INDUSTRIALIZATION OF THE OPAQUE ARCHITECTURAL FREE-FORM ENVELOPE: NEW ALTERNATIVE OF GRC MOLDLESS PANELS

ESTÉFANA CASTAÑEDA VERGARA
Architect

Directed by:
BENITO LAURET AGUIRREGABIRIA
Ph.D. Architect

2017

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA
ARQUITECTÓNICAS

**INDUSTRIALIZACIÓN DE
LA ENVOLVENTE OPACA
ARQUITECTÓNICA DE
FORMA LIBRE:
NUEVA ALTERNATIVA DE
PANELES DE GRC
SIN MOLDE**

ESTÉFANA CASTAÑEDA VERGARA

Arquitecta por el
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Dirigida por:

BENITO LAURET AGUIRREGABIRIA

Dr. Arquitecto por la Universidad Politécnica de Madrid

2017

POLITÉCNICA

Tribunal nombrado por el Magnífico y Excelentísimo Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día.....de..... de 20.....

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Suplente:.....

Suplente:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día.....de..... de 2017
en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

Calificación:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Resumen.	IX
Abstract.	XI
Nomenclatura.	XIII
Agradecimientos.	XVII
1. INTRODUCCIÓN.	1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.	
2.1 Justificación.	9
2.2 Objetivos.	11
2.2.1 Objetivo General.	11
2.2.2 Objetivos Particulares.	11
2.3 Hipótesis.	12
3. ESTADO DE LA TÉCNICA Y DE LA INVESTIGACIÓN.	
3.1 Antecedentes.	17
3.2 Estado de la Técnica.	26
3.2.1 Herramientas digitales, geometría y optimización.	27
3.2.2 Sistemas de fabricación.	42
3.2.2.1 Procesos sustractivos.	44
3.2.2.2 Procesos por conformado.	48
3.2.2.3 Procesos aditivos.	51
3.2.2.4 Procesos heterogéneos.	61
3.3 Estado de la Investigación.	
3.3.1 Publicaciones científicas indexadas en el JCR.	67
3.3.2 Publicaciones científicas no indexadas en el JCR.	74
3.3.3 Centros de investigación, desarrollo e innovación.	77
3.3.4 Tesis doctorales.	79
3.3.5 Libros y comunicaciones a congresos.	81
3.3.6 Páginas web.	87
3.4 Conclusiones del Estado de la Técnica y de la Investigación.	91
3.4.1 Propuesta del sistema alternativo.	94
4. MATERIALES Y MÉTODOS.	
4.1 Condiciones previas.	99
4.2 Metodología de Investigación Documental.	103
4.3 Metodología de Investigación Experimental.	105
4.3.1 Procedimiento de actuación.	105
4.3.2 Herramientas informáticas utilizadas para la generación de las pruebas experimentales.	106
4.3.3 Materiales utilizados en la fabricación de las pruebas experimentales.	108
4.3.4 Tecnología aplicada para la fabricación de las pruebas experimentales.	108
4.3.5 Pruebas experimentales de fabricación del nuevo sistema.	110
4.3.6 Prueba experimental de panel a flexión	116

	como base para la Metodología de Investigación por Simulación.	
4.4	Metodología de Investigación por Simulación.	120
4.4.1	Herramientas informáticas utilizadas para la generación de las pruebas por simulación.	120
4.4.2	Definición del modelo y consideraciones preliminares.	121
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	
5.1.	Resultados del Estado de la Técnica y de la Investigación debido a la aplicación de la Metodología Documental.	127
5.1.1	Análisis de programas informáticos para la fabricación de paneles de forma libre mediante el nuevo sistema.	128
5.1.2	Análisis de la impresión 3D de mediana escala.	131
5.2.	Análisis de los resultados de las pruebas experimentales.	135
5.3.	Análisis de los resultados de la investigación por simulación por flexión.	153
5.4.	Análisis y definición del sistema como resultado de la Metodología Experimental.	157
5.5.	Validación del sistema según normativa.	165
5.5.1.	Seguridad estructural (SE).	169
5.5.2.	Seguridad en caso de incendio (SI).	170
5.5.3.	Higiene, salud y protección del medio ambiente (HS).	172
5.5.4.	Seguridad de utilización y accesibilidad (SUA).	174
5.5.5.	Protección frente al ruido (HR).	174
5.5.6.	Ahorro de energía y aislamiento térmico (HE).	175
5.5.7.	Durabilidad.	175
5.5.8.	Identificación de los componentes.	177
5.6.	Análisis económico.	179
6.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.	
6.1	Conclusiones.	183
6.2	Líneas futuras de investigación.	186
7.	ACTIVIDADES DE DIFUSIÓN.	
7.1	Artículos científicos en revistas especializadas.	191
7.2	Comunicaciones a congresos.	191
7.3	Proyectos de investigación y desarrollo, y talleres internacionales.	192
7.4	Patentes.	193
8.	BIBLIOGRAFÍA.	197
9.	LISTA DE FIGURAS Y DE TABLAS.	215
10.	ANEXOS.	
Anexo 1.	Producción científica.	
A1.1	Artículo " <i>Free-form architectural envelopes: digital processes opportunities of industrial production at a reasonable price</i> ".	231

A1.2	Artículo " <i>Free-Form Architectural Façade Panels: An Overview of Available Mass-Production Methods for Free-Form External envelopes</i> ".	244
A1.3	Patente "Panel reforzado para cerramientos opacos en construcciones".	250
A1.4	Poster " <i>Manufacturing digital processes for free-form facade panels</i> ".	252
A1.5	Certificado de participación y certificado como ganadora del primer lugar del concurso del " <i>Adaptive Facade Systems</i> ".	253
Anexo 2.	Tablas de Procesos Digitales.	
A2.1.	Tabla comparativa de los procesos de Manufactura Aditiva de acuerdo al artículo de Wu, Wang, & Wang, 2016.	257
A2.2.	Tabla comparativa de los procesos sustractivos según Hauschild & Karzel, 2011.	258
A2.3.	Tabla comparativa de los procesos aditivos según Hauschild & Karzel, 2011.	259
A2.4.	Tabla comparativa de los procesos por conformado según Hauschild & Karzel, 2011.	260
A2.5.	Procesos existentes relacionado con la manufactura aditiva en la construcción, de acuerdo a Lim et al., 2012.	261
Anexo 3.	Sistema DRACE para cerramientos de fachada con paneles prefabricados de GRC.	265
Anexo 4.	Materiales y Tecnología.	
A4.1.	Propiedades del filamento de ABS.	287
A4.2	Propiedades del filamento de PLA.	288
A4.3.	Propiedades del GRC.	291
A4.4.	Propiedades mortero Beisser.	300
A4.5.	Propiedades pintura plástica.	302
A4.6.	Propiedades pintura metalizada.	304
A4.7.	Ficha técnica Cement Design.	307
A4.8	Impresora Prusa i2.	308
A4.9.	Impresora M3 de Moebyus.	314
A4.10.	Impresora Witbox.	317
A4.11.	Mallas de refuerzo de fibra de vidrio.	318
Anexo 5.	Cálculos y características de fabricación.	
A5.1	Propiedades de impresión en la M3.	323

En la presente tesis se desarrolla la viabilidad de la industrialización de la envolvente opaca arquitectónica de forma libre mediante la utilización de paneles de GRC sin molde. Debido a que la automatización, la digitalización y los procesos controlados numéricamente por ordenador están cambiando la forma en la que diseñamos, proyectamos y construimos los edificios, estamos cada vez más cerca de conseguir dar solución a las demandas actuales de las envolventes de formas sinuosas a precios asequibles y de manera universal.

Las nuevas tecnologías posibilitan afrontar la fabricación de retos formales como el Guggenheim de Bilbao, el Museo de Graz, o las estaciones del funicular de Innsbruck, con técnicas digitales como las de sustracción, conformado y adición, ya que son métodos fiables que han sido utilizados durante varias décadas por industrias como la automovilística, la naviera y la de aviación. Casos concretos de fachadas de formas complejas han sido solucionados mediante dichas tecnologías.

Este trabajo se centra especialmente en la búsqueda de un método que permita crear paneles sin molde, de una forma eficaz y económica. Concretamente, mediante la Impresión 3D de Fabricación de Filamento Fundido (FFF), y la incorporación del GRC (*Glass-fiber Reinforced Concrete*). Se expone un nuevo sistema constructivo, el cual se evalúa mediante una metodología experimental y de simulación estructural para verificar su posible desarrollo industrial y su incorporación a la industria de la construcción.

La tesis se divide en nueve capítulos. En los dos primeros capítulos se recogen la introducción, la hipótesis y los objetivos que se establecen para desarrollar este trabajo de investigación. En el capítulo tres, se exponen primeramente los antecedentes de la construcción de elementos de forma libre en la arquitectura, iniciando en las primeras décadas del siglo XX, hasta llegar a la actualidad. Posteriormente, en el estado de la técnica se desarrollan los programas informáticos, los elementos geométricos que permiten la creación de las formas complejas, así como la forma de optimización utilizada para racionalizar las envolventes arquitectónicas de una manera conveniente para su posterior fabricación. Después, se realiza una explicación detallada de todos los sistemas de fabricación existentes, sobre todo de aquellos que ya están activos industrialmente y que tienen cierta relevancia para ser aplicados dentro del sector de la construcción, como es el caso de los procesos sustractivos, de conformado, aditivos, entre otros.

También en el capítulo tres se detalla el Estado de la Investigación, en la cual se hace un análisis pormenorizado de las publicaciones científicas, los centros de investigación, desarrollo e innovación, las tesis doctorales, los libros y las comunicaciones a congresos, así como las páginas web, que permiten apreciar lo que se ha hecho hasta el momento, relacionados con el tema en cuestión. Como último punto de este capítulo, se recopilan las conclusiones del estado de la técnica y de la investigación y, se propone de una manera conceptual, un nuevo sistema de fabricación de paneles de forma libre sin molde mediante la generación de una malla tridimensional impresa por Fabricación de Filamento Fundido, la cual le aporta la forma, para posteriormente ser reforzada por una capa de GRC. Esta nueva propuesta surge del análisis profundo del estado de arte y de la investigación, basada en la necesidad real de dar solución

a la creación de paneles de forma libre, con medios al alcance de todos.

En el capítulo cuarto, se presentan los materiales y métodos aplicados para dar valor a la hipótesis planteada, los cuales se desglosan en tres partes. La primera es una metodología documental, en la cual se muestra la sistemática con la cual se ha realizado la búsqueda de información para conformar la base documental de este trabajo y, la justificación del porqué se ha buscado dicha documentación. La segunda, desarrolla toda la metodología experimental, en la cual se presenta el trabajo realizado con diversos ensayos y pruebas, así como la forma en que se pretende fabricar un prototipo a escala real, con el cual se busca el acercamiento al método de fabricación del nuevo sistema. En esta misma sección se elabora un ensayo a flexión de un panel tipo, el cual aporta los datos de elasticidad y deformación con pruebas no destructivas, que sirven de base para el análisis mediante simulación. Finalmente, en este capítulo se lleva a cabo una metodología de investigación por simulación, la cual consiste en la exploración mediante modelos tridimensionales realizados en un programa por elementos finitos (FEM) para observar el comportamiento de un modelo similar al panel deformado en laboratorio, dentro de un ámbito digital, realizando unas pruebas a flexión para ver el comportamiento del panel y de sus elementos, especialmente para analizar la participación mecánica de la malla termoplástica.

En el capítulo quinto se discuten los resultados de las metodologías aplicadas. En el caso de la documental, se resaltan los puntos más importantes del estado de la técnica y de la investigación. En la metodología experimental se exponen los resultados de las pruebas de laboratorio, así como el conocimiento aportado gracias a dichos experimentos. En cuanto a la metodología de simulación, se presentan los gráficos resultantes después de aplicar los datos de la prueba a flexión en laboratorio en el programa FEM, así como una serie de pruebas alternativas respecto al grosor de la capa del GRC para analizar también la participación de la malla termoplástica. Se explican de una manera detallada los resultados específicos del prototipo a escala real y se realiza una descripción pormenorizada del proceso industrial que debería seguir el nuevo proceso de paneles de forma libre de GRC sin molde, con los pros y contras del momento actual de la investigación.

Las conclusiones se especifican en el capítulo sexto, en el cual se exponen las ideas y propuestas finales a las que se ha llegado después de realizar toda la investigación, para finalmente demostrar si es viable o no la industrialización de los paneles de forma libre de GRC sin molde, así como aquellas líneas futuras de investigación que pueden llevarse a cabo a partir de este documento.

En el capítulo siete se describen las actividades que se han llevado a cabo durante la realización de la tesis para difundir la presente investigación, que constan de varios artículos publicados en revistas científicas indexadas, así como comunicaciones a congresos Internacionales, una patente y varios proyectos de investigación que están en marcha. En el capítulo ocho se detalla la bibliografía utilizada y en el nueve, la lista de figuras y tablas utilizadas durante todo el documento. En el décimo, se muestran los documentos anexos para aquellos temas en los que he querido incidir y detallar más a fondo sin enturbiar la tesis.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to research on the viability of industrialising opaque free-form architectural envelopes by using no-mould GRC panels. Because the automation, digitalisation and computer numerically controlled processes are changing the way we design, plan and build buildings, we are getting increasingly closer to solving the current demands for envelopes with sinuous shapes affordably and universally.

New technologies make possible tackling approaching the manufacture of formal challenges such as the Guggenheim Museum in Bilbao, the Kunsthaus in Graz, or the funicular stations in Innsbruck, with digital techniques such as subtractive, forming and additive processes. These are reliable methods that have been used for several decades by the automotive, shipbuilding and aviation industries. Specific cases of façades with complex shapes have been solved with such technologies.

The present work is particularly focused on finding a method that makes possible the production of no-mould panels effectively and affordably. Specifically, through the Fused Filament Fabrication (FFF) 3D printing process, and the incorporation of GRC (Glass-fiber Reinforced Concrete). It exposes a new construction system, assessed by an experimental methodology and structural simulation analysis in order to verify its possible industrial development and its incorporation to the building sector.

The thesis is divided into 9 chapters. The first two chapters include the introduction, hypothesis and objectives initially established to develop this research work. Chapter three breaks down the background of the construction of free-form architectural elements, from the first decades of the 20th century until now. Subsequently, the state of the art expands on computer software, the geometric elements enabling the creation of complex shapes, as well as the optimisation way used to rationalise architectural envelopes conveniently so as to their later manufacturing. Next, all the existing manufacturing systems are explained in detail, especially those already active industrially that are relevant to the construction sector, such as subtractive, forming and additive processes, among others.

Chapter three also enlarges upon the theoretical framework, analysing in detail the scientific publications, R&D&I centres, doctoral theses, books and papers, as well as websites, enabling the assessment of everything that has been done up until now regarding the subject in question. The last point of this chapter compiles the conclusions of the state of the art and the theoretical framework and proposes, conceptually, a new system for manufacturing no-mould free-form panels by generating a three-dimensional mesh printed with Fused Filament Fabrication, which gives the shape, and is later reinforced with a layer of GRC. This new proposal issues from a comprehensive analysis of the State of the Art and the theoretical framework, based on the actual need of solving the production of free-form panels by means accessible to all.

Chapter four introduces the materials and methods applied to validate the hypothesis formulated, separated in three parts. The first

one is a documentary method which shows the systematics used to search the information that makes up the documentary base of this work, as well as the justification for the aforementioned documentation. The second one develops the experimental methodology which presents the work carried out with several essays and tests, as well as how to build a full-size prototype with which to approach the manufacturing method of the new system. This same section develops a bending test for a model panel, which provides the elasticity and deformation data with non-destructive testing on which the simulation analysis is based on. Finally, this chapter carries out a simulation-based research methodology, which consists in exploring by means of three-dimensional models created with a Fine Element Method (FEM) programme in order to observe the performance of a model similar to the panel deformed in the laboratory, within a digital environment, carrying out bending tests to note the performance of the panel and its elements, and particularly to analyse the mechanical contribution of the mesh.

Chapter five discusses the results of the applied methodologies. The documentary method highlights the main points of the state of the art and the theoretical framework. The experimental methodology shows the results of the laboratory essays, as well as the knowledge provided thanks to these experiments. The simulation-based methodology presents the graphs resulting from inputting the data of the laboratory's bending test into the FEM programme, as well as a series of alternative essays regarding the thickness of the GRC layer in order to analyse the contribution of the thermoplastic mesh. The specific results of the full-size prototype are explained in detail, and the industrial process that should follow the new process of no-mould free-form GRC panels is described comprehensively, with its pros and cons at the current research date.

Chapter six states the conclusions, explaining the ideas and final proposals reached after accomplish the research, to finally prove if industrialising no-mould free-form GRC panels is viable, as well as the prospective lines of research that could unfold based on this document.

Chapter seven describes the actions taken during the development of this thesis to spread the current research, including several articles published in indexed scientific journals, as well as papers in International Conferences, a patent and several research projects underway. Chapter eight details the bibliography and chapter nine lists all the figures and tables used in the document. Chapter ten shows the annexed documents for the subjects I wanted to highlight and detail in more depth without blurring the thesis.

	2D	Dos dimensiones.
	3D	Tres dimensiones.
A		
	ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno.
	AM	Manufactura aditiva (<i>Additive Manufacturing</i>).
	ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> .
B		
	BAAM	<i>Big Area Additive Manufacturing</i> .
	BLOB	Objeto Binario Grande (<i>Binary Large Object</i>).
C		
	CAD	Diseño Asistido por Ordenador (<i>Computer-Aided Design</i>).
	CAM	Fabricación Asistida por Ordenador (<i>Computer-Aided Manufacturing</i>).
	CATIA	Aplicación interactiva tridimensional asistida por Ordenador (<i>Computer Aided Three-dimensional Interactive Application</i>).
	CC	<i>Contour-Crafting</i> .
	CMM	Máquina de medición por Coordenadas (<i>Coordinate-measuring machine</i>).
	CNC	Control Numérico por Ordenador (<i>Computer Numerical Control</i>).
D		
	DDG	Discretización Diferencial de la Geometría,
	DMF	Fabricación directa por Metal (<i>Direct Metal Fabrication</i>).
E		
	EFTE	Encofrado neumático inicialmente flexible.
	EMP	<i>Experience Music Project en Seattle, EE.UU.</i>
	EPS	Espuma de Poliestireno Expandido (<i>Expanded Polystyrene</i>).
F		
	FDM	Modelado por Deposición Fundida (<i>Fused Deposition Modeling</i>) Denominación

	registrada por Stratasys®.
FF	Forma Libre (<i>Free-form</i>).
FFF	Fabricación por Filamento Fundido (<i>Fused Filament Fabrication</i>).
FRB	Curvado por Rollos Flexibles (<i>Flexible Roll Bending</i>) .
FRP	Polímero o plástico reforzado por fibras (<i>Fiber Reinforced Plastic</i>).

G

G-Code	Código G. Lenguaje de programación de máquinas controladas numéricamente por ordenador (CNC).
GE	Algoritmos Genéticos .
CIG	<i>Central Industry Group</i> .
GRC ó	Hormigón Reforzado por Fibra de Vidrio (<i>Glass-fiber Reinforced Concrete</i>).
GFRC	
GRP	Plástico Reforzado con Fibras de Vidrio (<i>Glass-Reinforced Plastic</i>).

H

HDPE	Polietileno de alta densidad.
------	-------------------------------

I

IAAC	Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña.
ICD	Instituto de Diseño Computacional.
IFR	<i>International Federation of Robotics</i> .
ISF	Conformado gradual de lámina (<i>Incremental Sheet Forming</i>) .
ITKE	Instituto de Estructuras de la Construcción y Diseño Estructural (Universidad de Stuttgart).

L

LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> .
-------	--

M

MIT	<i>Massachussets Institute of Technology</i> .
MPF	Conformado por Multipunto (<i>Multipoint Forming</i>).
MFSB	Conformado por Multipunto y Curvado por Estiramiento (<i>Multipoint Forming and Stretch Bending</i>).

N

NC	Control Numérico (<i>Numerical Control</i>).
----	--

P	NURBS	<i>Non-Uniform Rational B-Splines.</i>
	PA	Poliamida.
	PC	Patrones Circulares (<i>Packing Circles</i>).
	PC	Policarbonato.
	PLA	Ácido poli-láctico (<i>Polylactic acid</i>).
	PJM	<i>Poly-Jet Manufacturing</i> (Fabricación por Poly-Jet).
	PS	Poliestireno.
	PEEK	Polieteretercetona.
	PP	Polipropileno.
	PVA	Poli Vinil Alcohol.
S	SCC	Hormigón Autocompactante (<i>Self-consolidating concrete</i>).
	SLA	Estereolitografía (<i>Stereolithography</i>).
	SLM	Derretido Selectivo por Láser (<i>Selective Laser Melting</i>).
	SLS	Sinterizado Selectivo por Láser (<i>Selective Laser Sintering</i>).
	STL	Lenguaje Estándar de Teselado (<i>Standard Tessellation Language</i>).
U	UHPC	Hormigón de ultra-alto rendimiento (<i>Ultra High Performance Concrete</i>).
W	WASP	<i>World's Advanced Saving Project.</i>

AGRADECIMIENTOS

Gracias Miguel Ángel, José Miguel y Nicolás, por su inmensa paciencia y por la comprensión del tiempo que no he podido darles para centrarme en este nuevo proyecto de mi vida.

Gracias a mi madre, por inculcarme desde pequeña el interés por el estudio y la superación personal. Gracias a mis hermanos María y Nacho por su colaboración, su amor y su apoyo absoluto.

Gracias a mi tutor Benito Lauret, por brindarme su conocimiento para desarrollar esta tesis, por compartir su pasión por la investigación, y el cual es también responsable en gran medida de los logros y avances conseguidos en este trabajo.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México por la beca doctoral que me han otorgado, ya que me ha permitido centrarme en la investigación de esta tesis.

Gracias a las empresas españolas que han aportado su granito de arena para el desarrollo de este documento, especialmente a Roberto Ruiz Ponce de Prefabricados Ponce, a Francisco Díaz de Moebius Machines, a Carolina Valencia y Jorge Hernández de Cement Design. Y en México, agradezco a Laura Maribel Rico, a Belinda Ontiveros Cazares de Interiorismo Perfectible Descansabrazos, a Esther del Carmen Castro de TEYCO y a Agustín Cornejo Schtullmann de Proyecto in House. Y de manera especial a mi entrañable amiga Naomi Egami.

Gracias a mis compañeros de Doctorado, ya que compartimos muchas experiencias juntos, así como conocimiento y amistad. También quiero agradecer al personal de la ETSAM de la UPM que favorecieron la realización de este proyecto, especialmente a los colaboradores del taller de maquetas y de la administración del Departamento de Construcción.

Gracias a los miembros del Tribunal que participan de manera desinteresada, dando su tiempo y experiencia en esta investigación.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

En las últimas dos décadas, el mundo de la arquitectura se ha visto transformado radicalmente por la incorporación de la tecnología digital tanto en los estudios de diseño, como en la industria. Los avances en el Diseño Asistido por Ordenador (CAD), la Fabricación Asistida por Ordenador (CAM) y las tecnologías Controladas Numéricamente por Ordenador (CNC) han abierto una puerta a nuevas oportunidades que permiten la producción de formas complejas, que hasta hace muy poco tiempo fueron difíciles y costosas de realizar utilizando tecnologías tradicionales de la construcción (Kolarevic, 2005).

Así es como la arquitectura de doble curvatura o comúnmente denominada *free-form* (forma libre) surge como una nueva tendencia basada enteramente en lo digital, en las plataformas informáticas y en el modelado tridimensional. Grandes edificios icónicos de nuestros tiempos como el Guggenheim de Bilbao, las estaciones del Funicular de Innsbruck de Zaha Hadid, o el Museo de Arte de Graz, avalan que dicho estilo formal no es algo que se pueda ignorar, ya que juega un papel trascendental en la arquitectura contemporánea (Pottmann et al., 2008).

De esta manera, el avance en el diseño tridimensional ha sido fundamental para la creación y visualización de nuevas morfologías como nunca antes había sido posible. Los arquitectos de hoy día, nos hemos beneficiado de los programas informáticos, ya que nos aportan una libertad formal más amplia a la hora de diseñar (Hauschild & Karzel, 2011). Tales superficies de forma libre pueden ser diseñadas en el ordenador, sin límites geométricos, y con la versatilidad de realizar cambios en tiempo real. Así, el despiece y la modificación de parámetros de la envolvente resultan más sencillos con la incorporación de software especializado, que permiten crear formas mucho más precisas y eficientes en base a parámetros de dimensiones, confort, ahorro energético, acústico, estructural, etc.

Si bien es cierto, que mientras el modelado de formas libres con las herramientas informáticas actuales se comprende completamente, no obstante, la fabricación de dichos elementos a escala real es un reto, ya que no hay un equilibrio o correlación directa entre lo que se diseña y lo que se construye (Pottmann, Eigensatz, Vaxman, & Wallner, 2015). Esto se debe a que la tecnología constructiva tiene claras limitaciones ya que está regida por los principios de normalización, prefabricación y producción en masa (Sousa & Duarte, 2005), (Del Águila, 2006). Las tendencias formales de la arquitectura se están encaminando hacia la construcción de las formas libres, algo que parece inevitable, por lo que los arquitectos tenemos la responsabilidad de dar una solución técnica viable y una manera de enfocar desde la industria de la construcción la fabricación de elementos únicos.

Uno de los puntos más llamativos de los edificios de formas complejas, es el reto formal-funcional que supone la envolvente, ya que debe cumplir con la doble función tanto de fachada como de cubierta, pues el límite entre una y otra no está definido. La envolvente funciona como una piel, como parte de un sistema físico que interactúa entre el exterior, el interior y el propio cerramiento. Sirve como una capa de protección frente a las incle-

mencias medioambientales, permite que el edificio “respire” y sea iluminado; participa en la estabilidad estructural y posibilita la comunicación visual (Afify & Elghaffar, 2007). Tiene unos condicionantes de forma y prestaciones que la hacen especial a la hora de buscar las soluciones idóneas para todos los elementos que la constituyen.

El estado actual de la industria de la construcción desafortunadamente está décadas por detrás de otras industrias como la aeroespacial, la automovilística o la fabricación de barcos, ya que no parece haber cambiado demasiado (Kolarevic, 2001). Desde que los romanos inventaron el hormigón (100 a.C), se sigue utilizando hoy en día tales materiales primarios, y haciendo uso de la mano de obra en la mayoría de las fases de la construcción. Según Richard Buswell, “ *las tecnologías de la construcción están limitando la imaginación, de ahí que se frene la innovación; nuevos métodos de producción y ensamblaje, a menudo surgen de eliminar la mano de obra, en lugar de desarrollar nuevos y radicales procesos*” (Buswell, Soar, Gibb, & Thorpe, 2007) (Teicholz, 2013). Por lo tanto, para la producción de envolventes con formas libres o de doble curvatura, frecuentemente se recurre a las industrias más avanzadas tecnológicamente, ya que llevan implantando métodos digitales que pueden solucionar la fabricación de paneles curvos en dos direcciones.

Es cierto que existen profesionales en la construcción que pueden fabricar dichos paneles, pero generalmente lo realizan de manera artesanal, creando moldes o contra-moldes, pero al ser un trabajo manual, conlleva una dilatación en los plazos de entrega, falta de precisión en algunos casos y un alto coste asociado.

La fabricación de piezas con formas sinuosas es muy difícil de conseguir debido a que resulta muy cara, requieren de mucho tiempo en su planeación, diseño y construcción, así como de una mano de obra altamente calificada. Además, los paneles de doble curvatura con frecuencia tienen que ser fabricados como pieza única, lo que resulta que para cada elemento se necesita un molde único (Pronk, Rooy, & Schinkel, 2009).

Por lo tanto, es necesario encontrar una nueva propuesta constructiva que permita no sólo dar solución a la producción de los paneles de forma libre, sino que a su vez sea asequible económicamente. Es decir, que se amplíe la libertad formal mediante la universalización de un nuevo sistema de paneles de geometrías complejas.

Mediante esta premisa, se hace una revisión a una serie de tecnologías digitales que permitan acercarse al objetivo planteado. La Manufactura Aditiva (AM) o Impresión 3D, es un proceso muy novedoso y tiene muchas ventajas, como ser un proceso sin necesidad de herramientas adicionales, que puede producir elementos únicos y con una gran libertad formal, y cuya producción no se encarece si cada pieza producida es distinta de la anterior.

Para la creación de paneles de fachada se requieren de ma-

teriales que tengan unas características apropiadas, tanto por su moldeabilidad, su resistencia a elementos ambientales, ser autoportante, entre otros. Un material ya muy consolidado en la industria de la construcción denominado GRC (*Glass-Fiber Reinforced Concrete*), permite con pequeños grosores crear láminas muy esbeltas, con unas excelentes características prestacionales para la envolvente arquitectónica, y por lo tanto muy conveniente para la presente investigación, ya que al ser un material con base cementosa puede adaptarse a cualquier superficie.

Si se piensa en paneles de GRC de forma libre, automáticamente se topa con la necesidad obvia del molde, lo que traducido a una obra singular, podría reportar tantos moldes como paneles, ya que en muchos casos no hay dos piezas idénticas. Así es como nace una necesidad evidente, que es la de la eliminación del molde, ya que representa no sólo el encarecimiento de cada panel, sino la contribución de generar residuos que podrían evitarse.

Parece lógico pensar que con el paso del tiempo, la demanda cada vez más amplia sobre este tipo de arquitecturas y la reducción en los precios de las herramientas de producción y fabricación digital, las posibilidades industrializar dichas construcciones pueden estar más cerca (Domínguez, 2012).

La implementación de dos procesos ampliamente conocidos como la impresión 3D y la proyección de GRC, pueden aportar la creación de un nuevo sistema constructivo, que elimine el molde y de esta manera reducir los costes. Por lo que el objetivo de esta investigación es estudiar la viabilidad de un sistema alternativo para la creación de paneles de forma libre de GRC sin molde. En el siguiente capítulo se exponen tanto la justificación, como los objetivos e hipótesis que sustentan este trabajo.

Como comenta Carlo Aiello: "*¡Es una gran época para ser arquitecto! En ningún otro periodo de la historia de la humanidad se habían visto tanta rapidez en los avances del diseño arquitectónico y es fácil imaginar lo que podremos ver construido en pocas décadas gracias a la integración de los avances en el campo del diseño y de la industria*" (Aiello, 2014).

Capítulo 2

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Justificación

La necesidad de encontrar un sistema de paneles de forma libre a un precio razonable surge debido a que actualmente los altos costes de fabricación restringen su utilización a grandes obras emblemáticas o singulares, impidiendo su uso en otros edificios más comunes. Esto deriva en una limitación de su uso, que es contraria a las posibilidades actuales de generación de formas en el ordenador. Es decir, la universalización del diseño informático que permite la generación de formas libres, choca con la posibilidad de su fabricación material para los edificios a precios asequibles.

En esta época digital, los ordenadores pueden crear formas tridimensionales complejas de una manera fácil y eficaz, que hasta la aparición de las tecnologías CAD/CAM fue difícil concebir, desarrollar, representar y mucho menos fabricar (Kolarevic, 2005). En este contexto la producción de paneles de doble curvatura son posibles mediante procesos de manufactura controlados numéricamente por ordenador (CNC). No obstante, como se ha comentado anteriormente, el uso de estos paneles está restringido a obras singulares por sus altos presupuestos, e inviable en obras más modestas.

Michael Eigensatz (Eigensatz et al., 2010), habla de la necesidad de dar solución a la construcción de estos edificios de formas libres, sobre todo, creando medios de panelización y racionalización de los materiales para crear elementos constructivos de buena calidad a precios asequibles, lo que coincide con Kolarevic (Kolarevic, 2003) en la adopción de medios tecnológicos digitales para dar una solución apropiada a la fabricación de piezas complejas.

La fabricación de paneles de forma libre que ofrece la industria actual es frecuentemente mediante moldes, y su producción tiene un coste muy elevado. Como señala Luis Ruiz (Ruiz Velázquez, 2017), se puede optar por dos soluciones. La primera es realizar moldes más económicos y la segunda opción es la eliminación del molde. Para esta última, la impresión 3D es una posibilidad a tener en cuenta gracias al potencial en ahorro de material, rapidez de fabricación y la libertad formal que permite, así como la posibilidad de construir piezas únicas sin encarecer por ello el producto final.

Existen materiales como el GRC que tiene unas características muy versátiles y apropiadas en la generación de paneles de forma libre, pero la necesidad de molde encarece el producto y mucho más cuando las piezas son únicas. No obstante, el material al ser aplicado sobre cualquier superficie tiene la capacidad de adaptarse a la forma. Lo realmente interesante es comprobar que existen métodos o sistemas que se podrían aprovechar para solucionar este problema de encarecimiento por uso de moldes únicos.

Los procesos digitales que existen en la construcción actualmente, según Hauschild y Karzel (Hauschild & Karzel, 2011) se dividen en cuatro secciones, los procesos sustractivos, los de conforma-

ción, los aditivos y los heterogéneos. Gracias a estos métodos se han llevado a cabo varios proyectos de fabricación de paneles de forma libre mediante la eliminación del molde.

Actualmente existen varios centros de investigación, estudios de arquitectura, universidades, entre otros, que están interesados en conseguir un método eficaz de producción de elementos de geometrías complejas para la construcción arquitectónica, a un precio competitivo.

La búsqueda por parte de arquitectos e ingenieros de métodos y sistemas que permitan desarrollar superficies de doble curvatura ha sido y será una constante de investigación muy interesante en el que ahora, quizás la mayor de las barreras, sea la económica. Las nuevas exploraciones se centran, además de encontrar nuevos materiales, sistemas híbridos, patentes etc., en racionalizar e industrializar soluciones que reduzcan los altísimos costes de producción.

El presente trabajo pretende hacer hincapié en las nuevas construcciones de formas geométricas complejas, de las cuales se han hecho eco muchos arquitectos, algunos galardonados con el Pritzker (Zaha Hadid, Frank O, Gehry, Toyo Ito, etc.), y en la necesidad de abordar el hueco existente en la industria de la construcción para dar una solución alternativa a la producción de paneles de forma libre para la envolvente arquitectónica, mediante un sistema de paneles de GRC sin molde. Tras el estudio y la comparación entre los resultados obtenidos, se puede evidenciar que mediante la utilización de procesos digitales y métodos constructivos simples se puede llegar a conseguir ejemplos a considerar como una solución a la tesis planteada.

Hasta ahora, los sistemas arquitectónicos habituales no han sido capaces de hacer frente a las envolventes arquitectónicas de forma libre a precios razonables, por lo que se necesita un nuevo enfoque para darle una solución viable. Por lo que lo más acertado sería industrializar la envolvente de formas complejas mediante un sistema alternativo sin molde.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general.

La presente tesis doctoral tiene su origen en la necesidad de definir, desarrollar y comprobar un sistema que permita elaborar elementos de forma libre de fachada a precios razonables.

Es posible un sistema alternativo de fabricación y puesta en obra de paneles de GRC, que facilite la industrialización de envolventes arquitectónicas opacas de forma libre sin molde.

Mientras que existen ejemplos de técnicas constructivas que permiten la realización de formas libres por medios artesanales (escultura, moldeado, encofrados, enfoscados y estucados manuales), así como por sistemas industriales adecuados a las grandes series de la automoción, la aviación o la náutica, parece no haber aún una alternativa razonable en el campo de la construcción. Hasta ahora el desarrollo y la fabricación de envolventes de doble curvatura o forma libre, están proyectados sobre una base de exclusividad y grandes presupuestos. Así como la dependencia del molde para este tipo de piezas, con el inconveniente del encarecimiento en el caso de elementos únicos, que en una envolvente singular, muy comúnmente todas las piezas lo son.

El creciente interés de los arquitectos por la liberación formal, las nuevas posibilidades de los programas de diseño y las perspectivas de desarrollo a corto plazo de las herramientas de control numérico justifican esta investigación.

2.2.2 Objetivos particulares.

Como consecuencia del análisis del estado del arte y de la investigación del tema de la presente tesis, presento los objetivos particulares para dar cumplimiento al objetivo principal.

- Se pretende identificar los programas informáticos que pueden ser integrados en el proceso de fabricación de paneles de forma libre de GRC sin molde para envolventes opacas.
- Para justificar la necesidad de un nuevo sistema, se debe llevar a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva respecto a las tecnologías y procesos que existen sobre la producción de paneles de forma libre en general, para de esta manera tener un marco documental sobre el cual basar el cumplimiento del objetivo principal.
- La definición amplia del nuevo sistema de fabricación de paneles de GRC de forma libre sin molde, en el cual se plantearán los puntos de partida, las características requeridas, el estudio de viabilidad técnica y las bases técnicas de producción industrial.
- Para cerciorarse de que la impresión 3D es un método adecuado para realizar un panel como el citado, oficiando como encofrado perdido de forma libre, se deberá analizar

dicho proceso digital de tal manera, que se ponga de manifiesto la viabilidad técnica de imprimir una malla a escala real.

- La aptitud del nuevo método se puede analizar mediante el diseño y la realización de pruebas experimentales, ya que con ellas se deben definir las características básicas y convenientes para la fabricación de paneles de forma libre de GRC sin molde.
- Como resultado de las pruebas físicas y del análisis de programas informáticos, se deberá, diseñar y fabricar un prototipo de un panel de forma libre a escala real. Con los medios técnicos de la ETSAM y de algunas empresas privadas, se puede llevar a cabo el diseño y la producción del panel para evaluar posibles disfunciones o inconvenientes y modificarlos de cara a su producción industrial.
- Una vez realizado el prototipo a escala real, se describirá el proceso de creación, desde la fase de diseño hasta los acabados, para hacer una extrapolación a un elemento real de fachada.
- De manera subordinada a la prueba de simulación, se deberá realizar una prueba de elasticidad a un panel con GRC sin molde para que se puedan extraer las deformaciones generadas mediante una serie de cargas.
- Con datos obtenidos en laboratorio se deberán llevar a un programa de elementos finitos (FEM), en el cual se pueda estudiar su comportamiento mecánico-elástico, tanto del GRC como de la malla termoplástica.
- Dentro de la normativa española y europea, se deberá analizar el cumplimiento del nuevo método, o establecer el marco normativo que le afecta.
- Proponer nuevas mejoras en la fabricación de paneles de forma libre de GRC sin molde, basados en una evolución futura razonable.
- Analizar la viabilidad económica del proceso para la fabricación del panel de doble curvatura propuesto. Cuantificar las horas de ejecución mediante máquinas CNC, así como la mano de obra.
- Llevar a cabo actividades de difusión del presente trabajo, como comunicaciones a congresos, publicación en revistas científicas, así como la posibilidad de explotar comercialmente el prototipo mediante una patente de invención.

2.3 Hipótesis

Es posible un sistema alternativo de fabricación y puesta en obra de paneles de GRC, que facilite la industrialización de envolventes arquitectónicas opacas de forma libre sin molde.

Capítulo 3

ESTADO DE LA TÉCNICA Y DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Antecedentes

Fig. 1. La Esfinge de Giza. Egipto.

Fig. 2. Restaurante "los Manantiales", México. Félix Candela. 1958.

Fig. 3. Centro de Vuelos TWA, Nueva York. Eero Saarinen. 1962.

Fig. 4. Casa Milá, "La Pedrera" Antonio Gaudí. 1912.

Las geometrías complejas o de forma libre fueron utilizadas en la arquitectura desde los primeros refugios-cobertizos construidos de madera y mimbre, como los descubiertos cerca de Niza, hace 400.000 años. Con el tiempo fue evolucionando la producción de dichas formas, como la Esfinge de Giza (Fig. 1) (2600 a.C), el Templo de Abu Simbel (1265 a.C), las viviendas Tongkonan de Indonesia, la escultura del David de Miguel Ángel (1504 d.C), etc., que se ejecutaron mediante herramientas manuales sencillas, pero sobre todo con un gran trabajo artesanal y escultural de por medio.

El arribo de la revolución industrial, aportó a la arquitectura nuevos materiales como el acero y el hormigón, y con ellos nuevas técnicas constructivas, dando paso a tendencias arquitectónicas innovadoras (Pottmann, Eigensatz, Vaxman, & Wallner, 2015). Gracias a la aparición del hormigón armado, a principios del siglo XX, varios diseñadores, arquitectos e ingenieros pudieron realizar edificaciones singulares de geometrías complejas, retando a los límites de la gravedad, gracias a que este nuevo material lo permitía por su maleabilidad y plasticidad.

Algunas de las obras de forma libre de hormigón más relevantes de principios del siglo pasado, son las desarrolladas por Pier Luigi Nervi (uso del ferrocemento); las estructuras laminares de borde libre (paraboloides hiperbólicos) de Félix Candela (Fig. 2), las superficies curvas de Heinz Isler; la ópera de Sidney de Jørn Utzon; el Centro de Vuelos TWA de Eero Saarinen (Ford, 1996) (Fig. 3); así como las obras de Maillart, o Freyssinet (Melaragno, 1991). Estas estructuras laminares tuvieron gran aceptación por su peculiaridad formal y por la capacidad de cubrir grandes luces con un espesor mínimo. Sin embargo, estas superficies de cáscara de hormigón fueron posibles gracias a que la mano de obra especializada en esas fechas aún era muy barata.

En España, caben destacar las obras de Eduardo Torroja y de Antoni Gaudí (Fig. 4). Sobre todo de este último, por el uso de formas complejas mediante geometrías regladas (paraboloide hiperbólico, hiperboloide, helicoide y conoide) y curvas catenarias. Utilizando para sus análisis estructurales y creación de catenarias, cuerdas, cadenas y pesas (Penttilä, 2006)

Las formas libres, también denominadas de doble curvatura, "free-form" o biomórficas no son algo nuevo, ya que como bien indica Rafael Moneo, *"son geometrías olvidadas debido a la dificultad de su representación"*. En la primera mitad del siglo XX existieron una gran cantidad de ejemplos del expresionismo modernista mediante elementos curvos como la Torre Einstein o Einsteinurm (1921) de E. Mendelsohn en Postdam, Alemania; la Capilla de Ronchamp, diseñada por Le Corbusier (1955), o el Pabellón finlandés de Alvar Aalto para la Exposición Universal de 1939 en Nueva York. Así como también la "Dymaxion House" (1927) de B. Fuller, que a pesar de contar con paneles metálicos curvos, su producción era completamente artesanal.

Cambiando de hemisferio, en América del Sur, concretamente, en Uruguay, el ingeniero Eladio Dieste a mediados del siglo XX comenzó a diseñar finas láminas de doble curvatura con ladrillo, armaduras de acero y hormigón (Fig. 5). Este sistema permitía industrializar una parte del método de fabricación, dando un paso adelante en la mecanización del sistema, pero en el cual era muy necesaria la mano de obra especializada (Anderson, 2004).

A finales de la década de los sesenta, las materias primas que se utilizaban para la creación de los cascarones de doble curvatura (acero, hormigón y madera) comenzaron a subir de precio en algunos países como México y Estados Unidos. En el caso del primero, se aunó la subida del salario mínimo, por lo que dejaron de ser rentables dichas construcciones y pasaron a convertirse en edificios artesanales a precios desorbitados.

A pesar de ello, se vivieron grandes ejemplos de experimentación con nuevos materiales durante la primera mitad del siglo XX, pero no fue hasta mediados de los años cincuenta que se comenzaron a ver paneles composite prefabricados con curvaturas. La "Casa del Futuro" (1957) (Fig. 6) de Richard Hamilton y Marvin Godoy (MIT), financiada por la empresa química Monsanto, es un ejemplo de la implementación de los composites en paneles con curvatura, ya que fue creada mediante paneles de poliéster reforzados con fibra de vidrio (GRP), los cuales eran autoportantes y de gran formato. El objetivo de esta vivienda era encontrar nuevos mercados para los productos plásticos, así como demostrar las posibilidades estructurales y formales en la construcción.

Como resultado de la euforia por el uso de los materiales compuestos, el arquitecto finlandés Matti Suuronen diseñó varias casas como la "Venturo House" y la "Futuro House" (Fig. 7) con paneles curvos de plástico reforzado con fibra de vidrio, con un aislante interior de poliuretano. La "Futuro House" fue diseñada como un elipsoide para garantizar su óptima durabilidad, y según el arquitecto, porque *"da una sensación de espacio, con el mínimo uso de materiales"* (Domus, 2011). Otro ejemplo de la utilización del plástico y la doble curvatura es la "Burbuja" de Jean Maneval, diseñada como casa de vacaciones. Éstas fueron fabricadas en serie, pero la producción se limitó únicamente a treinta ejemplares, ya que no tuvo gran repercusión comercial.

La gran revolución de los materiales dio a la arquitectura una nueva perspectiva respecto a sus fronteras formales y técnicas, así como nuevas apariencias suaves, lisas y de colorido brillante, con ondulaciones y bordes curvos en dos direcciones (Strike, 2004), una antítesis total al aspecto natural de los materiales preindustriales de origen mineral.

Estos ejemplos de viviendas producidas en plástico, tuvieron poca repercusión, aunque algunas se lograron comercializar, pero no tuvieron el éxito que se esperaba debido a una prefabricación poco industrializada, el riesgo de la combustibilidad del material y a los altos costes. No obstante, se demostró el avance realizado mediante la implementación de nuevos materiales en la construcción, aunque la industria no estaba preparada para

Fig. 5. Iglesia del Cristo Obrero, Estación Atlántida, Uruguay. Eladio Dieste. 1952.

Fig. 6. Casa Monsanto, Los Ángeles, California. 1957.

Fig. 7. Futuro House, Idyllwild, California. 1968.

ello.

Los progresos no sólo se registraron en la búsqueda de nuevos materiales, sino también en automatizar la manera en la que se producían los objetos. En la década de los años cuarenta del siglo pasado, un equipo de investigación del MIT, liderado por Jonh Parson y la empresa de armamento estadounidense Lockheed, desarrollaron una fresadora operada por Control Numérico (NC siglas de *Numerical Control*), la cual funcionaba con tarjetas perforadas, realizando un trabajo determinado repetidamente. En un principio no se utilizaron los ordenadores como generadores de información (MIT, 2013), ya que no fue sino hasta los años sesenta, con la aparición del CAD y del G-Code (lenguaje del NC) (Fig. 8) incorporados en los micro-ordenadores, que dan un nuevo empuje a la tecnología NC para su desarrollo comercial, convirtiéndola en Control Numérico por Ordenador (CNC, *Computer Numerical Control*) (Fehring, 1980) .

Fig. 8. Máquina CNC denominada Milwaukee-Matic II, comercializada por la Empresa Kearney & Trecker, 1959.

La tecnología de la información y la comunicación han transformado el mundo, y un gran porcentaje de las actividades humanas están controladas hoy día por los ordenadores. La arquitectura no es una excepción, y su éxito está basado principalmente en el aprovechamiento de las herramientas del Diseño Asistido por Ordenador (CAD). Las oficinas técnicas han pasado de los planos en papel, a dibujos informatizados en dos dimensiones (2D) y luego en tres dimensiones (3D).

En la actualidad, la facilidad que existe para generar con el ordenador cualquier tipo de forma, ha potenciado la creación de diseños extravagantes y llenos de superficies complejas, que a su vez han creado una nueva tendencia formal, ya que lo que anteriormente era difícil de representar, ahora mediante un programa informático se puede desarrollar con gran facilidad y precisión.

A este nuevo estilo formal se han unido grandes arquitectos de renombre, que plantean formas y diseños anárquicos, centrados en la forma libre. Debido a esta fascinación por las superficies sinuosas, se han creado edificios icónicos, con los cuales nos deleitamos gracias a sus formas complejas, sistemas y materiales constructivos innovadores, que nos abren la mente a nuevas posibilidades, a no tener miedo a los límites, a creer que se pueden romper las barreras de lo conocido.

Las formas de doble curvatura, "*blobby*" o "*blob*" (*Binary Large Object*) (Kolarevic, 2001), muy utilizadas en estas últimas décadas, nos plantean la necesidad de buscar más de cerca e involucrarnos en la manera en la cual se pueden construir dichas formas tan complejas. El hecho de que las formas complejas se resuelvan mediante curvas y superficies NURBS (*Non-uniform Rational B-Splines*), y sean por tanto, digitalmente posibles, también significa que su construcción puede alcanzarse por medio de procesos CNC (Kolarevic, 2005). Como bien apunta Branko Kolarevic: "*la "Era Digital" ha reconfigurado drásticamente la relación entre el diseño y la fabricación, creando una nueva línea entre lo que puede ser concebido y lo que puede ser construido. Los edificios ya no sólo son diseñados digitalmente sino que*

también pueden ser producidos digitalmente, el denominado "file-to-factory" (Kolarevic, 2003), transfiriendo la información del dibujo CAD directamente a las máquinas controladas numéricamente por ordenador (CNC). De esta manera se hace factible la producción y construcción de formas complejas, que hasta hace muy poco tiempo fueron difíciles y costosos de diseñar, fabricar y ensamblar, utilizando las tecnologías de la construcción tradicional.

A pesar de que la industria de la construcción se ha ido transformando de manera significativa durante los últimos cien años, "los cambios no se han hecho con rapidez y de buen agrado, ya que existe una especie de reticencia a aceptar las innovaciones en la construcción" (Strike, 2004), lo cual se puede ver claramente en nuestro quehacer diario como arquitectos. En este contexto, los arquitectos buscaron ayuda tecnológica dentro de otros campos relacionados con el diseño para dar solución a la fabricación de elementos de formas libres. Algunas respuestas vinieron de la industria de la automoción, de la aeroespacial y de la construcción de barcos, en las cuales hacen uso del CAD/CAM desde hace varias décadas, para fabricar componentes complejos desde la perspectiva tridimensional. Esta exploración reveló una amplia gama de métodos CNC disponibles, con capacidad para trabajar en distintos materiales y formatos (Sousa & Duarte, 2005).

Un ejemplo de la aplicación de otras industrias en la construcción arquitectónica, es la estructura-envolvente del Centro de Prensa NatWest (premio RIBA Stirling en 1999) del campo de cricket de los Lords, en Londres (Fig. 9a y 9b), que fue fabricado por la empresa CIG en los Astilleros Pendennis del Reino Unido, utilizando la tecnología y procesos habituales para la producción de barcos.

Actualmente, muchos de los elementos de la construcción como ladrillos, baldosas o paneles de hormigón son fabricados industrialmente, pero la automatización se queda ahí, ya que la mano de obra domina claramente el resto de procesos de la industria. La razón para esto es obvia, los edificios no son productos industriales en masa, sino piezas únicas que son transformadas de acuerdo a las preferencias de los agentes que intervienen en el proceso constructivo. Añadido a esto, la prefabricación de elementos de grandes dimensiones está condicionada por el transporte, de ahí que se prefiera realizar manualmente in-situ (Dagneshgari & Moore, 2013) o en espacios acondicionados para tales dimensiones, como es el caso de los astilleros.

De esta manera se busca subdividir los grandes elementos en piezas más pequeñas, fácilmente transportables y apilables. En el caso de las envolventes de doble curvatura, la utilización de paneles es la opción viable para crear dichas superficies, sin tener que recurrir a un gran casco que traería problemas de producción, transporte, altos costes, etc.

La mayoría de estos paneles de forma libre se producen utilizando moldes, lo que a menudo domina el costo del panel (Eigensatz et al., 2010) (Fig. 10). Según Ghang Lee, los paneles con

Fig. 9. Centro de Prensa del Campo de críquet, de los Lords. a. Montaje temporal del casco de aluminio en astilleros Pendennis. b. Construcción terminada. Londres. Future Systems. 1999.

Fig. 10. Proyectos donde se utilizaron moldes únicos para construir cada panel. a. Kunsthaus Graz, Peter Cook y Colin Fournier. 2003. b. Hungerburg Station, Innsbruck. Zaha Hadid. 2007.

Fig. 11. Desarrollo de la envolvente mediante la segmentación en paneles del Centro Cultural Heydar Aliyev, Baku, Zaha Hadid. 2012.

curvatura grado E, los cuales son más difíciles de fabricar, tienen un precio veinte veces mayor que un panel plano (Lee & Kim, 2012). No obstante, existen sistemas industrializados con apoyo de ordenadores (CAM), aplicados en otros sectores productivos que reducen el precio final gracias a la eliminación del coste de la mano de obra.

Esto nos lleva a la situación actual, en la cual la arquitectura y los ordenadores ya no pueden coexistir separados. Existen una gran cantidad de herramientas digitales que permiten la generación de edificios desde las primeras etapas de diseño, modelizado, visualización en 3D, pasando por los análisis predictivos, de racionalización y de simulación (Fig. 11), así como también en la fabricación de elementos constructivos y en la coordinación de la construcción (Hauschild & Karzel, 2011).

Fig. 12. Escultura el "Pez" en el Paseo Marítimo de Barcelona. Frank O. Gehry. 1992.

Fig. 13. Dibujos del proyecto el "Pez" realizados en el software CATIA.

Uno de los primeros arquitectos que desarrollaron un proyecto completamente de manera digital es Frank Gehry, con el "Pez" en el Puerto de Barcelona (1992) (Fig. 12). En colaboración con su socio Jim Glymph, se dieron a la tarea de buscar una plataforma informática que les permitiera enfrentar el reto formal no solo para su representación y diseño, sino para su elaboración, ya que necesitaban asegurarse un alto grado de precisión en la fabricación y ensamblaje (Shelden, 2002). Finalmente encontraron un programa francés denominado CATIA (*Computer Aided Three-dimensionanl Interactive Application*) (Fig.13), que se había creado para el diseño y fabricación de aeronaves. Con esta base informática comenzaron a diseñar modelos digitales, realizar análisis estructurales y a obtener información fiable para enviar las piezas a máquinas CNC que pudieran leer dicha información.

En la década de los años 90 se comenzaron a diseñar varios proyectos mediante la utilización del CAD-CAM, demostrando las diversas aplicaciones de dichas herramientas y los nuevos procesos que se generaban en el diseño y la construcción. Pero la importancia radicó sobre todo, en la evolución del *know-how* de las técnicas de diseño y fabricación digital (Pérez de Lama Halcón, Olmo Bordallo, Sánchez-Laulhé Sánchez de Cos, & Gutiérrez de Rueda García, 2011).

Fig. 14. Pabellón BMW "The Bubble". Exhibición del Motor en Frankfurt. Bernhard Franken. 1999.

Al final de la década de los noventa, Bernhard Franken diseñó el pabellón temporal de la BMW denominado "The Bubble" (Fig. 14), que puso en evidencia la rápida incorporación de las tecnologías digitales y la posibilidad de utilizarlas. La forma de doble burbuja fue generada digitalmente usando el software *AliasWavefront* (Capone, 2011), simulando cómo se mezclan dos gotas de agua bajo la influencia de la gravedad (Franken, 2014). El resultado obtenido fue seccionado en planos horizontales y verticales, para obtener una malla con la cual poder trabajar tanto la envolvente como la estructura. Las costillas de aluminio fueron cortadas por una máquina CNC de plasma y para la fabricación de los moldes de EPS (Espuma de Poliestireno Expandido), se utilizó una fresadora CNC. Sobre dichos moldes se colocaron las planchas de Polimetacrilato, las cuales se curvaron gracias a un proceso de termoformado. Si bien este ejemplo muestra una envolvente transparente, me parece que vale la pena recono-

cer la metodología y procesos que se han utilizado para lograr la fabricación de los paneles de doble curvatura que fácilmente pueden ser extrapolados a la envolvente opaca.

Volviendo a otra obra de Frank Gehry, el *Experience Music Project* (EMP), o "*Black Box*" (Fig. 15) en Seattle, fue diseñado con la idea de homenajear la vida y trayectoria del guitarrista Jimi Hendrix. Es un edificio con una forma voluptuosamente ondulante, la cual simula una guitarra *Fender Stratocaster* deconstruida (Magnusson, 2001). Al igual que en muchas de las obras de este arquitecto, el proyecto fue ideado primeramente en maquetas (más de 100) para después trasladarlo al ordenador mediante escaneado láser (ingeniería inversa).

La gran envolvente está formada por 21,000 paneles de acero. Cada uno de los paneles tiene una forma y dimensiones únicas, y fueron fabricados mediante cortadoras CNC gracias a la información que se extrajo directamente del modelo digital (Kolarevic, 2003). La empresa Zahner Co., fue la encargada de realizar el trabajo de curvado y colocación de las planchas metálicas, con un proceso de conformado patentado (Zepps™) (Zahner Corporation & Predock, 2014). Cada panel fue fabricado con un código de barras, el cual contenía toda la información necesaria para saber el lugar exacto donde debía ser instalado. Con uso de equipos de topografía láser enlazados con el modelo digital del programa CATIA se posicionaron cada uno de los paneles en el lugar exacto, tal y como se hizo en el Guggenheim de Bilbao.

Otros edificios y arquitecturas han marcado un punto de referencia en la nueva tendencia "*Blob*" como el Museo de Arte de Graz (Fig. 16), edificio biomórfico diseñado por *Spacelab* (Peter Cook y Colin Fournier). Este Museo fue en su momento (2003) muy innovador por la precisión con la que se fabricaron 1500 paneles curvados de acrílico semitransparente (Plexiglas) para toda la envolvente. Gracias a la creación de moldes de poliestireno extruido mediante el uso una fresadora CNC (Bogner, Cook, & Fournier, 2004), se curvaron dichas láminas acrílicas con un proceso similar al utilizado en "*The Bubble*" de B. Franken.

El artista Anish Kapoor realizó para el *Millennium Park* de Chicago la escultura llamada "*Cloud Gate*" (coloquialmente conocida como "*The Bean*") (Fig.17). Este proyecto es muy relevante ya que por su tamaño y características constructivas podría ser comparable a una obra arquitectónica. Esta escultura consta de 168 paneles de acero inoxidable, de 10 mm de espesor. Dichas láminas fueron curvadas con una rueda inglesa tridimensional que se creó especialmente para este proyecto (Steele, 2008), bajo el amparo de un software de modelado 3D. Cada panel se comprobaba mediante un escáner robotizado, y se fueron uniendo todas las piezas mediante una soldadura interior para evitar imperfecciones al exterior. Finalmente se realizó un pulido muy minucioso para obtener ese extraordinario efecto espejo.

Dentro de la aportación de la tecnología digital en todos los procesos del proyecto arquitectónico y su construcción, se encuentra el proyecto del arquitecto Toyo Ito de la Ópera Metro-

Fig. 15. *Experience Music Project*. Seattle, EE.UU. Frank O. Gehry. 2001.

Fig. 16. Museo de Arte de Graz, Austria. P. Cook y C. Fournier. 2003. La fachada "BIX" (combinación de "Big" y "Pixels") se convierte en una pantalla multimedia de grandes proporciones gracias a 930 luminarias circulares, las cuales son controladas por ordenador.

Fig. 17. *Cloud Gate*, *Millennium Park*, Chicago. Anish Kapoor. 2006.

Fig. 18. Maqueta interior 1:10 fabricada gracias a una fresadora CNC. Proyecto de la Ópera Metropolitana de Taichung, Taiwan. Toyo Ito. 2004.

Fig. 19. Estación de Nordpark, Innsbruck. Zaha Hadid. 2007.

Fig. 20. Panel de vidrio en molde metálico, sobre una base de vidrio perdido. Se utiliza una hoja de vidrio como subestructura sobre tubos metálicos que dan la forma, haciendo que la segunda hoja se amolde perfectamente, sin ninguna imperfección debida a los apoyos.

Fig. 21 Casa realizada con planchas de aluminio en Venecia, California. Mario Romano. 2016.

Fig. 22. El primer edificio de oficinas impreso en 3D. Dubái. 2016.

politana de Taichung. El interés de este proyecto radica en la utilización de soportes informatizados, desde la traslación de los bosquejos iniciales al ordenador, la creación de maquetas mediante CNC (Fig. 18), el uso de programas de racionalización y soporte de las estructuras, las simulaciones acústicas, lumínicas, etc. (Hauschild & Karzel, 2011). Además, de que se calcularon los elementos curvos (basados en el modelo de Voronoi), mediante un nuevo software desarrollado por ARUP, el cual somete a toda la envolvente a un algoritmo para suavizar los bordes y generar una continuidad en las curvas (Bosia, 2011).

El arquitecto japonés apuesta por el uso de los recursos digitales en todos los estadios de la construcción, desde la generación de ideas, hasta la construcción de grandes elementos. De acuerdo a Toyo Ito, las formas libres construidas de manera analógica o artesanal son inexactas, mientras que si se construyen sobre una base digital, pueden crear un proceso más rápido, flexible y preciso (Hauschild & Karzel, 2011). Demostrando con esta obra, que el uso de soportes digitales en superficies de forma libre puede aportar una reducción en los presupuestos gracias al control previo de todos los procesos de fabricación.

Zaha Hadid, explota en gran parte de sus obras la poética de la forma curva, atreviéndose a construcciones arriesgadas y casi imposibles. Un buen ejemplo son las estaciones del funicular en Innsbruck, Austria (Fig.19), en las cuales utiliza nuevos métodos de producción CNC basados en la industria automotriz, así como el termoformado del vidrio (Fig.20) para lograr los paneles de forma libre.

Esta tendencia formal está alcanzando también niveles más cercanos al común de los arquitectos, como es el caso de la "Wave House" en California (Fig. 21), de Mario Romano, en la cual se creó una segunda piel con paneles de aluminio de formas curvadas, las cuales fueron deformadas por rodillos y cortadas por una máquina CNC.

Uno de los grandes avances tecnológicos que demuestran el interés en las técnicas digitales, es el Centro de Impresión 3D de la Fundación del Futuro en Dubái (Fig. 22), el cual ha sido construido mediante manufactura aditiva (AM) por la empresa china WinSun Global. Se utilizó una impresora robotizada de grandes dimensiones (36 m x 12 m x 6 m), para crear varios edificios que cubren una superficie total de 250 m². Dicha obra se realizó en sólo 17 días, lo que redujo un 50% la utilización de mano de obra comparado con un edificio de similares características (Sukhtian, Aboudi, & Ireland, 2016).

La construcción de paneles de forma libre resulta compleja también porque se deben conseguir materiales que tengan ciertas características de deformación, o moldeabilidad como los plásticos, ciertos metales blandos, y materiales pétreos. Dentro de estos últimos, el hormigón de altas prestaciones (UHPC), el auto-compactable (SCC) o el reforzado por fibras de vidrio (GRC) son muy convenientes, salvo que requieren de moldes, lo que encarece su producción al tratarse habitualmente de piezas únicas (Grünewald, Schipper, & Hordijk, 2016)

Los paneles para edificios de forma libre, siguen siendo muy costosos, como bien señala Lloret (Lloret et al., 2015), y Eigensatz (Eigensatz et al., 2010). El hormigón es solo la mitad de la película, ya que el uso del molde no sólo puede determinar lo que se construye, sino que puede representar entre el 35 % al 60% del coste total del panel, además de contribuir a generar una gran cantidad de residuos, ya que tarde o temprano los moldes o encofrados se tienen que desechar.

A continuación, expongo una serie de construcciones contemporáneas que considero relevantes por la solución constructiva y el proceso de fabricación que le han dado a las superficies de forma libre. El Pabellón temático para la Expo 2012 en Yeosu, Corea del Sur (Fig. 23); la estación de autobuses de Hoofddorp, denominada "La ballena" (Fig. 24); el Pabellón de Vanke en la Expo Milán 2015 (Fig. 25); Centro Heydar Aliyev en Baku (Fig. 26); el Museo Ordos en Mongolia, la "Roca en el Desierto" (Fig. 27); la iglesia de Martin Luther King en Austria (Fig. 28).

Fig. 23. Pabellón temático de la Expo de Corea del Sur. SOMA. 2012. La construcción de las lamas móviles se realizó con GRC sobre moldes de poliestireno.

Fig. 24. Estación de autobuses en Hoofddorp. Holanda. NIO Architecten. 2003. La construcción es de espuma de poliestireno, cubierta por FRP.

Fig. 25. Pabellón de Vanke China, Expo de Milán. Daniel Libeskind. 2015. Forrado por azulejos rojos simulando una serpiente.

Fig. 26. Centro Heydar Aliyev, con paneles de GRC blanco. Baku, Azerbaiyán, 2013. Zaha Hadid Architects.

En resumen, se puede observar que la creación de la forma libre no es una cuestión nueva, sino que siempre ha estado presente, tanto en la arquitectura como en otras áreas artísticas. No obstante, en la época actual las geometrías complejas, o de doble curvatura, son una tendencia arquitectónica a la que no se puede dar la espalda, ya que está inmersa en nuestra cultura con los grandes edificios que se convierten en hitos y referencias urbanísticas, a pesar de que parecen estar restringidos sólo a la élite de los arquitectos, por los altos presupuestos que supone construirlos. Existen varios centros de investigación, universidades

Fig. 27. Museo Ordos, Mongolia. Ma Yansong, 2011. La envolvente del edificio se cubre con lamas metálicas, sin que se unan entre ellas.

Fig. 28. Iglesia de Martin Luther King, Austria. Coop Himmelblau. 2015. Edificio de paneles de acero, curvados mediante técnicas de conformado CAM/CAD específicas para la industria naval.

y empresas que buscan dar una solución viable y económica a la producción de paneles de forma libre, para que se pueda universalizar su uso. El molde es uno de los grandes inconvenientes en este proceso, por lo que dar una solución encaminada a eliminarlo sería un gran avance en la arquitectura y por ende en la industria de la construcción.

3.2 Estado de la Técnica

“Durante muchos años, el proceso de hacer dibujos arquitectónicos se fue convirtiendo progresivamente de lo analógico a lo digital, no obstante, el diseño de los edificios no reflejó dicho cambio. El dibujo CAD reemplazó las reglas paralelas por un puntero, pero los edificios lucían exactamente igual. Esto tal vez no sea sorprendente, ya que la representación en dos dimensiones simplemente reemplazó una a la otra. No fue hasta la irrupción del modelado en tres dimensiones y la fabricación digital, que se motivó el cambio en la manera de diseñar, y así expandir las fronteras de la forma arquitectónica y de la construcción” (Iwamoto, 2013).

William Mitchell afirma que los arquitectos dibujan aquello que pueden construir y construyen aquello que pueden dibujar (Mitchell, 2001). Esta correlación entre los medios de representación y la fabricación, no ha desaparecido por completo en esta era digital, es decir, que lo que se puede dibujar y lo que se puede producir se ha expandido de manera infinita gracias a las tecnologías digitales (Kolarevic, 2005). Es a partir de aquí donde se comienzan a gestar la gran cantidad de proyectos de forma libre que se exhiben actualmente en las grandes ciudades del mundo, marcando hitos arquitectónicos con superficies sinuosas, que además de ser capaces de representar, se pueden construir.

El proceso de creación de la envolvente de forma libre, en términos generales comienza con la definición del diseño o fase de ideación, trasladando dicha información al ordenador. Posteriormente, dicha envolvente se analiza mediante varios programas informáticos especializados para establecer una serie de condiciones que debe cumplir, como las estructurales, prestacionales (acondicionamiento térmico, lumínico, acústico, etc.), así como para refinar las formas y acercarlas lo más posible al ideal de la curva diseñada. Cuando todas estas cuestiones están controladas, se realiza la segmentación de la envolvente en piezas para que puedan ser fácilmente fabricadas, tanto en tamaño como en disposición. Finalmente, se procede al ensamblaje, ya sea en fábrica o *in situ* mediante operarios o sistemas automatizados.

La utilización del CAD-CAM es casi inevitable, ya que han sido muy bien aceptadas por la inmensa mayoría de los arquitectos, que ven como las herramientas digitales permiten de una forma más sencilla, productiva y directa, la creación de la arquitectura, más aún en el diseño de las formas libres. Dicha complejidad formal hace necesaria la utilización de modos de representación avanzados y programas específicos para la obtención de despieces y patrones optimizados. Al realizar dichas formas por ordenador, es un paso natural que la fabricación se base también en un entorno digital, ya que es un método útil e imprescindible hacia la industrialización de este tipo de superficies complejas.

Por todo ello, en este capítulo se exponen las herramientas actuales más representativas, que forman parte del diseño y la fabricación digital, así como de los recursos geométricos y de optimización. Posteriormente, se describirán los procesos digitales de fabricación que pueden asumir la producción de paneles de

forma libre para la envolvente opaca arquitectónica dentro de la industria de la construcción.

3.2.1 Herramientas digitales, geometría y optimización.

Antes de 1990, el diseño arquitectónico se desarrollaba a través de herramientas analógicas como trazado a mano alzada, elaboración de planos con papel y tinta, y maquetas de cartón. En esas fechas, varias industrias ya llevaban tiempo haciendo uso de la tecnología digital, hasta que algunos acercamientos como el proyecto "Estudio sin Papeles" (1992) de la Universidad de Columbia incentivó el uso de ordenadores en el diseño arquitectónico, evitando en la medida de lo posible el uso de los recursos manuales, sobre todo en las últimas etapas del proyecto (Andia, 2002). Más de dos décadas después, se ha esparcido tanto el uso de los ordenadores, que es impensable abordar un proyecto con medios analógicos, ya que se han trasladado todas estas técnicas al ordenador; es decir, se dibuja, diseña, simula, calcula, todo digitalmente.

Los beneficios iniciales del uso del CAD (*Computer-Aided Design*), se concentraron primordialmente en la facilidad con la que se puede repetir el trabajo, como por ejemplo, con el uso de comandos como copiar, pegar, cortar. Estas funciones y muchas otras favorecen la independencia del sistema, debido a la facilidad con la que se pueden manipular elementos, los cuales pueden estar conectados o no. Estos medios permiten la rápida construcción y modificación de los diseños desde una etapa muy inicial del proceso (Dunn, 2012), así como la versatilidad de algunos programas para crear renderizados (Fig. 29) en muy poco tiempo, los cuales permiten ver el objeto diseñado de una manera muy aproximada a la realidad física, sin tener que construirlo, o hacer grandes y costosas maquetas.

Fig. 29. Render fotorrealista del proyecto "Centro Internacional Chanhsha Meixihu de la Cultura y las Artes", China. Diseñado por Zaha Hadid.

La implementación del diseño asistido por ordenador, o CAD en 2D para la creación de planos, y posteriormente el 3D, han abierto un canal de posibilidades en el ámbito de la arquitectura y la construcción, ya que no es sólo una cuestión de dibujo por ordenador, sino del aprovechamiento de los datos para realizar simu-

laciones, crear maquetas virtuales o construir directamente desde el ordenador, mediante el proceso *file-to-factory* (del archivo informático a la fábrica) (Afify & Elghaffar, 2007). Esto consiste en trasladar la información de un modelo 3D a una máquina Controlada Numéricamente por Ordenador (CNC).

Existen una gran cantidad de programas informáticos para la arquitectura, y soportes que permiten la previsualización de muchos de los procesos de producción antes de realizarlos físicamente (Wu, Wang, & Wang, 2016). Dichos medios digitales están siendo utilizados ya no como una herramienta de visualización, sino como una herramienta de generación de formas y su transformación (Kolarevic, 2003). Menciono a continuación los programas informáticos que pueden aproximarse a la creación de formas libres de acuerdo a la fase de desarrollo en la que se encuentren:

- CAD: AutoCad, Rhinoceros, Sketchup, Archicad (Jurado E., Liébana C., & Gómez N., 2015), MicroStation, VectorRorks .
- Modelado 3D: 3ds Max, Google SketchUp, Digital Project (CATIA), MAYA y Rhinoceros.
- Programas Paramétricos: Digital Project, GenerativeComponents, Grasshopper, MAX script, MEL script, y Processing (Dunn, 2012).
- Programas de Simulación: COMSOL, CATIA, ANSYS, Hyperworks.

De acuerdo a varios autores (Helmut Pottmann, Asperl, Hofer, & Kilian, 2007), (Dimas & Briassoulis, 1999), (Barazzetti, 2016), (Moya & Pons, 2014), existen tres formas básicas de crear elementos tridimensionales de manera digital. Una es mediante NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*) (Fig. 30), la segunda es por mallas (Fig. 31), y la tercera, por nube de puntos (Fig.32).

Las NURBS son ampliamente utilizadas, ya que permiten el suavizado de las curvas y superficies, creando formas orgánicas, uniones fluidas y estructuras continuas. La incorporación de las *T-Splines* (Fig. 33) en el diseño de geometrías complejas, y en apoyo de las NURBS, le ha dado al diseño arquitectónico por ordenador, una nueva puerta para agilizar los procesos de cálculo.

Dichas NURBS (basadas en las curvas de Bézier y ecuaciones matemáticas, con diferente grado de complejidad), permiten modificar fácilmente las formas creadas mediante la manipulación de sus puntos de control, pesos y nudos (Fig. 30). Dichas curvas se realizan mediante polinomios de distintos grados, utilizando una cantidad mínima de datos, lo que garantiza la rapidez en su manejo y la razón por la cual muchos programas de modelado digital las utilizan. Se crean con ellas redes heterogéneas y coherentes, y su construcción es viable mediante máquinas CNC (Kolarevic, 2001), ya que permite la aproximación de las curvas complejas a curvas radiales. De manera auxiliar, existen las curvas isoparamétricas (isocurva o isoparm), que son utilizadas para ayudar en la visualización de superficies NURBS a través de trayectorias en las direcciones "U" y "V", para diferenciarlas de las cartesianas X, Y, Z.

Fig. 30. Superficie creada con NURBS, se muestran los puntos de control, así como los pesos (Schmiedhofer, 2007).

Fig. 31. Elemento de geometría compleja creado a partir de una malla con Rhinoceros.

Fig. 32. Nube de puntos obtenida mediante un escaneo 3D. Geomagic.

Fig. 33. Dibujo realizado con T-Splines y Grasshopper. www.grasshopper3d.com.

Fig. 34. Panel con superficie "Rubber Sheet" del proyecto "Freeform Construction" de la Universidad de Loughborough, Reino Unido.

Fig. 35. Proyecto ADAPA. Uso de la "Rubber Sheet" como base de la superficie de estudio.

Al liberar al diseñador de las convenciones del plano cartesiano, los programas de modelado utilizan geometría topológica de superficies y curvas continuas. La forma conocida como "Rubber Sheet" (lámina de goma) está dentro de este ramo de la topología geométrica, ya que permite a las superficies curvilíneas ser descritas mediante NURBS. Como se observa en la Figura 30, es fácil imaginar que si se extiende la "Rubber Sheet", fijando algunos puntos, agregando peso a otros y modificándolos desde otras posiciones, se puede observar las deformaciones resultantes a medida que se van variando las acciones (Dunn, 2012).

La "Rubber Sheet" ha sido utilizada como base experimental para distintos proyectos relacionados con la fabricación digital de forma libre, tales como el *Freeform construction* de la Universidad de Loughborough, (Fig. 34), la pieza Adapa para un molde adaptativo (Fig. 35) (Adapa, 2015), así como la investigación de ONL (Dunn, 2012), entre otros. La elección de esta superficie se debe a que proporciona una serie de peculiaridades muy especiales. Primeramente, tiene doble curvatura en dos sentidos, tanto en la cóncava como en la convexa, es simétrica y puede ser fácilmente deformada. Esto da como resultado, una superficie de fácil manejo mediante NURBS y con las características necesarias para la investigación de las superficies de forma libre.

Volviendo a la creación tridimensional de las superficies de formas complejas, se encuentran las mallas, las cuales son una alternativa a las NURBS, que también permiten la creación de formas tridimensionales complejas. Las mallas más utilizadas son las poligonales y poliédricas (Dunn, 2012). En cualquier caso, la aproximación geométrica se realiza a través de vértices, bordes y caras que combinados definen una rejilla que se aproxima a la forma del objeto deseado. Las mallas son utilizadas en programas 3D para aproximar la forma de doble curvatura mediante caras planas, por lo que puede ser un recurso adecuado si se quiere tener una aproximación de la envolvente con un recurso sencillo. Cabe puntualizar que dichas mallas también pueden ser creadas mediante NURBS, lo que no pone en conflicto ninguno de los tres métodos de generación de formas complejas.

La generación de formas a través de nubes de puntos se basa en un conjunto de vértices dentro de un sistema de coordenadas tridimensionales, que forman el objeto a modelar. Estas nubes normalmente se obtienen a partir del escaneado 3D, con el propósito de ser exportados a programas de diseño digital (CAD). Los puntos pueden ser modificados según las necesidades del usuario, y pueden formarse mallas o superficies NURBS a partir de ellos.

Tanto las NURBS, las mallas y las nubes de puntos, son métodos apropiados para la creación de superficies complejas o de forma libre, ya que son herramientas que facilitan la integración tridimensional en el entorno digital.

Continuando con los métodos digitales, el "Diseño Inteligente" en la arquitectura, es un avance dentro de los programas 3D, en el cual se hace uso de un software para optimizar los diseños, y trasladarlos directamente a los ordenadores que controlan los

procesos de fabricación y construcción. Un ejemplo muy claro es CATIA (*Computer Aided Three dimensional Interactive Application*), un software de modelado, simulación, manufactura, etc., creado para la industria aeroespacial francesa en los años setenta del siglo pasado, el cual fue utilizado en el estudio de Frank Gehry para realizar varios de sus proyectos (Shelden, 2002). La empresa *Gehry Technologies* al ver el potencial del programa lo reconfiguró para aplicarlo a la arquitectura y lo denominó "*Digital Project*" (<http://www.gehrytech.com/en/products/>) (Fig. 36). Esta nueva adaptación del CATIA a la arquitectura, permite describir los modelos digitales utilizando curvas de Bézier paramétricas y, algoritmos para superficies 3D, resolviendo sofisticadas formas tridimensionales y superficies, además de realizar simulaciones y tener un buen control de la fabricación de las piezas.

Fig. 36. Software *Digital Project*, Gehry Technologies. Proyecto Museo Soumaya, Ciudad de México. Fernando Romero. 2011.

Todo este desarrollo tecnológico no podría ser posible sin la aportación de la geometría y las matemáticas, ya que mediante algoritmos de distinta índole, el ordenador realiza varias operaciones para la visualización de las formas libres. Por ejemplo, los Diagramas de Voronoi (también denominados Polígonos de Thiessen o Teselación de Dirichlet), o las triangulaciones de Delaunay (Aurenhammer, 1991). Con estos estudios matemáticos se pudo crear la partición del plano Euclídeo, haciendo posible la segmentación de un cuerpo curvo en varias piezas planas (Singh, 2011), así como la posibilidad de visualizar varias alternativas de racionalización de las superficies complejas mediante un análisis paramétrico.

Fig. 37. Diseño paramétrico de panelización de una superficie. El software utilizado es Grasshopper Paneling System. Se muestran los diferentes patrones resultantes de la aplicación de una variedad de parámetros.

Un buen recurso para conseguir que la segmentación de las superficies de forma libre sea óptima, es la utilización del diseño paramétrico (Fig. 37), que permite en un entorno digital, mediante procesos matemáticos, la manipulación de las formas arquitectónicas con mayor precisión para llegar a los resultados requeridos. Existen varios métodos paramétricos, pero el más valorable para esta tesis es el que está basado en algoritmos genéticos (GE) o morfogénesis, el cual se inspira en los procesos evolutivos naturales, es decir, en la mutación y selección de una población de individuos con el fin de resolver un problema específico (Soler, 2013).

En el diseño paramétrico se utiliza una gran cantidad de datos con detalladas restricciones y referencias, así como tareas concretas definidas previamente por el usuario. El diseñador puede en cualquier momento alterar los valores o las fórmulas para que se modifiquen las relaciones entre los objetos y así lograr diferentes soluciones a un mismo problema. Las ventajas de este sistema es que los parámetros una vez establecidos, marchan de manera autónoma y guardan consistencia con las características escogidas, dando un abanico de opciones con las cuales resolver la forma (Schmiedhofer, 2007), (Kolarevic, 2005).

Existen varias aplicaciones o plataformas con las cuales se puede aprovechar la base CAD y aunar algoritmos paramétricos para realizar funciones paralelas, como Grasshopper, Karamba, Galapagos, Artisan, entre otros, que trabajan con programas de diseño tridimensional como el Rhinoceros. No obstante, no todos los *pluggins* (aplicación de un programa informático que añade una funcionalidad adicional) pueden resolver cualquier tipo de geometría compleja, ya que en ocasiones se tienen que desarrollar algoritmos o códigos de programación específicos, para controlar las variables que requiere dicho proyecto.

Como se ha visto, el uso de varios soportes digitales, aunado a las matemáticas, permiten obtener unos resultados asequibles y realizables a la hora de construir una superficie de forma libre. Esto se debe a que las propiedades geométricas de la envolvente de doble curvatura tienen una gran cantidad de elementos diferentes, así como numerosos detalles con soluciones únicas. Esto influye a la hora de elegir el proceso de diseño y de producción, que a su vez repercutirá en los costes finales (Sischka, Schneider, & Ziegler, 2012).

La representación de formas complejas con elementos estándar requiere de una profunda comprensión de las propiedades de las superficies. Por lo tanto, es necesario recurrir a tipologías repetitivas, patrones y componentes que hagan más sencillo el quehacer de tales arquitecturas y comprender las posibilidades existentes para dar la solución idónea a cada proyecto.

Dentro de los distintos tipos de paneles, se encuentran una serie de clasificaciones muy variadas, sobre todo cuando se aborda el tema de la forma libre (Henriksen, Lo, & Knaack, 2015), (Eigensatz, Kilian, et al., 2010), (Helmut Pottmann, Eigensatz, Vaxman, & Wallner, 2015). No obstante, hay un cierto acuerdo entre varios que he querido resumir en la figura 38.

SUPERFICIE PLANA

Superficie plana

SUPERFICIE DE CURVATURA SIMPLE

Curvatura simple

Cónica simple

Cónica inclinada

Superficie conoide

SUPERFICIE DE DOBLE CURVATURA

Esférica

Rotacional

Traslacional

SUPERFICIE DE FORMA LIBRE

Forma libre

Fig. 38. Clasificación de los paneles en función de su curvatura según (Henriksen et al., 2015), (Eigensatz, Kilian, et al., 2010), (Helmut Pottmann, Eigensatz, Vaxman, & Wallner, 2015).

El acercamiento de una superficie al diseño ideal, la cual sea adecuada para fabricación, se denomina racionalización. Esta racionalización muchas veces se convierte en "Panelización" (Fig. 39), la cual Eigensatz la define como *"la segmentación de una figura en piezas más sencillas, denominados paneles. Los cuales pueden ser producidos a un precio razonable con un proceso determinado de fabricación"* (Eigensatz, Kilian, et al., 2010). Con dicha partición se intenta lograr que la estética de la envolvente, la suavidad y la continuidad de la curva se mantengan lo más cercanos a la idea original. Para la optimización de la superficie no sólo se debe contemplar la fabricación, sino cuestiones como percepción visual, montaje, transporte, capacidad industrial, entre otras.

Para realizar la panelización se hace uso de algoritmos, de los cuales el Catmull-Clark es el más comúnmente utilizado, y ha servido como base para numerosas publicaciones relacionadas

Fig. 39. Envolvente post-racionalizada en la que se describen varios de los estadios de desarrollo, desde la superficie creada con NURBS, la malla discretizada y finalmente el modelo digital completo, el cual se analiza de acuerdo a la escala termográfica por su nivel de complejidad (Sischka, Schneider, & Ziegler, 2012).

con la racionalización de geometrías complejas (Helmut Pottmann, Asperl, et al., 2007), (Wallner & Pottmann, 2011), (Eigensatz, Kilian, et al., 2010). También cabe mencionar el grupo de investigación *Smart Geometry* (www.smartgeometry.com), que promovió el uso del diseño paramétrico y unas secuencias de comandos para el dominio de la complejidad geométrica de la arquitectura de forma libre, mediante la Discretización Diferencial de la Geometría (DDG) y la Optimización Numérica (Helmut Pottmann et al., 2015).

Existen varias maneras de abordar la segmentación de superficies complejas, ya sea mediante paneles planos o paneles curvos, no obstante la decisión para elegir un determinado tipo de pieza depende de varios factores como los presupuestos, la estética y el método de panelización elegido. El precio de la envolvente se incrementa de la misma manera en la que se incrementa la complejidad geométrica, por lo que es necesario racionalizar convenientemente la forma, para posteriormente poderla fabricar de una manera asequible.

Es evidente que al resolver las superficies con elementos planos es más factible y económico que realizarlo con piezas curvas (Helmut Pottmann et al., 2015), (Eigensatz, Deuss, et al., 2010). No obstante, la apariencia visual de una envolvente arquitectónica formada por paneles curvos es más aproximada que con superficies planas (Mitchell, 2001b). Por esta razón se debe tener muy presente la curvatura a seguir para no perderla en la segmentación. Se debe encontrar un equilibrio formal, con el cual se puede engañar al ojo humano haciéndole creer que la forma es redonda, cuando está realizada con elementos rectos (Van den Ende, 2011). También se puede lograr ese efecto, aumentando la cantidad de segmentos en los que se parte la envolvente para tener una mayor aproximación a la curva.

Las estrategias para la fabricación de elementos planos mediante la subdivisión de superficies se pueden resumir en: triangulación, poligonal, tiras desarrollables y puntos arbitrarios. Estos métodos consisten en colocar paneles planos (2D), en una superficie de geometría compleja. (Schodek, Bechthold, Griggs,

Kao, & Steinberg, 2005). El último método denominado por puntos arbitrarios, no está recogido como un método de subdivisión, pero creo que es importante mostrar sus características, ya que existen varios edificios construidos de relevancia con este procedimiento que resuelven correctamente la superficie de forma libre.

La triangulación (Fig. 40) es el método más utilizado para la partición de los elementos de doble curvatura, y consiste en fraccionar las superficies en segmentos triangulares planos. Está basado principalmente en el método matemático de la Triangulación de Delaunay, y existen hoy en día varios estudios de triangulación paramétrica con buenos resultados en cuanto a la optimización de piezas (Singh & Schaefer, 2010), (Singh, 2011), (Wallner & Pottmann, 2011), los cuales están aplicados en varios *plugins* de modelado tridimensional, que crean automáticamente mallas triangulares para segmentar las formas complejas. La ventaja de la triangulación es la garantía de una óptima distribución de fuerzas en toda la estructura, y que es posible discretizar casi cualquier forma mediante esta técnica (Schmiedhofer, 2007). Además de la versatilidad que reportan los vértices por cuestiones de diseño sin tener que preocuparse por las condiciones de los elementos adyacentes, ya que los paneles permanecen planos.

Sin embargo, la generación de superficies por triangulación tiene el inconveniente de crear una gran cantidad de bordes, lo que le confiere mayor complejidad en el comportamiento de los nodos, además de requerir mayor número piezas de anclaje, soporte y unión, lo que da como resultado un encarecimiento de la construcción de la envolvente utilizando este método (Helmut Pottmann et al., 2015). Algunos ejemplos de triangulación de envolventes de doble curvatura son, el 30 St. Mary Axe en Londres; la cubierta de la Sala de arte Islámico en el Louvre de París (Fig. 41), la cual se desarrolló mediante una malla poliédrica (Tang, Sun, Gomes, Wallner, & Pottmann, 2014); o "The Blob" en Eindhoven realizado del arquitecto M. Fuksas (Fig. 42).

Una solución más económica es la panelización por polígonos (Fig. 43), que se lleva a cabo partiendo una superficie en piezas cuadradas o rectangulares planas (Glymph, Sheldon, Ceccato, Mussel, & Schober, 2004), (Helmut Pottmann, Schiftner, & Wallner, 2008). Dicho método está basado en la teoría de la geometría de discretización diferencial (Bobenko & Suris, 2008). Pero el procedimiento más sencillo es encontrar la generatriz y la directriz de la superficie curva, y dividirlo en segmentos. Está claro que una envolvente de forma libre no tiene sólo dos curvas de referencia, por lo que para este tipo de particiones es recomendable hacer uso de las funciones paramétricas y las NURBS para obtener el mayor rendimiento y los resultados más aproximados a lo que se requiere.

La malla resultante por cuadriláteros en contraste que por elementos triangulares resulta más apropiada, ya que tiene un menor número de bordes, lo que conlleva un menor número de soportes, menos material, y por tanto menos costes. Además, los nodos entre paneles cuadrangulares no tienen tanta com-

Fig. 40. Estructura de una cubierta curva segmentada mediante triangulación (Singh & Schaefer, 2010).

Fig. 41. Cubierta de la sala de exhibición de Arte Islámico, en el Louvre, diseñado por Mario Bellini Architects y Rudy Ricciotti. Está basada en una malla poliédrica híbrida, que combina los grados de libertad de los triángulos con la ligereza que aporta el pequeño número de partes de una malla.

Fig. 42. Triangulación. "The Blob", Eindhoven. Estudio Fuksas. 2010.

Fig. 43. Segmentación por cuadriláteros. "The Sage, Gateshead", Reino Unido. Foster + Partners. 2004.

Fig. 44. Centro Nacional de Artes Escénicas, Pekín. Paul Andreu Arquitecto. 2007.

Fig. 45. Superficies desarrollables por bandas. Uso de Algoritmos genéticos. Axel Kilian 2001.

Fig. 46. a. Edificio del Disney Concert Hall en Los Ángeles, CA., diseñado por Frank Gehry. 2003. b. La envolvente fue creada mediante el procedimiento de superficies desarrollables.

plejidad como los triangulares, lo que es una gran ventaja a la hora de fabricarlos. (Schiftner, Baldassini, Bo, & Pottmann, 2008). Pero, la segmentación por cuadriláteros no puede ser utilizada en todas las superficies de forma libre, ya que dependiendo de la curvatura, puede no ser apto este método (Stavic, Wiltsche, & Freißling, 2010). Algunos edificios representativos que han elegido esta solución son el Centro Nacional de las Artes Escénicas en Pekín (Fig. 44); el Aeropuerto Internacional Incheon en Corea del Sur; o "The Sage Gateshead" (Fig. 43) diseñado por Foster + Partners.

Dentro de la panelización por cuadriláteros planos existe una propuesta denominada "Superficies desarrollables" (Fig. 45) (Kilian, 2001), la cual puede generar una serie de tiras mediante un algoritmo matemático de acuerdo a unas condicionantes previas, creando superficies desplegables planas que se van adaptando a la curvatura compleja de la envolvente (Wallner et al., 2010). Sheldon los denomina "tiras de papel", mientras Pottman habla de la generación de mallas cuadriculadas planas, que generan dependencias al enlazar curvas de una curvatura principal o generatriz (Gonzalez-Quintial, Barrallo, & Artiz-Elkarte, 2015). Una de las grandes ventajas de este tipo de métodos es la velocidad con la que se pueden realizar pruebas de despiece directamente con el fabricante (Lauret, 2011). Así como también la incorporación de principios geométricos básicos en un entorno paramétrico, por lo que la figura obtenida es el resultado de una estrategia predefinida, no de la adaptación constreñida a la forma.

Existen diversas maneras de control de la complejidad de las superficies, como es el caso del análisis Gaussiano, que evalúa el grado de curvatura en las superficies de geometrías complejas y da como resultado una imagen que indica a través de colores el nivel de curvatura que tiene la envolvente. En el caso de las superficies desarrollables tienen cero en una curvatura de Gauss en cada punto de la superficie debido a que son lineales en una dirección (Singh, 2011). Es decir que dichas superficies pueden ser desplegadas en una superficie plana y viceversa (Helmut Pottmann, Asperl, et al., 2007). El coste de fabricación por este método de tiras es mucho menor que la de los paneles de doble curvatura, sin embargo para garantizar que una superficie se compone de tiras desarrollables, es inevitable que surjan espacios vacíos entre ellas. El estudio de Frank Gehry utiliza mucho este sistema de tiras para asegurarse que es viable la fabricación de las formas sinuosas que diseña, como es el caso de la Sala de Conciertos Walt Disney (Fig.46).

Un tercer procedimiento para la obtención de paneles planos es mediante la colocación de puntos arbitrarios sobre las superficies de forma libre (Fig. 47) (Stavic et al., 2010). La solución está basada en la intersección de los planos tangentes, lo que da como resultado una infinita cantidad de posibilidades de unión. Para simplificar el proceso se utiliza una pieza u ornamento con una geometría preestablecida y con condiciones muy determinadas para hacerla coincidir con esas tangentes.

Fig. 47. Método por puntos arbitrarios. Diferentes soluciones de panelización en superficies de curvatura positiva y negativa (Stavic, Wilsche & Freißling, 2011).

Existen otras soluciones que son híbridas, como el caso del método "Packing circles" (PC), o relleno mediante patrones circulares, pensada en aprovechar la malla triangular para colocar elementos mediante patrones de distintas formas geométricas, (Fig. 48) (Helmut Pottmann et al., 2015). El objetivo es cubrir con un plantilla, una superficie de forma libre, como por ejemplo, el Edificio Selfridges (Fig. 49), o el Museo Soumaya (Fig. 36).

Fig. 48. Segmentación triangular y colocación de esferas en los nodos, mediante "Packing circles" (Schiftner et al., 2009).

Se puede obtener una gran variedad de opciones formales, especialmente con las mallas híbridas de caras planas, con las cuales se pueden desarrollar como formas arbitrarias, que con otros métodos no es posible discretizar (Schiftner, Höbinger, Wallner, & Pottmann, 2009). Es decir, que se pueden desarrollar dentro de la malla triangular, mallas poligonales para adaptar la estructura, y de esta manera se crea un sistema eficiente, que permite el ahorro de materiales y cumple las condicionantes de las geometrías complejas, ya que es un único elemento estandarizado el que se repite en toda la superficie compleja. No obstante, y a pesar de que la aproximación a la forma libre con Packing Circles es aceptable, tampoco llega a cubrir completamente las superficies como lo hace un panel de doble curvatura, ya que siempre quedan huecos entre los elementos por lo que no es una solución idónea para todos los casos.

Fig. 49. Envolvente diseñada mediante "Packing Circles". Edificio Selfridges, Birmingham. 2003. Future Systems.

La investigación de la panelización arquitectónica es un problema relativamente nuevo y existen pocos ejemplos de superficies de forma libre resueltos con paneles de doble curvatura, como la Fundación Louis Vuitton, los Pabellones de la Torre Eiffel, así como el Manta Glasshouse (Fig. 50). En éste último, los paneles fueron contruidos mediante paneles cilíndricos que en algunos casos sirvieron con un propósito estructural y que a pesar de ser acristalados, me parece que es un buen ejemplo de la búsqueda formal de las superficies curvas.

Fig. 50. Invernaderos Manta de las destilerías de Bombay Spirit Co. Paneles de vidrio con curvatura cilíndrica y comportamiento estructural. Heatherwick studio. Arup. 2014.

Los paneles curvos tienen unas condiciones distintas a los planos

Tabla 1. Clasificación de paneles de acuerdo a su precio de producción en diferentes materiales.
(Eigensatz, Deuss, et al., 2010).

surface types	manufacturing possibilities			double curved			
	glass	metal	fibre reinforced concrete or plastic	usually plastic deformation of material is involved			
single curved isometric to the plane, no or little plastic deformation of material				general double curved	custom molds, no thermal tempering of glass	machine or reconfigurable mold	custom molds commonly made of EPS foam
cylindrical parts of right circular cylinders	machine for bending and thermal tempering	roll bending machine	configurable mold or custom hot-wire cut foam mold	general ruled generated by a moving straight line	straight lines can be exploited	see above	foam molds can be hot-wire cut
conical parts of right circular cones	configurable or custom mold, no thermal tempering	machine or reconfigurable mold	configurable mold or custom hot-wire cut foam mold	translational carries two families of congruent profiles	congruent profiles can be exploited		congruent profiles can be exploited
general single curved developable surfaces	custom mold, no thermal tempering		custom hot-wire cut foam mold	rotational , cf. Figure 6 carries a family of congruent profiles

y existen dos tipos de curvaturas que se utilizan comúnmente en la discretización de superficies de forma libre: la curvatura simple y la doble curvatura (Helmut Pottmann, Liu, Wallner, Bobenko, & Wang, 2007) , (Eigensatz, Kilian, et al., 2010), (Henriksen et al., 2015). Eigensatz resume en una tabla (Tabla 1) los tipos de superficies curvas en relación con diferentes materiales y procesos de producción. También Pottman tiene una clasificación de curvaturas (Helmut Pottmann, Asperl, et al., 2007), pero la de Eigensatz me parece más completa y apropiada para esta tesis. Cabe destacar que tales geometrías tienen subgrupos, dependiendo del grado de curvatura y el rango de cambio en la misma, por lo que cada caso debe tener un estudio previo pormenorizado.

Los paneles de curvatura simple son aquellos que tienen la curvatura en una dirección, como un cilindro o un cono. Se pueden lograr pequeños grados de torsión dependiendo de la calidad de la red de curvas, las cuales pueden ser alineadas en franjas (Kilian, 2001), (Gonzalez-Quintial et al., 2015), (Wallner et al., 2010), (Helmut Pottmann, Schiffner, Bo, et al., 2008), lo que las convierten en una manera eficiente para su fabricación. Existen diferentes sistemas para panelizar dichas superficies, los cuales pueden ser usados para lograr la calidad de la curvatura requerida, así como el precio adecuado de su fabricación que a continuación se menciona.

Fig. 51. Envolvente segmentada utilizando paneles cilíndricos y planos mediante un modelo de tiras desarrollables. Servita Square Tower, Budapest. Zaha Hadid.

Un método de segmentación de paneles de curvatura simple es el desarrollado por Pottman (Fig. 51), el cual se basa en los modelos por tiras desarrollables de Kilian (Kilian, 2001), que permite la creación de una red de curvas con una superficie suavizada (Helmut Pottmann, Schiffner, Bo, et al., 2008). Bajo esta premisa, las superficies compuestas por tiras desarrollables también denominadas *D-Strips*, pueden verse como una representación semi-discretizada de una superficie de curvatura compleja, la cual constituye un lazo entre la suavidad y las superficies discretizadas.

De igual manera, Michel Eigensatz ha perfeccionado dicho estudio sobre las tiras desarrollables (Eigensatz & Schiffner, 2011), en el que propone la panelización de elementos de curvatura

simple mediante paneles cilíndricos. Esta idea surge debido a que éstos pueden ser producidos de manera más rentable, ya que no existe tanta complejidad geométrica en cada elemento. Existen cuatro tipos de ajustes para la generación de una malla discretizada mediante elementos cilíndricos: Local (Fig. 52), General, Global con Ángulos de Torsión y Global con Control de Ángulos de Torsión Avanzados, los cuales se van modificando y adaptando, de acuerdo a cada caso.

En cuanto a los materiales, las planchas metálicas son las más apropiadas para aplicar este proceso, como se verá en el siguiente capítulo. El vidrio es más difícil de curvar, pero se puede utilizar el doblado en frío con vidrio laminado. La madera también es adecuada para curvas desarrollables con curvatura simple, como en el caso del techo del Burj Khalifa (Fig. 53) (Helmut Pottmann et al., 2015), que para crearlo se basaron en el proceso de fabricación de barcos de madera.

Realizar la panelización de una superficie compleja mediante paneles de doble curvatura es un gran reto, y sólo algunos materiales pueden ser aplicados en estos procesos debido a la deformación que se requiere para lograr la suavidad de la forma libre, como es el caso de materiales cementicios, espumas, plásticos, cerámicas, etc. Para lograr dicha calidad, se requiere en la mayoría de los casos de la utilización de moldes, lo que encarece y ralentiza el proceso, ya que muchas veces el precio de producir un molde puede ser mayor que el del propio panel (Huzefa, 2013), (Helmut Pottmann et al., 2015).

Las envolventes de forma libre tienen la particularidad de tener una gran cantidad de piezas únicas, lo que conlleva la creación de un molde nuevo para cada una. Para resolver este inconveniente, existen proyectos de investigación, como el de la optimización de paneles de forma libre (Eigensatz, Deuss, et al., 2010), en el cual se favorece la reutilización del molde para reducir costes. Para lograr esto, se juega con los ángulos de torsión, así como divergencias respecto a los paneles adyacentes (Fig. 54) (Eigensatz & Schiftner, 2011). Los paraboloides, toroides, conoides, anticlásticos y sinclásticos son parte de la familia de las superficies de forma libre. La naturaleza propia de dichas superficies de doble curvatura no les permite ser tratadas en tiras o *D-Strips*, (Huzefa, 2013), por consiguiente, la manera de panelizar este tipo de superficies cambia respecto a los de simple curvatura.

Para realizar la optimización de paneles de doble curvatura, Michel Eigensatz y su equipo, han desarrollado un algoritmo que permite, con una limitada cantidad de tipos de paneles de doble curvatura, que se panelice una superficie de forma libre (Fig. 55), conservando la suavidad de la curvatura y el diseño original (Eigensatz, Deuss, et al., 2010). Reutilizar los moldes permite que la fabricación de paneles de formas libres sea más económica y rentable. Se puede decir que, es entre un 40% a un 60% más barata que la solución alternativa de construir paneles únicos, además de evitar la generación de residuos.

La panelización dirigida a la optimización de costes, incluyendo

Fig. 52. Solución de ajuste local sobre una base cilíndrica. Se permiten desviaciones de 2 cm aproximadamente en cada tira (Eigensatz & Schiftner, 2011).

Fig. 53. Segmentación de la pieza mediante tiras desarrollables con curvatura simple, del techo del Burj Khalifa, Gehry Technologies.2010.

Fig. 54. Panelización con elementos de doble curvatura, describiendo divergencias menores de 6mm y ángulos de torsión menores de 0,25 grados. (Eigensatz & Schiftner, 2011).

Fig. 56. Túnel realizado con planchas curvadas mediante una rueda inglesa. Antony's College en Oxford, Zaha Hadid. 2015.

Fig. 55. Segmentación de superficies de forma libre mediante algoritmos matemáticos, resueltos con paneles planos, en base a cilindros, paraboloides, toroides y cúbicos.

la reutilización de moldes con doble curvatura fueron utilizados en el proyecto de la Arena de los Corintios en Sao Paolo, en el panelizado metálico del Centro Comercial Atoll, realizado por Formtexx, o las planchas metálicas del túnel del Antony's College en Oxford (Fig. 56).

Dicho algoritmo se utiliza sin importar el tipo de material o método de producción. De acuerdo a la envolvente que se va a analizar, se crean una serie de moldes básicos, como se observa en la Fig. 55, que con cinco o seis tipos de paneles resuelve la segmentación del edificio de una manera adecuada y con pocas variaciones del diseño original. Los paneles planos son los más fáciles de producir, no obstante no cumplen con el criterio de aproximación a la estética de forma libre, por lo que normalmente para conseguir la apariencia suavizada, se tiene que recurrir a los paneles de doble curvatura. Naturalmente para conseguir dicha superficie continua, el algoritmo va ajustando los ángulos de torsión y las divergencias entre paneles (Fig. 57),

Fig. 57. Resultado de la panelización aplicando el algoritmo con diferentes rangos de ángulo de torsión y divergencias entre paneles.

lo que permite una panelización optimizada (Eigensatz, Kilian, et al., 2010). Al mismo tiempo los precios de fabricación se reducen por la aproximación de paneles geoméricamente más simples y la reutilización de los moldes (Helmut Pottmann et al., 2015).

El alto coste de fabricar envolventes de doble curvatura ha dado lugar a investigaciones centradas en la reutilización de los moldes de paneles para rentabilizar su producción, como es el caso del estudio mediante algoritmos de Eigensatz, o como Stargate Resources que desarrolló un software para la empresa Formtexx en el año 2009. Contaron con la colaboración de Arup Engineers, Jason Allen de Whiston Industries (Aston Martin, Audi, Bentley y Jaguar) y en particular arquitectos del estudio de Zaha Hadid. Todos ellos se dieron a la tarea de crear S-Form, un programa informático que proporcionaría en tiempo real y de forma automática la segmentación de la envolvente en paneles construibles, con NURBS como base geométrica. Lamentablemente el proyecto se quedó en estado de prueba, ya que existieron desavenencias entre los participantes. La empresa Evolute ha retomado este proyecto con Formtexx, y están desarrollándolo bajo la dirección del Dr. Helmut Pottmann, que es muy similar al trabajo del Dr. Michel Eigensatz (ahora colaboradores) con la incorporación de componentes paramétricos y la posibilidad de ser utilizado en varias plataformas CAD, ya no sólo en Rhinoceros. Dicho programa está en desarrollo y saldrá un programa Beta para el año 2018 (Pottmann, 2015).

Como se ha visto, las superficies de forma libre en la arquitectura se pueden resolver mediante la incorporación de algoritmos, y software específicos, con los cuales se aprovechan los avances de la informática y las matemáticas. No obstante, la translación de los datos generados por ordenador para crear un objeto físico no es un camino de un solo sentido, ya que el proceso puede ser revertido mediante el escaneado 3D, la digitalización, el uso de otras técnicas de generación de contornos o de imágenes (Dunn, 2012). En la terminología de la ingeniería y el diseño de producto a este método se le denomina ingeniería inversa (*Reverse Engineering*) (Arpak, 2008). Cuando se aplica en la arquitectura, habitualmente consiste en generar una maqueta a escala, y después digitalizarlo mediante un escáner 3D o una secuencia de fotografías, con lo cual se obtiene una nube de puntos, como se ha comentado anteriormente en esta sección.

Algunos arquitectos, como Frank O. Gehry, utilizan esta técnica en el desarrollo de sus proyectos (Fig. 58). Las formas libres y complejas de los diseños que crea no podrían ser reproducidos de manera apropiada utilizando planos convencionales en 2D o serían muy difíciles de plasmar. Es por lo que en su estudio se elaboran maquetas a escala del edificio en cuestión, las cuales se escanean a través de un brazo de medición 3D y toda la información obtenida se traslada al ordenador (Hauschild & Karzel, 2011). El escáner crea una nube de puntos desde el cual un programa tridimensional de diseño asistido por ordenador interpreta dichos puntos en coordenadas X, Y, Z, visualizando así un modelo 3D en el ordenador. Esta transformación continúa con la unión de puntos y la generación de curvas tipo NURBS, dando como resultado un módulo sólido el cual puede ser analizado,

Fig. 58. Ejemplo de la maqueta física original (dcha.) y la maqueta del mismo diseño después de haber sido escaneada, racionalizada y fabricada (izq.). (Shelden, 2002).

Fig. 59. Brazo de medición 3D CMM. Escáner de contacto portátil.

Fig. 60. Escáner 3D sin contacto. Modelo Sense, Cubify. Precio 395 euros (Dic. 2015).

validado o reparado. A partir de aquí se comienza a desarrollar el proyecto desde una perspectiva tridimensional dentro de un entorno digital.

Si el objeto escaneado se pretende fabricar, se puede trasladar dicha información ya digitalizada a un archivo STL (*Standard Tessellation Language*), un formato muy común de utilización en las máquinas de control numérico (CNC), que vayan a producir dicho elemento (Adeyeye, Pasquire, Soar, Austin, & Pendlebury, 2006).

Existen muchos programas para la Fabricación Asistida por Ordenador (CAM), todo depende del tipo de método productivo que se seleccione. Por ejemplo, en el caso de la impresión 3D, se requieren programas que definan la altura de la capa, el material a extruir, la velocidad de impresión, el uso del ventilador, etc., y dichos programas pueden ser de código abierto (Slicer, CURA, Pronterface) o gestionados por las compañías fabricantes de la impresora (Stratasys, Makerbot, 3D Systems).

Los escáneres que se utilizan comúnmente en el mundo de la arquitectura dependen de la escala del modelo a digitalizar. Para maquetas y pequeños modelos se utilizan generalmente escáneres de contacto y sin contacto. Los escáneres de contacto (Fig. 59) sitúan el objeto en una superficie plana y estática, por la que pasa una sonda para rastrear las características geométricas del modelo. Puede ser manual o con una máquina de medición por coordenadas (CMM), que cuenta con un sensor de posición que se mantiene mecánicamente en contacto con la superficie del objeto escaneado (Hauschild & Karzel, 2011). Por otro lado, los escáneres sin contacto (Fig. 60), suelen ser dispositivos muy costosos, pero eficaces cuando se escanea objetos de pequeñas dimensiones.

En ambos tipos de escáneres, se utiliza comúnmente un rayo láser que ilumina la zona a escanear, produciendo una nube de puntos o líneas que son capturadas por cámaras digitales (regularmente dos). Las imágenes grabadas son procesadas a través de técnicas ópticas de reconocimiento, que reconstruyen de manera tridimensional un modelo geométrico del objeto escaneado, el cual puede ser exportado para su uso en varios programas de diseño (Goldberg, 2001).

En el terreno más doméstico, existen en el mercado escáneres de escritorio y manuales, los cuales también permiten digitalizar modelos a pequeña escala. Estos aparatos pueden ser utilizados por arquitectos o diseñadores que parten de una maqueta o un modelo físico, y desean transferir sus diseños a una plataforma digital. Empresas como Fuel 3D, MakerBot, Cubify, entre otros, ofrecen estos escáneres a precios muy competitivos y asequibles.

Finalmente, otra técnica utilizada para capturar digitalmente un modelo tridimensional es la fotogrametría. Dicha técnica consiste en crear modelos digitales en 3D a partir de imágenes 2D (fotografías), mediante el uso de relaciones matemáticas establecidas en la geometría proyectiva, y de la visión estereoscópi-

ca. Se obtiene información en primera instancia de la geometría del objeto, es decir, información bidimensional (Fig. 61a). Por ejemplo, si se trabaja con dos fotos, en la zona común a éstas (zona de solape), se tendrá visión estereoscópica; o dicho de otro modo, información tridimensional.

Existe una plataforma de Autodesk denominada 123D Catch, que permite de manera gratuita subir a la red una secuencia de fotografías de un modelo (entre 6 y 70). Dichas imágenes tienen que tomarse desde varias posiciones, para que puedan crear la profundidad del objeto. Posteriormente, la aplicación devuelve un modelo 3D digitalizado (en formato STL u OBJ) (Fig. 61b), para poder trabajar con él en el programa CAD (Fig. 61c) (Kersten & Lindstaedt, 2012). Como este programa existen otros en el mercado como ARC3D, Agisoft PhotoScan, Blender, Photomodeler Scanner, que ya sea en línea o en un programa instalado en el ordenador, utilizan el mismo proceso de interpolación de puntos, pero en algunos casos, se requiere que la captura de las fotografías tengan algunos elementos de referencia fijos para el mejor procesamiento de datos.

El proceso de ingeniería inversa (Fig. 62) es una herramienta muy versátil que permite la extrapolación de datos a partir de una maqueta o un elemento tridimensional físico para poder ser manipulado digitalmente y obtener resultados muy aproximados y fiables, sobre todo cuando se habla de morfologías complejas.

Resumiendo, se puede afirmar que existen los medios digitales necesarios para abordar la segmentación de la forma libre en paneles producibles. Esto se logra, mediante la aplicación de algoritmos matemáticos, que permiten la panelización de la envolvente en piezas aptas para su fabricación y que además se puede acercar a la optimización de los medios materiales y humanos.

Así como también hay programas informáticos que pueden desarrollar las superficies complejas, mediante el uso de las NURBS y de los programas de diseño tridimensional, que permiten el desarrollo del proyecto no sólo para el diseño, sino también para la previsualización del proceso de fabricación más apropiado.

Actualmente los paneles de forma libre son los más complicados y costosos en fabricar, sobre todo si se comparan con los paneles planos o de curvatura simple. No obstante, los arquitectos demandan la fabricación de los paneles de formas complejas, ya que resuelven las envolventes de superficies sinuosas con una mayor calidad, proporcionando un acercamiento real al proyecto diseñado.

3.2.2 Sistemas y procesos de fabricación.

“Las superficies de forma libre son muy utilizadas por los grandes estudios de arquitectura, los cuales han puesto en la palestra la interrogante de cómo deberían ser construidas dichas formas complejas. No obstante, a media de que el modo en como se

Fig. 61. Digitalización de un objeto mediante una secuencia de fotografías (a). Posteriormente mediante la fotogrametría informatizada se crea una nube de puntos (b) para así obtener un modelo digital (c). Fuente: Taller de prototipos 2013, UPM.

Fig. 62. Proceso de digitalización de una maqueta tridimensional mediante escáner de contacto para posteriormente trasladarlo a una máquina CNC.

construye depende directamente de los avances digitales, la pregunta ya no es si se pueden construir las formas libre, sino, qué nuevos procesos o tecnologías se requieren para aprovechar este reto formal" (Kolarevic, 2003).

En la actualidad, la fabricación de los paneles de forma libre o de doble curvatura se realiza tanto de manera artesanal como con tecnologías digitales controladas numéricamente por ordenador (CNC). No obstante, el resultado de ambas opciones resulta muy divergente, ya que a pesar de que la calidad de los elementos producidos puede ser la misma, en el caso de la elaboración artesanal se requiere de una mayor inversión de tiempo y mano de obra especializada, lo que reporta unos gastos difícilmente comparables con la aplicación de la manufactura digital (Lim et al., 2012). Por lo tanto, se puede afirmar que, los nuevos avances tecnológicos están abriendo en el diseño arquitectónico y los métodos de fabricación, un camino para la producción de formas complejas que eran muy difícil y costoso diseñar, producir y montar, utilizando los métodos tradicionales de construcción.

Las máquinas CNC habitualmente funcionan mediante una secuencia de comandos denominada G-Code, con la cual se define una serie de parámetros, como la velocidad, la trayectoria de movimiento (*tool path*), la selección de las herramientas a utilizar, los comandos de arranque, ventilación, etc. Todas éstas, son instrucciones secuenciales, por lo que no se pueden realizar varias operaciones simultáneamente (Buswell, Thorpe, Soar, & Gibb, 2008). Sin embargo, gracias a este avance en la fabricación digital, se pueden llevar a cabo una gran cantidad de operaciones con la mínima intervención humana, lo que conlleva una mejora en las condiciones de seguridad, reducción de los tiempos de ejecución, así como de los costes de producción (Lim et al., 2012).

Así mismo, se emplean sistemas CAD y CAM que permiten mediante su participación conjunta la producción de un elemento enteramente digital. En el sistema CAD (Diseño Asistido por Ordenador), se diseña la pieza en el ordenador con herramientas de dibujo y modelado 3D. Posteriormente el sistema CAM (Manufactura Asistida por Ordenador) toma la información del diseño y genera la ruta de corte, adición o deformación que tiene que seguir la herramienta para fabricar la pieza deseada. A partir de este paso, se crea automáticamente el proceso de maquinado, el cual puede ser introducido a una máquina CNC mediante un disco o enviado electrónicamente.

El potencial de la fabricación digital ha evolucionado muy rápidamente con el desarrollo de los ordenadores y los programas informáticos. Por consiguiente, la información de diseño es inequívocamente la información de fabricación, es decir, que la correlación entre estos dos elementos ha potenciado la difusión de las formas libres, ya que mediante el dibujo en el ordenador se puede crear cualquier tipo de forma sin limitación alguna (Van den Ende, 2011). Aunque esto es cierto hasta un cierto punto, ya que en la mayoría de los casos, para la manufactura de paneles de forma libre, se requiere de una panelización ade-

cuada, la elección concreta de los materiales, la adecuación al presupuesto, así como la viabilidad de fabricación (uso o no de moldes, preformas, conformado, fresado, manufactura aditiva, etc) (Fig. 63) (Alonso, Lauret, Castañeda, Dominguez, & Ovando, 2014) (Anexo 1.2).

En líneas generales, el proceso de fabricación digital de paneles de forma libre, comienza con la creación de un modelo tridimensional realizado en CAD (habitualmente mediante NURBS), para posteriormente analizar la factibilidad de las formas de manera geométrica y/o paramétrica. Esto consiste (ver capítulo 3.2.1) en la fragmentación de la superficie en piezas fácilmente producibles, para no rebasar los límites dimensionales de la máquina elegida, así como contemplar las medidas permitidas en los medios de transporte que se vayan a utilizar (Fig. 64). También, dentro de lo posible, se debe plantear un patrón o plantilla de corte para evitar el gasto innecesario de material y reducir el tiempo de uso de la máquina, obteniendo como resultado un consumo eficiente de los medios.

Una vez que se ha cumplido con todo lo anterior, se traslada la información resultante a un archivo con formato dxf, .dwg, STL, IGES, OBJ o STEP a la máquina CNC, la cual resolverá mediante una serie de comandos e instrucciones (G, H y M-Code) las funciones que debe realizar para obtener la pieza deseada (Buswell et al., 2008).

Habitualmente la manufactura de los elementos de construcción, así como los procesos de edificación son viables económicamente gracias a la producción en masa de componentes estandarizados (Del Águila, 2006). Por esta razón, la utilización de procesos digitales tiene una importante relevancia en la construcción de paneles de forma libre, debido a la necesidad, en muchos casos, de la fabricación de piezas únicas y con geometrías complejas, que la industria de la construcción tradicional no puede rentabilizar debido al tiempo dedicado a cada pieza y la utilización de mano de obra especializada.

Tales sistemas de fabricación digital se pueden clasificar de acuerdo a su método de trabajo en procesos por sustracción, adición, conformado y heterogéneos (Hauschild & Karzel, 2011), (Kolarevic, 2003), (Dunn, 2012). En los siguientes apartados se desarrolla la descripción de los procesos, sobre todo de aquellos que son relevantes para la producción de paneles de forma libre, así como ejemplos de superficies construidas mediante dichos métodos. El objetivo principal es mostrar el avance de la industrialización de la envolvente de formas complejas en la actualidad, sus perspectivas de aplicación en la construcción y sus limitaciones.

3.2.2.1 Procesos sustractivos.

Los procesos sustractivos, consisten en la separación de partículas de un bloque de material sólido, utilizando diferentes técnicas (eléctrica, química, o mecánicamente reductiva). El exceso de material es removido para conseguir la forma deseada. Los métodos CNC sustractivos más comunes son el corte por láser,

Fig. 63. Moldes de cartón para crear un panel de forma libre de hormigón, cortados por máquina CNC. Proyecto de la Universidad de Liechtenstein en colaboración con la empresa Skateparks (Rudolph Concrete).

Fig. 64. Parasol, Sevilla. Las piezas fueron realizadas en bloques que fueran fácilmente transportables, ya que el acceso a la plaza complicaba las labores de abastecimiento.

por chorro de agua, el arco de plasma, el hilo caliente, la fresadora, o el robot de corte multiaxial (Hauschild & Karzel, 2011), (Dunn, 2012), (Brell-Cokcan & Braumann, 2011).

Habitualmente en la construcción, los procesos sustractivos están basados en la fabricación en 2D, y son los más utilizados debido a que la mayoría de las soluciones de envolventes de doble curvatura se solucionan con paneles planos (triangulación, cuadriláteros, superficies desarrollables, etc.) (Kolarevic, 2003) (ver. cap.3.2.1), o en su caso, estas piezas bidimensionales sirven como molde para obtener los elementos deseados mediante la intervención de otro tipo de procesos.

Fig. 65. Paneles de acero inoxidable cortados y perforados mediante corte láser. La empresa Formtexx realiza la curvatura de los paneles mediante una técnica formativa. Centro Comercial LAToll en Angers, Francia, diseñado por AAVP Architecture. 2013.

Fig. 66. Edificio BMW Welt, Munich. Coop Himmelblau. 2007.

El mecanismo de una máquina de corte sustractivo 2D consiste en el movimiento del cabezal por los ejes X e Y respecto a la mesa de corte, pudiendo ser una base estática con un cabezal móvil o ambas móviles. Las plataformas determinan el tamaño de la pieza que se puede cortar, por lo que si se requiere de elementos de grandes dimensiones, debe ser mediante pegado o ensamblado de varias piezas.

Los métodos de corte en dos dimensiones, suelen tener grandes diferencias sobre todo respecto a los materiales y espesores que pueden cortar. Es decir, cada material tiene su propio método de corte y se debe contemplar el tipo de tecnología a utilizar dependiendo del tipo de acabado, el precio, la precisión o la rapidez que se requiera. Como por ejemplo, una máquina de corte láser secciona únicamente materiales que puedan absorber la energía lumínica (metales), con espesores de hasta 25 mm, o por otro lado, el corte por chorro de agua puede cortar casi cualquier material de hasta 500 mm de espesor (Hauschild & Karzel, 2011).

El corte por Láser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) es una tecnología de índole térmica muy conocida y disponible, además aporta una gran precisión, rapidez y detalle en las piezas (Fig. 65). Este proceso consiste en un haz de luz infrarroja de alta intensidad, mezclada con un gas a alta presión, normalmente dióxido de carbono concentrada en un solo punto y gracias a la gran cantidad de energía en forma de luz se puede producir el corte. Para realizar un corte, se trasladan los dibujos de CAD en formatos 2D (dxf o dwg), los cuales son procesados por un programa específico de cada máquina, como por ejemplo el True Tops Laser (Hauschild & Karzel, 2011), (Dunn, 2012). Estos programas definen los patrones vectoriales que serán utilizados para cortar, taladrar o grabar.

En el caso del corte por láser, tiene una precisión de 0,05 mm y una velocidad máxima de 300,000 mm/min. En cuanto a la potencia, un láser con 6.000W es capaz de cortar planchas de 25mm de acero, 20mm de acero inoxidable, 15mm de aluminio, 20mm de zinc, 20mm de cobre, además de otros materiales blandos. La ventaja de este método frente a otros métodos de corte, como el de soplete con oxígeno, es que no se oxida en la reacción química. Uno de los ejemplos más significativos es el edificio BMW Welt (Fig. 66), que se construyó con más de 9.000 piezas de acero inoxidable perforadas, de diversas formas, cor-

tadas por una máquina láser con gran precisión (Frener Reifer, 2007), razón por la que se eligió este procedimiento (Brell-Cokcan & Braumann, 2011).

De igual manera, la cortadora por plasma puede realizar cortes con gran precisión en diversos materiales, sobre todo metales. El proceso consiste en el paso de un arco eléctrico a través de un gas comprimido en el cabezal de corte de la máquina, que calienta el gas a temperaturas muy altas (25,000°C a 50,000°C), lo que provoca un cambio de estado que lo convierte en plasma. La energía se condensa en la boquilla del soplete y es allí donde se centraliza el calor para realizar el corte (Society Nuclear & Plasma Sciences, 2016). Las dimensiones máximas de corte rondan los 3.000 mm de espesor con una precisión entre los 0,2mm y los 0,5mm. En ocasiones se puede deformar el material debido a las altas temperaturas si el material, o la plancha no es suficientemente densa. La calidad de corte no es muy fina, por lo que en ocasiones se requiere de un post-proceso de acabado. Un ejemplo de la utilización de este proceso es la estructura del Dynaform 2000 de Bernhard Franken, en el cual se cortaron con una máquina CNC de plasma, más de 30,000 piezas de acero para posteriormente soldarlas a mano.

Otro proceso sustractivo es el de corte por chorro de agua, que como su propio nombre indica, consiste en someter a un chorro de agua a alta presión, ya sea el líquido puro, o mezclado con partículas abrasivas sólidas que pasan a través de una boquilla, provocando la rápida erosión del material a su paso, creando cortes limpios y precisos. Una de las grandes ventajas de esta técnica es que realiza un corte en frío, y es aplicable sobre todo para aquellos materiales que no pueden verse afectados por cambios térmicos.

Uno de los ejemplos más llamativos es del stand de la Universidad de Darmstadt (Fig. 67), para la exposición Hobbit 2008, que fue realizado mediante la seriación de varias planchas de cartón corrugado, con el cual se formó una superficie de forma libre. Lo interesante de este proyecto es que el material en cuestión fue segmentado por una cortadora de chorro de agua, la cual tiene una presión de más de 1.000 m/s, lo que permite que el material no sufra ninguna deformación ni alteración (Hew, Fisher, & Awbi, 2001). La potencia de este sistema se convierte en energía cinética, permitiendo el efecto de corte. Existen dos tipos de técnicas de corte por chorro de agua (Hauschild & Karzel, 2011):

- Corte mediante agua pura (Fig. 68a). Este procedimiento se utiliza para el corte de materiales blandos tales como plásticos, materiales aislantes, fibras, textiles, madera, espumas y cartón, utilizando únicamente la acción abrasiva del agua. Es capaz de realizar cortes de hasta 350 mm y moverse en longitudes de 3000 mm x 4500 mm con una precisión de 0,025mm.
- Corte de agua con abrasivos (Fig. 68b). A este método se le incorpora partículas de un agente abrasivo como la arena, lo que permite el corte de materiales más duros, tales como acero inoxidable (>400mm), cobre, titanio, vidrio, piedra, hormigón (>180mm) y cerámica. Es capaz de realizar cortes de espesores de hasta 500 mm, y moverse por longitudes entre

Fig. 67. Stand de la Universidad de Darmstadt. 2008. Hecho a partir de placas de cartón corrugado, cortadas por chorro de agua.

Fig. 68. Diagramas explicativos del proceso de corte por chorro de agua pura (a) y con abrasivos (b).

Fig. 69. Corte por hilo caliente de gran formato.

Fig. 70. Corte por hilo caliente mediante robot de brazo articulado. Permite la creación de moldes de EPS con geometrías complejas. Universidad de Oporto.

los 2000 mm x 1000 mm, y los 4000 mm x 3000 mm con una precisión de 0,025mm.

El corte por hilo caliente es otro sistema de altas prestaciones, que a pesar de tener pocos ejemplos arquitectónicos, permite la ejecución de piezas de grandes dimensiones (Fig. 69). Se trata de un corte térmico mediante el cual un alambre sujeto a una cabezal robotizado, a modo de resistencia, se calienta y es capaz de cortar por fusión bloques de espuma de poliestireno (EPS) y otros materiales con densidades entre los 15kg/cm³ y los 50 kg/cm³ (Alonso, Lauret, et al., 2014). Una máquina CNC con esta tecnología puede trabajar con bloques de espuma de hasta 5000 mm x 1250 mm x 5000 mm, con una precisión de <0,1 mm / 300 mm y una velocidad máxima de 3000 mm/min, lo que hace de este sistema, una opción muy aceptable para la creación de paneles o moldes de forma libre, que se pueden recubrir posteriormente con GRC, GRP o Poliéster para protegerlas de los agentes erosivos del ambiente exterior.

También existe la posibilidad de incorporar el corte por hilo caliente a un robot de brazo articulado (Fig. 70), como en el caso de la propuesta del grupo de investigadores de la Universidad de Oporto (Martins, Campos, Nunes, & Sousa, 2015), el cual lo utilizan para realizar moldes para elementos de formas libres en hormigón. La desventaja de este sistema es la complejidad que representa el manejar una máquina de este tipo, ya que requiere de operarios muy especializados en su funcionamiento.

Fig. 71. Parada de autobús en Hoofddorp, Holanda. NIO Architecten, 2003. Piezas de EPS cortadas por hilo caliente.

Esta técnica de corte es muy utilizada en la industria naval para la generación de moldes para cascos de barcos, o para moldes de turbinas eólicas, a un precio relativamente bajo. Un ejemplo arquitectónico de este sistema, es la parada de autobuses de Hoofddorp (Fig. 71), cuya estructura de formas sinuosas fue creada a partir de bloques de espuma de poliestireno expandido (EPS), cortados mediante hilo caliente CNC, y fresadora de tres ejes, formando entre ellos un elemento con dimensiones totales de 50m x 10m x 5m. Posteriormente, se unieron las piezas y se recubrió con una capa de GRP (*Glass Reinforced Plastic*) (NIO Architecten, 2003). Esta construcción costó aproximadamente 1 millón de euros. No obstante, si se hubiera construido con acero y hormigón, podría haber costado el doble (Hauschild & Karzel, 2011).

Como se ha visto, las máquinas por sustracción son muy variadas y permiten el corte de diversos materiales. Además, las fresadoras son las máquinas sustractivas más utilizadas en la industria de la construcción (Van den Ende, 2011), (Brell-Cokcan & Braumann, 2011), (Dunn, 2012), las cuales realizan cortes en 2D mediante el movimiento del cabezal en los ejes X e Y, y en 3D al incorporar el eje Z. Suelen ser muy precisas y versátiles, con funciones básicas como el corte, perforado o taladro, así como operaciones más complejas de tallado, lijado, serrado, conformado, etc.

Las fresadoras CNC pueden realizar formas complejas, pero esto depende más de la rotación y de los ángulos que el troquel puedan realizar (Fig. 72a). Las máquinas más avanzadas (de 4 a 7 ejes) son capaces de efectuar operaciones más complejas,

cuantos más ejes, mayor capacidad operativa. No obstante, hay ciertas formas y maniobras en el interior de la pieza que la fresadora no puede realizar (Afify & Elghaffar, 2007), es decir que el taladro o troquel no puede llegar a cierta cantidad de puntos o espacios sin romper la pieza, debido a la propia disposición del cabezal de la máquina, además de dejar las esquinas redondeadas debido a la rotación propia de la broca.

Las fresadoras se están utilizando cada vez más en la generación de moldes de EPS y otros materiales ligeros de fácil producción, así como en la elaboración de réplicas para piezas de monumentos históricos y piezas especiales (Adeyeye, Pasquire, Soar, Austin, & Pendlebury, 2006). La posibilidad de generar mecánicamente elementos de curvaturas especiales, el bajo coste de la materia prima del molde y la fácil manipulación del mismo, le confieren una buena opción para elaborar paneles de forma libre en frío.

Con esta técnica se han construido moldes para los paneles de hormigón armado de la Torre Zollhof (Fig. 72b), para los paneles de metacrilato de “La Burbuja” de BMW o los paneles de GRC (Glass Reinforced Concrete) del Medienhaus K42 (Fig.73). No obstante, estas técnicas tienen un gran inconveniente, que es la generación de residuos, que no sólo se debe al propio proceso sustractivo, sino a que el molde creado tiene que ser eliminado en algún momento, fomentando un impacto negativo al medio ambiente.

Fig. 72. a. Fresadora CNC de seis ejes. Permite la formación de piezas con formas libres. b. 335 paneles de hormigón armado para la Torre Zollhof, Düsseldorf, a partir de bloques de EPS, formados por una fresadora CNC. Frank Gehry. 2002.

Fig. 73. Moldes de poliestireno expandido sobre los cuales se proyectó GRC. Proyecto Medienhaus K42, Friedrichshafen. Matthäus Schmid. 2002.

3.2.2.2 Procesos por conformado.

Los procesos por conformado son muy particulares, ya que utilizan la fuerza mecánica, ya sea por tensión o presión, sobre materiales en estado sólido o líquido, los cuales son modificados geométricamente causando la deformación plástica del material hasta conseguir la forma deseada. En el caso de la conformación térmica, afecta la estructura molecular del material en cuestión, que en el caso de la conformación en frío no sucede.

Algunos de los métodos por conformado CNC incluyen el punzonado, plegado y/o doblado (Fig. 74), hidroconformado, termoformado, moldeado por inyección, entre otros procesos

Fig. 74. Vivienda realizada mediante plegado y doblado de acero corten. *Ship house*, Undercurrent Architects. 2012.

Fig. 75. Máquina de MPF. Se muestra cómo mediante la presión de ambas matrices se puede deformar la plancha. Máquina fabricada por la Universidad Jilin, China.

Fig. 76. Proceso ISF con brazo robotizado controlado por CNC. Deforma las láminas metálicas gracias a un punzón que va realizando una presión constante en los puntos requeridos para conseguir la forma deseada.

híbridos.

Las planchas de metal han sido tradicionalmente conformadas a mano o en moldes de estampación o por presión. El uso de los procesos por CNC han permitido la reducción en los tiempos de producción y los costes de elaboración. Por estas razones, muchos fabricantes están invirtiendo en la modernización de las técnicas de conformado, como es el caso de CIG y Formtexx (Gould, 2010). Por otro lado, hay varios centros de investigación, que están haciendo ensayos y grandes avances en procesos CNC prometedores, como: el *Multipoint Forming* (MPF), el *Flexible Roll Bending* (FRB), el *Incremental Sheet Forming* (ISF), y un proceso mixto denominado *Multipoint Forming and Stretch Bending* (MFSB). La mayoría de estos procesos aún están en fase de desarrollo e investigación, pero ya hay algunos que se han comercializado como el *Multipoint Forming*.

La producción en masa para realizar formas aerodinámicas con metal ya existe, como se puede ver en la fabricación de automóviles, aviones o barcos, pero estos sistemas no son aplicables a la construcción de paneles arquitectónicos de forma libre, debido a que los requerimientos de cada panel normalmente son únicos e irrepetibles. Por tanto, el precio para la fabricación del molde no es rentable, dando como resultado edificios “blob” que raramente utilizan planchas de metal con doble curvatura, por lo que tienen que recurrir a ciertos trucos visuales para conseguir el efecto curvado (Lee & Kim, 2012).

El *Multipoint Forming* (MPF) es una tecnología similar al conformado tradicional, pero la diferencia es que aquí se utilizan dos matrices de puntos contrapuestas (Fig. 75), que al acercarse presionan la chapa metálica para conformarla con una geometría particular, previamente establecida en el ordenador mediante programa de fabricación CAM. El panel metálico obtiene la forma deseada gracias a que las barras metálicas se ajustan en altura por medio de la transmisión de la fuerza lineal, y permite cambios de posición de tantos paneles distintos como se requiera, sin tener un molde específico (Z. Y. Cai & Li, 2002), (Paunoiu, Cekan, Gavan, & Nicoara, 2008). Esta tecnología no sólo sirve para metales, ya que se pueden observar investigaciones dirigidas a plásticos y aerogeles (Alonso, Bedoya, Lauret, & Alonso, 2014) que pueden conseguir la doble curvatura en la que el sistema funciona simplemente como molde, pudiendo aplicar o no presión.

El *Incremental Sheet Forming* (Fig. 76) es un proceso en el cual la lámina se modifica a partir de tensiones progresivas localizadas debido a la utilización de un punzón metálico redondeado, el cual es controlado en todos sus movimientos por un ordenador (Park & Kim, 2003). Los materiales que pueden deformar pueden ser tanto metales como plásticos (Brell-Cokcan & Braumann, 2016). La ventaja del ISF frente a otros procesos mas convencionales es que no se requieren de troqueles especiales para conseguir una gran cantidad de formas diferentes, ya que estas se consiguen mediante el movimiento del punzón esférico a través de un patrón de diseño personalizado controlado por una máquina CNC.

La Agencia Espacial Europea, el *Central Japan Railway* (Fig. 77) o la compañía automotriz Ford, aplican este procedimiento para la creación de prototipos, moldes o cascarones que pueden ser producidos en horas, en lugar de semanas. Si esto se traslada a la construcción de envolventes arquitectónicas, se haría posible la producción de paneles de forma libre fácilmente en horas.

Otro de los procesos prometedores se denomina *Flexible Roll Bending* (Fig. 78), el cual es una técnica de conformado en frío, al igual que las dos anteriores, y consiste en la deformación de la plancha metálica al pasarla a través de unos rodillos que van girando a la vez que avanza. Mediante el programa CAM se introducen los datos necesarios, como el tipo de material, grosor, dureza y radios de curvatura, de esta manera el programa calcula las operaciones y las posiciones de los rodillos (Z.-Y. Cai, Li, & Lan, 2012). Existen dos tipos de FRB, los de dos ejes, en el cual la pieza está curvada en un solo sentido y los de tres ejes, que se pueden realizar curvas en distintas direcciones.

Para la construcción del *Dongdaemun Design Park* en Corea del Sur, un grupo de investigadores de la Universidad de Yonsei, del mismo país, desarrollaron un proceso híbrido denominado *Multipoint Forming and Stretch Bending* (MFSB) (Fig. 79), el cual consiste en deformar primeramente la plancha metálica mediante estiramiento en dos direcciones, para posteriormente aplicar las matrices por puntos (*Multipoint Forming*).

Fig. 79. Proceso de conformación mediante *Multipoint forming Stretch Bending* (Lee & Kim, 2012).

Con este proceso mixto se fabricaron alrededor de 22.000 paneles metálicos de doble curvatura, y el tiempo de ejecución con esta nueva técnica era de quince minutos por cada panel, a un precio medio de USD\$260 por metro cuadrado. Si se compara con el procedimiento tradicional, que sería mediante fundición de moldes a presión, tardarían varias horas por cada pieza y con un precio de USD\$7.000 por metro cuadrado (Lee & Kim, 2012). Esto demuestra que la industria posee los recursos para dar respuesta a la fabricación de este tipo de elementos complejos cuando se dan los factores apropiados para solucionarlos.

Dentro de la industria privada, la empresa Formtexx ha desarrollado un proceso del cual poco se sabe, ya que sus propietarios lo tienen bajo secreto industrial. Pero la relevancia de dicho proceso es que puede realizar el conformado de láminas metálicas de forma libre a una gran velocidad. Según sus creadores, el método es análogo al uso de las impresoras de sobremesa, pero más grande, en lugar de papel, es una plancha de metal, y en lugar de un cabezal de impresión conectado a una conexión USB, es una máquina controlada por ordenador con una conformadora robotizada que realiza deformaciones de doble curva-

Fig. 77. Prototipo a escala 1/8 de la sección frontal del Tren Bala (Shinkansen, Japón,) utilizando la técnica ISF.

Fig. 78. Proceso *Flexible Roll Bending*, desarrollado por la Universidad Jilin de China.

Fig. 80. Exhibición de paneles de forma libre de 10m x 3m., de la empresa Formtexx en el *Building Centre* de Londres. Con esta técnica se producen paneles de 1,20m x 1,20m con doble curvatura cada veinte minutos.

Fig. 81. Estudio de Dibujo de la Universidad de Artes Bournemouth, Reino Unido. 2015. Piezas de acero conformadas mediante rodillos controlados por ordenador, ensambladas y soldadas *in situ*. Empresa CIG.

Fig. 82. Qatar National Convention Centre, Arata Isozaki. 2010. Paneles de acero conformados con formas curvadas. Empresa Victor Buyck Steel Construction.

tura (Gould, 2014). La velocidad de fabricación es constante, y una de las aportaciones innovadoras de esta tecnología es que evita el impacto en las planchas, y por lo tanto las imperfecciones desaparecen (Fig. 65 y 80). Esto da una nueva oportunidad para la construcción de elementos metálicos ligeros de forma compleja o de forma libre, empleando técnicas de precisión similares a las utilizadas en la industria automotriz (Castañeda, Lauret, Lirola, & Ovando, 2015).

Por otro lado, la empresa CIG (*Central Industry Group*) ha desarrollado varios proyectos de arquitectura con envolventes sinuosas, realizadas con planchas de metal, sobre todo mediante conformado en frío y con técnicas propias de la industria naviera. Utilizan toda la tecnología que tienen incorporada en los astilleros, con máquinas CNC de presión positiva, punzonadoras, estampadoras, rueda inglesa, etc., pero con una base digital mediante la incorporación de programas CAM. Construyen sobre todo estructuras semi-monocasco como en el caso del Centro de Prensa del campo de críquet de los *Lords* (*Future Systems*), la Iglesia de Martin Luther King en Austria (*Coop Himmelblau*), el Pabellón Porche, Alemania (*Henn Architects*), o el Estudio de Dibujo de la Universidad de Bournemouth (*Peter Cook y Gavin Robotham*) (Fig. 81).

Otro ejemplo relevante es el desarrollado por Irata Isozaki, el *Qatar National Convention Centre* (Fig. 82), en el cual se conformaron varias planchas de acero para forrar una estructura que simula las ramas de un árbol. El problema fue encontrar quien pudiera curvar las planchas, ya que necesitaban que se conformaran una gran cantidad de hojas metálicas con distintas curvaturas. La empresa belga Victor Buyck Steel Construction fue quien realizó el encargo (Emir, 2012), pero con grandes inconvenientes, como trasladar las planchas desde Malasia hasta Qatar y las diarias dilataciones y contracciones de las planchas metálicas en un sitio con cambios de temperatura tan extremos como la Península Arábiga.

3.2.2.3 Procesos aditivos.

De manera opuesta a los procesos sustractivos, los métodos aditivos se caracterizan por la adhesión de capas de material para la fabricación de una pieza sin la necesidad de moldes o preformas (*tool-less*, sin herramientas). Una de las principales ventajas de dicha tecnología es la posibilidad de producir componentes únicos sin incrementar el precio de producción, ya que cada pieza que se imprime puede ser distinta a la otra, sin modificaciones mecánicas en la impresora, ya que si se tratara de realizar mediante los procesos de manufactura tradicional, sería inviable económicamente (Hauschild & Karzel, 2011). Esta característica, junto con la posibilidad de realizar cualquier forma compleja, hace de la fabricación aditiva (*Additive Manufacturing*, AM) un proceso realmente relevante dentro de la perspectiva de la personalización avanzada, y explica la implicación de un gran número de arquitectos en el desarrollo de técnicas y aplicaciones en este nuevo campo (Naboni & Paoletti, 2015).

Desde 2009 todas las categorías de métodos por capas se resu-

mieron en el término "*Additive Manufacturing*" (AM) de acuerdo a la regulación del Comité de la ASTM (*American Society for Testing and Materials*), en la publicación F2792,09/2009. La manufactura aditiva se define como "*un proceso de unión de materiales para realizar objetos desde un modelo informático 3D. La manufactura aditiva es opuesta a la manufactura por sustracción. Normalmente las piezas creadas con AM son procesadas una capa sobre otra. Sinónimos: fabricación aditiva, procesos aditivos, técnicas aditivas, manufactura por adhesión de capas, manufactura por capas y fabricación de forma libre*" (ASTM, 2009).

El principio del proceso aditivo es el mismo para todos los métodos y consiste primeramente en realizar un modelo 3D sólido en CAD para posteriormente exportarlo a un programa especializado como Slic3r, Repetier Host, Cura, entre otros, y el tipo de archivo puede ser STL, STEP, OBJ, etc. (Anzalone, Zhang, Wijnen, Sanders, & Pearce, 2013). El programa dependiente de la impresora 3D, divide el objeto a producir en capas bidimensionales con un cierto grosor (eje Z). Este proceso de separación por capas se denomina *Slicing* (corte en rebanadas). Posteriormente este archivo es convertido en G-Code, con el cual se definen todos los pasos que debe realizar la máquina para obtener el objeto deseado (Buswell, Soar, Gibb, & Thorpe, 2007). El dispositivo de manufactura aditiva o impresora 3D procesa cada capa del modelo de manera consecutiva, mientras el relleno y los contornos de la pieza se van solidificando. Dependiendo del método, la unión de cada nueva capa con la anterior se realiza por exposición, calentamiento o adhesión en una cámara confinada de ciertas dimensiones. De esta manera se genera capa a capa, la representación física de un modelo CAD inicialmente virtual (Strauß, 2013).

El pixel, dpi o ppi describen los datos en 2D. En el caso de las imágenes en 3D, pueden ser descritas por voxels (*volumetric pixel*). Estos no tienen una referencia en x, y, z concreta, pero es una unidad cúbica que compone un objeto en tres dimensiones. El término nació inicialmente en el área informática, pero posteriormente se introdujo como unidad de resolución en los objetos realizados mediante manufactura aditiva (Buswell et al., 2008), ya que constituye la unidad mínima procesable de una matriz tridimensional y es, por tanto, el equivalente del pixel en un objeto 2D.

De acuerdo a Wu, Wang, & Wang, 2016, hay cinco tipos de procesos de impresión 3D referidos a la construcción (estereolitografía, fabricación por filamento fundido, *Inkjet powder*, sinterizado selectivo por láser y *Contour Crafting*). No obstante, creo que se pueden aplicar más procesos de manufactura aditiva, ya que como se puede ver en el gráfico de Fig. 83 existen varios métodos, que se pueden introducir fácilmente en la industria de la construcción, que se explicarán más adelante.

Algunas de las tecnologías relacionadas con la manufactura aditiva que considero aplicables a la producción de paneles de forma libre son: la estereolitografía (SLA o STL), el sinterizado selectivo por láser (SLS), el *PolyJet* (PJM), el modelado por de-

Fig. 83 Métodos de manufactura aditiva de Wong y Hernández (Wong & Hernandez, 2012).

posición fundida (FDM® marca registrada por Stratays Inc.) o fabricación por filamento fundido (FFF), la fabricación por metal directo (DMF), el derretido selectivo por láser (SLM), el *D-Shape* y el *Contour Crafting*. A continuación se describen algunos de estos procesos.

Fig. 84. Proceso de fabricación aditiva por estereolitografía.

A mediados de la década de los ochenta del siglo pasado se creó el primer proceso de manufactura aditiva, que se logró gracias al deseo de unos diseñadores de producto de trasladar directamente sus archivos 3D en prototipos físicos. Así es como nace la estereolitografía (SLA) (Fig. 84), creada y patentada por Chuck Hull en 1987 (3D Systems), (Hull, 2014). Este método consiste en la solidificación de resinas en estado líquido y sensibles a la luz ultravioleta mediante un láser, que se va formando capa a capa. Por lo general, incluye una plataforma perforada, un recipiente de polímero y un láser UV. El láser traza mediante CAD/CAM la parte en que cada capa corresponde al sólido sobre la superficie del material contenido en una cuba, de modo que el material no afectado por la luz, permanece en su estado líquido y el expuesto se solidifica. Una vez realizada una capa, la plataforma baja para realizar la siguiente capa, y así consecutivamente hasta crear el modelo 3D (Pham & Gault, 1998). Posteriormente se somete a un proceso de curado en un horno de luz ultravioleta para reforzar la resistencia del objeto.

Con la estereolitografía se pueden fabricar formas muy complejas y con gran calidad de acabado. No obstante, tiene un inconveniente para grandes tiradas o elementos de grandes dimensiones, ya que el coste de las resinas fotosensibles ronda los 60 a 200 euros por litro (Wu et al., 2016), y resultarían muy caras las piezas de grandes proporciones.

En general, la mayoría de las máquinas de impresión 3D de escritorio tienen un área de trabajo de 210 x 290 x 200 mm, similar a un folio A4 (Buswell, Soar, Gibb, & Thorpe, 2005), (Hauschild & Karzel, 2011). No obstante, existen varias empresas que están comenzando a crear impresoras de mayores dimensiones como se puede observar en la Figura. 85, donde la empresa Materialise creó una máquina de estereolitografía con un área de impresión mayor de 2,00 m².

A partir de la invención de la estereolitografía, se comenzaron a desarrollar muchas otras máquinas utilizando el mismo principio de generación de objetos 3D mediante capas superpuestas, como es el caso del sinterizado selectivo por láser (SLS) (Fig. 86), que trabaja con material en polvo (normalmente metales, poliamidas libres, o con aporte de aluminio o fibra de carbono, que mejoran el comportamiento mecánico del producto final) (Knaack, Klein, & Bilow, 2010). Este proceso consiste en una cuba rellena de polvo fotosensible, el cual se precalienta justo por debajo de su temperatura de fusión con el fin de reducir el consumo de energía. Posteriormente se proyecta un rayo láser UV en los puntos específicos para sinterizar las partículas de manera local y así unirse con la capa anterior. La plataforma se hunde de 1 a 3mm por capa, un alimentador coloca más material en la cuba y el ciclo comienza de nuevo (Hauschild & Karzel, 2011). Al terminar la pieza necesita ser enfriado, y aquellas áreas de material que no se curaron permanecen como material de apoyo en torno al modelo.

El sinterizado selectivo por láser es un proceso con grandes cualidades en cuanto a la rapidez con que se crean las piezas y la alta calidad en el terminado del producto (Fig. 87). La empresa 3DSystems (<http://www.3dsystems.com>) tiene una impresora llamada sPro230 con unas dimensiones de impresión de 550 x 550 x 750 mm, lo que acerca este proceso a las medidas de un panel arquitectónico.

Otro tipo de proceso aditivo es el *Poly Jet* (PJM) (Fig. 88), que trabaja con un proceso similar al de una impresora 2D que inyecta gotas de tinta sobre el papel. Este método en lugar de inyectar tinta, lo que extruye son gotas de fotopolímero líquido que es secado y curado al momento con una luz ultravioleta. Sobre la bandeja se van acumulando capas finas para crear una pieza de distintos materiales y colores. También se inyecta material de soporte si se requiere, el cual se puede eliminar fácilmente al finalizar el proceso. La pieza se endurece al momento que entra en contacto con la luz ultravioleta. Este proceso puede combinar varios materiales y colores (hasta diez materiales en la misma impresión), y de acuerdo a Stratasys (www.stratasys.com) también se pueden utilizar biomateriales y composites con propiedades específicas y predecibles.

La fabricación por fusión de filamento (FFF) (Fig. 89) (Wohlers, 2014), es uno de los procesos más utilizados en todo el mundo. Anteriormente, se le denominaba fabricación por deposición fundida (FDM), pero este término lo absorbió la empresa Stratasys (www.stratasys.com) como una marca registrada, por lo que el movimiento RepRap (reprap.org) decidió acuñar el térmi-

Fig. 85. Prototipo realizado mediante el proceso de estereolitografía por la empresa Materialise (<http://manufacturing.materialise.com>). La máquina denominada Mammoth tiene un área de impresión de más de 2 m² (2100 x 680 x 800 mm).

Fig. 86. Sinterizado Selectivo por Láser.

Fig. 87. Silla ONE_SHOT.MGX fabricada en SLS. El asiento, las patas y las articulaciones de la silla son creadas en un solo procedimiento evitando el ensamblaje. Realizado en poliamida en Materialise por el diseñador Patrick Jouin 2006.

Fig. 88. PolyJet. Pieza realizada en la máquina Object1000Plus de Stratasys con unas dimensiones de 1000 x 800 x 500 mm.

Fig. 89. Fabricación por Fusión de Filamento Fundido (FFF).

Fig. 90. StickFilament. Permite la impresión en FDM/FFF con gradientes de color.

Fig. 91. Proyecto Escher. La plataforma de estudio es de 1200 x 300 mm, con una altura de 500 mm.

no de fabricación por fusión de filamento para poder utilizarlo sin restricciones legales.

La fabricación por fusión de filamento consiste en la “verdadera” adición de material, ya que el material no es pegado o curado, sino depositado en capas. El material se extruye mediante un cabezal robotizado que se mueve en los ejes X e Y, y cura directamente sobre la capa anterior. Dependiendo del modelo de la máquina, cuando se termina el depósito de una capa, el cabezal o la plataforma se desplazan en el eje Z para iniciar nuevamente otra capa. En algunos casos para asegurarse que las capas se unen entre sí, se calienta la bandeja de soporte a una temperatura específica dependiendo de los puntos de fusión de los materiales y de las máquinas (Knaack et al., 2010).

Los materiales que habitualmente se utilizan en las máquinas por FFF son, ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), PLA (Ácido Poliláctico) PC (polycarbonato), PA (Poliamida), PS (Poliestireno), PEEK (Polieteretercetona), goma, metales, simulaciones de madera, de ladrillo, entre otros. No obstante, cada material debe ser colocado en la impresora de manera individual, por lo que los gradientes, mezclas de colores y/o materiales son muy complicados. No obstante, existe un filamento en barras denominado *Stick Filament* (Fig. 90), que permite la utilización de distintos colores gracias a un sistema de anclaje entre las barras que dan continuidad en la impresión, pero que hay que ir colocando una a una. Aunque es un primer acercamiento a la versatilidad de este proceso, puede ser que en un futuro se logre de una manera menos artesanal.

La fabricación mediante filamento fundido (FFF) tiene el inconveniente de que al depositar cada capa, se va formando una superficie escalonada, lo que le confiere a la pieza unas ciertas limitaciones en cuanto a la exactitud y pulcritud del acabado final de la superficie de la pieza. No obstante, para la industria de la construcción puede ser irrelevante debido a la escala en la que se trabaja, ya que dichas diferencias son en muchos casos de micras, dependiendo de la altura de capa.

Un buen ejemplo de aplicación de FFF a gran escala es el proyecto Escher (projectescher.com) (Fig. 91), desarrollado por Autodesk, el cual permite crear piezas de gran tamaño mediante varios cabezales trabajando en paralelo. Es más rápido, debido a la cantidad de extrusores trabajando al mismo tiempo y no se compromete la calidad de los objetos creados, ya que se utiliza una tecnología existente ya probada. Este proyecto aun está en fase de investigación, por lo que no está disponible comercialmente, pero permite hacernos a una idea del potencial de la tecnología.

Habitualmente, las impresoras FFF utilizan un sistema cartesiano (Fig. 929a), con una cama de impresión cuadrada o rectangular. El cabezal se desplaza por los ejes X, e Y para depositar el material, mientras que para imprimir la siguiente capa se tiene que desplazar en el eje Z, ya sea mediante el movimiento del cabezal o de la propia cama, esto depende de la máquina o de la marca de la impresora. Otro estilo de impresión es el sistema Del-

ta (Fig. 92b), en el cual el cabezal queda suspendido mediante tres brazos en una configuración triangular y el desplazamiento es un tanto anárquico, ya que no atiende a un movimiento en Z secuencial, sino a la conveniencia de la fabricación de la pieza en cuestión (Allen & Trask, 2015). Por último, se encuentra la impresión polar (Fig. 92c), la cual es muy similar a la cartesiana, con la excepción de que los conjuntos de coordenadas describen puntos en una retícula circular, en lugar de un cuadrado, ya que la cama de impresión es la que se desplaza mediante movimientos circulares y la boquilla de extrusión permanece estática.

La fabricación aditiva (AM) se ha considerado un método limitado para su utilización en la industria de la construcción, debido al reducido tamaño de los objetos que puede producir. Además, su uso en arquitectura está concentrado en la fabricación de maquetas y prototipos a escala mediante las impresoras 3D de escritorio. Afortunadamente estas afirmaciones están cambiando, ya que recientemente se están desarrollando varias técnicas experimentales de AM a gran escala.

Pegna considera que la deposición por capas puede ser llevada a cabo con materiales de la construcción tradicionales (Pegna, 1997), como es el caso del *Contour Crafting* o el *D-Shape*, que utilizan como material una base cementicia (Knaack et al., 2010), (Kolarevic, 2003), o las impresoras de filamento plástico FFF como la BAAM o la KameronMaker. Estos procesos ofrecen la automatización en la construcción, así como la promesa de una libertad en el diseño (Buswell et al., 2007) a una mayor escala.

Enrico Dini desarrolló el 2004 la primera y más grande impresora 3D en ese momento, con la ambición de imprimir un edificio a escala 1:1. La máquina puede imprimir en una planta de 6,00 m x 6,00 m, que se eleva a lo largo de cuatro columnas pudiendo llegar a los 12,00 m en altura (Fig. 93) (Dini, 2009), (Lim et al., 2012). A este proceso se le denominó *D-Shape*, y es un método por deposición con polvo, el cual es endurecido selectivamente utilizando un aglutinante orgánico, capaz de producir elementos autoportantes de manera automática sin intervención humana. El Pabellón Radiolaria (Fig. 94) es un ejemplo de lo que se puede construir con este proceso pionero y es interesante por ser una estructura con una geometría compleja. Su tamaño es de 3,00 m x 3,00 m x 3,00 m y representa la maqueta a escala del pabellón final que tendrá 10,00 m en altura y se construirá en Pontedera, Italia (Monolite Ltd, 2011).

De una manera paralela, el Dr. Behrokh Khoshnevis de la Universidad del Sur de California, creó el proceso *Contour Crafting* (CC) (Fig. 95), que al igual que el *D-Shape*, sigue los principios de la construcción por adición de otros métodos de fabricación aditiva a gran escala. Utiliza de la misma manera el control por ordenador y puede imprimir materiales como polímeros, morteros, cerámicos, etc. El volumen que puede imprimir ronda los 36,00 m³. Una de las características que diferencia esta técnica respecto a otras similares, es la utilización de piezas planas colocadas perpendicularmente en la zona del extrusor, formando una L invertida (sistema patentado) (Fig. 96). Estas placas limitan el flujo vertical y horizontal del producto, permitiendo no sólo el

Fig. 92. Impresoras de Fabricación por Fusión de Filamento (FFF) a. Impresora cartesiana. b. Impresora Delta. c. Impresora Polar.

Fig. 93. *D-Shape*. Proceso de impresión a gran escala.

Fig. 94. Pabellón Radiolaria fabricado mediante D-Shape.

Fig. 96. Detalle de la boquilla y las paletas del Contour Crafting.

Fig. 97. 3D Big Delta Printer del proyecto WASP. Imprime materiales cerámicos, arcilla, cementicios y plásticos.

Fig. 98. Viviendas impresas por procedimiento aditivo de mortero. Empresa WinSun Co. China. 2014.

Fig. 95. Proceso Countour Crafting. Simulación de Impresión de edificios completos.

objeto deseado, sino que tenga un acabado con una calidad excepcional. La orientación de las paletas puede ser modificada y conseguir un ángulo diferente en función de las características de la superficie que se requiera (Khoshnevis, 2004).

El principal objetivo del Dr. Khoshnevis es la construcción de edificios completos tanto en la tierra como en la luna. Es remarcable su colaboración con la NASA en un proyecto de impresión 3D, que se centra en la construcción de refugios utilizando el material del planeta al que llegue como elementos base para la impresión. También tiene otro proyecto para la construcción de viviendas de emergencia para personas damnificadas (Knaack et al., 2010). Existe otro proyecto con el mismo objetivo solidario que es WASP (*World's Advanced Saving Project*) con la 3D Big Delta Printer (Fig. 97) (Moretti, 2015), (Gardiner, 2011).

Tanto el proceso *D-Shape*, como el *Countour Crafting*, no han desarrollado hasta la fecha ninguna construcción de grandes dimensiones, tales como viviendas o habitaciones, tal y como mencionan en sus respectivas propuestas. No obstante, en China, el grupo WinSun ha construido varios edificios (Fig. 98) con una tecnología similar al *Countour Crafting*. Dicha empresa propone de igual manera que el Dr. Khoshnevis, dejar huecos para el paso de instalaciones y el refuerzo estructural si fuera necesario. No obstante, la impresión de WinSun no se realizó de una sola pieza, sino en varias que posteriormente se ensamblaron en el terreno (Wu et al., 2016). Al igual que la impresión "*The Printed Villa*" de Hushang Tengda ubicada en Pekín, la cual fue construida por completo en 45 días y cada capa roda los 250 mm de espesor.

En el año 2017, la empresa Rusa Apis Cor construyó una casa a escala real impresa en 3D (Fig. 99) y según la compañía, tardaron un día en realizarla. Sus creadores aseguran que se puede utilizar la impresora en condiciones climáticas muy adversas (-35°C), ya que la construyeron *in situ* (Apis Cor, 2017). La localización de fabricación en este tipo de procesos será la clave a la hora de reducir los costes, ya que como Koshnevis comenta, "*comparado con la prefabricación, la impresión 3D no es mucho más barata a menos que se realice in situ, eliminando los costes de*

transporte del material y mano de obra" (Bruggen, 2014).

El Dr. Richard Buswell de la Universidad de Loughborough, ha desarrollado un proceso similar a los anteriores, llamado *Concrete Printing* (Impresión en hormigón). Tiene una capacidad volumétrica de 2,00 m x 2,50 m x 5,00 m. La cabeza extrusora está colocada sobre una grúa que se mueve por control numérico y su importancia radica en que han podido realizar paneles de forma libre sin molde (Fig. 100), así como muros y otros elementos para la construcción (Buswell et al., 2007), (Le et al., 2011). El grupo de investigación que desarrolla este proyecto lo han denominado *Freeform Construction*, que claramente muestra las posibilidades que aporta la tecnología aditiva a gran escala y aplicada a la fabricación de elementos de geometrías complejas mediante materiales muy comunes como los morteros de hormigón, arcillas, etc. Dicho proceso ha tenido una gran repercusión, tanto que el estudio de arquitectura de Norman Foster + Partners tiene un gran interés por desarrollarlo, ya que colabora con el grupo de investigación de la Universidad de Loughborough y la empresa de hormigones Skanska para producir un robot que reduzca significativamente el tiempo de impresión de elementos de hormigón, para hacer rentable el proceso.

Fig. 99. Casa de hormigón impresa en 3D, de la empresa rusa Apis Cor, construida en 1 día.

Fig. 100. Panel 1m x 1m, de hormigón reforzado, del proyecto *Freeform Construction*, Universidad de Loughborough.

Un desarrollo similar al *Concrete Printing* lo están llevando a cabo en la Universidad Tecnológica de Eindhoven. El área de impresión es de 9,00 m x 4,50 m x 3,00 m (Fig. 101), que al igual que la máquina del Dr. Buswell, utiliza una máquina extrusora anclada a una grúa controlada por CNC y extruye hormigón.

Por otro lado, existen varias máquinas de grandes dimensiones de fabricación por fundido de filamento termoplástico como la BAAM (*Big Area Additive Manufacturing*), (Fig. 102), que fue creada por el *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL), *Cincinnati Incorporated* y el Departamento de Energía de EE.UU. Nació como un prototipo de trabajo, con el cual han impreso un coche Shelby Cobra a escala real en 24 horas. La BAAM puede producir piezas de diversos materiales como ABS, PS, PEEK y Ultem (resinas de Polieterimida, PEI) reforzadas con fibra de carbono o fibra de vidrio, las cuales proporcionan ligereza y resistencia a las piezas. El área de impresión es de 2,00 m x 4,00 m x 0,87m y puede fabricar piezas 500 a 1000 veces más rápido que muchas

Fig. 101. Impresora de hormigón desarrollada en la Universidad Tecnológica de Eindhoven.

Fig. 102. Impresora BAAM, realizando la impresión de un coche Shelby Cobra a escala real.

Fig. 103. Sistema de impresión mediante railes para permitir que las impresoras puedan fabricar en altura.

máquinas aditivas de uso industrial, ya que su velocidad promedio ronda los 36 kg/hr.

LA BAAM ha demostrado que no sólo se puede mejorar la velocidad, sino la precisión de impresión (Cincinnati Incorporated, 2015), por lo que esta tecnología podría ser trasladada a la industria de la construcción para fabricar paneles arquitectónicos, siendo competitivos tanto en tiempo, como en precio. Actualmente desde el ORNL están estudiando otra máquina con mayores capacidades que la BAAM denominada WHAM (*Wide and High Additive Manufacturing*), con la cual pretenden realizar impresiones con una velocidad de 453,60 kg/hr, con unas dimensiones máximas de impresión de 7,00 m x 14,00 m x 3,05 m, la cual estará disponible comercialmente dentro de unos 12-16 meses (Armstrong, 2016).

El artista e ingeniero alemán D. Joris, creó un sistema denominado Z-Unlimited, que amplía mediante railes el límite en altura de las impresoras Ultimaker UM1m, extendiéndola hasta los 3,05m, además de colocar en línea 4-6 máquinas a la vez (Fig. 103) y crear piezas de grandes dimensiones, que posteriormente se podrán unir. Lo que reivindica, es la posibilidad de tener grandes elementos con impresoras de escritorio.

Fig. 104. Impresora Voxeljet VX4000, con capacidad de 8m3 (4m x 2m x 1m).

La impresora BigRep es una máquina por FFF diseñada por una empresa emergente alemana, la cual tiene una capacidad de 1,15 m x 1,00 m x 1,19 m, e imprime materiales como ABS, PLA, PVA (Poli Vinyl Alcohol), HDPE (Polietileno de alta densidad), PP (Polipropileno), Nylon, Laywood y Laybrick con un cabezal de extrusión dual. De la misma manera, existen varias máquinas de grandes dimensiones como la Voxeljet (Fig. 104) que imprime modelos en arena, similar al proceso *D-Shape*; la 3DP Platform con impresión en plástico (capacidad de 1,00 m x 1,00 m x 0,50 m), o la Kamermaker (Fig. 105) de DUS Architects, que con una impresión de bio-plástico están construyendo la fachada de una vivienda del canal de Ámsterdam (DUS architects, 2015). La mención de estas impresoras se debe a la importancia de tamaño y porque pueden ser aplicables a la producción de elementos arquitectónicos, especialmente aquellos que sean difíciles de conseguir mediante los procesos tradicionales.

El equipo de investigación *Emerging Objects*, en California,

Fig. 105. KamerMaker es una impresora basada en una Ultimaker, pero agrandada con una plataforma de 2,20m x 2,20m x 3,50m

EE.UU., está experimentando con un proyecto iniciado por Rael San Fratello Architects, con diversos materiales atípicos para la fabricación aditiva tales como: polímeros, madera, nylon, papel, acrílico, chocolate o sal. Su meta es imprimir materiales naturales aplicados a la arquitectura, mediante la unión o apilamiento de piezas (Fig. 106), ya que según exponen en su investigación, es más prudente hacer un edificio por piezas, que imprimirlo de una pieza, como pretenden con el *Contour Crafting* y el *D-Shape*. Este equipo aboga por la impresión de pequeños elementos y tienen un proyecto en marcha para construir el Hotel Jin Hai Lake en Pekín.

Fig. 106. *Bloom* (2015) es el nombre de esta instalación autoportante de 3,6m x 3,6m x 2,7m compuesto por 840 piezas impresas en 3D, con un composite de cemento sin partículas de óxido de acero, lo que le da ese color blanquecino.

El proyecto de *WirePrint* de Stefanie Mueller, consiste en la impresión de pequeños hilos de material para formar la pieza en lugar de rellenarlos. No es una impresión por capas, sino realmente en 3D (Fig. 107). Con esto se consigue mejorar la velocidad, reduciendo diez veces el tiempo de ejecución. Posteriormente se cubre con un material para lograr la superficies deseada. Este trabajo está basado en el concepto *low-fidelity* (Mueller et al., 2014), (Mueller et al., 2015), que es un término muy utilizado en los objetos a gran escala que no requieren de unos acabados perfectos a una escala de micras, sino de milímetros.

La selección de la tecnología de impresión 3D apropiada depende sobre todo del coste de producción, el tiempo de impresión, la precisión de las capas y acabado, así como los materiales que es capaz de imprimir. En la tabla 2 (Anexo 2.1), se muestran cinco de las tecnologías más relevantes dentro de la impresión 3D para la aplicación arquitectónica. En ella se puede ver cómo para imprimir metal se puede hacer mediante *Inkjet powder*, fabricación por filamento fundido y estereolitografía. La estereolitografía tiene la ventaja inherente en la fuerza por el material

Fig. 107. Proyecto *WirePrint*. Impresión de una botella mediante hilos de plástico. Posteriormente se recubre el objeto, pero mantiene la forma.

que produce. Por otra parte, para la impresión de cerámica y hormigón, el *Contour Crafting* se utiliza como la tecnología de impresión apropiada. Además, la precisión de impresión varía a través de diferentes tecnologías de impresión. Para la impresión de objetos con alta precisión (por ejemplo, modelos de arquitectura de trabajo), la impresión la estereolitografía puede ser la apropiada. Cuanta mayor precisión se requiera, el tiempo de impresión se incrementará, independientemente de la máquina.

Para seleccionar la tecnología de impresión 3-D más económica también dependerá del requisito de la precisión. Como puede verse en la Tabla del Anexo 2.1, para la impresión de objetos de baja precisión, el *Inkjet powder* parece ser el método más económico, así como con el tiempo de impresión más bajo y el índice de costes. Por otra parte, para la impresión de objetos de alta precisión, el sinterizado selectivo por láser y el *Inkjet powder* parecen ser los métodos más económicos.

3.2.2.4 Procesos heterogéneos.

La posibilidad de fabricar paneles de forma libre para la arquitectura con procesos de conformado, sustracción o adición puede ser complementada por procesos heterogéneos o mixtos. Esto se puede realizar mediante la incorporación de otros procesos, herramientas o técnicas de manufactura a un equipo común, como por ejemplo un brazo articulado robotizado.

La incorporación de robots, está creando mercados productivos como en el caso de la industria automotriz, la electrónica o la metalúrgica, sustituyendo en la mayoría de los casos la mano de obra. Esta nueva pauta va ganando territorio como se puede en el siguiente gráfico (Fig. 108), donde se aprecia el incremento de la venta de robots desde el 2010 al 2014, basados en las estadísticas del IFR (*International Federation of Robotics*)(IFR, 2015).

La utilización de robots en la industria de la construcción se lleva realizando desde la década de los setenta del siglo pasado, pero habitualmente ha sido para fabricar los elementos, que posteriormente se ensamblan para su utilización, no para la producción directa de elementos arquitectónicos o constructivos.

Los robots y brazos articulados son capaces de realizar complejos procedimientos, y tienen la capacidad de poder moverse con una autorreferencia de posición respecto al objeto de trabajo. Además, poseen en el "*end effector*" (terminal), la posibilidad de intercambiar una gran variedad de herramientas como por ejemplo, un láser, una varilla de corte por hilo caliente, una fresa, un arco de soldadura o un extrusor de fabricación aditiva. Todas estas funciones se pueden programar para que el robot lleve a cabo acciones específicas, sofisticadas (Dunn, 2012) y casi siempre de una manera muy precisa.

Se puede observar la utilización de robots en el proyecto del Instituto de Diseño Computacional (ICD) y el Instituto de Estructuras de la Construcción y Diseño Estructural (ITKE) de la Universidad de Stuttgart, en el cual desarrollaron en 2011 un Pabellón de Investi-

Fig. 108. Gráfico de la venta de robots en todo el mundo entre 2010 y 2014 (IFR, 2015).

gación (Fig. 109) con un diseño biomórfico, el cual fue construido con paneles de madera contrachapada (6,5mm), cortados por una fresadora conectada a un brazo robotizado tipo KUKA, los cuales fueron realizadas con gran precisión para que pudiesen ensamblar todas las piezas, ya que las uniones eran mediante machihembrado.

En el año 2014, ambos institutos volvieron a colaborar con otro pabellón pero esta vez el nuevo procedimiento robótico era mediante la fabricación de un encofrado neumático inicialmente flexible (EFTE), que se hizo gradualmente rígido con el refuerzo de filamento de fibras de carbono, creando un nido o cáscara de morfología curva (Fig. 110). Con este sistema se ahorraron el consumo de material por técnicas de encofrado convencional, y por tanto, minimizando los residuos de construcción asociados (Menges & Knippers, 2011).

El proyecto *MeshMould*, desarrollado en el ETH de Zurich, utiliza un robot de brazo articulado con un extrusor para la fabricación aditiva, que produce una malla escala 1:1, con una función de molde perdido (Fig. 111). Una vez realizada la matriz, se le agrega mortero, consiguiendo muros de formas curvas, ya que el propio molde hace de refuerzo gracias al estudio geométrico de los entramados que lleva la malla (Hack & Lauer, 2014). No obstante, tiene problemas de contención del hormigón en su fase líquida y se está investigando sobre los aditivos necesarios para que cumpla su misión aglutinante, sin ser demasiado líquido que se escurra, ni muy denso para no pasar a través de la malla (Gramazio & Kohler, 2014).

En el Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña (IAAC), un grupo de estudiantes crearon “Mataerial” (Fig. 112), el cual consiste en incorporar a un brazo robotizado un proceso aditivo que permite la creación de objetos tridimensionales en lugar de capas en 2D, y trabaja sobre cualquier superficie sin necesidad de estructuras o de apoyos adicionales (Jokic & Novikov, 2013b). El material que utilizan para crear ese efecto anti-gravedad son polímeros termoestables en lugar de termoplásticos (Jokic & Novikov, 2013a). Dentro del mismo IAAC se desarrolló otro proyecto denominado *Minibuilders* (Jin, Maggs, Sadan, & Nan, 2013), el cual en lugar de utilizar una gran impresora, emplean pequeñas máquinas robotizadas que pueden imprimir grandes estructuras como se aprecia en la figura 113. Finalmente, el último proyecto de este instituto es *TerraPerforma* (<http://www.iaacblog.com/projects/terraperforma-open-thesis-fabrication-201617/>), en el que imprimen mediante un robot tipo KUKA bloques de materiales tradicionales para la construcción de muros con geometrías un tanto intrincadas.

De una manera similar a *Mataerial*, funciona el proyecto de MX3D (mx3d.com) (Fig. 114), que puede imprimir estructuras metálicas autoportantes, las cuales soportan su propio peso mientras trabajan. Los metales que puede imprimir son, acero, acero inoxidable, aluminio, bronce y cobre, sin material de soporte. Añadiendo pequeñas cantidades de metal fundido, es capaz de imprimir líneas en el aire. Se crean líneas 3D con la flexibilidad para fabricarlo en cualquier sitio, de cualquier tamaño y forma.

Fig. 109. Pabellón ICD/ITKE 2011. Dirigido por el Prof. Menges y el Prof. Knippers.

Fig. 110. Pabellón ICD/ITKE 2014-2015. Se muestra el procedimiento aditivo mediante brazo robotizado.

Fig. 111. Muro realizado con el sistema MeshMould.

Fig. 112. Mataerial. Robot de brazo articulado que mediante proceso aditivo extruye un polímero termoestable.

Fig. 113. *Minibuilders*. Una de las máquinas comienza señalando la base sobre la cual se añadirán las siguientes capas y posteriormente se pueden añadir más máquinas para crear las paredes, techos y el refuerzo exterior.

Fig. 114. Proyecto creado por Joris Laarman como una investigación sobre la impresión a gran escala de estructuras sofisticadas. En la fotografía se ve dos robots construyendo un puente sobre un río. 2015.

El estudio de Coop Himmelblau, realizó la construcción de la cafetería del *Museum of Contemporary Art & Planning Exhibition* (MOCAPE) en Shenzhen, China, y la peculiaridad del proyecto es que fue diseñado con el objetivo de utilizar robots en todo el proceso de fabricación (Fig.115a), los cuales ensamblaran, soldaran y pulieran las planchas de acero inoxidable, para ahorrar en los costes de producción y tiempo. Comentaron que esta parte del edificio normalmente tardaría 8 meses, con 160 trabajadores *in situ*, sin embargo, con los robots se necesitarían únicamente 8 trabajadores y se realizará en 12 semanas (Mairs, 2016). Los resultados de la aplicación de los robots no ha sido desvelada en cuanto al ahorro, pero si se puede observar el resultado final (Fig.115b).

Fig. 115. Representación realista de la construcción de paneles de doble curvatura mediante robots. Coop Himmelblau.

Parece que hasta ahora, los robots pueden hacerlo todo, pero desafortunadamente no es así, ya existen varias desventajas, tales como que los robots no son fáciles de manejar debido a su cinemática. Esta es la razón por la que industrias como la automotriz, los aplica para realizar tareas repetitivas y simples, sin la necesidad de programar para cada pieza que se fabrica. Los robots también requieren de ergonomías y especificaciones muy particulares que pueden ser peligrosos para los operarios. Tanto es así, que los fabricantes proporcionan cursos muy especializados para los procedimientos de seguridad y salud a las personas que están a cargo de la máquina. No obstante, no se debe olvidar que es un sistema emergente en la industria de la construcción, que permite traducir la información de diseños

altamente complejos a diferentes sistemas de fabricación, y que seguramente en un futuro se podrá simplificar su manejo (Dunn, 2012).

Uno de los procesos innovadores fuera del ámbito de los robots es el *free-form metal inflation* (hinchado de metal de forma libre) (Fig. 116), que consiste en unir por los bordes dos láminas de metal mediante soldadura, para posteriormente insertar una válvula por la cual se inyecta aire, permitiendo que las placas se hinchen como si fueran unas almohadas. Es decir, que al inflar la pieza, la presión interna se incrementa, empujando el material hasta su límite elástico dentro de la fase de deformación plástica. Tal procedimiento está basado en las técnicas del hidroconformado. En ocasiones se tienen que realizar algunos cortes mediante láser para crear aberturas adicionales o para refinar la forma (Barkow, 2009). Hasta ahora se han realizado únicamente elementos ornamentales y prototipos de pequeños elementos, pero este proceso tiene mucho potencial por la sencillez del proceso y porque se pueden utilizar otros materiales para hinchar las piezas como aislamiento térmico o agua (Dunn, 2012). Esto permitiría que puedan ser colocados en el exterior, lo que sería muy apropiado para la solución a la problemática planteada en este documento.

Continuando con el metal y la soldadura, un grupo de investigadores del Instituto de Ciencia y Tecnología de Corea del Sur, está realizando grandes avances con un método híbrido denominado *3D Welding and milling* (Soldadura 3D y fresado), el cual usa un arco de gas de soldadura metálica como proceso aditivo y la fresadora como proceso sustractivo (Song, Park, Choi, & Jee, 2005). Con estos procesos mezclados se obtiene una calidad en los acabados de la superficie de las piezas, así como una gran precisión <0,5mm. Este método puede complementar al *free-form metal inflation* como un aporte al proceso de acabado.

Existen una gran cantidad de estudios relacionados con soluciones de paneles de formas complejas mediante moldes flexibles. Esto incluye enfoques tales, como el uso de telas como moldes para encofrado (Mark West & Ronnie Arya 2009), moldes neumáticos (Werner, 1986) o moldes flexibles para la prefabricación de paneles de hormigón (Raun et al. 2010).

Dentro de los proyectos de moldes para hormigón, existen dos que son los más utilizados. El primero, consiste en una densa cama de barras que son modificadas en altura, similar al *Multi-point Forming*. Estos elementos verticales se ajustan de acuerdo a la forma deseada, a la que se coloca en la parte superior una capa de un material flexible (Walczyk & Munro 2007) para posteriormente verter el material con el que se va a crear la pieza.

El segundo, es una investigación de la Universidad de Eindhoven, en colaboración con la Universidad de Delft, denominada "Kine-Mould", en la que mediante la combinación de varias barras separadas, las cuales son colocadas a la altura necesaria para que la plancha sea deformada (Fig. 117) mediante presión neumática. Se pueden obtener paneles de varios materiales, como por ejemplo de hormigón, cerámicos, o composites como el po-

Fig. 116. Escultura para IMM 2010 en la exhibición Architonic, diseñada por Oskar Zieta. Proyecto realizado por soldado/hinchado.

Fig. 117. Kine-Mould. Sistema de creación de paneles de formas complejas mediante la incorporación de unas barras móviles que se ajustan de acuerdo a las necesidades de producción (Schipper et al., 2015).

Fig. 118. Panel de forma libre de poliéster reforzado con fibras de vidrio.

Fig. 119. Prototipo para el ensayo de las propiedades de la cera como encofrado para elementos de hormigón (Oesterle, Vansteenkiste, & Mirjan, 2012).

Fig. 120. Paneles a partir de FRP, que pueden ser utilizados en la arquitectura como elementos estructurales de grandes dimensiones o paneles arquitectónicos para la envolvente.

liéster reforzado con fibras de vidrio (GRP)(Fig. 118) (Pronk, Rooy, & Schinkel, 2009). La cama de trabajo permite realizar paneles de 0,60m x 0,60m, los cuales pueden ser unidos posteriormente. (Pronk et al., 2009). Estos sistemas al ser reutilizables evitan la creación de desperdicio de material y por lo tanto menor coste.

Como se ha comprobado, hay un gran interés en el tratamiento de sistemas para paneles cementicios (Fig. 119), por lo que si se observa más profundamente, se puede advertir que existe un desarrollo intenso en la tecnología del hormigón, como por ejemplo el hormigón de ultra-alto rendimiento (UHPC), el hormigón autocompactante (SCC) o el hormigón con fibras de vidrio (GRC) (Grünewald, Schipper, & Hordijk, 2016). Si a esto se le aúna el conocimiento de la reología de los materiales, da como resultado un buen uso del hormigón para elementos ligeros de formas complejas.

En el caso de Blonder y Grobman, han desarrollado un sistema a base de polímeros reforzados con fibras (FRP), y consiste básicamente en colgar una membrana textil (fibra de vidrio tejida o fibra de carbono) impregnada de resina, que a partir del curado y volcado de la pieza se obtiene la pieza deseada (Fig. 120). Dicho proceso trata de eliminar la necesidad del uso molde para la fabricación de elementos de geometrías complejas. Emplea un simulador informático para calcular el comportamiento de la tela bajo la carga gravitacional y los resultados son visualizados previamente, con lo cual pueden modificar la pieza textil antes de su ejecución, así como los anclajes o contrapesos que sean necesarios (Blonder & Grobman, 2015).

En resumen, se ha podido comprobar que existen los medios tecnológicos necesarios para fabricar los paneles de doble curvatura, gracias a los procesos sustractivos, de conformado, aditivos o heterogéneos.

Los procesos sustractivos, son los métodos más utilizados en la construcción, debido a la producción en masa de elementos convencionales y estandarizados. Estas tecnologías tienen una gran relevancia dentro de la fabricación de paneles de forma libre, gracias a la capacidad de crear formas complejas a partir de materiales típicos de la construcción (Naboni & Paoletti, 2015) como madera, metales, espumas. Sin embargo, el gasto de material y la generación de residuos es un punto a tener en cuenta, ya que no parece sensato fabricar una sola pieza de un bloque de material, si no aporta un valor añadido en hacerlo específicamente mediante dicho procedimiento sustractivo (Hauschild & Karzel, 2011).

Por otro lado, los procesos por conformado han demostrado que pueden aplicarse en la fabricación de paneles de forma libre muy ampliamente, no obstante, los precios de tales elementos suelen ser muy altos y algunos de estos métodos aún están en fase de investigación. Si bien es cierto que la industria automotriz y la naviera tienen los medios y la experiencia para realizar dichos paneles, es deseable que se pueda incorporar lo antes posible a la construcción de piezas de fachada de doble curvatura.

En el caso de los procesos aditivos, presentan una serie de ventajas frente a la fabricación tradicional, y lo más importante es la creación de elementos singulares o hechos a medida. Además, se pueden crear formas complejas y sofisticadas sin que tengan que repetirse en cada tirada para hacer rentable su producción. Actualmente esta tecnología se encuentra en una fase de despegue, la cual tiene un gran potencial de desarrollo en un futuro muy próximo.

El uso de los robots y los moldes flexibles están dando resultados muy positivos en cuanto a la fabricación de piezas de doble curvatura, pero como se puede apreciar en la información anteriormente analizada, se encuentran muchos de ellos en una fase de investigación, lo que puede resultar ambiguo su posible viabilidad a corto plazo.

Los métodos digitales hasta ahora presentados, han demostrado su capacidad para la creación de formas complejas, no obstante, cuando se requiere de un panel con un precio asequible y con una buena calidad de fabricación, se comprueba que no todos los procesos, ni todos los materiales son válidos. Si se parte de que en la mayoría de los casos se requiere de moldes, esto incrementa el tiempo y el precio de la pieza, y más aún, cuando se presupone que en muchos de los casos suelen ser elementos únicos.

3.3 Estado de la Investigación

Los paneles de forma libre para la envolvente opaca arquitectónica, creados a través de herramientas digitales, tienen un recorrido muy corto en la historia de la construcción, por lo que existen pocos ejemplos de sistemas industrializados mediante estos procesos aplicados a la arquitectura.

En esta sección se expone el Estado de la Investigación respecto al objetivo de la tesis, como se puede ver el capítulo 2.2.1. Especialmente aquellos documentos referidos en publicaciones científicas del *Journal Citation Reports* (JCR), publicaciones científicas indexadas, comunicaciones a congresos internacionales, libros, páginas web especializadas, tesis doctorales, centros de investigación nacionales y del extranjero, así como otro tipo de medios de divulgación de relevancia, como los artículos no indexados.

El orden con el cual se desarrolla el estado de la investigación dentro de cada tipo de publicación, sigue el mismo esquema que el Estado de la Técnica, comenzando con las herramientas digitales, geometría y optimización, para pasar posteriormente a los procesos sustractivos, de conformado, aditivos y métodos heterogéneos.

3.3.1 Publicaciones científicas indexadas en el JCR.

Los principales fundamentos respecto a la implementación de paneles de forma libre en la construcción, son la aplicación de programas informáticos y el análisis matemático que permiten la optimización de la producción de dichos elementos. El artículo "*Architectural Geometry*" de Pottman (Pottmann, Eigensatz, Vaxman, & Wallner, 2015), marca de manera contundente, la necesidad de descomponer las envolventes de formas complejas, en paneles producibles, otorgándoles un apropiado soporte y asegurándonos que el precio de tal proceso no sea excesivo. De acuerdo a Pottman, se puede conseguir la racionalización o "panelización" (Eigensatz et al., 2010) de la envolvente, en piezas más pequeñas y reproducibles mediante la aplicación de herramientas digitales de manera automática, o con la utilización de un algoritmo realizado específicamente para dicha función. Muestra el autor en este artículo, una recopilación de los métodos matemáticos más relevantes respecto a este tema, aunque con una cierta tendencia para avalar el desarrollo de algunas de sus propias investigaciones.

Pottman puntualiza en este artículo los métodos de segmentación más apropiados mediante paneles planos, como el triangular y las mallas cuadrículadas. Así como solucionar paneles de una curvatura mediante tiras desarrollables (Fig. 121) (M. Kilian et al., 2008). Estas últimas son muy utilizadas en los proyectos de Frank Gehry mediante el sistema CAD desarrollado por Ghery Technologies bajo el programa CATIA.

Fig. 121. Generación de tiras desarrollables definidos mediante mallas poligonales en todas las fases de estudio. En la imagen de la derecha se aprecian las tiras desarrollables con un plano tangente constante a lo largo de la curva.

También describe el curvado por plegado, desarrollado por Kilian y el mismo Pottman, para la aproximación de paneles de doble curvatura con una superficie suavizada. Puntualiza varias opciones como parches por superficies regladas, o las revestidas por arcos circulares. No obstante, hace mucho hincapié en la necesidad de minimizar los costes mediante la repetición de piezas idénticas en la medida de lo posible, y aplicar los sistemas de diseño propuestos en dicho artículo para solucionarlo.

Dentro de los procesos de manufactura digital existen varios artículos relacionados con el conformado de planchas metálicas, de los cuales hay dos muy relevantes sobre la tecnología multipunto escritos en el año 2002, que son: "*Multi-point forming of three-dimensional sheet metal and the control of the forming process*" (Z. Y. Cai & Li, 2002), y "*Multi-point forming technology for sheet metal*" (Z. Y. Cai & Li, 2002). En ambos documentos se explica el procedimiento de trabajo con el cual mediante unas matrices contrapuestas de puntos reconfigurables en altura, se pueden deformar planchas metálicas, obteniendo superficies de forma libre. Al ser un proceso automatizado con una máquina CNC, se pueden reducir los costes de producción, ya que los tiempos se acortan sustancialmente.

Li en el año 1999, ya había redactado un artículo sobre el *Multi-point forming* con todos los avances de su investigación (Li, Liu, Su, & Li, 1999), pero no fue hasta 2002 que los resultados se hicieron evidentes con la fabricación de algunas piezas metálicas. No obstante, existen algunos inconvenientes en esta tecnología, como la calidad del acabado de la plancha metálica, que al ser sometida a presión de varios puntos, ya que la superficie suele terminar con varias deformaciones (Fig. 122). Para dar solución a estos problemas, Li y Cai proponen utilizar una almohadilla elástica para aminorar la deformación puntual de los punzones. Por otro lado, también consideran la posibilidad de incorporar un elemento de retención perimetral, para con esto evitar desplazamientos incensarios y que se pueda ajustar en la máquina perfectamente la hoja a deformar.

Naceur incorpora el agua como elemento de presión para evitar que la placa metálica quede marcada y lo expone en su artículo "*Finite Element and Experimental Investigation of the Mul-*

Fig. 122. Las deformaciones en la chapa metálica mediante el uso de MPF son evidentes en la imagen superior, en donde se analizan de antemano los puntos de incidencia y deformación. Para evitar tales incidencias, Li y Cai proponen la incorporación de la almohadilla plástica para eliminarlas como se aprecia en las dos figuras de abajo.

Fig. 123. Incremental forming de una plancha de aluminio en una máquina CNC.

Fig. 124. Formas que demuestran el potencial del Incremental forming en cuanto a prototipos y ensayos.

tipoint Flexible Hydroforming", en el cual describe la utilización del *multi-point forming*, pero con la incorporación del hidroconformado (Naceur & Hedi, 2013), que permite menos imperfecciones de la plancha metálica, ya que utiliza una sola cama de punzones en la parte inferior y el agua en la parte superior como energía para producir la deformación.

Para el método *Incremental Sheet Forming*, hay dos artículos que resumen el potencial de dicho proceso. El primero es el de "*Fundamental Studies on the incremental sheet forming technique*" (Park & Kim, 2003), donde se hace una descripción del método, los ángulos límite de aplicación. Además exhibe la fabricación de varias piezas con formas complejas y concluyen los autores que esta técnica es muy ventajosa especialmente en el conformado positivo en comparación con los métodos tradicionales, pudiendo conformar piezas con geometrías complejas (Fig. 123). No obstante, el conformado en negativo y las esquinas no se logran de manera efectiva y con calidad aceptable debido a la configuración propia del proceso mediante un punzón giratorio. Sin embargo en el artículo "*Asymmetric Single Point Forming Incremental Forming of Sheet Metal*" (Jeswiet, Micari, Bramley, Dufloy, & Allwood, 2005), los autores proponen la incorporación de otras tecnologías al proceso, como las fresadoras CNC, robots, etc., con el objetivo de tener más ejes de trabajo y así mejorar el rendimiento del proceso (Fig. 124).

El *Incremental Sheet Forming* se encuentra actualmente en fase de comercialización, pero no ha alcanzado su máximo desarrollo, ya que hay ciertos ángulos y conformados negativos que no logra hacer con la suficiente precisión a pesar de la hibridación del proceso. No obstante es una tecnología prometedora a mediano plazo en la industria de la construcción, ya que como bien dicen Jeswiet, et al., uno de los principales beneficios de esta técnica es que se pueden ejecutar paneles de metal de distintas formas y curvaturas en pequeñas series, sin incremento en los costes y el tiempo (Jeswiet et al., 2005).

Continuando con el conformado metálico, existe un método innovador denominado *Flexible Roll Bending*, que al igual que los dos anteriores, puede ser aplicable a la fabricación de paneles de formas complejas. El artículo donde se describe dicha tecnología es: "*Three-dimensional sheet metal continuous forming process based on flexible roll bending: Principle and experiments*" (Z.-Y. Cai, Li, & Lan, 2012). El método consta de unos rollos metálicos flexibles, a través de los cuales pasa una plancha que se va deformando debido a la presión que ejercen dichos rollos (Fig. 125). Existe la posibilidad de realizar curvados de planchas metálicas en una dirección o en dos. En el artículo se puede ver con detalle el proceso y algunos ejemplos ejecutados, así como en el capítulo 3.2.2.2 de este documento.

Dentro de los procesos de manufactura sustractiva existen muchos artículos relacionados con el corte láser, el corte por chorro de agua, corte por hilo caliente, las fresadoras CNC, entre otros (Lasemi, Xue, & Gu, 2010), (Song, Park, Choi, & Jee, 2005), (Mueller et al., 2015), (Aigner & Brell-cokcan, 2009), (Brooks, 2010), pero quiero hacer hincapié en el artículo "*Embodied Prototyping: Ex-*

a. Principle sketch of the forming set up (front view)

b. 3D view of continuous forming

Fig. 125. Conformado continuo de una plancha metálica mediante el sistema de doblado por tres rollos flexibles.

ploration of a Design-Fabrication Framework for Large-scale Model Manufacturing" (Sass, Chen, & Sung, 2016), en el cual Larry Sass (director del *Design Fabrication Group* del MIT) propone un sistema para crear modelos a gran escala denominado *Scalable Planar Structures* (SPS). Este consiste en piezas 2D ensambladas para crear elementos en 3D (Fig. 126). Este sistema minimiza el modelado CAD en 3D, así como facilita la interacción con las máquinas de fabricación digital más sencillas como una cortadora láser o una fresadora CNC de dos ejes. Una opción muy acertada para la creación de piezas tridimensionales a partir de elementos planos sencillos que mediante el ensamblaje y machihembrado se consiguen volúmenes que posteriormente podrían ser recubiertos con otros materiales para poder ser expuestos a agentes climáticos.

Larry Sass y su equipo publicaron en el año 2005 un artículo denominado "*Design production: constructing freeform designs with rapid prototyping*" (Sass, Shea, & Powell, 2005), en el cual hacen un experimento con varias piezas impresas en 3D para construir un modelo de forma libre en un día. Dicho modelo está a escala 1:12, pero, aportan las pautas necesarias para realizar el mismo modelo a escala real con ensamblajes metálicos impresos en 3D y paneles de vidrio. En el 2006 publican "*Materializing design: the implications of rapid prototyping in digital design*" (Sass & Oxman, 2006) en el cual analizan las ventajas de la fabricación digital y la incorporación de sistemas de construcción tridimensionales. Hablan del prototipado rápido, y del estudio de pequeñas maquetas realizadas principalmente con impresoras 3D y cortadoras láser, para formalizar métodos de fabricación que puedan ser escalables y de esta manera poder construir elementos para la arquitectura a escala real como "*The Instant House*" o "*Kit House*". Este investigador y su equipo se acercan mucho a la fabricación digital para dar soluciones fácilmente trasladables a la industria de la construcción, de ahí su importancia y preciso entendimiento.

La manufactura aditiva es un campo que está en auge y existen muchos artículos referidos a tal tecnología. No obstante, para su aplicación en la construcción el número de publicaciones se reduce considerablemente. Uno de los más relevantes publicado en 2016 es "*A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry*" (Wu, Wang, & Wang, 2016), en el cual los autores desarrollan cinco tipos de procesos de impresión 3D que consideran aplicables a la construcción, como la estereolitografía (SLA), el modelado por deposición fundida (FDM o FFF), la impresión por inyección de polvo (IPP), el sinterizado selectivo por láser (SLS) y el *Contour Crafting* (CC). Realizan un estudio pormenorizado de cada tecnología con los pros y los contras, así como un cuadro comparativo de los precios de fabricación, su precisión en el acabado y los materiales de impresión apropiados. Mientras que el SLS puede ser utilizado para imprimir objetos en metal, el CC puede usarse para imprimir productos de hormigón y cerámicos. Wu, Wang y Wang afirman que los distintos procesos tienen varios beneficios en común como la reducción del gasto de material, la flexibilidad en el diseño y la reducción de la mano de obra. También concluyen que el uso de la impresión 3D en la industria de la construcción depende considerable-

Fig. 126. Modelo 3D de un pato desarrollado a partir de piezas planas ensambladas entre sí.

mente de la precisión de los objetos impresos, la disponibilidad de los materiales, el coste del proceso y el tiempo de impresión. La impresión 3D está aún en su infancia, y hay muchas cosas por resolver, como la calidad de los acabados, la interoperabilidad entre el diseñador y quien lo fabrica, la escalabilidad de las máquinas y el ciclo de vida de los objetos impresos.

Todos estos procesos están en muchos casos en fase de investigación y desarrollo, como se puede ver en los artículos "*Advances in three dimensional printing – state of the art and future*" (Dimitrov, Schreve, & Beer, 2006) y "*3-D printing: The new industrial revolution*" (Berman, 2012). En este último se plantean nuevas formas de emplear la impresión 3D desde una perspectiva distinta, ya que comentan que se puede reciclar entre el 95% y el 98% del material. Además, afirman que la impresión 3D en plástico es económicamente rentable y competitiva en la producción de series entre 50 y 5.000 piezas, debido a que se requieren de tecnologías que permiten la fabricación de piezas con diseños complejos, ya sea de pequeñas o grandes dimensiones para solucionar dicha demanda.

En el caso de la manufactura aditiva a gran escala con impresión de hormigón o materiales cerámicos, Pegna fue el primero en sugerir el uso de materiales cementicios con dicha tecnología (Pegna, 1997). Posteriormente se desarrollaron varios procesos en base a dicha propuesta, como son, el *Contour Crafting* (Khoshnevis, 2004), (Khoshnevis, Hwang, Yao, & Yeh, 2006), (Zhang & Khoshnevis, 2013), el *D-Shape* y el *Concrete Printing* (Le et al., 2011), (Malaeb et al., 2015). Tales procesos se desarrollan de manera detallada en el artículo "*Developments in construction-scale additive manufacturing processes*" (Lim et al., 2012), en el cual se realiza una descripción de cada uno de los procesos, además de realizar un análisis comparativo, con detalles como los tipos de materiales, diámetros del extrusor, altura de capa, propiedades mecánicas, tamaño máximo de impresión, entre otros, de cada tecnología (Anexo 2.5). El sistema *Concrete Printing* es el que más puntos positivos tiene en dicha comparativa, pero el autor tiene una clara tendencia hacia dicha tecnología, ya que el Dr. Buswell es director del proyecto *Freeform Construction* de la Universidad de Loughborough, quienes han desarrollado dicho método y participan en el artículo.

El Dr. Buswell interviene nuevamente en 2007 y 2008 en dos artículos relacionados con los procesos aditivos a gran escala, que son el "*Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction*" (Buswell, Soar, Gibb, & Thorpe, 2007) y el "*Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction*" (Buswell, Thorpe, Soar, & Gibb, 2008). En ambos documentos hace referencia a que la manufactura aditiva (AM) es una tecnología emergente, que tiene el potencial de crear componentes constructivos a escala real, tales como paneles o paredes sin la necesidad de moldes, y con diseños de forma libre. También recalca que el desarrollo de los materiales aplicados juega un papel muy importante en el avance de dicha tecnología, como se puede ver en la impresión de metal, de fibra de carbono y de otros materiales híbridos que hay en el mercado hoy en día.

El tipo de material utilizado también marca una diferencia a tener en cuenta, ya que la resistencia del hormigón que se extruye no es el mismo que el realizado en una tolva o en una fábrica de hormigones. Por esta razón, se están desarrollando investigaciones al respecto como *"Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders"* (Fig. 127) (Gosselin et al., 2016).

En el artículo *"Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction"* (Buswell et al., 2007), declaran que la factibilidad del *Concrete Printing*, independientemente de los factores humanos, pasa por ser competitivo en precio, tiempo y por el valor añadido. No obstante, dicha tecnología se evaluó mediante la construcción de un muro y se concluyó que, con los medios con los que cuentan actualmente, el precio resulta excesivamente caro, comparado con otro muro elaborado por métodos tradicionales, especialmente por los materiales que deben utilizarse para el proceso de impresión. El tiempo de ejecución es similar entre el producto impreso por AM y el ejecutado de manera artesanal. Finalmente el valor añadido de la impresión 3D es la posibilidad de realizar elementos de formas complejas y únicas, sin incremento de precio, ni uso de moldes.

El último artículo que ha presentado el Dr. Buswell con el Dr. Lim, es el *"Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction components"* (Lim et al., 2016), en el que proponen que para mejorar la impresión en hormigón, se puede hacer uso del método de impresión delta o mediante impresión por capas curvadas, evitando de esta manera que la calidad de la pieza impresa se vea mermada por el efecto escalonado de las capas (al menos en un sentido de la curva) (Fig. 128). Además, de que con este procedimiento el número de capas necesarias es menor que con un sistema cartesiano, lo que conlleva una reducción de tiempo y de costes. Este esquema de trabajo lo desarrolló bajo el *script* de un *plugin* de Rhinoceros, que en lugar de trabajar directamente con un G-Code, se extraen las coordenadas y se genera el patrón de impresión, se salvan en un archivo de texto y se incorporan directamente al Grasshopper, desde el cual se modifica el sistema de impresión en 2D para poder incorporar la impresión real en 3D.

Existen dos artículos de gran relevancia para la tesis, que describen la producción de paneles de forma libre en GRC (*Glass-Fiber Reinforced Concrete*), que son: *"An innovative approach to for tomorrow's architectural buildings envelopes with complex geometries"* (Henriksen, Lo, & Knaack, 2015), y *"A new method to advance complex geometry thinwalled glass fibre reinforced concrete elements"* (Henriksen, Lo, & Knaack, 2016). En ambos artículos se explican los diferentes tipos de elementos de fachada más comunes realizados en GRC y la posibilidad de ejecutar paneles de forma libre con este material. En el primer artículo, desarrollan un cuadro comparativo entre superficies planas, de curvatura sencilla, de doble curvatura o de forma libre con ejemplos construidos con paneles de GRC. Realizan un análisis del problema que tienen los paneles de borde, ya que en la mayoría de las veces queda el canto visto. Por lo que Henriksen, Lo y Knaack proponen un sistema de paneles finos para fachada

Fig. 127. Muro impreso en 3D en hormigón de altas prestaciones. Desde la concepción en CAD hasta la fabricación mediante *Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete*.

Fig. 128. Comparación de patrones de impresión entre capas planas y el patrón de capas curvadas sobre el diseño de un panel sándwich de doble curvatura.

con GRC, utilizando un sistema de molde flexible mediante barras ajustables (Fig. 129), evitando el fresado de distintos moldes, haciendo a este proceso más rentable, según los autores.

En el segundo artículo, *"A new method to advance complex geometry thinwalled glass fibre reinforced concrete elements"* (Henriksen, Lo, & Knaack, 2016), hacen un análisis económico estimativo, sin desarrollo de conceptos, aseverando que el precio por m² de este tipo de panel ronda los 250,00€, lo que es un 50% menos respecto a un panel realizado con molde. Este nuevo acercamiento para realizar paneles de forma libre mediante una mesa flexible, crea una nueva oportunidad para la producción de una gran gama de elementos de geometrías complejas realizados en GRC. Desafortunadamente, este tipo de mesa reconfigurable no puede crear cualquier tipo de forma, como por ejemplo una pirámide, o un prisma trapezoidal. También están limitados por las dimensiones de la mesa, ya que no pueden realizar piezas más grandes y con ángulos y/o aristas rectos. Lo más importante es que la producción se ve restringida por la ocupación de la cama por lo menos durante 24 hrs., hasta que el panel haya alcanzado el primer curado, lo que desacelera el proceso.

Fig. 129. Prueba del panel de GRC en un proceso de pre-mezclado en una mesa flexible, la cual se ha colocado con una forma libre.

3.3.2 Publicaciones científicas no indexadas en el JCR.

En el año 2011, Bart van den Ende realizó un trabajo de Master el cual publicó en la Revista de la Universidad de Delft, denominado: *"Standard Principles: Double Curved Facades"* (Van den Ende, 2011). En dicho documento trata de solucionar la problemática de la fabricación de fachadas con doble curvatura mediante elementos habituales de la construcción, en lugar de proponer nuevos sistemas. Hace un análisis de las curvas de acuerdo al grado que tienen y así poder segmentarlas. También analiza una serie de edificios singulares, acristalados en su mayoría, con formas complejas o de doble curvatura, de acuerdo al material elegido, el tipo de malla, si los paneles son curvos o planos, las uniones y el sistema de fijación. Hace mucho hincapié en que los elementos planos son fáciles no solo para dibujarlos, sino para fabricarlos, por lo que propone una solución mediante nodos ajustables. Con esto permite utilizar componentes estandarizados y paneles planos. Van de Ende sugiere que tales piezas de unión podrían ser ejecutadas mediante impresión 3D en metal, ya que permite un mayor detalle en el diseño y en la posibilidad de generar piezas distintas, cada una con características especiales. A pesar de que actualmente es una tecnología relativamente costosa, el autor espera que con el tiempo bajen los precios y haya un desarrollo e investigación en materiales que permitan que su sistema sea una realidad.

En el MIT, Kenfield A. Griffith escribe un trabajo denominado *"Design Computing of Complex-Curved Geometry using Digital Fabrication Methods"* (Griffith, 2006) que propone el desarrollo de una serie de piezas estandarizadas mediante un algoritmo matemático que puedan ser apiladas como piezas de Lego para formar muros de formas libres (Fig. 130). Lo nombra *Complex-curved Wall System* (incluido en el grupo de Larry Sass), y también expone su creación mediante la manufactura aditiva como hizo Van de Ende, incorporando procesos como el *Contour Crafting*, que podría producir las piezas en masa, para posteriormente ser apiladas y reproducir la forma arquitectónica deseada.

Respecto a los métodos por conformado, el artículo *"Case Study of Mass Customization of Double-Curved Metal Façade Panels Using a New Hybrid Sheet Metal Processing Technique"* (G. Lee & Kim, 2012), es una investigación muy reseñable que desarrollaron un grupo de científicos de la Universidad de Corea del Sur, para el edificio del *Dongdaemun Design Park* (diseñado por Zaha Hadid). Consiste en un sistema híbrido entre el *multi-point forming* y el *stretch forming*, el cual consiste en colocar una plancha de metal para realizarle un estiramiento en dos sentidos, y posteriormente someterla a la presión de la cama multipunto (Fig. 131). Se hace referencia a esta tecnología en el capítulo 3.2.2.2. Los autores aseguran que con este sistema se ahorra un 90% del coste, en comparación con los métodos tradicionales. Además, de que el tiempo promedio de fabricación de cada panel se reduce de varias horas a 15 minutos por pieza. El precio de la máquina no se detalla, pero es de suponer que no se ha repercutido en el precio del panel que exponen.

Fig. 130. Modelo a escala de elementos arquitectónicos, impresos con la impresora Z-corp.

Fig. 131. Prototipos de la fachada del Dongdaemun Design Park en distintas etapas con sistemas reales de anclaje e instalación. Fotos de Gang Lee.

Siguiendo la línea de la manufactura aditiva, una serie de investigadores, los cuales encabeza Holger Strauß, con el artículo, "*The Potential of 3D printed parts for the building envelope*" (Strauß, Emmer Pfenninger Partner AG, & Knaack, 2016), desarrolla al hilo de su tesis doctoral *AM envelope* (Strauß, 2013), la incorporación de la fabricación aditiva en la industria de la construcción con elementos de pequeñas dimensiones, como es el caso de una pieza de unión entre perfiles para paneles de doble curvatura, denominado "*Nematox facade node*", la cual está realizada en metal mediante una impresora 3D y actualmente la empresa Kwaneer-Alcoa está desarrollando dicha pieza para su comercialización. Strauß en este artículo hace una revisión de los métodos aditivos actuales que pueden incorporarse en la fabricación de elementos arquitectónicos, como es el caso de la impresora VX4000 de Voxeljet, la KamerMaker en Amsterdam de DUS Architects o el *Contour Crafting* de Khoshnevis. Todas estas impresoras son de gran tamaño, con una capacidad de impresión que rondan entre los 8m³ y los 216 m³.

Fig. 132. Proceso de extrusión de la malla del proyecto MeshMould, mediante un robot UR5.

El autor aboga por la manufactura aditiva, ya que cree que ofrece la oportunidad de fabricar elementos de fachadas al momento, sin necesidad de producir grandes series de piezas por adelantado. También asegura que la AM nunca reemplazará los procesos de producción ya establecidos, sino que será un método complementario para facilitar la producción. Por lo que el uso de mano de obra especializada será necesaria en el sitio de ensamblaje o construcción, combinado con las herramientas de alta tecnología para conseguir los objetivos formales del diseñador. Estas dos últimas aseveraciones son las que le dan un valor significativo a su artículo ya que ve el futuro de una manera muy sensata.

MeshMould (Fig.132) nació como un proyecto de investigación dentro del *Future Cities Laboratory* (FCL), en el cual Norman Hack y Willi Lauer desarrollaron una malla mediante manufactura aditiva con un robot de brazo articulado tipo KUKA, para la creación de un entramado plástico al cual añadiéndole hormigón, crearía muros de geometrías complejas. Redactaron el artículo.

culo “*Mesh Mould: Robotic fabrication for non-standard concrete constructions*” (Hack & Lauer, 2014), en el cual se detalla que mediante la extrusión de un hilo de PLA de 2mm se va creando una malla con aperturas aproximadas de 30 mm x 20 mm x 20 mm. Posteriormente a esta malla se le añade un mortero de baja viscosidad para poder acceder a todos los huecos, así como un posterior vibrado a pocas revoluciones. Este sistema puede ser una solución para la construcción de muros de forma libre, no obstante, falta desarrollar más ampliamente el mortero utilizado, y el sistema de contención, ya que son temas sin resolver. El peso de cada unidad, las dimensiones y el curado son elementos a tener en cuenta y a los cuales no han hecho referencia los autores. Sin embargo, el artículo “*Iridescence Print: Robotically Printed Lightweight Mesh Structures*” (Helm et al., 2015) marca una tendencia hacia el desarrollo de las mallas únicamente, sin entrar en detalle de los materiales cementicios, haciendo hincapié en que esta técnica permite la producción de estructuras tridimensionales con geometrías complejas, que hacen un uso óptimo del material en el espacio. Lo que a mí respecta no hay un acercamiento real del sistema a la industria de la construcción, pero ya se verá con el tiempo si se sigue adelante con este planteamiento inicial.

Buscando dar una solución a los paneles arquitectónicos de formas libres, en el Instituto de Tecnología en Israel, han desarrollado un método muy original mediante textiles de FRP (*Fiber Reinforced Plastic*). El artículo, “*Design and fabrication with fibre-reinforced polymers in architecture: a case for complex geometry*” (Blonder & Grobman, 2015), plantea la eliminación del molde, utilizando una serie de membranas a base de polímeros reforzados con fibras, en las cuales cuelgan pesos y un sistema de cables para poder modificar la forma de la pieza.

De una manera similar, en el *Centre for Architectural Structures and Technology* (CAST), en Canadá, desarrollaron el *Thin-shell concrete from fabric molds* (West, 2009). Este proyecto sigue las premisas del anterior proyecto de I.T. de Israel, pero crea la forma de la pieza mediante un marco perimetral que sujeta una pieza de tejido, la cual se va deformando para conseguir la forma deseada y a la cual se le vierte posteriormente mortero o GRC, creando de esta manera elementos de formas complejas que una vez que han curado se pudo observar el resultado (Fig. 133). Tales piezas pueden ser utilizadas también como elementos estructurales, ya que pueden llevar refuerzos metálicos, y en el caso del GRC son autoportantes por las fibras que contiene el material. El principal objetivo de CAST es crear sistemas que de manera sencilla puedan reducir el consumo de material en la construcción, específicamente, con el uso mínimo de moldes entienden que han cumplido su cometido.

Dentro del grupo de investigación 4TU. *Federation* (<https://www.4tu.nl>), en el cual participan tres Universidades holandesas (Delft, Eindhoven y Twente), se ha creado un proyecto denominado: *Fluid Mold*, del cual surgen varios escritos como: “*Producing thermoplastic moulds for mass-production of non-repetitive double-curved concrete panels*” (Van Rijbroek, 2015). En dicho documento se desarrolla el sistema de barras regulables, similar al

Fig. 133 El GRC es vertido encima del tejido, haciendo que fleche por el peso del material añadido, que previamente ha sido simulado.

Fig. 134. Kine-mould desarrollado por la 4TU Federation.

que inició Arno Pronk en el año 2009 (Pronk, Rooy, & Schinkel, 2009), con el cual se pueden crear moldes flexibles. Otro proyecto dentro del mismo grupo de investigación llamado *Kine-Mold* (Fig.134), funciona con la colocación de las barras en la posición requerida de acuerdo a un programa informático de simulación, posteriormente se sitúa una lámina termoplástica, la cual es deformada mediante calor, para finalmente añadir el mortero. Este sistema puede llegar a ser una buena propuesta, pero tiene muchas cuestiones que resolver como el calentamiento de la lámina, el gasto excesivo de tiempo para ajustar las barras, la calidad de los bordes y los sistemas de contención, así como la resistencia de las barras durante la adecuación de la forma y como bien señalan sus autores, falta la automatización del proceso.

3.3.3 Centros de investigación, desarrollo e innovación.

En España existen varios centros de investigación que están muy centrados en el desarrollo de la manufactura aditiva aplicada a la construcción. Dentro del Programa Cien con fondos FEDER y el CDTi, se está llevando a cabo el proyecto 3DCONS (Vias y Construcciones, 2015), el cual consiste en la impresión 3D directa y la fabricación de elementos prefabricados "a la carta". Sobre todo está centrado en la aplicación de la envolvente arquitectónica y los elementos en vertical.

Fig. 135. MegaRob. Proyecto de robot de brazo articulado para la fabricación de elementos de la industria aeronáutica.

Otro Centro Tecnológico que está apostando por la impresión 3D es Aitiip (<http://www.aitiip.com>), el cual está llevando a cabo dos proyectos independientes. El primero es el "Megarob" (Fig. 135), que es un robot de brazo articulado que trabaja desde una estructura de grúa, con distintas funciones como láser, escáner, fresadora, etc. Por otro lado, Aitiip tiene la impresora FORTUS 900mc, de Stratasys (<http://www.stratasys.com>), la cual tiene una cama de impresión de 914 mm x 610 mm x 914 mm y trabaja por deposición fundida (FDM). En esta impresora se pueden construir elementos arquitectónicos de unas dimensiones razonables, pero actualmente no tienen ningún ejemplo fabricado relacionado con la industria de la construcción, aunque han comentado que se están planteando la fabricación de elementos de conexiones entre perfiles.

Fig. 136. Manual de Fabricación Aditiva editado por COTEC, 2011.

También desde la Fundación COTEC, se ha creado un documento denominado "Fabricación Aditiva" (Fig. 136) (COTEC, 2011), que engloba toda la tecnología relacionada con la AM, sus múltiples usos y aplicaciones, dentro de los cuales establece que existen perspectivas dentro de la industria de la construcción y hace alusión al *D-Shape* de Enrico Dini (Dini, 2009) como una tecnología viable para la fabricación de viviendas.

En el *Freeform Construction Group*, que lo dirige el Dr. Richard Buswell de la Universidad de Loughborough del Reino Unido, están estudiando sobre la impresión 3D de hormigón a gran escala, como se ha apreciado en artículos anteriores (Buswell et al., 2008), (Le et al., 2011), (Buswell, Soar, Gibb, & Thorpe, 2005), (Lim

et al., 2012), (Buswell et al., 2007), (Buswell, Soar, Gibb, & Thorpe, 2006), así como la investigación que realizó Hopkinson (Hopkinson & Dickens, 2003) respecto a un análisis de costes de la AM. Este último artículo del año 2003 explica que el coste de las máquinas de impresión 3D es bastante elevado por el momento, y concluye que en precio, la manufactura aditiva puede ser comparable con el moldeo por inyección. También señala que los materiales y los acabados impresos eran temas pendientes de mejora. A fecha de hoy los precios de las impresoras han bajado considerablemente (24% en diez años) de acuerdo al "Reporte Wohlers de 2016" (Wohlers, 2016), por lo que puede ser posible que esa comparación en precio se vaya modificando.

Otro centro Europeo que lleva varios años haciendo experimentaciones sobre la construcción de edificios de forma libre es el *Research Pavillion ICD/ITKE* del *Institute for Computational Design* de la Universidad de Stuttgart (<http://icd.uni-stuttgart.de/?cat=6>). Desde el 2010 hasta la actualidad, han creado 6 pabellones, cada uno con una solución constructiva distinta, que va desde la arquitectura biomórfica con paneles de madera contrachapada cortadas por un robot Kuka, como un encofrado neumático flexible al cual se va rigidizando gradualmente mediante el refuerzo con fibras de carbono en su interior (Fig. 137). Centran sus esfuerzos en la combinación de tecnologías digitales aplicadas a la construcción, pero sobre todo, creando formas complejas y demostrando las posibilidades de las tecnologías utilizadas.

En Londres, específicamente en la empresa Laing O'Rourke, el investigador James Gardiner, junto con Steven Janseen, han creado un sistema con el que crean moldes de cera de una manera rápida (400L/hr), y de una baja calidad, para que sirvan como matrices para elementos de mortero, GRC o cualquier material proyectable (Fig. 138) (Laing O'Rourke, 2017). Existen varios inconvenientes, el primero es el desperdicio de material, que aunque alegan que se puede reciclar el 95%, una vez que se usa la cera pierde una serie de propiedades, sobre todo de homogeneización, lo cual reduce su comportamiento en los siguientes moldeos (K. Lee, Blackburn, & Welch, 2015). Segundo, la cera al derretirse, se somete a un proceso de calentamiento el cual puede provocar desprendimientos del hormigón que aún está en fase de curado, no tanto por la temperatura que se alcanza, sino por la expansión que puede tener la cera (Sotomayor, Krupa, Várez, & Levenfeld, 2014). El precio de una máquina de impresión de cera es bastante alto para una impresora de sobremesa, que ronda entre los 25 a los 55 mil dólares americanos (<http://www.solid-scape.com>), sobre todo si se piensa que se requiere de una impresora de grandes dimensiones para la creación de paneles arquitectónicos, lo que supone que ese precio se incrementa excesivamente.

En Estados Unidos existen varios centros de investigación, como el *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) (<http://web.ornl.gov/sci/manufacturing>), que conjuntamente con el Departamento de Energía de EE.UU y la compañía Cincinnati Inc. (<http://www.e-ci.com/baam>), crearon la impresora BAAM (*Big Area Manufacturing*), la cual tiene un área de trabajo de 6040mm x 2280mm x 1828mm, y es capaz de imprimir un coche de tamaño

Fig. 137. Pabellón ICD/ITKE 2015-2016.

Fig. 138. Esquema del proceso de producción de moldes de cera para la creación de paneles de materiales cementicios proyectables.

real en aproximadamente 24 horas. Ahora están desarrollando una nueva impresora denominada BERTHA, que declaran que será más rápida, más económica y más eficiente que la anterior. Con esta tecnología han creado un pequeño pabellón, el cual además de estar impreso en 3D, integra sistemas de ahorro y acumulación de energía.

En la Universidad Berkley, en California, el grupo de Rael San Fratello, creó el proyecto *Bloom* y el *Picoroco Wall* (<http://www.rael-sanfratello.com/?p=1830>). La idea principal de este proyecto es crear mediante la impresión 3D de pequeñas piezas, elementos arquitectónicos de formas complejas (Fig. 106), que a su vez son autoportantes, en lugar de imprimir grandes piezas.

El *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), tiene varios grupos de investigación como el *Self-Assembly Lab* (<http://www.selfassemblylab.net>), donde se están creando materiales y elementos que a través de la transformación del material, pueden auto-enamblarse, ya sea al contacto con el agua, o con el aumento de temperatura. Este proyecto está pensado para utilizarse como piezas inteligentes para la arquitectura, la automoción y otras industrias. El *Design Fabrication Group* (<http://ddf.mit.edu/>) dirigido por el Dr. Larry Sass, maneja múltiples líneas de investigación, relacionadas con la creación y fabricación digital de elementos constructivos, especialmente de geometrías complejas como es el caso del "*Constructing Freeform Dessigns with Rapid Prototyping*" (Sass et al., 2005), "*Materializing design: The implications of rapid prototyping in digital design*" (Sass & Oxman, 2006) y "*Embodied prototyping: exploration of a design-fabrication framework for large-scale model manufacturing*" (Sass et al., 2016).

3.3.4 Tesis Doctorales.

Uno de los documentos que inspiraron parte de la presente investigación, es la tesis del Dr. Luis Alonso, titulada "*Sistema de Cerramiento Transparente de Alta Eficiencia Energética y Forma Libre (F2TE3)*" (Fig. 139) (Alonso, 2012). Dentro de sus conclusiones, uno de los puntos que me parecen más relevantes es cuando dice: "*A día de hoy, no existe ningún impedimento a nivel técnico o tecnológico para el diseño y fabricación de superficies de forma libre...*", ya que existen como bien rescata en su estado del arte, las tecnologías para la fabricación de dichos elementos, así como los programas informáticos de análisis sobre la racionalización y la panelización (Eigensatz et al., 2010).

Fig. 139. Axonometría explicativa del Sistema F2TE3. Alonso, 2012.

Hace alusión a la eliminación de moldes, como una manera de economizar su panel transparente, ya que utiliza el conformado mediante *Multipoint Forming*.

En cuanto a las tesis relacionadas con la geometría de las formas libres hay dos que resultan muy interesantes y son: "*Discrete Triangulated Meshes for Architectural design and Fabrication*" (Singh, 2011), y "*Design Exploration through Bidirectional Modeling of Constraints*" (A. Kilian, 2006). En la primera tesis se proponen soluciones estética y económicamente viables mediante el teselado suave de formas libres. Este teselado está formado por triángulos, a los cuales se les incorpora un algoritmo matemático, para tratar de racionalizar las formas curvas mediante el menor número de elementos distintos. No obstante, según declara Singh, si la curva es muy cerrada, tiene que resolverse con piezas especiales en el caso de que se quiera conservar la apariencia curva. En la segunda tesis, Kilian muestra un sistema de panelización mediante tiras desarrollables. Este método permite que los paneles puedan crearse con sólo una curvatura, lo que ayuda a ser fabricados más fácilmente que aquellos que tienen dos curvaturas. Este sistema se resuelve mediante algoritmos genéticos o genómicos dentro de una plataforma de simulación paramétrica, dando como resultado varias soluciones, de las cuales se pueden elegir las más adecuadas a la forma o al número de tipos de paneles creados.

El estudio de Frank Gehry es uno de los precursores de la arquitectura contemporánea y ha realizado grandes avances en la informática para la creación de elementos complejos. D. Sheldon, es un colaborador de dicho estudio, que plasma en su tesis "*Digital Surface Representation and the Constructibility of Gehry's Architecture*" (Shelden, 2002) la forma en la que se trabaja en el estudio de este reconocido arquitecto canadiense. Desde la concepción del proyecto, las maquetas, el uso de la ingeniería inversa, así como la adaptación de la forma en el ordenador, hasta llegar a la producción de las piezas. La relevancia de esta tesis radica en las soluciones de las formas complejas mediante la racionalización, ya que permite que se pueda conseguir la geometría adecuada, así como mantener dentro de unos márgenes los presupuestos estimados. Aunque cabe hacer un alto en este punto, ya que el gasto por metro cuadrado de un edificio singular de Gehry no es comparable a una construcción convencional. Hace alusión a la necesidad de mantener siempre los costes controlados, mediante la optimización de los paneles, el material y el proceso a utilizar. Este documento es una referencia muy útil, pero tiene que ser extrapolada y adaptada a los requerimientos de cada proyecto y los medios con los que se cuenta.

Dentro de la Escuela de Arquitectura de la UPM se ha presentado una tesis llamada "*Diseño para Fabricación Digital: Definición unívoca entre formas y fabricación en arquitectura*" (García del Valle, 2015), en la cual se hace patente la inquietud de los arquitectos para ser partícipes de la evolución tecnológica y digital de la industria de la construcción. Hace una exposición muy detallada de los sistemas de fabricación digital en todas las áreas, y plantea un protocolo específico para cada proyecto, para

asegurar una comunicación eficiente entre el diseño y la fabricación, permitiendo reducir los costes y los tiempos. El proceso propuesto requiere de una persona especializada que pueda establecer los criterios geométricos para generar la forma y la optimización, así como la elección de los materiales y los sistemas de fabricación digital apropiados. Todo esto basado en un entorno multi-paramétrico enfocado en la fabricación digital. Con lo cual, dicha tesis es un punto de referencia en cuanto a las tecnologías digitales, y exportando dichos conocimientos a cómo puede ser aplicable a los paneles de forma libre para la envolvente arquitectónica.

Dentro del tema de fabricación aditiva la tesis "*Exploring the Emerging Design Territory of Construction 3D Printing perspectives*" (Gardiner, 2011), se presenta la aplicación de la impresión 3D a gran escala para la fabricación *off-site* de elementos de construcción. Propone el autor utilizar sistemas similares al *D-Shape*, ya que bajo su criterio, es la tecnología que más desarrollada está en la industria de la construcción de manufactura aditiva. La contribución más significativa, es el análisis de los factores que hace a la impresión 3D tan compleja, así como su comparación con la construcción tradicional. Hace una exposición de tres construcciones distintas la *Freefab*, la *Villa Roccia* y *(in)human habitat*, en las que explora diferentes temas alrededor del tema central, que es la fabricación mediante técnicas de impresión 3D, encontrando una brecha entre la teoría y la práctica, pero asegura que en pocos años se podrán solucionar.

Fig. 140. Nodo de Perfilera de aluminio Nematox II, impresa en 3D mediante ConceptLaser system EOS® FKM Sintertechnik GmbH.

Finalmente, la tesis "*AM Envelope. The potential of Additive Manufacturing for facade construction*" (Strauß, 2013), habla de una manera más específica sobre elementos de la fachada que pueden ser fabricados mediante métodos de fabricación aditiva (AM). Su trabajo se centra en los elementos de unión entre perfileras para fachadas complejas, que requieren de elementos singulares. Fabrica varios prototipos de nodos a escala 1:1 en aluminio, ABS y acero inoxidable, convirtiendo al *Nematox Node* (Fig. 140), en la primera pieza de unión para fachada impresa en 3D a escala real. Es una propuesta muy prometedora y da un paso adelante hacia el cambio en los métodos de diseño y construcción de las fachadas en general.

3.3.5 Libros y comunicaciones a congresos.

En esta sección citaré primeramente los libros, para reseñar posteriormente las comunicaciones a congresos, continuando con el orden establecido previamente.

Fig. 141. Portada del libro "Architectural Geometry" (Pottmann et al., 2007).

"*Architectural Geometry*" (Fig. 141) (Pottmann, Asperl, Hofer, & Kilian, 2007), es un libro de referencia muy completo, ya que hace una selección de conceptos geométricos básicos hasta llegar a las operaciones Boleanas, las Curvas de Bezier y las *Splines*. Explican las funciones y fórmulas para obtener las superficies desarrollables que trazan una conexión directa con las prestaciones estructurales y los requisitos de manufactura. También exponen temas avanzados respecto a la optimización y discretización de formas y superficies de geometrías complejas, mediante ma-

llas con elementos planos triangulares o cuadrados, así como la posibilidad de realizar la segmentación mediante elementos curvos. Los autores son investigadores de primer nivel, ya que, tanto Pottman como Kilian han desarrollado grandes avances en el tema matemático-geométrico para solucionar las superficies de forma libre mediante paneles que permitan la optimización de las superficies y por lo tanto, se pueda economizar en esta partida presupuestaria. Incluyen estudios de otros autores como es el caso del algoritmo de Eigensatz (Eigensatz et al., 2010).

En cuanto a los procesos digitales, hay tres libros notables, ya que están centrados únicamente en la industria de la construcción y hacen referencia a varios edificios singulares con grades retos constructivos. El primero es *"Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing"* (Fig. 142) (Kolarevic, 2003), el cual nace a partir de un Simposio Internacional en la Universidad de Pensilvania en 2002, en el cual Kolarovic realiza un estado de la técnica de los procesos digitales aplicados en la arquitectura y añade posteriormente la filosofía de cada participante respecto al tema principal. La importancia de este libro no sólo radica en la explicación del estado actual de la tecnología, sino en cómo realizar la incorporación de los nuevos procesos tecnológicos a la construcción tradicional. Hace alusión a varias de las tecnologías que se utilizan en la fabricación de barcos y de aviones, ya que bajo su punto de vista, tales vehículos son comparables en escala y prestaciones con la construcción de edificios. Concluye que los procesos digitales ya existen, solo hay que incorporarlos a la construcción. Muestra varios ejemplos conocidos de obras de Gehry, Franken, Cache, entre otros, y hace hincapié sobre todo en los edificios *"blob"* o de forma libre, en las soluciones del panelizado, así como los distintos procesos y materiales que se han utilizado. Es uno de los primeros libros que tiene una recopilación completa de todos los elementos más importantes relacionados con la arquitectura de forma libre, desde su concepción, pasando por la discretización geométrica y formal para terminar con la fabricación digital de los elementos y la posibilidad real de producirlos.

El siguiente libro es un monográfico de Birkhäuser denominado *"Digital Processes: Planning, Design, Production"* (Fig. 143) (Hauschild & Karzel, 2011), en el cual Hauschild y Karzel hacen un despliegue exhaustivo, desde los programas informáticos, las tecnologías periféricas (GPS, escáneres, etc.), y finalmente los procesos de manufactura digital. Todo ello no está dirigido a la fabricación de elementos de formas complejas, sino todo lo relacionado a la producción digital dentro de la industria de la construcción. Hacen una separación entre sistemas generativos (aditivos), sustractivos, de conformado y de unión (soldadura), aunque como bien indican, éste último está en una fase inicial de automatización y desarrollo, por lo que no se muestran muchos ejemplos. Las contribuciones más importantes son los cuadros comparativos (Anexos 2.2, 2.3 y 2.4) de casi todos los procesos existentes en el mercado y relacionan temas como calidad del producto terminado, tiempo de fabricación, tamaños máximos, precisión, etc. También analizan siete construcciones realizadas con tecnologías digitales y aportan las soluciones a las que se llegaron, no sólo desde el punto de vista de la manu-

Fig. 142. Portada del libro *"Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing"* (Kolarovic, 2003).

Fig. 143. Portada del libro *Digital Processes: Planning, Design, Production* (Hauschild & Karzel, 2011).

Fig. 144. Portada del libro "Digital Fabrication in architecture" (Dunn, 2012).

factura, sino también del proceso de diseño, cálculo estructural, simulaciones acústicas, de incendios, iluminación, etc.

El libro de Nick Dunn, denominado "*Digital Fabrication in architecture*" (Fig. 144) (Dunn, 2012) se divide en tres partes, que son *Generation*, *Integration* y *Strategies*. En la sección de *Generation*, integra los programas CAD, el uso de las NURBS, las mallas, la parametrización, la morfogénesis y la posibilidad de incluir algoritmos para modificar las formas arquitectónicas. En la sección de *Integration*, explica las tecnologías digitales más utilizadas como el corte láser, las fresadoras, el prototipado rápido, el escaneo 3D y el uso de robots. Y como punto apreciable es el tercer capítulo de *Strategies*, ya que hace referencia a técnicas de fabricación desde otro punto de vista, como el contorneado, doblado, conformado, seccionado y embaldosado. Este tipo de selección de procesos también se explica en el libro de "*Digital fabrication in Architecture, Engineering and Construction*" (Caneparo, 2014), en el cual hacen un repaso más técnico a todas los métodos digitales existentes, no sólo para la arquitectura, sino también para la ingeniería en general.

Fig. 145. Portada del libro "Rapids" (Knaack et al., 2010).

"*Rapids*" (Fig. 145) (Knaack, Klein, & Bilow, 2010), es un texto especializado en la manufactura aditiva, que expone todos los sistemas existentes en la actualidad. Hacen una selección de los sistemas que están relacionados con la arquitectura, como el *D-Shape* o el *Contour Crafting*, y finalizan el libro con unas propuestas de lo que en un futuro podría ser la construcción gracias a la automatización de los procesos y a la aplicación de métodos aditivos. Es un libro muy enfocado a la construcción y sobre todo a la impresión a gran escala de hormigón, que ayuda a establecer un marco de referencia de dichas tecnologías.

Wohlers Report (Wohlers, 2016) es un documento anual, en el cual se hace un análisis del estado actual, tendencias y previsiones del mundo de la impresión 3D. Para el interés de esta tesis, en el año 2016 se estableció un incremento del 8,8% en la aplicación de esta tecnología a la construcción, con unas previsiones a 10 años del 15-22% de crecimiento, sobre todo aplicado a elementos de geometrías complejas.

Finalmente, para entender las bases de la automatización, pero sobre todo de la industrialización de paneles y su aplicabilidad en la envolvente arquitectónica, los dos tomos de "*La industrialización de la edificación de viviendas. Tomo 1: Sistemas y Tomo 2: Componentes*" (Del Águila, 2006a) (Del Águila, 2006b), del Dr. Del Águila son importantes para la tesis, sobre todo por la metodología experimental que explicaré en capítulos posteriores.

En cuanto a los congresos, resumiré de igual manera las comunicaciones, comenzando por la geometría, los procesos digitales y otros.

SIGGRAPH es el *International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques*, que se desarrolla anualmente en distintas ciudades del mundo. En 2008 M. Kilian presentó "*Curved Folding*" (M. Kilian et al., 2008), en el cual expuso la posibilidad de desarrollar piezas de forma libre mediante

elementos doblados, con un algoritmo basado en las superficies desarrollables, que anteriormente ya había mostrado (A. Kilian, 2001). Se muestra, como a partir de una hoja de papel se puede realizar un esquema tipo *origami*, con el cual se pueden conseguir superficies de formas complejas únicamente haciendo dobleces. (Fig. 146).

En 2010 se presentaron dos comunicaciones al SIGGRAPH muy importantes, como es el "*Paneling Architectural Freeform Surfaces*" (Eigensatz et al., 2010) y el "*Triangle surfaces with discrete equivalence classes*" (Singh & Schaefer, 2010). En el primero, Eigensatz, et al, desarrollaron un algoritmo con el cual se puede optimizar la segmentación de las envolventes de forma libre, mediante la utilización de unos pocos tipos de paneles (plano, cilíndrico, paraboloide, toroide, cúbico y personalizado) para economizar su producción. Este documento es una de las investigaciones más importantes referentes a la segmentación de fachadas con geometrías complejas. En el caso de la comunicación de Singh y Schaefer, tratan de realizar la optimización de piezas de geometría compleja, pero desarrollándola únicamente con piezas triangulares planas, de manera que cuanto más se seccione y se diversifiquen los triángulos, más se asemejará a la figura original. El máximo objetivo que se quiere conseguir, es un precio bajo y una aproximación a la forma curva.

Advances in Architectural Geometry, es el Simposio más significativo en su rama y se celebra anualmente. En 2010, Eigensatz y otros compañeros presentaron "*Case Studies in Cost-Optimized Paneling of Architectural Freeform Surfaces*" (Fig. 147) (Eigensatz, Deuss, et al., 2010), en el cual se desarrolla el algoritmo del anterior comunicado "*Paneling Architectural Freeform Surfaces*" (Eigensatz et al., 2010), pero con tres casos de estudio (Pabellones de la Torre Eiffel, la Torre Lissajous y la Librería Skipper), demostrando la panelización de superficies arquitectónicas de forma libre, con un ahorro en los costes de producción y preservando la calidad original de la forma.

La comunicación "*Geometry of Architectural Freeform Structures*" (Pottmann, Schiftner, & Wallner, 2008) publicada en el *Internationale Mathematische Nachrichten* de 2008, es un artículo que hace referencia a la necesidad de diseñar las envolventes de forma libre en base a una estructura que se adapte a las necesidades del diseño. Con esta premisa, plantean la incorporación de mallas, las cuales funcionen como vigas de soporte, alineadas con los paneles que posteriormente cubrirán las superficies. También hacen un análisis de varios ejemplos de edificios contruidos mediante paneles de curvatura en una dirección, de las superficies con tiras desarrollables, así como de paneles reglados. El objetivo final es tratar de reducir los costes asociados a la fabricación de moldes, permitiendo que cuantos más paneles se repitan, más se podrá ahorrar en la fabricación de moldes complejos. Como se observa, tanto M. Eigensatz como H. Pottman abogan por utilizar la geometría al servicio de la optimización y reducción del número de paneles diferentes, lo que es un acierto ya que se acercan a la universalización de la forma compleja.

Fig. 146. Modelo de un automóvil y su desarrollo mediante doblado. La descomposición en superficies regladas se muestra mediante el esquema de color. La segmentación es necesaria hacerla mediante NURBS.

(a) Paneling solution with kink angle thresholds specified globally over the surface.

(b) Paneling solution with spatially adaptive kink angle thresholds.

Fig. 147. Diferentes propuestas de panelización con el algoritmo de Eigensatz.

Respecto al tema de procesos digitales, en numerosos congresos y simposios se está viendo un incremento en la presentación de dichos métodos e investigaciones, especialmente los que están relacionados con la fabricación aditiva, como es el caso de la comunicación "The potential of freeform construction processes" (Buswell et al., 2005), presentado en el IN: *Proceedings of the 16th International Symposium on Solid Freeform Fabrication*, y "The increasingly strong link between 3D modeling and automated manufacturing" (Capone, 2011), del IMProVe 2011 *International conference on Innovative Methods in Product Design*. Estas comunicaciones están orientadas sobre todo a mostrar el nuevo panorama de la impresión 3D, y su aplicación a la industria de la construcción, no especialmente de paneles de fachada, sino en general.

En el *International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials (HiPerMat)*, se presentó un artículo muy relevante denominado "Double-curved panels produced in a flexible mould with self-compacting fibre-reinforced concrete" (Fig. 148) (Grünwald, Schipper, & Hordijk, 2016), en el cual se detalla la experimentación que se ha llevado a cabo para crear paneles de GRC muy esbeltos

mediante un molde flexible, sin recurrir los fabricados mediante fresadoras CNC, con el consiguiente gasto de material, tiempo de elaboración y generación de residuos. Esta es una propuesta muy valorable por tratar de eliminar el uso de moldes, pero tiene por delante muchas mejoras como bien indican sus autores, relacionados con la resistencia mecánica, y que al igual que la propuesta de Henriksen, Lo y Knaack (Henriksen et al., 2015), no pueden desarrollar cualquier forma, sino algunas curvas con cierto grado de inclinación y la fabricación en serie aún está pendiente de desarrollo.

El *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)* es una palestra muy concurrida para la exposición de soluciones de paneles arquitectónicos de forma libre, como el trabajo que presentó en 2009 el Dr. Arno Pronk de la Universidad Tecnológica de Eindhoven, "*Double-curved surfaces using a membrane mould*" (Fig. 148) (Pronk et al., 2009), que al hilo de esta investigación presentó en el mismo congreso, pero del 2015, una comunicación denominada "*Flexible mould by the use of spring Steel mesh*" (Pronk, Seffinga, el Ghazi, & Schuijers, 2015) en la que mejoraba las condiciones del método de paneles por molde flexible. Otra comunicación presentada al IASS en 2015 fue "*Shear-deforming textile reinforced concrete for the construction of double-curved structures*" (Woodington, Bergsma, & Schipper, 2015) que muestra cómo el uso de textiles y su deformación, pueden servir como moldes para crear paneles de doble curvatura.

Continuando con los elementos de GRC, se encuentra el "*Concept to Realisation : GRC and Complex Facades*" (Bishop & Wilson, 2011) realizado para el *International Glassfibre Reinforced Concrete Association (GRCA) Congress* de 2011, que hace una recopilación de varios proyectos ya construidos con paneles de GRC con formas libres, así como los sistemas que se han utilizado para su fabricación, como el Complejo de Investigación del Petróleo, KAPSARC de Zaha Hadid, el *National Center for Popular Music* en Sheffield, Reino Unido, y el *China Academy of Fine Arts*. Realiza un análisis de las juntas entre paneles, así como de las prestaciones más relevantes del GRC, la posibilidad de ser producido en serie, la resistencia los rayos UV, la resistencia al impacto, a la abrasión, el mínimo peso e impacto en la estructura, el rendimiento térmico, entre otros.

La necesidad de dar solución a los paneles de forma libre es un tema recurrente como se puede ver en las siguientes comunicaciones que se han presentado:

- "*Zero Waste Free-Form Formwork*" (Oesterle, Vansteenkiste, & Mirjan, 2012) del *Second International Conference on Flexible Formwork*.
- "*Efficient material use through smart flexible formwork method*" (Schipper & Grunewald, 2014) presentado en el *ECO-Crete: International Symposium on Environmentally Friendly Concrete 2014*;
- "*Automated Planning and Design of Formwork for Freeform shell structures*" (Nassar & Aly, 2012) en el *Construction Research Congress. ASCE 2012. Construction Challenges in a Flat World*;

Fig. 148. Prototipo de paneles de doble curvatura con GRC en molde flexible.

Fig. 149. Prototipo de paneles realizados mediante Flexible Mould.

- *"Lightweight Prefabrication in Concrete Through Robotic Hot-Wire Cutting"* (Martins, Campos, Nunes, & Sousa, 2015) en el *Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe*. eCAADe 33;
- *"The GRP Shell Structures for The Rabin Center in Tel Aviv"* (Eekhout, 2006) en el *International Conference On Adaptable Building Structures 2006*.

Otro congreso relevante por las temáticas que se exponen en sus ponencias es el ACADIA (<http://acadia.org>), que se especializa en las geometrías paramétricas y los software de dibujo 3D. Se lleva a cabo anualmente en los EE.UU., y en dicho congreso se publicaron varios artículos relevantes como *"A New Parametric Design Tool for Robot Milling"* (Brell-Çokcan & Braumann, 2010), *"A Parametric Strategy for Freeform Glass Structures Using Quadrilateral Planar Facets"* (Glymph, Sheldon, Ceccato, & Mussel, 2002).

El ICAE (<http://icae.hei-tecnalia.com/es/index.html>), es un congreso internacional que se lleva a cabo cada cuatro años en la ciudad de San Sebastián, España, organizado por la empresa Tecnalia, en el cual se debaten materias relacionadas con las fachadas arquitectónicas. En la última convocatoria del 2015 se presentaron artículos como *"Free-form architectural envelopes: Digital processes opportunities of industrial production at a reasonable Price"* (Castañeda, Lauret, Lirola, & Ovando, 2015) (Anexo 1.1) o el *"Biomimicry in climate adaptive building skins: relevance of applying principles and strategies"* (Cadenas, Javier, & González, 2015), que se centran en la particularidad de las fachadas de geometrías complejas y la necesidad de darle solución a su generación y producción.

FACADES+ (<http://www.facadesplus.com>) es una organización de los EE.UU que coordina eventos por todo el país americano sobre las fachadas arquitectónicas, pero desde un ámbito de la investigación y las nuevas tendencias formales. Así como el ROB/ARCH (<http://www.robarch2016.org>), que es un congreso internacional que se lleva a cabo cada dos años y está organizado por la *International Association for Robots in Architecture*. Dicha entidad está integrando desde hace unos años varios procesos de manufactura aditiva a los brazos articulados, permitiendo la producción de elementos complejos como se ha demostrado en el proyecto *MeshMould* (Hack & Lauer, 2014).

3.3.6 Páginas Web.

Las páginas web que más aportan información relevante sobre el tema de la presente tesis, son en su mayoría sobre empresas que han realizado proyectos e investigaciones sobre la construcción de paneles opacos de forma libre para la envolvente arquitectónica.

La empresa Formtexx (<http://www.formtexx.com>) tiene un sistema de conformado de planchas metálicas, la cual guarda el proceso bajo secreto industrial (Gould, 2010) como se ha explicado en el punto 3.2.2.2. Todos los datos obtenidos han sido extraídos de la página web y no se han encontrado más datos

para contrastar o argumentar mejor este proceso.

De una manera similar, la empresa Zahner (<http://www.azahner.com>), fabrica paneles metálicos de doble curvatura con un sistema al que llamaron ZEPPS (Zanher Corporation & Predock, 2014). Este proceso fue desarrollado inicialmente para dar respuesta al proyecto del edificio del *Experience Music Project* en Seattle, EE.UU de Frank Gehry. Dicha empresa utiliza procesos digitales para curvar las piezas metálicas, pero no especifican el tipo de tecnología utilizada, ni tampoco el rango de precios, o los tiempos de ejecución, por lo que no es posible realizar una comparativa entre el sistema de Lee y Kim (G. Lee & Kim, 2012), con la de Zahner.

La empresa CIG (<http://www.centralindustrygroup.com>) del Reino Unido, realiza de manera similar la conformación en frío de planchas metálicas mediante máquinas CNC, como la rueda inglesa, punzonadoras, estampadoras, etc., con la singularidad de elaborar elementos de grandes dimensiones, ya que esta empresa comenzó en un astillero para la fabricación de barcos, pero que actualmente dan solución también a elementos de doble curvatura para la envolvente arquitectónica.

Existen empresas que comercializan impresoras 3D de gran formato como son BigRep (<http://bigrep.com>) con la impresora BigRep One; la empresa alemana Voxeljet (<http://www.voxeljet.de>) con la máquina VX4000; 3D Platform (<http://3dplatform.com>), una empresa de linois, EE.UU, con la impresora 3DP; y finalmente el *Oak Ridge National Laboratory* en colaboración con Cincinnati Incorporated (<http://www.e-ci.com/baam>) que crearon la impresora BAAM (Cincinnati Incorporated, 2015), la cual imprimió un coche Shelby Cobra a escala 1:1, en menos de 24 hrs., y pretenden realizar puntualmente algunas ventas de dicha impresora de gran capacidad tecnológica.

Stefanie Muller, profesora del MIT, tiene una página web (<http://stefaniemueller.org>) en la que expone todos sus proyectos más importantes relacionados con la impresión 3D, de los cuales han salido proyectos como *Wire-Print. Fast printed previews* (Fig. 107) (Mueller et al., 2014) y el de *Low-Fidelity Fabrication* (Mueller et al., 2015). Los cuales son un acercamiento a la impresión 3D desde la simplicidad y el uso de varias técnicas complementarias a la manufactura aditiva.

Design Fabrication Group (<http://ddf.mit.edu>), es un equipo de investigadores, liderado por Larry Sass, en el que se pueden apreciar no sólo los trabajos donde dan solución a la construcción de elementos arquitectónicos de forma libre, sino también aplicaciones paralelas que pueden ser extrapoladas al tema de la presente tesis. Algunos de los artículos relevantes que han salido de dicho grupo son "*Design Production: Constructing Freeform Designs with Rapid Prototyping*" (Sass et al., 2005), "*Materializing design: The implications of rapid prototyping in digital design*" (Sass & Oxman, 2006), "*Embodied prototyping: exploration of a design-fabrication framework for large-scale model manufacturing*" (Sass et al., 2016), de los cuales se han hablado anteriormente en este capítulo.

Como se ha podido observar a lo largo de este capítulo, existe información de diverso nivel de importancia, que ha permitido poner en situación la presente tesis. Los artículos de revistas indexadas han revelado varios métodos de fabricación de paneles de doble curvatura, sobre todo mediante conformación y manufactura aditiva. Así como la necesidad del estudio pormenorizado de la superficie para su posterior segmentación o "panelización".

En el caso de los centros de investigación y desarrollo, existen varios de ellos en España, pero sobre todo en el norte de Europa y en EE.UU es donde están desarrollando diversos estudios sobre procesos digitales de manufactura, de los cuales, los métodos productivos por adición o impresión 3D están consiguiendo gran relevancia en diversos sectores industriales, de los cuales se incluye la construcción.

Las Tesis Doctorales encontradas son de distintas materias y enfoques, como las desarrolladas en la Universidad de Delft, que abogan por la utilización de la impresión 3D en la producción de elementos para la construcción. También hay un par de documentos que mediante análisis geométricos y programas informáticos exploran la forma libre o doble curvatura. Así como el trabajo enfocado a Frank Gehry y a los procesos de conformado utilizados en sus envolventes.

En cuanto a libros y comunicaciones a congresos, existe mucha literatura de diversa índole. Los libros más relevantes son, "*Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*" (Kolarevic, 2003); el monográfico de Birkhäuser denominado "*Digital Processes: Planning, Design, Production*" (Hauschild & Karzel, 2011); el "*Digital Fabrication in architecture*" (Dunn, 2012); y "*Rapids*" (Knaack et al., 2010). Todos ellos han aportado información muy significativa respecto a los métodos de fabricación digital, que permiten la producción de elementos de doble curvatura.

En cuanto a las comunicaciones a congresos, se ha observado que existen métodos para realizar una panelización de modo racional, tratando de simplificar lo más posible la producción de tales elementos. También han sido de gran relevancia las investigaciones sobre los moldes flexibles y la intervención del GRC como un material muy apropiado para los paneles de forma libre de la envolvente arquitectónica. Finalmente, hay una gran cantidad de comunicaciones que acentúan que la manufactura aditiva o impresión 3D, está tomando un espacio muy importante en las publicaciones y los congresos internacionales, posicionándose en soluciones para la arquitectura, y por lo tanto, la posibilidad de crear con ella nuevos sistemas constructivos.

Finalmente, las páginas web investigadas se centran más en las empresas privadas donde exponen sus avances y productos, así como páginas de grupos de investigación dentro de universidades, o personas relacionadas con el tema de estudio. En todas estas webs se muestran información gráfica de gran interés para esta tesis, ya que demuestran mediante obras realizadas la viabilidad de sus productos o investigaciones.

3.4 Conclusiones del Estado de la Técnica y de la Investigación

La necesidad de encontrar un sistema de paneles de forma libre a un precio razonable, proviene de los altos costes de fabricación de dichos elementos, lo que restringe su utilización sólo a grandes obras emblemáticas o singulares, impidiendo su uso en la arquitectura en general. Esto deriva en una limitación de su empleo, que es contrario a las posibilidades actuales de generación de formas en el ordenador. Es decir, que la universalización del diseño informático de formas libres choca con la limitación económica de producción material para los edificios.

Por lo tanto, se concluye que después de la documentación mostrada en el Estado de la Técnica y de la Investigación, no existen sistemas accesibles y económicos sin molde, es decir, que no hay un método adecuado para la industrialización de la envolvente opaca mediante paneles arquitectónicos de forma libre. Sin embargo, se puede observar que existen las bases técnicas para una propuesta alternativa. Dicha aseveración se apoya en los siguientes puntos:

- El diseño formal de grandes hitos arquitectónicos tiende hacia la incorporación de volumetrías de forma libre, que como cita Pottman, *"Es obvio que estos edificios son grandes iconos constructivos de nuestros tiempos, que confirman que el estilo formal de geometrías de forma libre es algo a lo que no podemos dar la espalda, ya que juega un papel trascendente en la arquitectura contemporánea"* (Pottmann et al., 2008). Lo que arroja la necesidad de cubrir una demanda de procesos o métodos que sean capaces de producir elementos de forma libre para la envolvente arquitectónica, los cuales sean viables técnicamente y a un precio asequible para permitir la generalización de su uso.
- En el nuevo milenio, la incorporación de la tecnología digital CAD-CAM en los procesos de diseño y fabricación ha aumentado, y se han consolidado como herramientas de producción arquitectónica, no sólo para elementos de formas libres, sino también para proyectos más tradicionales.
- La proliferación de herramientas informáticas a través del dibujo tridimensional ha requerido del apoyo de recursos matemáticos y geométricos, que se han convertido en plataformas paramétricas de gran ayuda, sobre todo en la construcción de edificios de formas complejas, tanto para la segmentación de la envolvente, como para la racionalización y la optimización de la producción de paneles (algoritmos de panelización), permitiendo la repetición de piezas y de esta manera la reducción de los costes.
- La utilización de formas como la *"Rubber Sheet"* permiten realizar análisis y estudios de las superficies complejas de una manera óptima, ya que existen otras investigaciones que uti-

lizaron la misma pieza con unos resultados muy aceptables.

- En este sentido, la fabricación de un edificio de forma libre ya no representa un problema que no pueda resolverse (suponiendo que el presupuesto lo permita) (Eekhout, 2002), ya que existen tanto los programas informáticos como la tecnología de manufactura para realizarla, como se puede comprobar en la producción de barcos, automóviles o aviones, aunque aún no esté adaptada específicamente a la industria de la construcción.
- Tradicionalmente, la industria de la construcción y sus procesos constructivos sólo eran económicamente viables a través de la producción en masa, y del ensamblaje de componentes estandarizados. No obstante, los métodos de fabricación digitales, o CNC han transformado este modo de producción ya que estas tecnologías permiten la fabricación de elementos de formas complejas y piezas únicas.
- La incorporación de las aplicaciones CNC en la producción de los elementos de forma libre en la arquitectura, ha dado un gran soporte al quehacer del arquitecto. No obstante, no existe un vínculo directo entre los programas CAD y las máquinas, ya que los objetos deben ser transformados en puntos, vectores o plantillas mediante un software puente (CAM) para poder leer la información y ser trasladada a una máquina CNC. Es decir, que muchos programas informáticos que normalmente utilizamos los arquitectos, son de gran utilidad en la creación de modelos tridimensionales, pero en la gran mayoría no han incorporado algún instrumento o comando que permita fabricar directamente desde el software de dibujo, o permitan la previsualización del proceso.
- Los métodos de fabricación digital mencionados en este documento son técnicas sustractivas, de conformado, aditivas y heterogéneos. Dichos procesos están abriendo un nuevo campo en la industria de la construcción, pero muchos de ellos están en fase de investigación y desarrollo.
- En la mayoría de los casos, la fabricación de los paneles de forma libre depende directamente de un molde que se realiza previamente con la forma deseada. El inconveniente, es que en la producción de elementos arquitectónicos de forma libre habitualmente hay muchas piezas únicas, lo que significa que se debe utilizar un molde nuevo por pieza, incrementando de esta manera el precio y el consabido desperdicio de material.
- Existen varias investigaciones sobre la producción de paneles de forma libre evitando el uso de moldes, pero todos están en fases muy iniciales. Dichos proyectos incorporan como base una cama con barras elevables o móviles que permiten la adaptación de la forma. El proyecto más avanzado es el de Henriksen, Lo, & Knaack, 2016, el cual se ha comentado con detalle en el Estado de la Investigación. Este proyecto da un impulso hacia la búsqueda de procesos alternativos y la incorporación de materiales como el GRC o morteros con

fibras, haciendo del panel un elemento autoportante, prefabricado y con buenas prestaciones para la incorporación en la envolvente arquitectónica.

- El desarrollo de la fabricación digital ha evolucionado a un punto en el que se puede decir que actualmente existen los medios propicios para su implantación en la industria de la construcción, sólo falta dar un paso para alcanzar tales objetivos. Muchos investigadores y especialistas en la fabricación digital (Lim et al., 2012), (Eigensatz et al., 2010), (Kolarevic, 2003), (Sass & Oxman, 2006), declaran que la manufactura aditiva es una de las mayores alternativas en el campo de la construcción, especialmente para dar solución a aquellas arquitecturas de formas sinuosas y complejas. Así como para favorecer la reducción de residuos y el impacto ambiental mediante el uso de la fabricación por filamento fundido (FFF), que utiliza materiales como el PLA, el cual es un termoplástico biodegradable, pues proviene de materia orgánica.
- Por lo tanto, la manufactura aditiva (AM) representa una buena alternativa para la producción de elementos de formas libres sin un coste añadido, ya que se puede producir una pieza distinta cada vez, sin incrementar el precio por la producción de piezas distintas, con el beneficio de no requerir moldes. Los sistemas de producción en masa son económicos cuando se producen una gran cantidad de elementos. Sin embargo, la AM no encarece el precio para pequeños volúmenes, además de disminuir la mano de obra y ahorro en el gasto de material, evitando así un impacto ambiental. Sin embargo, existen varios puntos aun no resueltos, como es el tema de la escala de las impresoras, la utilización de materiales inflamables, la velocidad de impresión, o el acabado final.
- Existen varios materiales moldeables para los paneles de la envolvente arquitectónica que sorprenden por su esbeltez, su comportamiento térmico (algunos con cambio de fase), y su deseado aspecto estético. El GRC, el UHPC y morteros con fibras (GRCA, 2014), (Sánchez P., 2015), son materiales que tienen una gran capacidad autoportante, ya que con solo 1 cm de grosor se pueden producir paneles de grandes dimensiones, como se ha podido ver en varios ejemplos ya contruidos.
- Finalmente, reuniendo todos los puntos anteriores se visualiza que existen los suficientes fundamentos teóricos y técnicos para la potencial existencia de un método alternativo que permita dar solución a la industrialización de paneles de forma libre evitando el molde. Por lo tanto, se plantea un sistema a través de la manufactura aditiva, especialmente a través de la impresión 3D por fabricación de filamento fundido, con el refuerzo de una capa de GRC, evitando de esta manera el molde, que encarecería y ralentizaría el proceso.

3.4.1 Propuesta del Sistema Alternativo.

En base a la investigación documental, se propone un sistema alternativo para la fabricación de paneles de forma libre mediante el uso de GRC sin molde, los cuales tienen un núcleo realizado con una malla tridimensional de termoplástico impreso en 3D y reforzado con una capa de GRC.

La idea de la malla surge de la utilización del *deployé* (o metal desplegado) en conjunción con el mortero. Con ambos materiales se obtienen piezas de pequeño espesor con un armado interior que las hacen más resistentes. El problema de esta malla metálica es que no puede curvarse fácilmente para obtener superficies de forma libre. Por lo tanto, extrapolando este sistema muy conocido e indiscutible, a un panel de formas complejas, se crea esta nueva alternativa.

La manufactura aditiva es de gran utilidad, ya que mediante la fabricación de filamento fundido (FFF) se crean las mallas 3D (emulando al *deployé*), las cuales funcionan como encofrado perdido y replica de manera exacta la forma deseada, con cualquier tipo de superficies curvas o planas. No se visualiza la manufactura de moldes pedidos con superficies termoplásticas continuas, ya que con los huecos del entramado se facilita la ejecución reduciendo tanto el material, como el tiempo de impresión y permite el mejor agarre entre los materiales que intervienen. La capa de GRC sirve como refuerzo para que el panel tenga una consistencia capaz de resistir las prestaciones necesarias para un panel de fachada autoportante, como son las cargas de viento, de nieve, etc.

Las dimensiones de los huecos de la malla juegan un papel importante, ya que deben permitir que al proyectar el GRC se agarre a la rejilla, pero sin que traspase todo el material, ya que sería inviable, y se deben colocar esperas o piezas de anclaje, las cuales servirán posteriormente para ser situadas en una estructura de la fachada. Una vez que haya pasado el tiempo de curado, se realizarán los trabajos de acabados de acuerdo a las necesidades de la envolvente.

Capítulo 4

MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Condiciones Previas

El tema principal de la tesis es la de examinar la viabilidad la industrialización de la envolvente opaca arquitectónica de forma libre mediante la fabricación de paneles de GRC sin molde, con un núcleo de malla termoplástica impresa en 3D.

Para dar coherencia a este enunciado, se ha partido de las conclusiones del Estado de la Técnica y de la Investigación, en las cuales se hace una descripción resumida de las tecnologías disponibles y los materiales que permiten desarrollar un sistema alternativo. Así, con este marco tecnológico actual y con una metodología aplicada, se podrá demostrar si la industrialización de este nuevo sistema constructivo es posible.

Se resuelve establecer la propuesta sobre un sistema digital, debido a que tanto la generación de las formas complejas, como su preparación para fabricarlas, deben estar en un entorno informatizado. Una ventaja de trabajar sobre una plataforma digital es la de poder trabajar de manera simultánea en distintos terminales, lo que permite la agilización y modernización de la técnica propuesta. Además, con los programas informáticos CAD/CAM y algunos *pluggins* específicos, se puede realizar el diseño de la envolvente, la simulación mecánica y la optimización de la fabricación.

Dentro de los procesos examinados, la manufactura aditiva (AM) es una técnica que ofrece múltiples ventajas, como la posibilidad de producir piezas únicas, con formas simples o complejas sin encarecer por ello cada elemento fabricado, por distintos que sean. No se requieren de herramientas externas, ni de moldes, por lo que la convierte en una excelente opción tecnológica.

Las máquinas de AM más asequibles y de uso más comercial son las de fabricación por filamento fundido (FFF) (Wohlers, 2016). Al ser una tecnología con gran potencial, se decidió realizar un primer acercamiento teórico al estudio de los paneles impresos en 3D. El resultado era realizar un panel completamente de termoplástico, pero debido a sus características estructurales, el envejecimiento por los rayos UV, la poca resistencia al fuego, un mínimo aislamiento térmico, entre otras, mostraron las limitaciones del material y el incumplimiento de las normativas vigentes. Buscando otros materiales que pudieran cumplir con los requisitos de un panel de fachada, se encontraron compuestos como fibra de carbono o metal, pero el incremento en los costes representaba una limitante muy importante tanto para la generalización de este sistema, como de su industrialización.

Por consiguiente, se decidió que la gran ventaja que aportaba la impresión 3D, era la de fabricar cualquier forma, por compleja que fuera y sin la necesidad de repetición para economizar su producción. Así que no se eliminó la pieza de termoplástico, sino que se pensó en forrarla o cubrirla con otro material que le diera la capacidad de resistir las cargas de viento y nieve, que fuera autoportante, que permitiera estar al exterior en contacto directo con los agentes ambientales, pero que a la vez siguiera aportando ligereza. Así que se eligió al GRC (*Glass-fiber Reinfor-*

ced Concrete) como material idóneo para cumplir con estos requisitos.

El origen de esta combinación de sistemas nace de la observación y de la experiencia de la malla de *deployé*, como se ha comentado anteriormente, una vez que se le agrega una capa de mortero, se convierte en un elemento reforzado y con un pequeño espesor.

Así es como se crea el nuevo sistema de panel con un núcleo de malla de termoplástico que le aporta la forma, y la capa de GRC el refuerzo. Es decir, que se convierte en un elemento con unas prestaciones propias de un panel de fachada, con resistencia a la intemperie y al fuego, así como de una gran ligereza debido a los espesores tan pequeños del GRC (0,01m a 0,015m) y con la posibilidad de tener cualquier forma, incluso de forma libre.

Un tema secundario, pero no menos importante, es la inquietud de que el método desarrollado en esta investigación no genere un gran impacto ambiental. Esto se espera lograr con la utilización de materiales que puedan ser reciclados o que produzcan la menor cantidad de residuos y CO₂ en su fabricación. Por lo tanto, se apuesta de una manera más rotunda en este sistema porque al no requerir de molde, se evita la creación de residuos, como en el caso de las fresadoras con los bloques de EPS o las matrices metálicas, que tarde o temprano se terminan tirando. Además, el uso del PLA (Ácido poliláctico) para la impresión 3D, es beneficioso ya que es un material biodegradable con una base orgánica, de bajo coste y puede reciclarse.

Se pretende que la metodología propuesta para el desarrollo de la tesis sea lo más sencilla posible, ya que se trata de dos tecnologías ampliamente conocidas, como son la proyección del GRC, y la impresión 3D mediante fabricación de filamento fundido (FFF), que al unirse crean un nuevo sistema, del cual en la actualidad no hay antecedentes conocidos, y que lo hacen muy atractivo por los resultados que puede generar.

La metodología propuesta se basa puramente en la manera en la que se va a proceder paso a paso para lograr una serie de resultados, y con ellos esclarecer la factibilidad del nuevo sistema. Está dividida en tres partes, la documental, la experimental y la de simulación.

En la primera metodología, se pretende exponer las técnicas y el sistema de búsqueda de información, referente al tema de la tesis, así como la importancia de los datos obtenidos que permiten dar una base de conocimiento sobre la originalidad y la demanda real de un sistema alternativo para la fabricación de paneles para la envolvente opaca de forma libre. Además, demostrar la manera de priorizar los temas e información para ser expuestos en este documento.

La metodología experimental tiene como objetivo principal demostrar mediante ensayos, pruebas y experimentos, las características necesarias que requiere la fabricación de este tipo de

paneles para su futura industrialización. Para lograr dicha meta, se propone la construcción de varios especímenes de estudio, y un prototipo a escala real, que demuestren dicha hipótesis mediante la incorporación de materiales y métodos asequibles, útiles y de fácil disponibilidad.

Finalmente, en la metodología por simulación se intenta mediante pruebas a flexión de un panel experimental, obtener datos físicos reales, que puedan ser exportados a un programa de simulación por elementos finitos (FEM) y de esta manera obtener un acercamiento a un método de cálculo apropiado, que pueda ser utilizado en futuras investigaciones o simulaciones mecánicas que incorporen dicho sistema. Si bien es cierto que el GRC en sí es un material ampliamente conocido, la incorporación de la malla termoplástica y su uso en elementos de formas libres justifican dicho análisis. Ya que como bien es sabido, el cálculo manual para obtener la flexión de un elemento plano rectangular es relativamente sencillo, pero cuando la forma es compleja, la utilización de este tipo de programas FEM es imprescindible.

El proceso que se ha seguido en cada uno de los puntos metodológicos se resume de la siguiente manera en la Figura 150:

Fig. 150. Esquema de actuación en la fase metodológica.

Quisiera subrayar que la creación de algunas de las piezas de ensayo, así como el prototipo a escala real se han realizado gracias a la participación inestimable de tres empresas, Prefabricados Ponce S.L., Moebyus Machines S.L. y Cement Design, con las cuales estoy desarrollando varios proyectos de investigación sobre la fabricación de los paneles de forma libre de GRC sin molde.

Prefabricados Ponce, lidera este grupo de empresas, que una vez que conoció la propuesta de mi tesis, ha querido desarrollar el proyecto para investigar si es posible su industrialización. Por

otro lado, Moebyus Machines, ha creado un prototipo de una impresora 3D de gran formato, denominada M3, con 1,00 m3 de capacidad. La han fabricado de manera expresa para el proyecto de investigación Iberoeka (en cooperación con Argentina), del cual el CDTi nos ha seleccionado para su desarrollo.

Prefabricados Ponce, no sólo ha apoyado el proyecto Iberoeka, sino que ha colaborado en el desarrollo de la presente tesis ya que ha facilitado la utilización de sus instalaciones y varios vertidos de GRC sobre los elementos de estudio. Además, estamos desarrollando otro Proyecto CDTi nacional para continuar con la investigación de este sistema.

Por otro lado, a partir de la elaboración de los principios que rigen la creación de esta nueva propuesta de paneles, surgió una patente, la cual está actualmente en revisión, con el número P201530692 del 19 de mayo de 2015, con el nombre "Panel Reforzado para cerramientos opacos en construcciones" (Anexo 1.3).

4.2 Metodología Documental

La finalidad de la Metodología Documental es demostrar la manera en la que se ha obtenido la información sobre la industrialización de la envolvente opaca arquitectónica mediante paneles de GRC de forma libre sin molde. Una vez que se han obtenido dichos datos, se realiza un análisis para reconstruir en su justa proporción e importancia la información, así como establecer relaciones, diferencias, etapas o posiciones del estado de conocimiento actual del tema. Es decir, un grupo de ideas que permitan dar respuestas a determinados cuestionamientos y poder realizar teorías e hipótesis que sustenten el estudio de la presente tesis. Además, se pretende con dicha información, avalar la novedad y originalidad del nuevo sistema propuesto.

La búsqueda de información se ha realizado de manera periódica en varios portales científicos como, Ingenio de la UPM (Ingenio, 2016), la Web of Knowledge (WOK)-Fecyt o Web of Science (Web of Science, 2016), Reed-Elsevier (Elsevier, 2016), Taylor & Francis (Taylor & Francis Group, 2016) o Springer (Springer, 2016), que suponen unas de las bases más importantes de estudio a nivel mundial, ya que son las fuentes de información de más alto nivel a las que he podido acceder, tanto por la calidad de la información, como por la revisión a la que son expuestos, lo que garantiza en gran medida su fiabilidad y objetividad. Los artículos de mayor categoría en su gran mayoría están indexados por el *Journal Citation Reports* (JCR).

Los criterios de búsqueda habitualmente se hacen por palabras clave, campo de investigación, autor, título, etc. En este caso, se ha realizado por palabras clave, las cuales eran en su mayoría en inglés: *free-form*, *freeform*, *double curvature facade*, *architecture*, *complex geometry*, *blob architecture*, *architectural panels*, *envelopes*, *mouldless*, *3D printing*, *Additive Manufacturing*, *Large-scale*, *3D printing*, *digital process*, entre otras. La información resultante al utilizar estas palabras ha tenido que ser desmenuzada y filtrada, ya que hay muchas otras ramas que coinciden con ciertos términos, como la Oftalmología o la Ingeniería de Producto y Materiales.

En las búsquedas no sólo se obtuvieron artículos científicos, sino también comunicaciones a congresos, libros, folletos especializados, patentes y tesis doctorales.

También se utilizó la herramienta informática de *Google Academic* (<https://scholar.google.es>), donde se han encontrado algunos documentos mediante exploraciones selectivas por tema o palabras clave. Los resultados obtenidos han sido contrastados con el propio congreso o revista que los edita para asegurarme que los datos expuestos eran correctos.

Dentro de *Google Academic* utilicé un servicio de alarmas por palabras clave denominado *Google Scholar Alerts* (Google Scholar Alerts, 2016), tanto en español como en inglés, lo que ha reportado semanalmente, varios artículos, libros, comunicaciones a congresos, entre otros, relacionados con las palabras clave anteriormente indicadas.

Una vez que se había filtrado la información, se separaba por el tipo de importancia, alta, media o baja. Esta jerarquía se establece a partir de la cercanía que tiene con el tema, como por ejemplo el uso del GRC, impresoras de gran formato, la segmentación de paneles arquitectónicos, nuevas tecnologías digitales, envolvente arquitectónica, etc.

Añadido a esta información, ha sido de gran utilidad las visitas a las páginas web de grupos de investigación como *Facadeworld* (Facade World, 2016); el *European Facade Network* (European Façade Network, 2016); el Instituto de Diseño Computacional (ICD) y el Instituto de Estructuras de la Construcción y Diseño Industrial (ITKE) de la Universidad de Stuttgart (ICD/ITKE, 2016); el *National Centre of Competence in Research (NCCR) Digital Fabrication* de Suiza (National Centre of Competence in Research. Digital Fabrication, 2016); el *Flexible Mould Project* (Schipper, 2016); o el *Design Fabrication Group* del MIT (Design Fabrication Group, 2016). Su importancia radica en que se han extraído las últimas novedades de las investigaciones realizadas, las comunicaciones a congresos presentadas, o los artículos publicados, así como las próximas presentaciones o simposios a los que se puede acceder.

Han sido de gran relevancia los datos recabados en la web de la Asociación Internacional de GRC (GRCA) (GRCA, 2016), en especial las comunicaciones a sus congresos, ya que existen muchos documentos relacionados con la forma libre y la participación del GRC en su producción, así como información técnica respecto al propio GRC y sus componentes.

Para obtener datos de campo y más cercana a la producción de paneles de doble curvatura, se han consultado fichas técnicas de tecnología relacionada como BigRepOne (Gurka, 2016), Voxeljet (Voxeljet, 2016), BAAM (Oak Ridge National Laboratory, 2016) o DUS Architects (DUS Architects, 2015). Que gracias a ellos se puede poner en situación el estado actual de la industria y del mercado de productos.

De los resultados obtenidos, se dividió la investigación en varias secciones. Primeramente los antecedentes respecto a la arquitectura de forma libre, las nuevas tendencias arquitectónicas, los edificios icónicos o relevantes de esta tipología arquitectónica, el uso de materiales y los sistemas utilizados para su fabricación. Como segundo punto de estudio, lo referente al dibujo digital o informática, la geometría y la segmentación de las envolventes de geometrías complejas. El tercer tema, es sobre la base tecnológica, es decir, los procesos con los que cuenta la industria, y aquellos que pueden ser aplicados a la generación de paneles de forma libre. La selección y categorización de cada capítulo se realiza mediante una jerarquización de acuerdo a su relevancia respecto al objetivo de la tesis.

4.3 Metodología Experimental

En la mayoría de los nuevos procesos o creación de productos, es necesario tener una base experimental que permita mediante procedimientos y operaciones controladas, obtener información que posteriormente se pueda analizar, estudiar y comparar, y por lo tanto, resolver si es apto o no para su producción y puesta en el mercado. Por consiguiente, el objetivo de aplicar una metodología experimental en esta tesis se debe a estos y varios factores más. Es un nuevo sistema, el cual tiene pocos antecedentes en cuanto a su procedimiento de fabricación, su comportamiento mecánico, capacidades de carga y prestaciones en general. Además, al ser un elemento de fachada, tiene muchas condicionantes de seguridad debido a la interacción con los usuarios.

Esta metodología experimental se erige sobre tres premisas: la disponibilidad, la utilidad y la asequibilidad de los materiales, equipos y métodos para el desarrollo de las piezas de estudio. Una vez que se define el proceso de realización de los paneles, se llevan a cabo una serie de probetas o piezas de ensayo que aportan información, y permite en muchos casos la rectificación del proyecto, nuevos planteamientos, así como su mejora dentro de la investigación, para que una vez terminado este documento, cualquier interesado pueda recoger los resultados y continuar con el trabajo.

4.3.1 Procedimiento de actuación.

Previamente al comienzo de la aplicación de la metodología experimental, se establecen una serie de principios básicos mediante un esquema de trabajo sobre el cual se desarrolla una serie de experimentos con el objetivo de obtener resultados de campo, que permitan el acercamiento a la industrialización del sistema de paneles de forma libre de GRC sin molde. Además, se estudian a fondo las características de los materiales y los procesos de producción que están involucrados en esta fase, tanto a nivel documental como experimental.

A continuación se muestra un esquema general de actuación (Fig. 151) para la creación de las piezas de trabajo.

Fig. 151. Esquema general de la metodología experimental.

La primera tarea es acotar perfectamente la finalidad para el que se va a desarrollar cada pieza, ya que de eso depende directamente la forma geométrica que va a adquirir la malla tridimensional. Se hace una breve hipótesis de resultados, y una vez que se ha definido la superficie a utilizar, se diseña tridimensionalmente en CAD con todos los elementos accesorios, como son las piezas de soporte, los elementos de borde, los límites de enrasado, espacios para anclajes, etc. Todo esto para que esté lista a la hora de fabricarla. Se realiza una verificación de los elementos y dimensiones del dibujo y una vez que todo está preparado, se procede a exportar el dibujo en formato STL al programa dependiente de impresión 3D.

Como se ha mencionado anteriormente (Cap. 3.2.2.3) las máquinas de impresión 3D requieren de un programa de que traduzca la información del dibujo CAD a una pieza producible. En dichos programas se pueden ajustar las características de impresión, como altura de capa, grosor de capa, velocidad de impresión, calidad, etc. Una vez ajustados dichos puntos, se genera un G-Code, que es una lista de comandos, en la cual se especifican los pasos que tiene que dar la impresora 3D para realizar la pieza y que la secciona en capas horizontales.

Cuando están impresas las piezas en 3D, se procede a realizar las pruebas correspondientes. Con los resultados que se generan en dichos ensayos, se pueden realizar una serie de conclusiones preliminares, comprobaciones de las hipótesis iniciales y puntos de mejora de cada uno de ellos.

Al finalizar toda la ronda de pruebas, se recopila la información obtenida de las probetas y los experimentos realizados, para comenzar a diseñar y proponer las características que debe cumplir el prototipo a escala real. De esta manera se puede conseguir un panel, de la mejor manera posible, con todos los pormenores estudiados, así como con toda la tecnología y medios disponibles hasta ese momento.

4.3.2 Herramientas informáticas utilizadas para la generación de las pruebas experimentales.

Las herramientas informáticas a utilizar en la fase experimental, se basan en la disponibilidad y conocimiento del doctorando, así como las restricciones propias de las máquinas, ya que en el caso de una de las impresoras, sólo se podía utilizar un tipo de programa informático.

Rhinoceros.

Para el dibujo tridimensional de las piezas de estudio, este programa es una herramienta muy apropiada debido a que está basada en NURBS, que describen de manera eficiente las superficies de doble curvatura y tiene la posibilidad del control paramétrico, como se ve en el capítulo 3.2.1 Herramientas Digitales, Geometría y Optimización. La elección de utilizar como programa base el Rhinoceros (Fig. 152), también se ha visto refor-

Fig. 152. Imagen del desarrollo del panel "Rubber Sheet" en el programa Rhinoceros.

zada por la disponibilidad y conocimiento del doctorando.

Es un programa de reconocido prestigio en el mundo de la arquitectura y especialmente en el diseño de curvas complejas, así como en el diseño industrial. La empresa McNeel desarrolla este software, y está estudiando unas herramientas que permitan dibujar piezas que se puedan producir directamente sin tener que ser exportadas. McNeel ha creado un *plugin* de creación directa de modelos mediante impresión 3D (García del Valle, 2015). No obstante, debido a la falta de recursos no ha sido posible someterlo a prueba para esta tesis.

CURA.

Para la impresión 3D, CURA (Fig. 153) es un programa de los más utilizados en el entorno 3D, no sólo por su acceso gratuito, sino porque varias de las empresas lo recomiendan para utilizar sus productos, como en el caso de la impresora Witbox, Makerbot, Ultimaker o la M3 de Moebyus Machines.

CURA es un programa genérico de impresión 3D que realiza el corte en capas, denominado "*slicer*" para procesar los archivos de diseño en 3D. Genera cada capa para que sea fabricada por la impresora 3D, con lo que se obtiene un archivo G-Code, el cual se transmite directamente a la impresora. Admite una gran cantidad de formatos como STL, OBJ, DAE, AMF, entre otros.

Fig. 153. Imagen del programa CURA de impresión 3D.

La selección de este programa se debe a varios factores. El primero, es por su disponibilidad al ser de código abierto y su gratuidad. El segundo, porque ofrece la posibilidad de configurarlo para adaptarse a la impresora que se vaya a utilizar. El tercero, porque la impresora M3 está configurada para usar únicamente el CURA. Por lo que estos puntos han facilitado que se eligiera como el programa base de impresión 3D, aunque de manera puntual se han utilizado otros como Slic3r, Pronterface y Repetier.

4.3.3 Materiales utilizados en la fabricación de las pruebas experimentales.

- **ABS:** Filamento de Acrilonitrilo butadieno estireno normal utilizado para la impresión de la pieza 1, con las especificaciones del ASTM D-638 del tipo IV para especímenes a tracción, y ASTM D-5379 para especímenes por cortante (Cantrell et al., 2011), con un filamento de 1,75 mm de grosor. Propiedades en Anexo 4.1.
- **PLA:** Filamento de PLA de "NatureWorks Ingeo" 4032D para las piezas de prueba y el prototipo a escala real. Con las especificaciones ASTM D-638 para especímenes a tracción, con un filamento de 1,75 mm de grosor. Propiedades en Anexo 4.2.
- **GRC:** Hormigón reforzado con fibra de vidrio realizado en fábrica. Cemento Portland, BL II/A-L 42, 5R y fibra de vidrio Cem-Fil 2, con un contenido del 19% de Zirconio (ZrO_2). 2,63 g/cm³ densidad comprobada según ASTM C693, resistencia a tracción 8-12 Mpa. Ficha del material y pruebas de carga en Anexo 4.3
- **Mortero:** Marca Beisser: Mortero seco Tipo M-80a s/ DB SE-F Fábrica. Ver ficha técnica en Anexo 4.4.
- **Pintura plástica:** Pintura plástica mate color gris para exteriores a base de co-polímeros acrílicos Procolor, UNE 48244, UNE EN 1062. Ver ficha técnica en Anexo 4.5.
- **Pintura metalizada:** Pintura acrílica de aspecto metalizado brillante, Novasolplay, PintyPlus, de color gris NVS M191. Ver ficha técnica en Anexo 4.6.
- **Recubrimiento:** de mineral metálico en base a eco-cemento, partículas de aluminio natural, cargas minerales y nano aditivos de la marca Cement Design. Referencia KAL + RM. Ficha técnica en Anexo 4.7.

4.3.4 Tecnología aplicada para la fabricación de las pruebas experimentales.

La tecnología más relevante utilizada para la fabricación de las piezas de estudio, es sin duda la maquinaria de impresión 3D. No obstante, también quiero hacer mención a la intervención de la proyección de GRC, que a pesar de que no se realiza ninguna modificación en el sistema habitual de rociado, ha sido una par-

te importante en la participación de las pruebas.

A continuación se presentan unas de tablas con las características más importantes de todas las impresoras que se utilizaron para la creación de las mallas tridimensionales en termoplástico. Además, se pueden consultar en los Anexos las fichas técnicas de cada una, con datos más específicos del fabricante.

Tabla 2. Especificaciones de la impresora Prusa i2.

Impresora Prusa i2 (Anexo 4.8).

Fig. 154. Impresora Prusa i2.

Fabricante

Rep Rap (*open source*)

Medidas de impresión

0,20m x 0,20m x 0,12m

Material

PLA y ABS

Temperatura de fusión

220°C – 240°C. (Uso cama caliente)

Diámetro filamento

0,00175m -0,003m

Diámetro boquilla

0,00040m

Velocidad de impresión

Hasta 0,080 m/s

Fig. 154. Impresora Prusa i2.

Tabla 3. Especificaciones de la impresora M3.

Impresora M3 (Anexo 4.9).
Fabricante	Moebyus Machines
	Medidas de impresión	1,00m x 1,00m x 1,00m
	Material	PLA, PETG, PVA
	Temperatura de fusión	195°C – 220°C
	Diámetro filamento	0,00175m
	Diámetro boquilla	0,0004m, 0,0008m y 0,001m
	Velocidad de impresión	Hasta 0,15 m/s

Fig. 155. Impresora M3.

Tabla 4. Especificaciones de la impresora Witbox.

Impresora WITBOX (Anexo 4.10).	
Fabricante	BQ
Medidas de impresión	0,297m x 0,21m x 0,20m
Material	PLA
Temperatura de fusión	195°C – 220°C
Diámetro filamento	0,00175m
Diámetro boquilla	0,0004m
Velocidad de impresión	Hasta 0,20 m/s

Fig. 156. Impresora Witbox.

Fig. 156. Impresora Witbox.

4.3.5 Pruebas experimentales de fabricación del nuevo sistema.

Se realizan tres pruebas experimentales relacionadas con la producción del nuevo sistema. Cada una tiene un propósito específico que pretenden poner a prueba, comprobar y estudiar las posibilidades de su industrialización de acuerdo a las condiciones previamente estudiadas.

La ubicación donde se realizaron la mayoría de las pruebas y ensayos fueron en las instalaciones de Prefabricados Ponce en Illescas, en las oficinas de Moebius Machines, y sobre todo, en el taller de prototipos y en el taller de maquetas de la ETSAM, debido a que en estos dos últimos se encuentra una gran variedad de herramientas y de espacio para ejecutar los ensayos necesarios.

- **Prueba 1.**

La primera prueba se realiza con dos finalidades muy claras, la primera, y más importante es averiguar las dimensiones apropiadas para los huecos de la malla impresa en 3D, para que el GRC o el mortero, una vez que sean proyectados, puedan traspasar lo suficiente, de tal manera que se pueda asegurar la unión entre ambos, pero sin filtrarse por completo. Y la segunda, es observar el comportamiento de los materiales al ponerlos en contacto (ABS/PLA, mortero y GRC), por si existiese algún tipo de degradación, repelencia u otro tipo de conducta a tener en cuenta, así como los inconvenientes que se puedan presentar al realizar el proyectado.

La malla de *deployé* con una capa de mortero, se convierte en un bloque ligero de cemento reforzado, la cual es una solución económica, ligera y de rápida ejecución. Con este sistema constructivo de base, la granulometría de los materiales utilizados y el tamaño de las fibras de vidrio que se incorporan a la mezcla de hormigón (entre 0,0012 a 0,0036 m (Barros Llerena, Caballero, & Zaldo, 1981)), se hace una primera hipótesis de hueco del entramado de 0,014m x 0,014m.

Para realizar los experimentos de la prueba 1, se diseña una malla plana, ya que en esta fase no es prioritario hacerlo con formas complejas, debido a que la preocupación principal es la de encontrar la medida adecuada para el alojamiento de los materiales cementicios, debido por un lado a que se pretende hacer el hueco lo más grande posible para ahorrar en material de la malla, y aminorar el tiempo de ejecución, pero sin comprometer el paso del material.

A continuación se muestran en la tabla 5, las principales características de la malla impresa con termoplástico con la impresora Prusa i2.

El vertido del mortero y del GRC son esenciales para alcanzar los dos objetivos. Por estos motivos, se realiza una primera prueba con mortero de cemento convencional (Fig. 158) (ver ficha del material en el Anexo 4.4), en el taller de prototipos de la ETSAM.

Tabla 5. Características de la Prueba 1.

Prueba 1. Malla de plástico ABS.	
Material	ABS
Dimensiones exteriores	0,32m x 0,22m x 0,01m
Dimensiones de celda	0,014m x 0,014m
Grosor de malla	0,001m
Máquina utilizada	Impresora Prusa i2 (<i>open source</i>)
Tiempo de fabricación	25 hrs (por los cuatro elementos que conforman la malla).
Observaciones	Esta pieza se fabricó en cuatro partes y se pegó mediante cianocrilato comercial. Se produjeron 4 mallas idénticas.

Fig. 157. Malla de plástico ABS de prueba 1.

Fig. 158. Prueba 1. Experimento 1. Malla de plástico ABS con mortero.

Fig. 159. Prueba 1. Experimento 2. Malla de ABS con GRC.

Se prepara una mezcla de mortero para cubrir los huecos de la malla y posteriormente se deja en la zona de curado durante 28 días. Otra de las mallas se lleva a las instalaciones de Prefabricados Ponce para que los operarios especialistas realicen una proyección de GRC (Fig. 159) (ver Anexo 4.3).

Con estos dos experimentos, se puede comprobar tanto en la malla 1 y como en la malla 2, el comportamiento de los materiales a los 28 días de curado y sobre todo, saber si la medida del hueco es el adecuado para alojar principalmente el GRC, ya que este material es el que le proporcionará la resistencia mecánica a los paneles.

Se han tenido en estudio durante dos años y medio todas las piezas de ensayo para comprobar si hay algún tipo de comportamiento no deseado entre los materiales termoplásticos (ABS-PLA) y los cementicios (GRC y mortero de cemento).

• Prueba 2.

El propósito de esta segunda prueba es la de diseñar las capas mínimas que requiere el panel con el sistema propuesto, para que sea lo más esbelto y ligero posible, cumpliendo con las condicionantes de un elemento de fachada, el cual debe ser autoportante y resistir las inclemencias medioambientales (viento y nieve)

En cuanto al acabado final del GRC, se sabe que es muy bueno cuando se proyecta sobre un molde, pero no tanto cuando no lo hay. Por lo que es importante dar una buena solución para esta cuestión estética y que sea comercialmente aceptable. Por lo tanto, se deben plantear acabados que demuestren que la fabricación mediante este sistema es válido. Como los paneles metálicos con doble curvatura son muy vistosos y costosos, se propone la posibilidad de emular el acabado de metal mediante pinturas especiales como la automotriz.

A la par, se debe elegir el sistema de soportes adecuado para las mallas impresas en 3D. Al ser elementos de una cierta com-

plejidad geométrica, pueden colapsarse o simplemente no se pueden imprimir por tener mucho vuelo. Se hace una serie de propuestas hipotéticas, que puedan ser apropiadas para que mantenga la estabilidad de la pieza mientras se imprime, y cuando se le vierta el mortero o el GRC. De estas primeras averiguaciones surgieron dos propuestas. La primera es la colocación de elementos de apoyo, de acuerdo a los parámetros aportados por el programa de impresión 3D. Y la segunda es la colocación de elementos de soporte diseñados previamente en la fase de dibujo.

Gracias a que el programa CURA realiza un análisis de simulación, en el que se puede ver el tiempo de ejecución y el material empleado, se utiliza esta herramienta para hacer una comparativa entre las dos propuestas de soportes.

Para estas pruebas es importante que la forma elegida tenga una superficie curvada en dos sentidos, y por ello se elige la sección de un casquete esférico. Las propiedades de las mallas se explican en la Tabla 6.

Tabla 6. Características de la Prueba 2.

Prueba 2. Casquete esférico	
Material	PLA
Dimensiones exteriores	0,15m x 0,15m x 0,01m
Dimensiones de celda	0,01m x 0,01m
Grosor de malla	0,0012 m
Máquina utilizada	Witbox
Tiempo de fabricación	9 hrs cada pieza
Observaciones	Se imprimieron 6 piezas idénticas.

Fig. 160. Malla de sección de casquete esférico.

Afortunadamente, llegó a la ETSAM una nueva impresora 3D de la marca Witbox, con la cual se pueden fabricar dichas piezas en PLA, y de esta manera probar con otro material termoplástico, ya que las piezas anteriores se realizaron en ABS.

Las dimensiones de las piezas son de 0,15m x 0,15m debido a que la cama de impresión de la nueva máquina es de 0,297m x 0,21m x 0,20m. Como se pretende imprimir elementos de una sola pieza, con la forma de una sección de casquete esférico, se determina realizarlas de esas medidas. Al tener un vuelo considerable, ya que se apoya únicamente en los cuatro puntos de las esquinas, se requiere forzosamente de unos pilares o elementos (Fig. 160) que no le permitan colapsar a la hora de producirlos, como se ha mencionado anteriormente, por lo que se realiza un estudio de soportes de manera simulada y experimental.

• Prueba 3.

Al finalizar las pruebas 1 y 2, y una vez que se tiene una serie de resultados favorables, se decide dar el paso para producir un

panel a escala real, con el cual se puede corroborar la viabilidad técnica de la fabricación de este sistema constructivo de paneles de forma libre sin molde.

Con este prototipo se pretende el acercamiento a la fabricación industrial de un panel, en un supuesto encargo real, pasando por todas las etapas de producción, arrojando una pieza de estudio apropiada para su evaluación.

Este prototipo se realiza con los materiales, métodos y medios al alcance del doctorando, con la mejor disposición de lograr un ejemplar válido para ser presentado como un elemento de valor que permita dar un paso más hacia su industrialización.

Para establecer una coherencia entre la propuesta y la investigación en cuanto a las geometrías de los paneles de formas libres (Cap. 3.2.1), se opta por escoger la superficie “*Rubber Sheet*” (lámina de goma), ya que permite tener curvas cóncavas y convexas por ambos lados, además de que ayuda a estudiar el comportamiento de la pieza tanto con curvas positivas como negativas y la transición entre ellas. Además, dicha superficie se ha utilizado en diversas investigaciones por la singularidad de sus curvas (Henriksen, Lo, & Knaack, 2016), (Dunn, 2012), (Kolarevic, 2003).

El planteamiento de fabricación de este prototipo a escala real pasa por cuatro fases, el modelado, la impresión 3D, el reforzado con GRC y el acabado. Sus dimensiones y características deben ser muy próximas a las de un panel de fachada prefabricado a escala real (Tabla 7) y las medidas de celda y grosor de malla se obtienen del análisis de las pruebas anteriores.

Tabla 7. Características de la Prueba 3. Prototipo a escala real.

Prueba 3. Prototipo 1, “ <i>Rubber Sheet</i> ”.	
Material	PLA
Dimensiones exteriores	1,00m x 0,90x 0,27m
Dimensiones de celda	0,0116m x 0,0123m
Grosor de malla	0,002 m
Máquina utilizada	M3 de Moebyus
Tiempo de fabricación	95 hrs.
Observaciones	Esta malla se fabricó de una pieza en la impresora de gran formato M3, con una capacidad de impresión de 1m3 (1,00m x 1,00m x 1,00m).

Fig. 161. Panel “*Rubber Sheet*” para Prueba 3.

Cuando se tiene una envolvente arquitectónica de forma libre, se realiza primeramente una segmentación o “panelización” en elementos producibles, por lo que se entiende en esta fase que los paneles son superficies sin espesor, ya que es más fácil hacer uso de estas piezas en el ordenador para realizar análisis de forma, de composición y por tipologías. En este caso, se hace la suposición de un panel ya segmentado y con una forma de lámina de goma, por lo que se parte de este paso para relatar el

proceso del prototipo a escala real.

Con estas características, se dibuja la superficie en el ordenador, mediante un programa de modelado tridimensional tipo CAD, para evaluar la forma, la función y el ensamblaje. Como se comentó anteriormente, se utiliza concretamente el programa Rhinoceros para diseñar los modelos tridimensionales.

Una vez que se obtienen las curvas "base", y se definen los materiales, los acabados, el sistema de montaje o subestructura, etc., se procede a introducir el espesor total del panel, que será el resultado de sumar la malla impresa en 3D, el GRC, el mortero y/o el acabado.

Cuando se tiene el diseño de todo el panel dibujado tridimensionalmente con las capas, se selecciona únicamente la malla que va a ser impresa en 3D. Dicha pieza tiene la responsabilidad de respetar la forma final, por lo que para ajustarse perfectamente a los paneles vecinos, se debe considerar tanto las capas que lleva en la cara exterior de la pieza, como en la interior, ya que dependiendo de la estructura de soporte, los encuentros o la base sobre la que va apoyada pueden afectar a su correcta colocación.

Se entiende que la superficie compleja de la malla requiere de soportes para su impresión y el vertido posterior del GRC, por lo que gracias a los estudios planteados en la prueba 2, se colocarán dichas piezas para su sustento, de acuerdo a los resultados obtenidos.

La impresión de la malla o núcleo se realiza en PLA (termoplástico), en la impresora M3 de Moebius Machines, ya que dicha empresa comenzó a desarrollar un prototipo de impresora de gran formato para el proyecto Iberoeka, basado en el tema de la presente tesis.

Para la impresión 3D se requiere de un programa puente que permita la previsualización de la pieza y la edición de las características de producción. Se selecciona el software CURA, debido a que la impresora M3 está configurada para trabajar sobre esta plataforma. Se establecen la altura y grosor de cada capa, la velocidad y calidad de impresión, la sobre-extrusión, la adición o no de soporte, el uso de ventilador, etc. Una vez se ha configurado correctamente el archivo de impresión, se genera en este mismo programa el G-Code, que es el lenguaje en el cual funcionan las impresoras 3D. Dicho código establece un patrón de producción, es decir, que codifica todos los pasos que debe llevar a cabo la impresora para obtener la pieza deseada. Al ser este proceso por capas, subdivide la superficie en planos horizontales, los cuales identifican la localización de los bordes de los sólidos y los vacíos, así como también convierte este análisis en operaciones específicas de la máquina y optimiza la impresión reduciendo el tiempo de fabricación de manera automática.

El GRC está pensado para reforzar la malla plástica, ya que tiene unas características muy valorables, tales como resistencia a la flexo-tracción, impermeabilidad, incombustibilidad y crea un

panel prefabricado autoportante con las suficientes prestaciones para cumplir con las normativas vigentes de un elemento de fachada.

Para este sistema, la utilización del GRC se hace de manera convencional, sin modificar de ninguna manera las condiciones de fabricación, ni de los materiales. Lo único que cambia es que no se vierte sobre moldes, sino sobre una malla impresa en 3D.

Antes de realizar la proyección, se deben preparar los anclajes o el sistema de fijación del panel. La medida recomendada del GRC es de 1 cm de grosor, el cual deberá ser alisado con un rodillo acanalado para que quede lo más compacto posible, eliminando los huecos de aire contenidos en la masa y para que pueda penetrar por los huecos de la malla. El grosor mencionado es el especificado por el fabricante de GRC (Prefabricados Ponce) y también ha sido contrastado con la *International Glass-fibre Reinforced Concrete Association* (GRCA) en el documento "Manufacturing GRC" (<http://www.grca.org.uk/grc-manufacturing.php>).

El GRC se prepara previamente con un mortero de cemento con las calidades que se han mencionado anteriormente, y se pueden comprobar en el Anexo 4.3. Se coloca en la pistola pulverizadora el hilo de fibra de vidrio, y una vez que se tienen listos estos dos elementos, se hace una primera prueba para ver si la pulverización es la adecuada, tanto del mortero, de la longitud de la fibra y la cantidad proyectada.

La resistencia alcalina de la fibra de vidrio depende principalmente del contenido de Zirconia (ZrO_2) presente en el vidrio, con un contenido aproximado de un 19% en el GRC realizado por Prefabricados Ponce. Las fibras son cortadas por la pistola pulverizadora con una longitud media de 32 mm. Es importante que la longitud de la fibra supere esta medida, ya que de acuerdo al estudio de Paradela et al., las longitudes menores de 25 mm son ineficaces para su correcto comportamiento mecánico (Sánchez Paradela & Sánchez Gálvez, 1991).

Una vez transcurrido el curado primario de 24 horas del GRC, se puede dar la vuelta al panel, para poder aplicar el mortero de relleno, el acabado o el GRC. En este punto, el mortero debe penetrar en los huecos de la rejilla para ayudar a la homogeneización de los materiales intervinientes.

En el caso del mortero es conveniente no sobrepasar la malla, es decir, que debe quedar enrasado con ella para evitar deformaciones y alteraciones en las medidas finales. Estas dimensiones se plantean previamente en la fase de diseño, para que el grosor de todas las capas como la del mortero, el acabado, el GRC, así como las perfilerías, dilataciones entre elementos, etc. no distorsionen la forma de los paneles, y para que quede ajustado correctamente en el espacio de la fachada que corresponde, sin problemas de tolerancias con los paneles colindantes.

Finalmente, se deja curar el tiempo necesario (7-28 días) en condiciones óptimas de temperatura y humedad (Miravete, 2004),

en las instalaciones de Prefabricados Ponce, en una zona especial de curado que tienen habilitado para esta fase.

Llegados a este punto, el panel debe estar listo para comenzar con las tareas de acabado. Este último proceso se debe llevar a cabo con técnicas convencionales como lijado, enlucido, emplastecido o pintado.

Como se ha comentado anteriormente, el acabado del GRC sin molde no es óptimo, ya que se pretende que la capa de este material se coloque por la cara exterior del panel, por lo que el industrial de Prefabricados Ponce ha buscado a una empresa que trabaja con morteros y aporte el menor espesor posible, garantizando una buena calidad de los terminados. Es por este motivo que la empresa Cement Design, se presta para realizar el acabado del panel con mortero de cemento, resinas y añadido de minerales, con un grosor medio de 0,5mm (Ficha en Anexo 4.7).

Antes de la aportación de este eco-cemento, se realiza un pulido para alisar lo mejor posible la superficie. Posteriormente se aplica una pintura metalizada o veladura metálica para obtener un acabado similar a una chapa metálica. Todo este trabajo se realiza manualmente y con herramientas básicas como lija, brocha y rodillo.

La elección específica del acabado de chapa automotriz o metálica, es para observar las posibilidades reales de este sistema, ya que una vez que se haya pintado, podría competir con un panel metálico, no sólo por el acabado, sino porque al no necesitar moldes, ni estampados, y no tener dilataciones y contracciones, se convierte en una buena opción por dichas cualidades y porque el precio del panel puede ser más competitivo.

4.3.5 Prueba experimental de panel a flexión como base para la Metodología de Investigación por Simulación.

Es bien sabido, que el cálculo estructural de las superficies arquitectónicas con formas complejas no se calculan manualmente, sino que se utilizan programas informáticos que permiten realizar de una manera fiable y en relativamente poco tiempo análisis mecánicos o simulaciones para ver el comportamiento de dichas envolventes.

Se decide realizar una prueba experimental para estudiar el comportamiento del nuevo sistema, concretamente a deformación, no a rotura, con un panel plano. De esta manera se pueden obtener datos que se transferirán posteriormente a un programa de simulación por el Método de Elementos Finitos (FEM), y de esta manera se podrá obtener una metodología que permitirá en un futuro calcular las deformaciones de los paneles de cualquier forma, por compleja que sea, ya que el ordenador será el que realice los cálculos.

Que la forma del panel sea plano es importante para poder realizar cálculos manuales de flecha y elasticidad, y una vez realizados, compararlos con los resultados arrojados en el programa FEM, y de esta manera asegurar si la metodología propuesta es correcta o no.

Otra de las hipótesis teóricas propuestas es la *No-colaboración* de la malla de termoplástico en los esfuerzos a flexión ya que la capacidad elástica del GRC (20 GPa aprox.) está comprobada que funciona excelentemente en espesores de 1 cm., por lo que la poca masa y escaso nivel de elasticidad del entramado de PLA (4 GPa aprox.) hacen previsible el resultado de no participar mecánicamente. No obstante, al ser un nuevo sistema, del cual no se tienen referencias de pruebas mecánicas, es importante realizar estos experimentos, ya que el comportamiento de la malla puede resultar azaroso.

De esta manera nace la prueba 4, la cual se crea para acometer una prueba de resistencia a flexión. La metodología utilizada en esta prueba es mediante experimentos no destructivos. La pieza a experimentar es un panel plano con un núcleo de malla de PLA reforzado con una capa de GRC por uno de sus lados y sus dimensiones vienen indicadas en la (Tabla 8).

Tabla 8. Características de la Prueba 4.

Prueba 4. Malla Plana de PLA.				
Material	PLA			
Dimensiones exteriores	1,00m	x	0,25m	x
	0,015m			
Dimensiones de celda	0,015m x 0,015m			
Grosor de malla	0,003 m			
Máquina utilizada	Witbox			
Tiempo de fabricación	42 hrs.			
Observaciones	Esta pieza se fabricó en seis partes y se unió mediante elementos de anclaje y cianocrilato comercial.

Fig. 162. Panel plano para prueba 4.

Fig. 162. Panel plano para prueba 4.

Para el cálculo a flexión se considera una luz de cálculo de 1000 mm, porque es una dimensión lo suficientemente amplia para ser concluyente y lo suficientemente manejable para poder hacer varios experimentos sin necesitar de una gran cantidad de materiales, útiles o tecnologías de apoyo.

A la pieza de estudio se le pone a prueba mediante dos tipos de cargas. La primera es mediante un útil de carga y la segunda por carga directa. Se colocan unos soportes de madera en los bordes laterales (Fig. 163).

En cuanto al cálculo manual, se pretende realizar un análisis por carga uniformemente repartida, como puede ser en el caso de viento, pero como a nivel experimental es difícil conseguirlo, se realiza una aproximación mediante el útil de carga, que según el Ing. Calavera de INTEMAC (Calavera Ruiz, García Dutari, &

Fig. 163. Panel reforzado con GRC y núcleo de malla de PLA. Soportes laterales y útil de carga.

Fig. 164. Diagrama por carga uniforme.

Fig. 165. Diagrama de dos cargas puntuales en los extremos, a un cuarto de distancia por cada lado.

Fig. 166. Comparación de diagramas. Resulta una flecha muy similar.

Rodríguez Escribano, 1992), el diagrama que se genera por una carga uniforme (Fig. 164) y el diagrama con cargas repartidas en los extremos, a un cuarto de distancia (Fig. 165), son muy similares, ya que reportan una flecha casi idéntica (Fig. 166)

Con estas pruebas experimentales se pretende medir las deformaciones a medida que varía el peso y la colocación de las fuerzas, para obtener datos como flecha y cargas, que se exportarán al programa de elementos finitos (FEM).

Los materiales y el equipo para la prueba experimental son:

- Panel de malla impresa en 3D de PLA, reforzada con GRC.
- Pesas y voluntario.
- Sistema de apoyos.
- Útil de carga.
- Cinta métrica.

El procedimiento se inicia con la medición del panel, su longitud, base y altura. Posteriormente se marca el panel con varias distancias, una al centro y dos a una distancia equidistante de 1/4 por cada extremo. Estas medidas sirven para colocar primeramente el útil de carga, que mide 0,50m y se coloca a 0,25m de cada extremo, y posteriormente, la medida central es para las cargas puntuales.

Una vez que se tienen recogidas todas las referencias, se coloca primeramente el útil de carga y se realizan tres cargas distintas con las cuales se miden las deformaciones a medida que se va variando el peso, tanto en carga como en descarga. La medida se hace al centro del panel y se mide el descenso realizado respecto a la horizontal. Se repite esta operación, pero sin el útil de carga y con los pesos al centro del panel de manera directa. Con esta prueba se debe obtener el descenso del panel en su fase elástica sin llegar a su etapa plástica, en la que no se miden las velocidades de descenso y tiempo de vuelta a su punto inicial.

Con los datos obtenidos se realizan unos cálculos manuales con la fórmula de Elasticidad para vigas, y se comparan con los datos obtenidos en la simulación por elementos finitos. De esta manera se analiza la cercanía del Módulo de Young del GRC con el obtenido en la pieza de la prueba 4, y así establecer la aportación de la malla termoplástica en el sistema de paneles.

4.4 Metodología de Investigación por Simulación

La metodología de simulación se incorpora a la tesis por la necesidad de dar valor al nuevo sistema creado de paneles de forma libre mediante una malla impresa en 3D, reforzada por GRC sin necesidad de molde. Gracias a la experimentación de un panel real en una prueba mecánica a flexión, se pueden comparar con los resultados obtenidos en el programa de elementos finitos (FEM), y establecer un nuevo método de cálculo para este sistema planteado, con cualquier tipo de forma, por compleja que sea.

Para que la simulación sea lo más cercana a la realidad, es necesaria la fabricación de un panel con el nuevo sistema, y que sea sometido experimentalmente a flexión, como se realiza en la prueba 4. Con los datos obtenidos, se colocan en el programa FEM, concretamente el software COMSOL, para observar los datos resultantes. Se trata concretamente de un estudio mecánico a deformación, no a rotura, ya que no se habla de seguridad, aunque se controlan que las deformaciones estén dentro de ciertos baremos límite.

El GRC es un material muy conocido y no requiere claramente que se estudie, pero al intervenir un nuevo elemento, como es la malla tridimensional de termoplástico, la cual no se ha comprobado en su unión con el GRC, justifica la utilización de esta simulación. Además, como señalaba anteriormente, es inviable hoy en día realizar cálculos manuales para elementos de formas complejas.

Los programas por método de elementos finitos, trabajan en general con aproximaciones de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy complejas con materiales isotrópicos, por lo que su utilización con las superficies de formas libres es esencial. El sistema a calcular no es isotrópico, pero se calcula como tal, ya sirve para uniformizar los cálculos tanto simulados como manuales.

4.4.1 Herramientas informáticas utilizadas para la generación de las pruebas de simulación.

COMSOL Multiphysics

Fig. 167. Imagen del programa COMSOL Multiphysics.

El programa elegido es el COMSOL Multiphysics (Fig. 167), debido a su accesibilidad y al conocimiento del doctorando. Es un software de análisis y resolución por elementos finitos (FEM) para varias aplicaciones físicas y de ingeniería, además de ser una herramienta de modelado y análisis para prototipaje virtual de fenómenos físicos, como en este caso, de mecánica estructural, soportando la integración de problemas de diferentes campos (multifísica) (Addlink, 2016).

4.4.2 Definición del modelo y consideraciones preliminares.

La definición de la pieza se realiza primeramente en el software de dibujo tridimensional Rhinoceros, y se exporta al programa COMSOL Multiphysics, como un archivo IGES. El modelado, así como la inserción de datos se hacen en el sistema métrico decimal y tomando como base el dibujo del panel plano de la prueba experimental 4, con las mismas dimensiones y características.

Las dimensiones son 1,00m x 0,25m x 0,030m, el grosor está dividido en dos, por una parte 0,015m de la malla plástica de PLA y otros 0,015m de GRC. En este caso se estudiará como un solo material, por lo tanto isótropo.

Para esta simulación, se hacen dos propuestas:

- Considerar el grosor total de 0,03, (GRC+Malla)
- Considerar únicamente 0,015m del GRC

En la primera propuesta, se realiza la simulación de un bloque isótropo, con un grosor de 0,03m, sin que se especifiquen los dos materiales. Por otro lado, se considera el panel con un grosor de 0,015m e isótropo. Esta última propuesta, que simplifica el método de simulación se entiende porque el material que aporta la fuerza y resistencia es el GRC y es probable que la malla termoplástica no tenga ninguna participación mecánica-estructural, sino que solamente sirve como encofrado perdido que aporta la forma. Por ello, es importante su observación para reconocer si se debe desestimar la malla en los cálculos venideros.

Una vez definido el dibujo del panel en el programa COMSOL, se realiza un análisis tridimensional denominado "*Solid Mechanics*", mediante un sistema estacionario. Posteriormente, se incorporan los elementos que intervienen en la simulación, como, las líneas de soporte y los puntos de carga.

El sistema de análisis es para un "material lineal elástico" en el que se proporcionan tanto en Módulo de Young, como el Coeficiente de Poisson. Para comprobar que el panel trabaja en unos baremos aceptables en cuanto a sus deformaciones, se realiza una serie de pruebas con distintos módulos de elasticidad para acercarse a la flecha obtenida en la prueba experimental.

Se establece un sistema cartesiano, estacionario, con un mallado fino y con un tipo de secuencia controlado por el programa. Las condiciones de carga son simplemente repartida, y no se

han contemplado las variaciones de acuerdo a la velocidad. Las condiciones de contorno se establecen en los bordes inferiores de los lados cortos, ya que es donde se han colocado los soportes en la prueba experimental.

Los datos constantes en la simulación son los de la medida del panel simulado, que son 1,00m x 0,25m. Se consideran dos grosores distintos de cálculo, por un lado 0,030m, que corresponde al sistema completo de GRC y la malla, y por otro lado de 0,015m que corresponde únicamente al GRC, como se ha explicado anteriormente.

La carga máxima que se aplica es de 110kg (1078N), que corresponde a una carga repartida de 4312 N/m., con una densidad de 1900 kg/m³ y un Coeficiente de Poisson de 0.24, resultado de una comparativa con los datos del GRC.

Una vez ya establecidos todos los datos y habiendo realizado tanto el mallado como el estudio estacionario general, se realizan los ensayos tanto con distintos módulos de elasticidad, como con los espesores de panel, para comparar si con determinado módulo se acerca a la deformación recabada en la prueba experimental. Dichos datos se explican más a fondo en el capítulo 5 de Discusión de Resultados.

Para obtener los resultados, y las imágenes, se solicita en el programa COMSOL, un gráfico tridimensional para que se muestren las deformaciones propias de la simulación del panel una vez que se ha calculado la carga y el descenso o flecha.

De esta manera se obtiene una simulación, la cual puede ser útil como sistema metodológico para calcular las deformaciones en paneles con formas complejas.

Capítulo 5

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Resultados del Estado de la Técnica y de la Investigación como resultado de la Metodología Documental

De acuerdo a la Metodología Documental se han obtenido una serie de resultados, los cuales se han expuesto en el Estado de la Técnica y de la Investigación. Dichas conclusiones preliminares, han permitido realizar un nuevo planteamiento respecto a los paneles de GRC de forma libre sin molde, favoreciendo su industrialización, los cuales se exponen a continuación:

- Existe una demanda real de producción de paneles de forma libre para la envolvente opaca arquitectónica, mediante métodos digitales de fácil acceso, viables y a un precio asequible. Ya que de momento los sistemas y soluciones de edificios con geometrías complejas generalmente están restringidos a grandes proyectos con presupuestos abultados, por lo que no se ha propiciado la universalización de esta tendencia.
- La utilización de las tecnologías CAD-CAM aportan una ventaja de optimización, rapidez y precisión, que son necesarias en la fabricación de paneles para fachada, sobre todo en aquellas piezas únicas con formas complejas.
- Los programas informáticos de dibujo tridimensional que utilizan las NURBS como base de creación de curvas, son muy necesarios en la concepción y diseño de las formas de doble curvatura, debido a la rapidez y facilidad en su manejo.
- Es necesario para la producción de paneles de forma libre, un programa informático que permita la segmentación de la envolvente en piezas fácilmente producibles en tamaño y forma, es decir, que permitan su racionalización y la posibilidad de ver mediante diseños paramétricos las distintas opciones que se pueden obtener para de acuerdo a una serie de características, elegir las más ventajosas según cada caso.
- Los métodos de fabricación digitales presentados se han elegido por su capacidad para crear paneles de forma libre. Los métodos sustractivos, aditivos, por conformado y heterogéneos, están avanzando muy rápidamente hacia la incorporación en la industria de la construcción, aunque aún falta mucho para estar a la altura de otras industrias como la automotriz, la aeronáutica o la naviera.
- El molde en la creación de paneles de formas complejas es en muchos casos esencial para su fabricación. Uno de los grandes inconvenientes en la producción de dichos elementos es la existencia de muchas piezas únicas, lo que conlleva la utilización de un molde único y exclusivo para cada elemento, incrementando de esta manera el precio, el tiempo y el innecesario desperdicio de material.

- Existen investigaciones que se inclinan hacia la producción de paneles de formas libres sin la utilización del molde. Algunos de estos trabajos se realizan mediante camas con barras automatizadas, mediante estampación o conformado de planchas metálicas o por plataformas hinchables. La investigación más avanzada y de gran relevancia para mi tesis es la desarrollada por Henriksen (Henriksen, Lo, & Knaack, 2016), que mediante una cama móvil y adaptable, crea paneles de GRC de forma libre, dando como resultado un elemento autoportante, prefabricado y con unas buenas prestaciones.
- Queriendo dar un paso más allá y con la necesidad de eliminar no solo el molde, sino el tiempo de espera de la cama, se concluye que el uso de la manufactura aditiva (AM) es una buena opción para la creación de la forma del panel, ya que puede producir una pieza distinta cada vez, sin encarecer por esto la producción. La AM es una opción viable debido a que los costes de ejecución no se incrementan por la complejidad de la pieza o del número de piezas realizadas, además de la ventaja de no utilizar moldes y la posibilidad de usar materiales biodegradables y reciclables como el PLA.
- La utilización del GRC es un acierto en la incorporación del nuevo sistema debido a sus excelentes características, como son su moldeabilidad, el mínimo grosor necesario para ser autoportante (10 mm), su comportamiento térmico, la resistencia mecánica y su incombustibilidad.
- Con todos estos fundamentos, se visualiza la posibilidad de crear un sistema alternativo mediante manufactura aditiva o impresión 3D, que le aporta la forma al panel, para posteriormente reforzarla con una capa de GRC, eliminando de esta manera el molde que encarece y ralentiza el proceso, además de evitar la creación de residuos.

5.1.1 Análisis de programas informáticos para la fabricación de paneles de forma libre mediante el nuevo sistema.

Se analizan los programas informáticos que son necesarios para formar parte de la creación de paneles de forma libre de GRC sin molde mediante impresión 3D. Así como también la utilización de la geometría como una herramienta indispensable, no sólo para resolver los problemas de las formas complejas, sino para la fabricación de dichas piezas. Dicha geometría se encuentra inmersa dentro del entorno digital, por lo que no se pueden desvincular ambos campos. A continuación se desarrollarán los cuatro tipos diferentes de software que se han analizado:

- **Programas informáticos en el proceso de diseño.**

Como se ha expuesto en el Estado de la Técnica, existen varios programas que permiten la generación de formas complejas en el campo de la arquitectura. No obstante, el programa Rhinoceros es el programa dentro de los analizados que más ventajas reporta.

La utilización de NURBS es muy importante, pero se pueden utilizar otros programas de diseño y dibujo tridimensional que no sean Rhinoceros, como puede ser Metrolog XG (<http://www.metrologic.fr/es-es/productos/software/metrologxg.aspx>), o el *Digital Project* (Ghery Technologies). En el caso del éste último, está basado en el programa de CATIA y reformado por el Estudio de Frank Ghery para explotar los recursos del programa a la hora de crear y fabricar superficies complejas como el Guggenheim de Bilbao o el *Concert Hall* de Walt Disney en Los Ángeles.

Como se verá en un futuro próximo, la necesidad de integrar en un solo programa (BIM) una variedad de funciones, puede ser beneficioso desde el punto de vista del arquitecto-diseñador y del fabricante.

- **Programas informáticos en el proceso de segmentación de la envolvente de forma libre.**

La optimización de la superficie de forma libre de una envolvente arquitectónica se obtiene mediante la segmentación en piezas más pequeñas para que sea fácilmente producible, como bien menciona Michel Eigensatz (Eigensatz et al., 2010)

El programa Rhinoceros tiene una serie de *pluggins* o software secundarios que permiten mediante el diseño paramétrico crear una segmentación de la envolvente en paneles construibles, con NURBS como base geométrica, tales como Karamba, Galapagos, Artisan o Grasshopper. Este último está orientado a funcionar como un editor de algoritmos generativos, el cual es un programa muy sencillo e intuitivo, el cual no requiere de una formación muy específica si ya se utiliza Rhinoceros.

El potencial de Grasshopper radica en el manejo simultáneo de gran cantidad de figuras y datos, que a partir de una serie de parámetros previos, se establece la partición de la superficie, dependiendo de las condicionantes del sistema, por ejemplo, que no puede superar una determinada medida, o que el nivel de curvatura no debe exceder tales grados, etc.

Otro de los puntos importantes a tener en cuenta, es que cualquier tipo de modificación realizada a nivel formal, se realiza en Rhinoceros y de manera automática se traslada a Grasshopper sin perder información en el intercambio, por eso entiendo que la vinculación entre ambos es óptima. Si se utilizaran otros programas no vinculados podría existir una deficiencia en los intercambios de información que pueden reportar problemas a corto y mediano plazo.

Existen programas informáticos que permiten la segmentación de la envolvente de forma libre en paneles producibles, pero existe uno muy específico denominado S-Form que puede dar una solución muy próxima a la necesidad de los arquitectos y fabricantes respecto al tema de segmentación y parametrización. Dicho programa lo están desarrollando desde la empresa Formtexx y Evolute para poder funcionar en varios programas CAD, pero sobre todo lo están promocionando en Rhinoceros.

Es un programa que saldrá en el año 2018 y según sus desarrolladores es el software que más se acerca a la panelización real de la superficie arquitectónica, especialmente para aquellas con formas complejas. Actualmente ya tienen en Evolute (<https://www.evolute.at/software-en/software-overview.html>) varios programas que permiten la panelización y la racionalización de las envolventes por medio de superficies desarrollables y para el mallado de superficies de forma libre, como LITE o FIT, pero según sus representantes, con S-Form se logrará realmente el deseado paso de la segmentación y racionalización de manera óptima.

- **Programas informáticos en el proceso de impresión.**

Debido a la condicionante de la impresora M3 de Moebyus Machines, el programa de impresión utilizado en esta tesis de una manera más asidua es el CURA, ya que los fabricantes de dicha máquina desarrollaron todas las características de impresión sobre dicho programa.

Se utilizaron anteriormente programas como el Slic3r (<http://slic3r.org/>), Repetier (www.repetier.com/), o Pronterface (www.pronterface.com/) para la impresión de las mallas más pequeñas en las impresoras Prusa i2 y Witbox. A pesar de que son programas de código abierto y gratuitos, tienen el inconveniente de que para conseguir una impresión con buena calidad es necesario interrelacionar varios programas, ya que son complementarios. En el primero se realiza el proceso de “*slicer*” o de rebanadas de la pieza en elementos horizontales, y en el Pronterface se establecen las condiciones de impresión. Por consiguiente era necesario saber manejar ambos, lo que hacía el proceso no sólo más lento, sino más engorroso.

El programa CURA se ha utilizado para la fabricación de la malla para el panel a escala real y ha funcionado muy bien en todos los casos. No obstante, al analizar los objetos a imprimir tarda demasiado tiempo, a pesar de tener un ordenador con una RAM de gran capacidad. También, al ser una tecnología en desarrollo constante, hay una serie de términos que al traducirlos del inglés al español suelen no tener mucha coherencia, pero espero que este tema menor se solucione con el tiempo. Es una plataforma estable y funciona de manera intuitiva, sobre todo para aquellos que se inician en el mundo de la impresión 3D. No obstante para el manejo correcto de la impresora y de todas sus capacidades es necesario incursionar en la sección avanzada del programa y tener unas cuantas horas de uso para saber manejarla adecuadamente.

- **Programas informáticos en el proceso de simulación.**

COMSOL es el programa que se utilizó para la simulación del panel por el método de elementos finitos (FEM). La elección de este software se basa especialmente en el conocimiento previo del doctorando, pero también porque es un programa con grandes prestaciones, no sólo para la parte estructural, sino también térmica, acústica, de fluidos, etc., que en líneas futuras de investigación se podrá utilizar. Los resultados obtenidos en este programa han permitido estimar la participación de la malla de

plástico en las pruebas simuladas de elasticidad.

Existen una gran variedad de programas de simulación de estructuras como ANSYS (<http://www.ansys.com/>), CATIA (<http://cadtech.es/catia>), AUTODESK *Simulation* (<http://www.autodesk.com/solutions/simulation>), Trelis (<http://www.csimsoft.com/>), entre otros, que pueden dar una solución fiable como se ha podido obtener del COMSOL, ya que la mayoría de los programas de simulación por FEM pueden aportar unos resultados similares, sólo es una cuestión de recursos y capacidades del usuario.

5.1.2 Análisis de la impresión 3D de mediana escala.

Las impresoras 3D mencionadas en el Estado de la Técnica y de la Investigación son de diversos tamaños, modelos y capacidades. Por lo que es prudente hacer un análisis específico de los medios técnicos que se han utilizado para la fabricación de las mallas termoplásticas, ya que son la base para un futuro desarrollo industrial.

A continuación se analizarán varios elementos de la impresión 3D referidos a la producción de las mallas de termoplástico.

- **Software.**

Las herramientas actuales de los programas informáticos especializados para la impresión 3D tienen grandes capacidades, como la de programar la impresión para que pueda tener material de soporte en piezas que por su geometría o posición lo requieran, además de poder incorporar varios extrusores en línea con los que optimizar la producción. Sin embargo, la necesidad de hacer más versátil este sistema hace que lo que ahora sirve, según pasa el tiempo se va quedando obsoleto, ya que cada vez salen nuevos *pluggins*, o nuevos programas que sustituyen a los actuales, por lo que tener un soporte informático estable y con buenas prestaciones, depende de la compañía que lo realiza y del interés que haya para estar constantemente renovando y actualizando su plataforma.

Por otro lado, creo que es necesario que exista una forma más sencilla de acercar el objeto diseñado a la fabricación, es decir, que no existan programas dependientes o puente de las máquinas, específicamente de las impresoras 3D. Si se pudiera diseñar mientras se previsualiza el elemento antes de producirlo, se reduciría mucho el tiempo que se pierde en las pruebas y comprobaciones entre los programas de CAD y de impresión, así como evitar el gasto de material innecesario en las pruebas fallidas.

En el caso de la impresión de la malla tridimensional para el panel de GRC, se detectaron una serie de factores a tener en cuenta:

- ◊ La versión 15.05 de CURA que se utilizó, es muy estable y no se registraron problemas relevantes en cuanto a la comunicación con la impresora.

- ◊ El uso del software CURA facilita la comunicación entre el programa de dibujo y la máquina, pero se han perdido muchas horas y material en las pruebas que se podrían evitar con un mejor previzualizador.
- ◊ El análisis previo que realiza el programa de impresión de los objetos a producir, requiere de mucho tiempo, además de que por cada modificación, por pequeña que sea, el programa vuelve a analizar todo el objeto desde el inicio, lo que ralentiza mucho esta fase del proceso.
- ◊ Para realizar una impresión con una calidad media y sin problemas, se requiere de experiencia y de un conocimiento del software, ya que existen conceptos un tanto complejos como las condiciones del *raft*, la retracción, el tipo de soporte, la temperatura del material, la velocidad de impresión o velocidad del ventilador, entre otros, que son importantes y determinan el resultado final.

- **Calidad.**

La mejora de la calidad en la impresión 3D es una de las prioridades que tiene el mercado de la manufactura aditiva, sobre todo aquellas por fabricación por filamento fundido (FFF) (Wohlers, 2016), (Gao et al., 2015). No obstante, para el proyecto de esta tesis, la calidad superficial de la malla no es un requisito indispensable, ya que se aprovecha el escalonado que se crea por la seriación de capas, para que tenga un mejor agarre con los materiales cementicios que se le incorporan posteriormente. Ya que si se tuviera un acabado liso como el de una pieza realizada por moldeo por inyección, tal vez no se podría garantizar dicha adherencia.

Como se verá más adelante, se ha podido comprobar en las pruebas 1 y 2, que la rugosidad del objeto impreso en 3D resultó favorecedor en este caso entre el GRC y el PLA de la malla. Como nota adicional, después de 2 años y medio de haber realizado esos prototipos, el material aún sigue actuando de manera monolítica con la malla y no ha tenido ningún desprendimiento, ni se presentan ningún tipo de anomalías.

- **Velocidad.**

Las impresoras en general aún son bastantes lentas, especialmente las de filamento fundido, sobre todo si se comparan con otros procesos industriales como el corte láser o el moldeo por inyección. Existen máquinas como la BAAM, que trabaja a una velocidad media de 5m/seg., con extrusores de 7 a 5 mm de diámetro (Cincinnati Incorporated, 2015), pero son tecnologías que aún no son asequibles, tanto por su precio como por la restricción de mercados debido al secreto industrial.

Una gran ventaja que tendría la impresión 3D sería mejorar la velocidad, lo que la convertiría en una tecnología competitiva. En el caso de la impresión del núcleo o malla de forma libre para los paneles de GRC, se pudo imprimir todo el panel en 95 horas (casi 4 días), a una velocidad media de 120-150 mm/seg., lo que es

mucho tiempo en el caso de tener que industrializar el proceso. No obstante, sigue siendo un tiempo más que aceptable si se compara con los moldes de goma que tardan aproximadamente una semana en prepararlos.

- **Material de impresión**

Un punto importante a considerar es el tipo de filamento que se va a utilizar. La M3 sólo permite materiales como el PLA, Pflex y PET. Se eligió el PLA por las condiciones de precio, operatividad y facilidad de reciclado. Al operar con PLA, el color fue un tema importante a considerar, ya que al imprimir en color negro, se detectó que tenía problemas de adherencia a la plancha, lo mismo que en otros colores como el blanco y el verde. El color que mejor adherencia y calidad de impresión tuvo fue el color gris. No existe un resultado concluyente de los motivos por los cuales ha surgido este problema, pero como la malla queda embebida entre el GRC y el motero, y no tiene una prestación estética, se ha continuado trabajando con el color gris, hasta que se solucione el tema de la coloración de los filamentos.

El PLA es un material que aporta unas condiciones de rigidez lo suficientemente necesarias para ser autoportante cuando es una pieza plana, pero cuando cambia la superficie y se curva, comienzan los problemas de oscilaciones, tanto en la impresión, como en el transporte o en el proyectado de GRC. Por lo tanto, es necesario que se integren elementos de soporte y rigidización, que aseguren que la retícula no tendrá movimientos indeseados, sobre todo cuando se realiza el vertido del GRC, ya que puede generar alteraciones dimensionales y formales no deseadas.

En el caso de la calidad de impresión relativa al material del soporte es un tema complejo, ya que la necesidad de soporte para la impresión de estas superficies sinuosas es imprescindible en la mayoría de los casos, pero se entiende que la calidad de la malla no tiene porqué ser la misma que la del soporte, pero esto no es posible regularlo o modificarlo de momento en la M3. No obstante, para mejorar este tema, se realizaron algunas pruebas simuladas, las cuales se verán con más detalle en los puntos siguientes. Se instalaron unos soportes diseñados desde el programa de dibujo, para ahorrar tiempo y material, ya que si se dejaba que el programa de impresión (CURA) colocara el material de soporte preestablecido, no sólo se elevaba en un 23% el gasto de material, sino que también se alargaba el tiempo de fabricación en un 28%.

Para evitar todo este tipo de precauciones, se podría utilizar filamentos de PLA que incorporan fibras que refuerzan el material, como es el caso de fibras de carbono (<http://filament2print.com/es/pla-especial/656-fibra-de-carbono-proto-pasta.html>) o de nylon (<http://filament2print.com/es/184-taulman-nylon>), ya que le aportan a la pieza una mayor rigidez a costa de eliminar la flexibilidad del objeto, pero esta sería una buena opción a considerar, así como incorporar otros materiales termoplásticos que ayuden a simplificar el proceso de impresión. Aunque de momento son filamentos muy costosos, pero se espera que con el tiempo los precios bajen.

- **Otras características de la impresión 3D.**

En el caso de las piezas impresas para esta investigación, no se han registrado problemas por el grosor del extrusor, ya que trabajando con un diámetro de 0,4mm, 0,8mm y 1 mm de boquilla y filamento de 1,75 mm, se han logrado paredes de 1 mm de grosor, que como se ha visto en la prueba 1, es un tamaño adecuado para la malla. Con esta medida lo que se intenta es que la máquina haga los menos recorridos posibles para optimizar la impresión y reducir el tiempo de ejecución. Aunque de momento no se ha logrado del todo.

En el mercado se han estandarizado dos diámetros de filamentos, 1,75mm y 2,85mm para boquillas entre 0,2mm a 1 mm. La problemática se plantea cuando se habla de objetos de grandes dimensiones en los que no se requiere una precisión de micras, pero si de una mayor velocidad, la cual se podría lograr aplicando una boquilla de mayor grosor. Algunos expertos afirman que no se puede trabajar con filamentos tan grandes (2,85mm) debido a que suelen dar problemas en los extrusores, y que existe un problema en la escala a la hora de pasar de una boquilla de 1 mm a una de 5 mm, ya que el motor de inyección del filamento no es capaz de alimentar ese grosor a una velocidad mayor. Por lo tanto, es un problema que la técnica aún no ha llegado a ese punto de manera comercial, pero si existe en la práctica, ya que la BAAM puede imprimir a una velocidad de 5m/seg con boquillas de 5mm.

La medida del área de impresión es un tema que depende directamente de la posibilidad de desplazamiento del cabezal de extrusión. En cuanto al software, la posibilidad de que imprima en una cama de 1m x 1m es igual que si fuera de 10m x 10m. El problema es cuando se habla de recorridos, de la estructura de soporte de la máquina, de rotores, de correas, etc. Todo esto comienza a producir una serie de inconvenientes debido a la escala, que es complejo realizar, pero como se ha demostrado en otros ejemplos de máquinas de gran formato por fabricación de filamento fundido (FFF) (DUS architects, 2015), (Cincinnati Incorporated, 2015), (Moretti, 2015), se pueden realizar.

Muchas de las piezas que tienen las impresoras 3D por FFF, se pueden producir en la misma máquina, lo que se denominan "máquinas autorreplicantes" (Bowyer, 2017). La auto-replicación es una gran virtud que el movimiento RepRap ha dado al mundo de la impresión 3D, ya que se pueden descargar piezas desde una biblioteca en Internet y tenerla en pocas horas ya hecha. Por lo que el tema de repuestos no es un problema, sino una ventaja comparada con otros procesos de la industria. El resto de los elementos que no pueden fabricarse en la propia impresora, son de uso común en la industria, por lo que su reparación no resulta compleja.

5.2 Análisis de los resultados de las pruebas experimentales

Las pruebas experimentales son la base para estudiar la viabilidad técnica del nuevo sistema. Gracias a dichos ensayos se pueden comprobar las condiciones y características de lo que posteriormente será el prototipo a escala real, y finalmente postular las etapas y procesos necesarios de la fabricación de paneles de forma libre de GRC sin molde.

Resultados de la Prueba 1.

Es evidente que en esta prueba se partía de cero, ya que el sistema propuesto es nuevo y no tiene ninguna referencia anterior respecto a proporciones, características o condiciones, a pesar de que se tienen como base dos procesos ampliamente conocidos como son el GRC y la impresión 3D, pero su conjunción no estaba clara.

Para realizar el primer panel, se estableció la premisa de trabajar con una forma simple, por lo que se creó una malla plana y de forma rectangular, con unas medidas de 0,32m x 0,22m x 0,01m. Como se comentó anteriormente en el punto 4.3.5. (Pruebas experimentales de fabricación del nuevo sistema), la base de la medida de los huecos (0,014 x 0,014m) viene dada por la experiencia y observación del *deployé* con mortero de cemento, así como el análisis de la propia granulometría de los materiales intervinientes, tales como la arena, el mortero y las fibras de vidrio, que rondan entre los 0,0012 a 0,0036 m.

Fig. 168. Malla de termoplástico (ABS) con mortero de cemento Beisser, después de 24 hrs. de curado.

La malla se realizó con la impresora Prusa i2, con el material ABS, tal y como se especifica en la tabla 5, del punto 4.3.5. En la primera prueba (Fig. 168), se colocó sobre la pieza plana termoplástica, un mortero convencional, con una consistencia relativamente densa, para que permaneciera en la malla. Se eligió una mezcla de cemento rápido tipo Portland de la marca Beisser (ficha técnica en el Anexo 4.4), la cual resultó muy favorable, ya que al tener esa consistencia pastosa, le permitió filtrarse por las celdas de la malla, pero sin escurrirse por completo. Posteriormente se alisó con una llana aplicando una pequeña presión, para que la mezcla se introdujera lo más posible en los huecos.

Fig. 169. Rejilla con GRC, se puede comprobar que no traspasa lo suficiente.

Dentro de esta prueba, se realizó un segundo experimento (Fig. 169), el cual consistió en la proyección de una capa de GRC sobre la malla de ABS, pero con el mismo objetivo, que era el de averiguar si el tamaño de la celda era el apropiado, así como el comportamiento del material y su adherencia a la malla. Esta se llevó a cabo en las instalaciones de Prefabricados Ponce, ya que era necesario comprobar con las técnicas y los métodos habituales de proyección del GRC, cómo se comportaba la malla y las condiciones en las que era mejor realizar dicha prueba.

Con dichas medidas de hueco, se pudo comprobar tanto con mortero de cemento, como con GRC, que las dimensiones son apropiadas para que los materiales cementicios utilizados para este panel se quedaran atrapados y no traspasaran hacia el

otro lado.

De acuerdo a la literatura revisada, no existe ninguna prueba científica que avale que el GRC en unión con termoplásticos genere algún problema. El cemento en contacto con varios plásticos ha resultado una mezcla apropiada en otros casos, como la mezcla de morteros con resinas plásticas (Meshgin, Xi, & Li, 2012), o plásticos reciclados (Saikia & De Brito, 2012). Después de dos años y medio de haber realizado dichos experimentos, siguen conservando sus características físicas y se comportan de manera homogénea y armónica.

Se concluye en esta prueba, que el tamaño apropiado de hueco de la malla termoplástica ronda entre los 0,01m a 0,02m. Se entiende que cuanto más grande es el hueco, se ahorra más en el material de impresión y se acelera su producción, pero esta medida tiene un límite que debe tomarse muy en cuenta debido a que tanto el GRC como el mortero, pueden colarse a través del entramado. También se observa que no existe ningún problema al poner en contacto los materiales, por lo que es un buen resultado para continuar avanzando en esta investigación.

Resultados de la Prueba 2.

Los objetivos de esta prueba son tres. El primero es averiguar las capas que son necesarias para realizar el panel, de tal manera, que sea lo más esbelto y ligero posible. El segundo, es solucionar el tema del acabado final, ya que como bien es sabido, el GRC tiene un acabado muy bueno cuando se ha realizado sobre molde, pero cuando no lo tiene, su aspecto debe mejorarse. Finalmente, se tiene que establecer la tipología más apropiada de soportes de la malla a la hora de imprimirlos en 3D, ya sea pre-diseñados en CAD o mediante los que aporta el programa de impresión.

Si se requiere de un elemento esbelto, es necesario tener en cuenta las capas mínimas necesarias para el panel sin que pierda la forma, por lo que se precisa analizar el grosor de cada capa, así como el ahorro de material y la ligereza del mismo.

Una vez que ya se tenía establecido el tamaño de la celda y la buena conjunción entre materiales, era oportuno dar un paso más y probar el sistema en un elemento de doble curvatura, por lo que se eligió producir una sección de un casquete esférico, ya que se puede trabajar con una forma uniforme y fácilmente reproducible (Fig. 170).

Se imprimieron seis piezas en la impresora Witbox, con termoplástico de PLA gris, después de hacer varias pruebas con otros colores de filamentos. Estos elementos no tuvieron que imprimirse por separado, sino que son elementos monolíticos y realizados en una pieza con una duración aproximada de 9 hrs por cada una.

En el primer ensayo, se vertió mortero por la cara exterior del panel, tratando de que se rellenaran todas las celdas (Fig. 171), pero dejándolo completamente enrasado, para que al añadir otro material, no se perdiera la forma. Con esta medida, se po-

Fig. 170. Dibujo en CAD de la prueba 2 con soportes prediseñados.

Fig. 171. Prueba 2. Experimento 1. Casquete esférico de PLA con mortero enrasado por la cara exterior.

Fig. 172. Prueba 2. Casquete esférico de PLA con mortero por la cara interior.

drían evitar deformaciones e intolerancias entre elementos ya que se mantiene la forma inicial de diseño.

También se puede observar que no hay problemas en la cara posterior (Fig. 172), ya que el motero ha traspasado un poco la malla, pero no se ha perdido del todo el material, quedando perfectamente alojado en las celdas.

Por lo tanto, se ha comprobado que puede ser posible un panel de tres a cuatro capas mínimas (Malla + GRC + Mortero + Pintura) para obtener un elemento de fachada lo más ligero posible. No obstante, esto es un acercamiento mediante elementos de experimentación a escala, por lo que se espera que una vez que se realice el prototipo a escala real se pueda concretar dicha suposición. Por los avances y resultados que se han obtenido en esta experimentación, se entiende que puede ser muy probable que se consiga.

Como ya se advirtió anteriormente, el casquete esférico es una pieza que está en vuelo y sólo se apoya en las cuatro esquinas, así que para que no colapsara a la hora de imprimirlo, necesitaba de material de soporte. En los programas de impresión 3D, es opcional colocar material de soporte, por lo que si se decide utilizarlo, la máquina 3D aplica material a discreción de manera predeterminada, sin opción a reducir el gasto de material, donde colocarlo o modificar la calidad de dichos elementos.

Por lo tanto, se colocaron como una propuesta alternativa unos pilares en la parte interior del casquete de forma estratégica en la fase de diseño, los cuales se dibujaron en el programa CAD para estudiar si instalando dichos elementos previamente se podría reducir el tiempo y el material de impresión.

Se realizaron dos simulaciones de la pieza en el programa de impresión CURA. En la primera se colocó la pieza con los soportes prediseñados en CAD (Fig. 173), y en la segunda se puso la pieza sin soportes interiores (Fig. 174), solo los de las esquinas, para que el programa colocara el material necesario de relleno para imprimir la pieza de manera efectiva y que no colapse.

Con la opción "a" se tarda un 40% menos de tiempo y además el gasto de material es una quinta parte que con la opción "b" (Figs. 173, 174, 175 y 176). El tema de colocar material de so-

Fig. 173. Casquete esférico impreso en 9 hrs, 10 minutos, con un gasto de material de 61 gr. de PLA.

Fig. 174. Casquete esférico impreso en 24 hrs, 10 minutos, con un gasto de material de 309 gr. de PLA.

Fig. 175. Gráfico de gasto de material para la prueba de soportes.

Fig. 176. Gráfico del tiempo que tarda en imprimir los soportes.

porte es necesario debido a que las piezas que se imprimirán, normalmente tendrán geometrías complejas con ciertos vuelos, o alejadas de la cama de impresión. Dicho esto, se debe realizar un análisis pormenorizado de la pieza antes de su impresión, para que en cada pieza que se vaya a imprimir, se coloquen los soportes necesarios en la fase de diseño (CAD), y cuando se fabriquen, no tengan problemas de ejecución.

También se ha comprobado que cuando se realiza el proyectado de GRC, los soportes pueden ser necesarios para que no se produzcan deslizamientos o deformaciones de la malla, por lo que puede ser prudente, según cada caso, eliminar dichos soportes una vez que hayan pasado por lo menos 24 hrs después del vertido.

Finalmente, para la prueba 2 se realizaron unas propuestas de acabados superficiales para ver las posibilidades de este tipo de paneles, sometidos a terminados propios de la industria automotriz, o simulaciones muy cercanas a los metales. La idea de buscar esta cercanía con los paneles metálicos, se debe a que este sistema de paneles de forma libre de GRC sin moldes, podría ser capaz de competir en precio y calidad con las chapas metálicas de fachada, ya que el nuevo proceso no requiere de sistemas de moldeos, estampación o curvados, por lo que puede ser más económico, además de no tener alteraciones propias del metal.

Como se puede observar en la Figura 177, se ha colocado en la malla de doble curvatura unas pruebas por etapas. La primera etapa (de abajo hacia arriba), es el vertido del mortero y enrasado de la malla. El segundo, es el lijado del mortero, y cubierto con masilla para cubrir las imperfecciones. En la última franja se ha pintado con una pintura plástica, la cual ha quedado con un acabado liso con una excelente calidad.

En la Figura 178, se pueden ver los diferentes estados del proceso de acabado, desde el pulido hasta el pintado, con un terminado brillante como una chapa automotriz con pintura metalizada, simulando perfectamente un panel metálico.

Por lo tanto, se concluye en este punto, que no sólo es posible obtener un panel ligero y esbelto, sino que puede tener unos acabados muy competitivos, como el de la chapa metálica. En

Fig. 177. Prueba 2. Casquete esférico con capas por fases.

Fig. 178. Prueba 2. Casquete esférico con pintura automotriz como acabado final.

la cuestión de los soportes, es más apropiado por ahorro de material y de tiempo, colocar los soportes a las piezas en el fase de diseño, para que se pueda trabajar de manera óptima con el panel.

Resultados de la Prueba 3.

Una vez que se han obtenido unos resultados muy positivos en las anteriores pruebas, se procede a desarrollar un panel a escala real (Fig. 179), para verificar los datos recabados y para estudiar la viabilidad de fabricación de este nuevo sistema.

Una condición primordial de este prototipo, es que debe tener todas las características de un panel de fachada para poder hacer un análisis apropiado, de cara a su posible industrialización.

Fig. 179. Propuesta de panel con el nuevo sistema. Ilustración por capas.

Quiero hacer mención de varios proyectos de investigación que están en marcha de manera paralela, como el CDTi y la patente de invención, que han surgido gracias al tema de investigación de la presente tesis. Por lo que, aprovechando la disposición de las empresas participantes como Prefabricados Ponce, Moebius Machines y Cement Design, se ha podido completar este prototipo de estudio.

Para analizar la fabricación del prototipo a escala real, se explica de una manera más específica mediante cuatro etapas, que son, el modelado, la impresión 3D, el vertido de GRC y el acabado.

- **Modelado.**

La forma del panel seleccionada es una superficie de forma libre, con curvas cóncavas y convexas, basada en el concepto de la *"Rubber sheet"*, (mencionada en el cap. 3.2.1), ya que este tipo de forma parece la más apropiada, por sus curvas y

sus transiciones. También varios centros de investigación han tomado esta "lámina de goma" como referencia formal para realizar experimentos relacionados con la fabricación de paneles de geometrías sinuosas y por la singularidad de su forma, ya que tiene curvas positivas y negativas, así como una transformación entre ellas en la misma cara del panel.

Se considera que las dimensiones del panel prototipo deben asemejarse a las de un panel de fachada real, que pudiera transportarse fácilmente, y que pudiera ser fabricado en la impresora M3, la cual tiene unas medidas máximas de impresión de 1,00m x 1,00m x 1,00m. Por lo que al adecuar la superficie "Rubber Sheet" en el programa CAD, las medidas resultantes fueron 1,00 m x 0,90 m x 0,27m, tal y como se ve en la Figura 179.

En el supuesto de que se estuviera realizando el diseño de una fachada de forma libre, en esta primera fase, se debería realizar una panelización o segmentación de toda la envolvente. Sin embargo, este paso no se ha realizado, ya que se toma directamente el panel, como si fuera resultado de una supuesta división de fachada previa.

Se ha utilizado el programa Rhinoceros para diseñar los modelos tridimensionales. Se introducen las medidas y formas del panel al programa CAD, por lo que una vez se han obtenido las curvas "base", y se han definido las capas, el sistema de montaje o sub-estructura, se procede a introducir el grosor del panel, que será el resultado de sumar la malla impresa en 3D, el GRC, el mortero y/o el acabado. Idealmente, se propone que para crear un panel lo más ligero y manejable posible, debe tener unos grosores mínimos de 0,01m de GRC, 0,01m – 0,015m de malla termoplástica y 0,005 de mortero y acabados. Por lo que el grosor final rondaría los 0,03m.

Una vez que se tiene el predimensionado del panel con todas las capas, se selecciona únicamente la malla. Dicha pieza tiene la responsabilidad de respetar la forma final, por lo que para ajustarse perfectamente a los paneles vecinos, se debe considerar tanto las capas que lleva en la cara exterior de la pieza, como en el interior, ya que dependiendo de la estructura de soporte, los encuentros, o la base sobre la que va apoyada pueden afectar también a su correcta colocación.

En el programa de dibujo se procedió a crear la malla tridimensional a partir de cuatro curvas NURBS de segundo nivel (Fig. 180a), con unas dimensiones de 1,00 m x 0,90 m, con una altura de 0,27m entre crestas. Una vez realizadas las líneas base, se generó una superficie de cobertura (Fig. 180b), mediante el comando: "superficie a partir de 3 a 4 curvas", el cual la convirtió en una superficie cerrada. Posteriormente se creó un sólido con un grosor de 0,01m mediante extrusión. Y finalmente se perforó mediante una serie de sólidos para formar los huecos y así crear la malla (Fig. 180c).

Una prioridad en el diseño de la malla es que el GRC pueda ser capaz de penetrar en la malla lo suficiente, pero sin traspasar por completo para evitar la pérdida de material. Así que gracias

Fig. 180. Proceso de creación de panel en el programa Rhinoceros. a. Cuatro curvas NURBS. b. Superficie "Rubber sheet" de forma libre. c. Panel volumétrico convertido en malla.

Fig. 181. Representación del prototipo en archivo STL. En la imagen de la izquierda se puede observar la segmentación triangular de la pieza.

a las experimentaciones previas con varias mallas y vertidos de mortero y GRC, se concluyó que la medida óptima de celda ronda entre los 0,01m y los 0,02m (ver punto 4.3.5. Pruebas experimentales) y una altura de la malla de 0,015m.

Con estos datos, para realizar las celdas de la malla, se dividió la superficie en partes iguales, de tal forma que el grosor de cada pared fuera de 0,002m de manera constante. Por lo tanto, se creó una malla con celdas de 0,011m x 0,012m cada una, siendo en total 70 huecos en el eje X y 66 huecos en el eje Y.

Una vez que se diseñó la malla en el ordenador y se colocaron una serie de soportes, se procedió a ser exportado como un archivo STL, desde el propio programa Rhinoceros. Este tipo de archivo consiste en una lista de coordenadas de caras triangulares, cuyos bordes coinciden perfectamente para crear una representación de la superficie del modelo (Fig. 181).

- **Impresión 3D.**

Comúnmente, al obtener el archivo STL, se traslada a un programa dependiente de la impresora 3D, como es en este caso el software CURA, ya que como se ha mencionado anteriormente la impresora M3 está creada y programada en este programa.

Una de las primeras cuestiones que se presentaron en esta fase, era decidir si se imprimía la pieza de manera horizontal o vertical. Al realizar unos estudios previos y gracias a la previsualización y estimación que aporta el programa CURA, se vio que hacer la pieza en horizontal tardaba alrededor de 96 horas y en vertical 55 horas.

Fig. 182. Panel "Rubber Sheet" con soportes vistos en el programa de impresión Cura.

No obstante, para asegurar su correcta ejecución se concluyó realizar la pieza en horizontal (Fig. 182), con unas piezas de apoyo pre-diseñadas en el programa CAD. Se tomó esta decisión debido a que en la mayoría de los ensayos previos y en impresiones en otras máquinas, se ejecutó en horizontal con unos resultados muy buenos. También he de recalcar que se llevaron a cabo impresiones de la misma pieza a escala 1:25 en posición vertical, y dio algunos problemas de retracción y movimiento de la pieza

por oscilación según crecía en altura.

En el programa CURA, se establece el grosor de la capa, la altura de capa, el tipo de relleno, la velocidad de extrusión, el uso o no del ventilador, la capa perimetral denominada "*skirt*", o la capa de base "*brim*". En el caso de esta pieza y debido a su gran tamaño, los técnicos de la empresa Moebyus Machines, fueron quienes aconsejaron que era necesario colocar el "*raft*". Dicho "*raft*" es una base que se imprime previamente a la pieza deseada, la cual es lo suficientemente rígida para evitar movimientos una vez que se comienza a imprimir, además de que ayuda a la homogeneización de la superficie en la base. En el Anexo 5.1 se pueden ver las características de impresión desglosadas para este prototipo, realizados en el programa CURA.

Se realizaron varias pruebas o tentativas de impresión, para ajustar las características más apropiadas, y se tuvieron en cuenta las recomendaciones del fabricante. Una vez que se tuvieron listos dichos puntos, se generó el G-Code (Fig. 183), que es el lenguaje en el cual funcionan las impresoras 3D. En dicho código se establece un patrón de producción específico, es decir, que codifica todos los pasos que debe llevar a cabo la impresora para obtener la pieza deseada. Al ser este proceso por capas, subdivide la superficie en planos horizontales, los cuales identifican la localización de los bordes de los sólidos y los vacíos, así como también convierte este análisis en operaciones específicas de la máquina y optimiza la impresión.

La pieza se imprimió en la M3 de Moebyus Machines, con una capacidad de 1,00m³, y el material utilizado para la impresión es PLA (Ácido Poliláctico), debido a que la máquina está creada con unas especificaciones que son propicias para este material. Además, el PLA es biodegradable y todo el material sobrante o residual puede ser reciclado (<https://www.bq.com/es/pla>), (ht-

```

;FLAVOR:RepRap
;TIME:2632151
;Generated with Cura SteamEngine 2.3.1
M104 S200
M109 S200
G28 ;Home
G1 Z15.0 F6000 ;Move the platform down 15mm
;Prime the extruder
G92 E0
G1 F200 E3
G92 E0
;LAYER_COUNT:1954
;LAYER:0
M107
G1 F1500 E-6.5
G0 F2541.2 X903.487 Y23.302 Z.3
;TYPE:SKIRT
G1 F1500 E0
G1 F1800 X903.583 Y22.529 E0.0293
G1 X903.757 Y21.769 E0.05864
G1 X904.009 Y21.031 E0.08797
G1 X904.335 Y20.323 E0.1173
G1 X904.731 Y19.652 E0.14661
G1 X905.195 Y19.025 E0.17596
G1 X905.72 Y18.449 E0.20528
G1 X906.301 Y17.93 E0.23458
G1 X906.933 Y17.473 E0.26393
G1 X907.608 Y17.083 E0.29325
G1 X908.319 Y16.764 E0.32257

```

Fig. 183. G-Code del prototipo a escala real.

[tps://filaments.ca/](https://filaments.ca/)).

Una vez que la impresora 3D ha recibido el código de actuación o *G-Code*, comienza el proceso automático de impresión, depositando capa a capa filamento termoplástico mediante un extrusor en el área de impresión (Fig. 184).

Fig. 184. Pruebas de impresión del prototipo en la M3 de Moebius Machines.

Por las propiedades intrínsecas de la impresión 3D mediante el depósito de material por capas, se crea un efecto de micro-esalonado en las superficies y bordes debido a la sucesión de capas. Esta situación se entiende que puede ser favorable a la fabricación del panel, ya que dicha rugosidad ayuda la unión entre el termoplástico (ABS, PLA), el GRC y el mortero de cemento. Mientras el plástico moldeado usualmente tiene una superficie lisa y suave, las estrías en la pieza impresa en 3D, son apropiadas para la adherencia entre materiales.

Cuando la impresora 3D terminó de fabricar la pieza después de 96 horas (4 días), se retiró de la cama o base de impresión todo el material de soporte y el *"raft"*. No obstante, debo puntualizar que como cada pieza tiene su particularidad, en ocasiones es posible que para el vertido de GRC se requiera del material de soporte, por lo que se deberá esperar a que transcurra el tiempo de curado antes de retirarlo. En el caso de la *"Rubber Sheet"* no ha sido necesario dejar los soportes y se retiraron todos para proceder al siguiente paso del proceso.

- **Reforzado con GRC.**

La proyección del GRC se realiza de la manera habitual, es decir, que los industriales se hacen cargo de este proceso sin modificar de ninguna manera sus condiciones de utilización, ni del tipo de material, ni incluyendo algún tipo de aditivos especiales. Lo único que cambia es que no se vierte sobre moldes, sino sobre una malla impresa en 3D, por lo que el desencofrado no es necesario.

Previamente al vertido del GRC, se realiza un mortero de cemento en una tolva con las calidades que se ven reflejadas en el

Fig. 185. Máquina de mezcladora GA 125, motor 7,5 Kw.

Anexo 4.3. Se coloca en la pistola pulverizadora hilo de fibra de vidrio, y una vez que se tienen listos estos elementos, se hace una primera prueba para ver si la pulverización es la adecuada, tanto del mortero, como de la longitud de la fibra y la cantidad que arroja. Las fibras son cortadas por la pistola con una longitud media de 32 mm. Todas estas operaciones se realizan en una misma máquina, como se puede ver en la Figura 185.

Para que el panel no tuviera problemas de movimientos a la hora de verter el GRC, unos operarios lo aseguraron a una base con unos tacos de madera (Fig. 186). Como se ha comentado anteriormente, se puede fortalecer la pieza para que no se deforme a la hora del proyectado de GRC con algunos elementos de soporte, ya sea que se diseñen desde el programa CAD y no se eliminen después de la impresión, o esperar a llegar a fábrica en la cual se le añadirán unas piezas de soporte como se hizo en este caso.

En este prototipo se proyectó el GRC por la cara exterior de la

Fig. 186. Colocación de la malla en una superficie apropiada con sujeción lateral.

Fig. 187. Pulverizado del GRC sobre malla impresa en 3D.

mallla (Fig. 187). Se propuso el vertido de 1 cm de grosor, el cual fue alisado por los operarios para que quedara lo más compacto posible y para que pudiera penetrar por los huecos de la malla. Dicho grosor es el especificado por la *International Glassfibre Reinforced Concrete Association* (GRCA) en el documento *Manufacturing GRC* (<http://www.grca.org.uk/grc-manufacturing.php>), y además, los industriales de Prefabricados Ponce concluyeron que sería una medida apropiada para este panel.

Por la cara interior se colocaron unas esperas para los anclajes, para que una vez curado y terminado, pudiese colocarse en una fachada.

Una vez terminado el proceso de pulverización, un operario realiza un aplanado de las fibras mediante un rodillo metálico acanalado (Fig. 188) para que quede lo más liso posible y ajustar el grosor en toda la pieza a 1 cm. Como se puede apreciar en la Figura 189, el material se queda contenido en la superficie y no traspasa. Esos pequeños elementos que se observan, una vez

Fig. 188. Alisado de las fibras de vidrio mediante cepillo metálico.

Fig. 189 Cara interior del panel por el cual no traspasó el GRC, salvo algunos pequeños elementos.

que se ha endurecido el GRC, se pueden eliminar con una lija fácilmente.

Una vez terminado el curado primario (24 hrs.), se procedió a dar la vuelta al panel, para colocar una capa de mortero por la cara interior y que quedaran las esperas bien alojadas. Finalmente, se dejó curar el tiempo necesario (28 días) en condiciones óptimas para elementos de GRC .

- **Acabado final.**

Llegados a este punto, el panel estaba listo para comenzar con las tareas de acabado, las cuales se llevan a cabo gracias a técnicas convencionales como lijado, enlucido, emplastecido o pintado.

En el caso específico del prototipo, una vez que finalizó el proceso de curado, se lijó la superficie del panel con lija de grano medio para eliminar las imperfecciones más evidentes. El industrial de Prefabricados Ponce, al ver que la calidad del acabado que le podían dar no era el apropiado, se puso en contacto con una empresa de acabados de mortero llamada Cement Design.

Una vez que se trasladó el panel a las instalaciones de Cement Design, se lijó nuevamente la superficie con una lija de grano

Fig. 190. Vertido de mortero con resinas de Cement Design.

fino, posteriormente se limpió todo el polvo y residuos, y se procedió a la incorporación de un emplastecido con mortero de cemento con resinas (Fig. 190) con un grosor de 0,5 mm. (ver ficha en anexo 4.7) para cubrir las imperfecciones y nivelar las superficies. Todo este trabajo se realizó de manera manual con herramientas básicas como lijas, llana, paletas, bochas y rodillos.

Una vez aplicado el mortero, se dejó secar (alrededor de 3 días), para después lijar y bruñir la cara exterior para conseguir un acabado liso (Fig. 191). Posteriormente se pintó con una veladura metalizada con un rodillo (Fig. 192), obteniendo un acabado similar a una chapa metálica.

Se eligió específicamente este acabado para demostrar las posibilidades en cuanto a apariencia real de este sistema. Con esta prueba se obtiene un acabado que roza casi la perfección, ya que gracias a los resultados obtenidos se puede decir que puede competir con un panel metálico, no sólo por el acabado, ni por no tener tantas retracciones y dilataciones, sino porque al no necesitar moldes, ni estampados, el precio del panel puede ser más competitivo.

Fig. 191. Lijado del prototipo después del secado para dejar la pieza con una calidad lisa.

Fig. 192. Pintado de la pieza con una veladura metalizada.

El tema de los acabados es muy amplio, ya que esto dependerá directamente de la Dirección Facultativa. Pero para este sistema de paneles son asumibles la pintura, aplicación de cerámica, de piedra, morteros, entre otros.

Resultados de la Prueba 4.

La prueba experimental 4 tiene el propósito de servir como base de datos para la simulación por el método por elementos finitos (FEM), mediante un experimento a flexión de un panel plano, el cual es fácilmente calculable de forma manual.

Se requiere observar de manera física, el comportamiento a flexión del panel con sus componentes básicos, que son el GRC y la malla termoplástica, para posteriormente con los datos obtenidos realizar una simulación, y de esta manera obtener de manera digital una nueva metodología de cálculo.

Un segundo objetivo, es observar la colaboración real de la malla termoplástica, es decir, si existe una aportación estructural o de resistencia de la malla en su participación con el GRC. Por una cuestión lógica, se puede obviar su participación debido a su poca masa y bajo módulo de elasticidad, pero al ser un nuevo sistema constructivo, se realiza una comprobación simple mediante dicha prueba a flexión.

El panel consiste en una malla termoplástica de PLA con unas dimensiones de celda de 0,015m x 0,015m (Fig. 193). Se realizó en la impresora Witbox y se le colocó una capa de GRC de 0,015m. Las características de dicho panel se detallan en la Tabla 9.

Fig. 193. Visualización del panel plano con malla de PLA y refuerzo de GRC.

Se realizó la prueba experimental con una serie de cargas sin medición de velocidad de los desplazamientos. Todas las pruebas se realizaron en la fase elástica, sin llegar a su etapa plástica, y con dichos datos se ha podido estimar el módulo de elasticidad o de Young. La metodología utilizada fue mediante experimentos no destructivos.

A la pieza de estudio se le puso a prueba mediante la exposición a diversas fuerzas mediante un útil de carga y otra por carga puntual. Con estas pruebas experimentales se pretendía medir las deformaciones a medida que variaba el peso y la co-

Tabla 9. Datos generales del panel para pruebas a flexión.

Módulo de elasticidad del PLA (GPa)	3,5
Módulo de elasticidad del GRC (GPa)	20
Largo, x (+/- 0,5mm)	1000,00
Ancho, b (+/- 0,5mm)	250,00
Altura, h (+/- 0,5mm), de la cual:	30,00
GRC	15,00
PLA	15,00

locación de las fuerzas. También se registró un comportamiento similar entre carga y descarga del panel, por lo que se puede asegurar que permaneció dentro de su zona elástica sin traspasar nunca a su fase plástica.

El procedimiento se inició primeramente con la medición del panel (Fig. 194), al cual se le tomaron las dimensiones de longitud, base y altura (Tabla 9), ya que la proyección del GRC podría haber modificado las medidas diseñadas. Se colocó el panel sobre unas bases de madera en los dos extremos y se verificó que tanto la base como los soportes estaban correctamente asentados.

La idea de colocar un útil de carga a una distancia equidistante de 1/4 por cada extremo, viene dada por la aportación de J. Calavera (Calavera Ruiz, García Dutari, & Rodríguez Escribano, 1992), que como se vio en el punto 4.3.5, puede ser comparada a una carga uniformemente repartida.

Fig. 194. Medición del panel a experimentar.

Fig. 195. Colocación del útil de carga sobre el panel.

Tabla 10. Datos de carga-descarga con útil del panel prueba 4.

Peso	Deformación en carga (+/- 0,01mm)	Deformación en descarga (+/- 0,01mm)
1. 30 kg	-0,8 mm	-
2. 83 kg	-3 mm	-
3. 110 kg	-5 mm	-

Fig. 196. Visualización de panel con útil de carga y apoyo en los extremos.

Fig. 197. Panel con carga mediante útil.

El útil de carga es de madera (Fig. 195) con un peso propio de 3 kilos. Gracias a este útil se pudieron colocar las cargas (Fig. 196 y 197), y posteriormente se midieron las deformaciones longitudinales a medida que se fue variando el peso. Los valores registrados de las deformaciones se pueden apreciar en la Tabla 10 tanto en carga como en descarga.

Posteriormente se realizó la experimentación con cargas puntuales y directas sin el útil de carga, por lo que la concentración del peso se colocó al centro. Las mediciones que se tomaron fueron respecto a la base horizontal sobre la cual se colocó el panel de ensayo (Fig. 198 y 199). La Tabla 11 muestra los valores de deformación que arrojó la medición mediante cargas puntuales:

Tabla 11. Datos de carga-descarga con peso puntual de prueba 4.

Peso	Deformación en carga (+/- 0,01mm)	Deformación en descarga (+/- 0,01mm)
1. 30 kg	-1 mm	-
2. 83 kg	-4 mm	-1 mm
3. 110kg	-6 mm	- 1,5 mm

Fig. 198. Visualización de panel con carga puntual.

Fig. 199. Prueba 4, panel con carga directa.

Tal y como se define en la Ley de Hooke, originalmente formulada para casos de estiramiento longitudinal, establece que *"el alargamiento unitario que experimenta un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada sobre el mismo, sin rebasar el límite elástico que deforme permanentemente dicho material"*. En este caso, todas las deformaciones realizadas se han mantenido dentro del límite elástico de los materiales, para que no se desvirtuaran las mediciones y para cumplir con dichas condiciones.

En el caso de las cargas puntuales, en las cuales el panel tuvo una deformación en descarga, se comprobó que pasados unos minutos, el panel volvió a su estado inicial. Por lo que estos resultados nos muestran la potencial deformación del panel, pero sin rebasar su límite hacia su estado plástico.

Para analizar las deformaciones físicas, se realiza el cálculo mediante el módulo de Young (1), para obtener un módulo de elasticidad aproximado con el cual se podrá simular el panel en el programa por elementos finitos. El cálculo que se realiza es mediante la fórmula de carga repartida, que como se ha comentado, es la que se realizó con el útil de carga, ya que como bien es sabido, este tipo de paneles sufren por la presión y succión del viento de una manera uniforme. Con el fundamento teórico se calculó mediante las siguientes fórmulas:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{q L^3}{48 \delta I} \quad (1)$$

Donde:

E= Módulo de Young

σ = Esfuerzo

ε = Deformación

q= Carga repartida

L= Longitud

δ = Flecha (diferencia)

I= Momento de Inercia de la sección

$$I = \frac{bd^3}{12} \quad (2)$$

Donde:

b= base de la sección

d= altura de la sección

$$F = m * g \quad (3)$$

Donde:

m= Peso aplicado

g= fuerza de la gravedad

Tabla 12 Cálculo del Módulo de Elasticidad para panel de 0,03m de grosor.

CARGA	F	q	flecha	E
1	294 N	1176 N/m	1 mm	2,72 GPa
2	813,4 N	3253.6 N/m	3 mm	2,51 GPa
3	1078 N	4312 N/m	5 mm	1,99 GPa

De acuerdo a los datos revelados (Tabla 12), el panel evaluado tiene un Módulo de Young promedio de $E = 2,40$ GPa. Este dato supone que el grosor calculado de 0,03m es poco razonable debido a la lejanía del Módulo de Young del GRC, que es de 20 GPa, y a la hipótesis de que la malla de termoplástico no realiza ningún trabajo mecánico.

Como se puede observar, el panel tiene un grosor de 0.015m de GRC, lo que se puede considerar como el grosor efectivo para esta prueba. Por lo tanto se propone un cálculo similar con las mismas cargas y deformaciones, pero reduciendo el espesor de cálculo para apreciar los datos que arrojan.

Tabla 13 Cálculo del Módulo de Elasticidad para panel de 0,015m de grosor.

CARGA	F	q	flecha	E
1	294 N	1176 N/m	1 mm	21,77 GPa
2	813,4 N	3253.6 N/m	3 mm	20,08 GPa
3	1078 N	4312 N/m	5 mm	15,97 GPa

Con los datos obtenidos, se puede observar en la Tabla 13, que el módulo de elasticidad se incrementa de una manera considerable al disminuir el grosor de material efectivo, dando como resultado un Módulo de Young promedio de $E = 19,27$ GPa, que es un módulo muy cercano al del GRC, por lo que se entiende que el canto efectivo puede ser solamente el del GRC y la malla se considera únicamente como encofrado perdido que aporta la forma, pero sin contribución mecánica alguna, por lo que puede eliminarse de las consideraciones de cálculo.

Todos estos datos se han recabado para que sirvan de base en la simulación por el método de elementos finitos, como se puede ver en el siguiente punto.

5.3 Análisis de los resultados de la investigación de simulación por flexión

La necesidad de realizar una simulación a flexión del panel se debe simplemente a que los paneles con formas libres o complejas no se suelen calcular a mano, sino por ordenador. Aunque el GRC es un material ampliamente conocido, la aportación de este estudio no es la manera de calcular, sino el cálculo de las formas curvas mediante programas de uso habitual.

El panel, se presupone que es un elemento autoportante, ya que el GRC le aporta esta condición muy apreciada como elemento de fachada. El cálculo que se realiza por simulación es concretamente mecánico a deformación, no a rotura, ya que no se habla de seguridad, debido a que las deformaciones se comprueban que están dentro de ciertos baremos aceptables.

Como se comentó en el capítulo 4.4.1, el programa elegido para realizar la simulación es COMSOL, el cual ayuda a realizar los cálculos mediante el método de elementos finitos (FEM). Al igual que en los cálculos manuales, el material se considera isótropo, aunque es evidente que no lo es. Esto se debe a que el programa FEM suele calcular los materiales como isótropos, lo que permite de una manera más sencilla contrastar los resultados obtenidos.

Se estableció que el panel a calcular es una plancha plana compuesta de una malla de termoplástico tal y como se realizó en las pruebas físicas, con unas dimensiones de 1,00m x 0,25m. En cuanto al espesor, se realizan varias simulaciones con cantos variables debido a las consideraciones observadas en las pruebas experimentales a flexión, ya que uno de los objetivos es la de estudiar la aportación mecánica-estructural de la malla termoplástica.

La simulación se realizó sobre un sistema cartesiano y se propuso un nuevo material, con el cual se podrá buscar el Módulo de Young que pueda aportar la deformación aproximada a 0,005m, que fue lo que se obtuvo en la prueba experimental a flexión con una carga repartida. Se ha elegido esta carga ya que entiendo que es la máxima deformación recogida en las pruebas experimentales, y que puede favorecer a la obtención de resultados. Las condiciones de contorno del panel son empujadas en los extremos cortos.

Se realizaron una batería de simulaciones con distintos grosores y distintos Módulos de Elasticidad (Young) para ver el comportamiento en el simulador de las condiciones de cálculo, así como la comparativa con las mediciones de laboratorio.

El primer Módulo aplicado es de 20 GPa, ya que es el del propio GRC, el cual se obtuvo de las probetas realizadas en laboratorio por la empresa Prefabricados Ponce S.L. Y el segundo módulo es aquel que permita tener una flecha de 0,005m.

Los valores que se tomaron para realizar la simulación inicial:

Tabla 14. Datos del nuevo sistema.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo de Young	Variable	GPa
Densidad	1900	Kg/m3
Coefficiente Poisson	0.24	-

Se varían las secciones de cálculo en este análisis simulado, ya que se quiere analizar si la malla de PLA aporta alguna función estructural o de colaboración.

- Plancha de espesor de 0,03m

Como se puede apreciar en la Figura 200, el resultado de aplicar 20 GPa a una plancha de 0,03m, con una carga repartida, reporta una flecha de 0,000079 m, lo que dista mucho de la flecha obtenida en laboratorio. No obstante, en la Figura 201 se aprecia que se han alcanzado los 0,005m de flecha, pero con un módulo de 0,5 GPa, por lo que se entiende que el grosor efectivo de cálculo no es el adecuado, ya que dista mucho del módulo del GRC de 20GPa y de los resultados obtenidos en laboratorio.

Fig. 200. Panel de 0,03m de grosor con una carga repartida y un Módulo de Young de 20 GPa. Flecha total de 0,000079m.

Fig. 201. Panel de 0,03m de grosor con una carga repartida y un módulo de Young de 0.5 GPa. Flecha total de 0.005m.

- **Plancha de espesor de 0,015m**

Al aplicarse el Módulo de Young del GRC (20 GPa), el panel se comporta de una manera muy próxima a como se esperaba, con una flecha de 0,004m (Fig. 202). No obstante, para obtener la flecha de 0,005m la simulación nos arroja un Módulo de Elasticidad de 16 GPa (Fig. 203), que sigue siendo un dato muy positivo, por ser muy cercano al del GRC.

Fig. 202. Panel de 0,015m de grosor con una carga repartida y un módulo de Young de 20 GPa. Flecha total de 0,004m.

Fig. 203. Panel de 0,015m de grosor con una carga repartida y un módulo de Young de 16 GPa. Flecha total de 0,005m.

Se pueden concluir varios temas con estas simulaciones. Primeramente, que el grosor efectivo del panel es de 0,015m, que corresponde al grosor del GRC, ya que los cálculos realizados mediante simulación se acercan mucho a las pruebas experimentales tanto por la flecha como por el Módulo de Elasticidad. Por lo tanto, el canto de 0,03m no es una medida de cálculo real, ya que la malla tridimensional de termoplástico no colabora en las acciones estructurales. Se puede considerar como un elemento nulo y por lo tanto eliminarlo del cálculo, ya que como bien se ha visto tanto en los cálculos manuales, como

en la presente simulación, no aporta ninguna mejora, ni tampoco disminuye su comportamiento, por lo que se puede entender como un elemento que únicamente aporta la forma.

El nuevo sistema propuesto trabaja de una manera óptima y con unas condiciones propias de un panel de fachada, muy cercanos a los módulos de trabajo del GRC como se puede ver en la simulación con espesor de 0,015 m.

Con esta nueva metodología expuesta, se pueden someter a cálculo a paneles de formas complejas gracias a la experimentación y simulación realizadas, proporcionando unos datos y una sistemática apropiada para dichas superficies. Además, se trabaja con materiales isótropos, lo que permite tener unos cálculos accesibles mediante programas por elementos finitos.

Si se aplican estos datos a una pieza compleja, como el caso de la "Rubber Sheet" (Fig. 204) con una hoja de GRC de 0,01m, se obtiene una deformación de 0,003m con una carga repartida similar a la de 110kg, anclado únicamente en las esquinas. Lo que aporta unos datos muy positivos no sólo en cuanto a la deformación del panel, sino de la viabilidad del panel para poder participar en la construcción de una envolvente arquitectónica.

Fig. 204. Simulación de panel de forma libre de 0,01m de espesor con un Módulo de Young de 20 GPa. Flecha total de 0,003m.

5.4 Análisis y definición del sistema como resultado de la Metodología Experimental

Después de haber realizado un análisis pormenorizado a los resultados obtenidos en las pruebas experimentales y de simulación, se ha logrado una experiencia y el conocido “know- how” del proceso de fabricación de los paneles de forma libre de GRC sin moldes, por lo que se exponen a continuación las condiciones, características y mejoras del nuevo sistema propuesto de acuerdo a las cuatro etapas en las que se ha dividido anteriormente el proceso.

- **Modelado.**

El modelado es una parte esencial en la fabricación de los paneles de forma libre de GRC sin molde, ya que del estudio de los elementos y materiales que intervienen depende el éxito de su fabricación.

Se parte de una fachada o envolvente de forma libre, la cual tiene que ser segmentada en distintas piezas para que sean fácilmente producibles. Es decir, que se tienen que tener en cuenta previamente tanto el tamaño de la impresora, de los materiales disponibles, así como de los medios de transporte que se vayan a utilizar, para realizar dicha panelización.

La panelización se realiza habitualmente con un programa de dibujo tridimensional como Grasshopper, Karamba, Galapagos, Artisan, o mediante la aplicación de algoritmos específicos como los de Eigensatz (Eigensatz et al., 2010). En este caso, se desarrolló únicamente el panel sin realizar ninguna segmentación, no obstante, este paso es necesario cuando se parte de un diseño en el cual no se ha considerado la segmentación.

La malla de termoplástico actúa principalmente como un encofrado perdido, ayudando a mantener la forma del panel. Estas superficies reticulares pueden ser modificadas a través de un modelado paramétrico con el fin de generar automáticamente una amplia gama de soluciones alternativas de diseño. Esto es particularmente útil en las primeras fases de diseño, donde se quieren explorar las relaciones entre distintos elementos, como los paneles colindantes. Dichos programas paramétricos se utilizan en algunos casos como programas secundarios o *pluggins*, como es el caso del Grasshopper, que trabaja bajo la plataforma de Rhinoceros.

Cada pieza debe ser diseñada con unas dimensiones predefinidas, utilizando un programa CAD. Se debe contemplar el modo en el que se va a colocar el panel, las capas que lo van a conformar y las medidas de la malla.

Después de la realización de las pruebas y el prototipo a escala real, se proponen tres maneras de utilizar el sistema ya que dependiendo de cada proyecto, se podrá utilizar uno u otro. La

Fig. 205. Opción 1 de panel con capa de GRC + malla + acabado.

Fig. 206. Opción 2 de panel con capa de malla + GRC + acabado.

Fig. 207. Opción 3 de panel con capa de GRC + malla + GRC + acabado.

opción 1, consiste en una capa de GRC por el interior del panel, la malla de termoplástico, y una capa de mortero y acabado en la cara exterior (Fig. 205). La segunda opción es hacerlo a la inversa, es decir, que el GRC esté por la cara exterior, con el acabado, la malla al centro y una capa de mortero por el interior. (Fig. 206). Finalmente, la tercera opción es tener dos capas de GRC, una por la cara interior, otra por la cara exterior con el acabado, y la malla en el centro, creando un panel sándwich (Fig. 207).

Idealmente, se propone que el panel óptimo es el número 2, que tiene sólo una capa de GRC por el exterior, con el acabado por encima y el núcleo de termoplástico con el mortero por el interior. Esta preferencia se debe a que si se deja el GRC por el exterior, se puede favorecer la no propagación de fuego. No obstante, con esta propuesta se tiene que tener mucho cuidado en cuanto a que la proyección del GRC no rebase los límites dimensionales permitidos para que no se deforme el panel.

Los huecos de la malla se han estudiado, dando un promedio de uso óptimo entre 0,01m a 0,02m, por lo que todos los paneles que se quieran realizar mediante este nuevo sistema, se deberían realizar con estas medidas. No obstante, se valora en un futuro realizar algunas pruebas con distintas geometrías para la malla para ver si existe la posibilidad de ahorrar en el material termoplástico y acelerar el proceso, pero con el mismo objetivo de no dejar traspasar el material cementicio.

En el caso de realizar paneles de borde o con aberturas, se propone crear un elemento que limite el vaciado de mortero o GRC, dependiendo del tipo de panel a desarrollar. Esto consiste, simplemente en una pequeña pieza de recrecido de la malla en la zona límite, como se puede observar en la figura 208. La idea es que dicho elemento se use como frontera, por la cual el mortero no rebose o traspase las zonas en que no sea necesario, y cuyos lados queden perfectamente definidos. Además, tienen que ser creados previamente a su fabricación, es decir, que deben ser modelados desde la fase de diseño en el ordenador.

En el caso de las piezas de anclaje, se pueden realizar desde la fase de diseño una serie de marcas o elementos, que se puedan imprimir, y a las que el operario pueda identificar para que estén ubicadas perfectamente donde se requieran. Una propuesta es

Fig. 208. Perspectiva de panel. Solución de abertura con elementos de borde (rojo).

anular los huecos de la malla o rellenarlos por completo, o hacer una cruz dentro de los huecos donde deberían ir las piezas de espera. De esta manera se asegura la correcta posición de las piezas con relativa precisión y controlado desde la fase inicial para evitar las posibles distorsiones dimensionales.

Se plantea en este punto la posible intervención de las empresas especializadas o técnicos fachadistas que vayan a fabricar dichos paneles, siempre bajo la supervisión del arquitecto o proyectista, ya que muchas de las condiciones de trabajo y dimensionado dependen directamente de los recursos de fabricación, transporte, acabado y montaje, con los cuales se tienen que contar siempre desde la fase de diseño.

- **Impresión 3D.**

Una vez que se tiene definido la forma de la malla, sus dimensiones y el módulo de huecos, desde el programa CAD se exporta en formato STL, OBJ o STEP a un programa dependiente o vinculado a la impresión 3D, como es el caso de CURA, Slic3r, Repeater, entre otros. Algunas impresoras tienen su propia plataforma informática, pero los anteriormente mencionados funcionan en una gran variedad de máquinas, siendo CURA, el programa que más se utilizó en la elaboración de las probetas de estudio, debido a que la impresora M3 estaba configurada para utilizar únicamente dicho software. En el caso de imprimir la malla en otra impresora, se tendrá que ver el tipo de programa asociado a la máquina y observar los parámetros de impresión que son apropiados para imprimir dicha malla.

Uno de los inconvenientes que se han observado en la realización de las piezas de estudio en las impresoras 3D, es la velocidad de fabricación, por ejemplo, la pieza de casi 1,00 m² tardó 4 días en imprimirse, lo que representa mucho tiempo si se va a industrializar el proceso, pero si se compara con los siete días que normalmente tarda un molde de goma, sigue siendo muy aceptable. El tiempo aproximado para realizar las mallas termoplásticas de esas dimensiones debería rondar 1 día aproximadamente, de acuerdo a la conversación mantenida con el industrial de la empresa Prefabricados Ponce y a la idea de crear un proceso óptimo. La velocidad media de impresión de la M3 es de 150 mm/seg. aproximadamente, por lo que se debería buscar otra máquina u otro extrusor que pudiera avanzar a 600 mm/seg., o trabajar con varios extrusores a la vez para conseguir el objetivo.

de fabricar una malla al día.

Como se ha visto anteriormente en la prueba 2, es necesario para las piezas con elementos en vuelo, que se pre-diseñen elementos de soporte para que no colapsen las mallas, no obstante, en algunos casos se pueden tener elementos en cantiléver sin soporte con un ángulo menor a 45° .

En el caso de piezas muy complejas por su forma o por su ejecución, se propone que la impresión se realice de manera invertida, de tal manera, que la cara por la que se va a proyectar el GRC quede arriba y por debajo diseñar una serie de soportes, para de esta manera garantizar la estabilidad de la pieza y evitar así las deformaciones debido a la complejidad formal.

Otra opción para las piezas con formas muy complejas, de gran tamaño, o que requieran de mucho material de soporte, se propone dividir el panel en varias secciones, de tal manera, que cada elemento tenga una base horizontal en contacto directo con la cama de impresión, como se puede ver en la figura 209. Lo que se pretende con esto es que cuanto más horizontales sean las piezas, menor es el material de soporte necesario. Adicionalmente se tendría que crear un sistema de enganche o ensamblaje entre piezas, que deben ser generadas en la fase de diseño, para que una vez fabricadas, se puedan acoplar y formar el panel completo. De esta manera se puede agilizar el proceso de impresión, evitando el gasto innecesario de material de soporte y por consiguiente, no generar tantos residuos.

Para la impresión de la malla se definen una serie de características tales como, el grosor de la capa, la altura de capa, el tipo de relleno, la velocidad de extrusión, el uso de ventilador, una capa perimetral denominada "*skirt*", o una capa de base llamada "*brim*". En el caso de las piezas de grandes dimensiones y realizadas con la impresora M3 se advirtió tras varios ensayos y por las recomendaciones del industrial, que era necesario colocar un "*raft*", que es una serie de capas de material termoplásti-

Fig. 209. Solución para piezas complejas o de gran tamaño mediante la segmentación en piezas más pequeñas. a. Pieza original. b. Simulación de impresión con soportes. c. Segmentación de la pieza. d. Colocación de las piezas lo más horizontales posibles para evitar el gasto de material y por lo tanto mayor tiempo de ejecución.

co para evitar que se levante la pieza que se está imprimiendo. Esta función también la podría hacer el "*brim*", pero no es tan resistente, y al ser piezas mucho más grandes, se hizo uso del "*raft*" para asegurarse de que se mantenía unida la pieza a la cama mientras se imprimía.

Muchas de estas características de impresión se pueden modificar, pero en el caso de las temperaturas a las cuales deben ser extruidos ciertos filamentos, es un tema irrevocable, ya que depende directamente de las propiedades térmicas y puntos de fusión del material, así como la necesidad de una cama caliente o fría. Como por ejemplo el caso del ABS, que requiere siempre de una cama caliente.

El uso de ventilador también es opcional, ya que depende de las condiciones del entorno en las que se imprimen, el tamaño de la impresora, el tamaño de la propia pieza, etc. Todo esto como se puede ver, depende directamente del criterio de quien realice dichos ajustes, de su conocimiento y experiencia, por lo que es muy importante contar con una persona especializada en el tema.

Cuando ya están elegidos y revisados todas las características de impresión, se procede a encender la impresora para comenzar a calentar los extrusores y comprobar el correcto funcionamiento de toda la maquinaria. En el caso específico de la M3, no consta de cama caliente, pero existen máquinas que si la tienen, por lo que es necesario proceder también a su calentamiento en paralelo con el extrusor. Esta preparación es importante, ya que dichas máquinas necesitan de un tiempo preliminar para estar a punto, ya que deben llegar a la temperatura idónea para que la pieza no tenga problemas de adhesión o ruptura. Sin embargo, con la velocidad que avanza la tecnología se podrían ver en poco tiempo máquinas que ya no necesiten de este tiempo previo, así como de muchas otras mejoras.

Desde el programa de impresión, se genera el G-Code para enviar todas las funciones y coordenadas de lo que debe hacer la impresora, ya que establece un patrón de producción con dichos datos para obtener la pieza deseada.

La impresión se puede realizar mediante diferentes máquinas o procedimientos, ya que como se ha observado anteriormente, existen tecnologías como la estereolitografía, el sinterizado por láser, la impresión con resinas, cerámica, hormigón, etc., que también pueden realizar una malla tridimensional a la que se puede reforzar con GRC. No obstante, toda la investigación se realizó específicamente sobre las impresoras por filamento fundido con materiales termoplásticos, debido a varios factores como la asequibilidad, la cercanía y el precio reducido de los filamentos, por lo que sería interesante verificar en un futuro cercano las nuevas posibilidades que se pueden aplicar a este sistema.

Los materiales utilizados en la impresión 3D han sido el PLA y el ABS, pero existen una gran variedad de filamentos como es el caso del PTG, PTG, Laywood, Laybrick, Carborfil, etc. (<https://filaments.ca/>). También hay filamentos como el de fibra de car-

bono o de aleación con metales, que podrían ser interesantes si se necesitara que la malla cumpliera una función estructural, lo que no se descarta en una futura investigación.

Cuando la impresora 3D termina de fabricar la pieza, se retira de la cama o base de impresión, eliminando el material de soporte y el "raft" sobrante. No obstante, como cada pieza tiene su particularidad, en ocasiones es posible que requieran de material de soporte para recibir el GRC, y esperar a que transcurra el tiempo de curado antes de retirarlo como se explicó en los párrafos anteriores de resultados de la prueba 3.

- **Refuerzo GRC.**

El GRC está pensado para reforzar la malla plástica, ya que es un material con unas características tales como resistencia a la flexo-tracción, permeabilidad, incombustibilidad y permite que sea un panel prefabricado autoportante con las suficientes prestaciones para cumplir con las normativas vigentes de un elemento de fachada. La composición y las pruebas de carga realizadas por Prefabricados Ponce se pueden ver en el Anexo 4.3.

El módulo de Young o de elasticidad, de los termoplásticos es muy bajo (3,5- 4 Gpa), por lo que para cumplir con las características mínimas de un panel de fachada se requiere de un material secundario que lo refuerce. Si se toma como referencia el GRC (16-20 Gpa) para medir la resistencia del panel, el del termoplástico se desestima, como se ha podido comprobar en las pruebas a flexión y en el estudio por simulación. Por lo tanto, la malla funciona únicamente como el núcleo que otorga la forma y queda como un encofrado perdido.

Antes de verter el GRC, se deben colocar unos elementos de espera para la posterior incorporación de anclajes de fachada. Esto dependerá del sistema de sujeción a utilizar, pero se debe prever este tema antes del proyectado para que las piezas queden ahogadas y reforzadas en el GRC, favoreciendo de esta manera la sujeción del panel en la fachada.

El proyectado de GRC se realiza como habitualmente se hace, sin la modificación de los materiales ni de las técnicas de vertido, salvo que se debe tener un especial cuidado con rellenar los huecos de la malla y comprimir lo mejor que se pueda la mezcla para sacar el aire que pueda quedar en la masa, cosa que se realiza mediante el rodillo acanalado.

La unión del GRC con el termoplástico se ha observado que trabaja de manera homogénea, además de que el microescalonado que se genera por la impresión en capas, favorece la adherencia entre los materiales, que seguramente no funcionaría igual con una superficie completamente lisa.

Se estima que es apropiado realizar los paneles con la proyección del GRC con 1 cm de grosor por sólo una cara para que sea un elemento ligero, lo cual está comprobado que funciona satisfactoriamente (GRCA, 2016).

Cuando ha pasado el curado primario de 24 horas, se puede dar la vuelta al panel para aplicar el mortero. Se deben eliminar las fibras de vidrio que sobresalen de la malla con una lija de grano medio, así como aquellas que sobresalen de la propia capa de GRC. En este punto, el mortero debe penetrar en los huecos de la rejilla para ayudar a la homogeneización de los materiales intervinientes. Dicho mortero no debería sobrepasar la malla, es decir, que debe quedar enrasado con ella, para evitar deformaciones y alteraciones en las medidas finales, pero esto dependerá de la colocación del panel y del mortero, porque si esta capa va al interior, podría sobrepasar unos milímetros respecto de la malla, para que toda la malla termoplástica quede embebida por completo.

Las dimensiones respecto al grosor del mortero, del GRC, de la malla y del acabado, así como de las perfileras, dilataciones entre elementos, etc., deben tomarse en cuenta en la fase de diseño, para que quede ajustado correctamente en el espacio de la fachada que corresponde, sin problemas de tolerancias con los paneles colindantes. Es decir, que la malla ya viene con las dimensiones adecuadas para que se le añadan capas y no pierda la forma que se le ha asignado.

En piezas con huecos, con GRC por ambas caras, por la complejidad de la pieza, o simplemente porque se quiere tener un mayor control de las dimensiones, se pueden utilizar piezas de borde, como se ha demostrado en el punto anterior (Fig. 208). Con dichas piezas se aseguran los operarios de no superar la medida establecida y así evitar problemas por desviaciones dimensionales.

Por último, se debe dejar curar en las condiciones óptimas que requiere un panel creado con materiales cementicios, que según Miravete (Miravete, 2004) recomienda una temperatura de 15°C, con una humedad media de 95% HR y de 7 a 28 días de curado para un desarrollo eficaz de la resistencia mecánica.

- **Acabado final.**

El acabado final es una parte importante del proceso, ya que es la apariencia que van a tomar los paneles, lo que va a vestir la envolvente. En el caso específico de este nuevo sistema, se ha analizado la posible incorporación de varios materiales como revocos, pintura, cementos con resinas, cementos con nanopartículas, etc.

Sin embargo, también se plantea la posibilidad de que la Dirección Facultativa o el promotor quieran que la fachada sea monolítica y no necesite de juntas. Esto se puede conseguir mediante la utilización de técnicas ya existentes en la construcción como el acuapanel o las mallas pretratadas con fibra de vidrio (ver Anexo 4.11), que permiten el movimiento entre los elementos.

Las técnicas para el acabado final propuestas son muy comunes, como pulidos, texturizados, con patrones, incrustaciones, maderas simuladas, superficies acanaladas o estriadas, coloca-

ción de placas de piedras, cerámicas, etc.

Como se ha visto en el capítulo anterior, el prototipo a escala real se ha pintado con una veladura metálica para simular un panel de chapa automotriz. Con esto se pretendía demostrar las capacidades del nuevo sistema para adecuarse a complejos retos en cuanto a la terminación de su superficie, cosa que se ha logrado casi rozando la perfección.

- **Otras consideraciones.**

La capacidad de aislamiento del sistema propuesto mediante paneles de forma libre de GRC sin molde no se han estudiado, ya que se entiende que es un tema que debe ser acotado dependiendo de cada proyecto. Por ejemplo, se puede realizar un proyectado de espuma por el interior del panel para conseguir las condiciones requeridas según normativa, o simplemente se considera como un sistema de fachada sin la carga aislante, ya que la pared interior es la que tiene esa responsabilidad. Además, debido al estado de investigación en el que se encuentra, aún es pronto para realizar pruebas regladas para saber el cumplimiento efectivo del sistema. Por lo consiguiente, no se considera el cálculo y diseño del aislamiento térmico ni acústico.

La recepción en obra se podría realizar utilizando las mismas técnicas adoptadas para el transporte de paneles planos. Sin embargo, por la complejidad de algunas piezas, será apropiado que se preparen algunas plataformas, convenientemente calzadas para ubicar temporalmente las piezas antes de su colocación.

En cuanto a la puesta en obra se establecerá un sistema controlado por el Jefe de Obra, la Dirección Facultativa, y revisado por la empresa que fabrique los paneles, ya que la disposición y los ángulos de colocación son muy importantes en este tipo de envolventes, por lo que es recomendable que la empresa fachadista desarrolle una técnica de localización específica. Como por ejemplo en el caso de algunas envolventes de Frank Gehry, se guían por una serie de códigos de barras y de modelos tridimensionales digitalizados, que les indican las coordenadas y posición de cada elemento (Shelden, 2002).

5.5 Validación del sistema según normativa

La aplicación de la normativa a este nuevo sistema implica la comercialización y puesta en obra, cosa que de momento no se ha logrado. Sin embargo, está en una fase muy avanzada de la investigación, aunque sin haber logrado su madurez técnica. Por lo tanto, se entiende que la normativa es un elemento que debe estar presente, pero la mención a cualquier legislación es meramente una aportación orientativa para guiarse sobre un entorno regulado, además de que una vez se logre su completo desarrollo, pueda ser más fácil su integración en la industria de la construcción.

La Normativa vigente para la construcción en España es el Código Técnico de la Edificación (CTE), y los paneles de GRC sólo están recogidos en el Catálogo de Elementos Constructivos, como *"Sistema de fachada de paneles industrializados de GRC para fachadas no ventiladas"*, sin existir ninguna referencia específica de paneles prefabricados de GRC, o de elementos de PLA (Ácido poliláctico), por lo que no se puede hacer una justificación completa del sistema propuesto. También, el GRC como sistema completo o de cerramiento, no tiene marcado CE, pues éste es únicamente aplicable a la cascara de este material y no al panel en su conjunto.

La normativa europea relacionada con el GRC es la aprobada en 1997 por el grupo de trabajo *"Glass Fibre Reinforced Cement / Composites Cement – Verre"* del Comité técnico CEN/TC-229. Los diferentes controles a realizar sobre los procesos de los paneles de GRC se han recogido en las siguientes normas técnicas:

UNE EN 1169: 2000 *"Productos prefabricados de hormigón. Reglas generales para el control de producción en fábrica de hormigón armado de fibra de vidrio"*.

UNE EN 14649: 2006 *"Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para la determinación de la resistencia remanente de las fibras de vidrio en el cemento y el hormigón (ensayo SIC)"*.

UNE EN 1170:1998 (8 partes) *"Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio"*. Se distinguen:

Parte 1: UNE EN 1170-1:1998: *"Medida de la consistencia de la matriz, método denominado "por exposición"*.

Parte 2: UNE EN 1170-2:1998: *"Medida del contenido en fibra del GRC fresco, método denominado "separación por lavado"*

Parte 3: UNE EN 1170-3:1998: *"Medida del contenido en fibra del GRC proyectado"*.

Parte 4: UNE EN 1170-4:1998: *"Medida de la resistencia a flexión, método "ensayo simplificado a flexión"*.

Parte 5: UNE EN 1170-5:1998: *"Medida de la resistencia a flexión, método denominado "ensayo completo a flexión"*.

Parte 6: UNE EN 1170-6:1998: *"Determinación de la absorción de agua por inmersión y determinación de la*

densidad seca”.

Parte 7: UNE EN 1170-7:1998: *“Medida de las variaciones dimensionales extremas en función del contenido de humedad”.*

Parte 8: UNE EN 1170-8:1998: *“Modelo de ensayo de ciclos ambientales”.*

Debido al uso del GRC desde hace más de 40 años y de sus resultados ampliamente comprobados, a pesar de no estar recogido específicamente en el CTE, se dictamina una presunción de cumplimiento. No obstante, existen los Documentos de Idoneidad Técnica (DIT's), los cuales también pueden servir como referencia para comparar este nuevo sistema.

Actualmente, existen varias empresas con DIT como *Housing Formula GRC*, que está en posesión del DIT N° 599/13 para fachadas ventiladas con paneles sándwich GRC, y el DIT N° 600/13 para cerramiento de edificios con paneles de GRC. También Construcciones Especiales y Dragados, tiene el DIT 367/R del Sistema DRACE para cerramiento de fachada con paneles prefabricados de GRC (Anexo 3), el cual sirve de base para comparar los requisitos prestacionales con el nuevo sistema propuesto.

Como se ha comentado anteriormente, esta justificación es meramente una averiguación previa, para poner en contexto el sistema propuesto de acuerdo a las normativas vigentes. Visto dicha contrariedad para justificar directamente el cumplimiento del nuevo sistema de paneles de forma libre de GRC sin molde, se ha optado por plantearlo como una solución alternativa del CTE, con lo que debe justificarse su cumplimiento mediante el establecimiento de la equivalencia de las prestaciones respecto a las que se obtendrían de aplicar los Documentos Básicos (DB). Entre los documentos de referencia se pueden encontrar, además del propio CTE:

- Las especificaciones técnicas armonizadas de la Directiva del Productos de la Construcción-DPC 89/106/CEE, es decir, las normas armonizadas y los Documentos de Idoneidad Técnica Europeos-DITE (*European Technical Approval-ETA*), obtenidos estos últimos a partir de las Guías de DITE (ETAG) o a partir de procedimientos comunes establecidos y acordados por los distintos organismos miembros de EOTA (*European Organization for Technical Approvals*).
- Los informes técnicos de EOTA (*Technical Reports*) relativos a métodos para la verificación de características específicas para ciertos productos de construcción.
- Las normas internacionales (ISO), o normas de otros países europeos en cuyo marco normativo se considere el sistema constructivo o métodos de verificación y criterios de evaluación relacionados.
- Otras normas y documentos nacionales de idoneidad tales como el Documento de Adecuación al Uso - DAU o los Documentos de Idoneidad Técnica (DIT).

Las fachadas de paneles prefabricados al ser productos de construcción que se producen para su incorporación permanente a las obras de edificación, su situación normativa viene liderada

por el Código Técnico de la Edificación (CTE), la EHE-08 y por el Mercado CE.

El Código Técnico de la Edificación es el marco normativo por el que se regulan las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios para satisfacer los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad. En determinados casos los Documentos Básicos establecen las características técnicas de los productos sin perjuicio del Mercado CE.

Tal como se indica en el artículo 5 del CTE, para la justificación de las exigencias básicas del CTE, existen dos alternativas posibles:

- Adoptar en el proyecto soluciones técnicas basadas en los DB, cuya aplicación acredita su cumplimiento.
- Adoptar soluciones técnicas alternativas que requieren la justificación específica del cumplimiento de las exigencias básicas.

Asimismo, en este mismo artículo se indica que la base de la justificación de las soluciones técnicas alternativas a las consideradas en los DB del CTE es establecer la equivalencia de las prestaciones respecto a las que se obtendrían de aplicar los DB. Para poder establecer esta equivalencia, es necesario extraer y clasificar el tipo de información que contienen estos DB, según el planteamiento que se hace en el propio artículo 3 del CTE. De acuerdo con éste, se puede considerar que en los DB las exigencias básicas se traducen en:

- Características prestacionales cuantificables y aplicables al sistema constructivo completo o a partes de él.
- Valores límite o criterios de evaluación para comprobar el cumplimiento de estas características.
- Métodos de verificación o procedimientos para evaluar de un modo homogéneo los valores límite de las características que se consideren en cada caso.

Por tanto, la justificación técnica y cuantitativa del cumplimiento de las exigencias básicas del CTE pasa por establecer las características prestacionales de cada exigencia básica, verificando con métodos adecuados al sistema constructivo que se cumple un valor límite o criterio determinado para esa característica.

No obstante, puede no ser tan sencillo, incluso si la mayor parte de las características prestacionales pueden estar consideradas en los DB, establecer los valores límite o criterios de evaluación y los métodos de verificación, ya que estos conceptos normalmente dependen en buena medida de los aspectos particulares del sistema constructivo en estudio. Además de ser un panel con varias capas y distintas propiedades de cada material, se considera un panel con múltiples soluciones de montaje en obra, ya que puede ser trasdosado, tener cámara de aire (abierta o cerrada), etc.

En este sentido, con objeto de facilitar el proceso de justificación de una solución técnica alternativa, se propone clasificar las características prestacionales en función de su grado de definición

dentro de los DB, y de igual modo, el grado de definición de sus valores límite y de sus criterios de evaluación, y métodos de verificación asociados.

De acuerdo al CTE, al documento técnico del ITeC (Bento, 2012), a los Catálogos de Elementos Constructivos del CTE (Ministerio de Fomento. Gobierno de España, 2010), el DIT del sistema DRA-CE para cerramientos de fachadas con paneles prefabricados de GRC (Instituto Eduardo Torroja, 2006) y el DIT de Sistema PRE-INCO para cerramientos de fachadas con paneles prefabricados de GRC (Instituto Eduardo Torroja, 2011), se establecen las características prestacionales de cada exigencia básica del CTE aplicables a los sistemas de cerramiento de fachada ventilada, los cuales de momento se consideran como un tema a cumplir,

Tabla 15. Requisitos, Exigencias básicas y características prestacionales aplicables al panel de GRC con malla de PLA y acabado de mortero (adaptación de la tabla de Bento, 2012).

Requisito	Exigencia	Característica	Aplicable a
Seguridad Estructural	SE1: Resistencia y estabilidad	Resistencia mecánica y estabilidad	Hoja interior y <u>Hoja exterior</u>
	SE2: Aptitud de servicio	Deformación (flechas y desplomes)	Hoja interior y <u>Hoja exterior</u>
Seguridad en caso de incendios (SI)	SI2: Propagación exterior.	Reacción al fuego de la cara exterior	<u>Hoja exterior</u>
		Resistencia al fuego	Hoja interior
Higiene, salud y protección del medio ambiente (HS)	HS1: Protección frente a la humedad	Grado de impermeabilidad al agua de lluvia	Hoja interior y <u>Hoja exterior</u>
		Capacidad de drenaje de la cámara de aire	<u>Hoja exterior</u>
		Limitación de condensaciones	Hoja interior
	Sustancias peligrosas	Contenido o desprendimiento de sustancias peligrosas	Materiales de los componentes
Seguridad de utilización y accesibilidad (SUA)	SUA2: Riesgo de impacto	Resistencia a impactos	Hoja interior y <u>Hoja exterior</u>
	SUA8: Riesgo de acción del rayo	Equipotencialidad	Hoja interior y <u>Hoja exterior</u>
Protección frente al ruido (HR)	HR: Protección contra el ruido	Aislamiento al ruido aéreo procedente del exterior	Hoja interior
Ahorro de energía y aislamiento térmico (HE)	HE1: Limitación de la demanda energética	Aislamiento térmico	Hoja interior
		Permeabilidad al aire	Hoja interior
Otros requisitos adicionales	Durabilidad	Corrosión	Componentes metálicos
		Comportamiento a envejecimiento acelerado	Materiales de los componentes
	Identificación de los componentes.	Características de los componentes relacionadas con las prestaciones del sistema	Componentes

pero sin la obligatoriedad en esta fase de desarrollo. En la tabla 15 se presentan de forma sintética los requisitos y las exigencias básicas que debería cumplir el panel de GRC de una sólo hoja con núcleo de PLA y acabado de mortero.

5.5.1 Seguridad estructural (SE).

Las exigencias básicas de seguridad estructural (SE1: Resistencia y estabilidad y SE2: Aptitud de servicio) se definen en el Artículo 10 del CTE. Las características prestacionales relacionadas con estas exigencias son la resistencia y estabilidad del sistema y las deformaciones, principalmente las flechas y desplomes aplicables tanto a la hoja exterior como a la hoja interior del cerramiento de fachada, pero en este caso solo será asumible a la hoja exterior. En el caso de la resistencia mecánica y estabilidad, los criterios de evaluación y métodos de verificación podrían asimilarse a los indicados en el DB SE, por ejemplo considerando las verificaciones basadas en coeficientes parciales indicadas en el apartado 4.2 de dicho documento.

En el caso de las deformaciones, si bien los métodos de verificación podrían asimilarse a los indicados en el apartado 4.3 del DB SE, no ocurre lo mismo con los valores límite, ya que, por ejemplo, los valores límite de las flechas indicadas en el apartado 4.3.3.1 corresponden a estructuras horizontales. En este caso se deberán establecer valores límite adecuados al sistema que se está estudiando, por ejemplo, si los paneles son fijados mediante perfiles horizontales tipo raíl, las deformaciones que deben tener estos perfiles deben ser compatibles con las deformaciones del panel. Para el análisis de esta compatibilidad podrían ser útiles métodos de ensayo como el de resistencia a la acción del viento indicado en la Guía del DITE 034.

Sobre la hoja exterior se recomienda realizar comprobaciones mediante cálculo de:

- ◇ flexión del panel y, en su caso, rotura de la ranura, cuando éste sea fijado mecánicamente de forma oculta,
- ◇ resistencia del elemento de fijación mecánica del panel. En el caso de perfiles horizontales de fijación, además se deberá comprobar la deformación de este perfil,
- ◇ resistencia de las uniones del elemento de fijación del panel con el perfil vertical de la subestructura,
- ◇ resistencia y deformación de los perfiles verticales de la subestructura,
- ◇ resistencia de los elementos de unión de los perfiles a las ménsulas,
- ◇ resistencia y deformación de las ménsulas,
- ◇ resistencia de los anclajes de las ménsulas a la estructura soporte.

El modelo de cálculo debe representar adecuadamente los puntos de apoyo tal y como se representan en el diseño del sistema, siendo recomendable independizar los movimientos de la hoja exterior de los movimientos de la estructura del edificio y de

la hoja principal.

Como se demostró en el apartado 5 de la presente tesis, de las pruebas que se realizaron a flexión, se obtuvieron unos datos muy positivos, ya que considerando el grosor de cálculo únicamente el del GRC, el panel reporta un Módulo de Elasticidad muy apropiado para un elemento autoportante de fachada, siendo la malla de termoplástico un elemento nulo en cuanto a temas de cálculo, ya que sirve únicamente como encofrado perdido que aporta la forma, y las flechas obtenidas no están cerca de los límites establecidos para acciones de viento y nieve (Ministerio de Fomento. Gobierno de España, 2010).

En el caso del DIT 037-R del sistema DRACE (Instituto Eduardo Torroja, 2006) se sometieron a ensayo unas probetas de GRC de 1 cm de espesor para su rotura a cortante, y todas se rompieron por flexión, obteniéndose unos valores a cortante de $V = 2,57 \text{ N/mm}^2$. También se pueden apreciar las probetas de Prefabricados Ponce en el Anexo 4.3.

Las acciones a considerar deben ser principalmente las acciones debidas al viento y al peso propio de los componentes. Asimismo, cuando sea necesario, también se deberán considerar acciones debidas al sismo y las debidas a variaciones de temperatura y humedad, especialmente si el sistema contempla materiales sensibles a estas variaciones higrotérmicas. Con los datos obtenidos tanto en las pruebas experimentales como en las de simulación, se puede asegurar que las prestaciones del panel son muy favorables respecto a las acciones de viento.

Sobre la hoja interior se recomienda realizar comprobaciones mediante cálculo de su resistencia y estabilidad, teniendo en cuenta que las acciones debidas al viento y al peso propio de la hoja exterior se transmiten a la hoja principal de forma puntual, en los puntos de fijación de la subestructura de la hoja exterior. Por ejemplo, en el caso de una obra de fábrica de ladrillo, se podrían considerar los criterios y métodos de verificación indicados en el DB SE-F. Complementariamente se debería considerar la prescripción de un ensayo en obra de extracción de los anclajes sobre el soporte, que valide los valores límites utilizados en los cálculos de comprobación.

5.5.2 Seguridad en caso de incendio (SI).

Las exigencias básicas de seguridad en caso de incendio se definen en el Artículo 11 del CTE (SI1 y SI2). Las características prestacionales a considerar son la reacción y la resistencia al fuego. En este caso, la justificación de las exigencias básicas y sus características prestacionales puede realizarse directamente aplicando los valores límite y métodos de verificación indicados en el DB SI1, para propagación interior y DB SI2 para propagación exterior.

Respecto a la propagación por el interior, debe tenerse en cuenta lo indicado en la tabla 4.1 del DB SI1, aplicado a la hoja interior del cerramiento de fachada, que para el nuevo sistema no es aplicable si se considera una cámara ventilada.

Respecto a la propagación por el exterior, deberán considerarse los valores límite y criterios de evaluación de resistencia al fuego indicados en el DB SI2 (propagación horizontal y propagación vertical) aplicables al tramo de fachada que debe impedir la propagación del fuego de un recinto a otro a través de la fachada. Este requisito deberá ser asumido, en el caso que nos ocupa, por la hoja interior del cerramiento de fachada ventilada. Por ejemplo, si se considera que la hoja principal del cerramiento de fachada ventilada está formada por una pared de obra de fábrica de ladrillo de 11,5 mm de espesor guarnecida por la cara expuesta (cara interior), tal como se indica en la tabla F.1 del Anejo F del DB SI, su resistencia al fuego sería EI 180 y en consecuencia la fachada cumpliría el valor límite (EI 60) indicado en el DB SI2. No obstante, estos datos son meramente orientativos, ya que en cada obra se deberá analizar dichos elementos para ver si existe cumplimiento de la norma.

Respecto a la reacción al fuego en fachadas, los componentes de la hoja exterior, especialmente el revestimiento exterior, deben cumplir con el valor límite indicado en el párrafo 4 del apartado 1 del DB SI2 en las condiciones establecidas. Adicionalmente, los componentes auxiliares de la hoja exterior (por ejemplo, sellado de juntas) o los componentes que se encuentren sobre la superficie exterior de la hoja principal y en contacto con la cámara de aire (por ejemplo, aislantes térmicos) también deben cumplir con este valor límite para las condiciones establecidas en el DB SI2.

En el caso específico del GRC, se ha podido comprobar en los ensayos presentados por la Asociación de GRC (GRCA) que tiene una características excelentes frente al fuego, ya que han dado unos resultados de estabilidad e integridad siendo de Clase 0, no combustible. Eurocalse: A2-s1, d0 (Concrete Society Ltd., 2007), favoreciendo la no propagación. En el caso de la malla termoplástica de PLA, es bien sabido que es un material inflamable, con una resistencia no comprobada, pero tiene la conveniencia de estar revestido por las dos caras, una de GRC y otra de mortero de cemento, lo que funciona como barrera casi infranqueable antes de llegar al núcleo.

El mortero de cemento se considera de clase A1 de reacción al fuego sin necesidad de ensayo, según el Real Decreto 842/2013 de Clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego (Ministerio de Fomento, 2013). Por lo que con estos valores se entiende que el panel cumpliría con los requisitos de la norma en cuanto al DB SI2.

En el caso del DIT 367-R (Instituto Eduardo Torroja, 2006), se ensayó un sistema de panel sud-frame con 1 cm de GRC, el cual resultó un E120, aunque el estudio se detuvo de forma voluntaria al llegar a 210 minutos, tiempo durante el cual se mantuvo el criterio de integridad. Con este ejemplo se puede comprobar que los sistema con GRC tienen una garantía en cuanto a la seguridad en caso de incendio.

Adicionalmente, se deberá analizar si es necesaria la incorpora-

ción de barreras cortafuego horizontales en la cámara ventilada para impedir que, por el efecto chimenea, se aumente la propagación de un eventual incendio por la cámara de aire.

5.5.3 Higiene, salud y protección del medio ambiente (HS).

La exigencia básica de protección contra la humedad se define en el Artículo 13.1 del CTE. Las características prestacionales que deben considerarse son el grado de impermeabilidad al agua de lluvia, la capacidad de evacuación y la limitación de condensaciones.

El grado de impermeabilidad en las soluciones de cerramiento de fachada ventilada se define a partir de los valores límite indicados en la tabla 2.5 del DB HS1 en función de la zona pluviométrica y del grado de exposición al viento del cerramiento de fachada. Asimismo, en la tabla 2.7 se indican las condiciones que deben cumplir las soluciones constructivas de las fachadas a partir de la definición de los niveles de prestaciones para cerramientos con revestimiento exterior. Estos niveles de prestaciones se definen como:

- ◊ resistencia a la filtración de agua del revestimiento exterior (R),
- ◊ resistencia a la filtración de agua de la barrera contra la penetración de agua (B),
- ◊ composición de la hoja principal (C).

Si bien los valores límite y condiciones de las fachadas pueden asimilarse a las indicadas en el DB HS1, la definición de los niveles prestacionales R, B y C pueden valorarse a partir de métodos de verificación ligeramente distintos a los indicados en dicho documento básico.

Por ejemplo, para los cerramientos de fachada ventilada con paneles de forma libre de GRC sin molde, fijados mecánicamente y con una hoja principal de obra de fábrica de ladrillo, los niveles de prestación que se les podrían asignar son:

- ◊ Una barrera contra la penetración del agua alta (B3) debido a la presencia de la cámara ventilada siempre que se incorpore un aislante no hidrófilo por la cara exterior de la hoja principal, sin embargo, las condiciones de espesores de la cámara, aberturas mínimas de ventilación, evacuación del agua filtrada a la cámara de aire y sobre todo las soluciones de puntos singulares, parece que son más propias de sistemas de cerramientos de fachada ventilada de doble hoja pesada que de sistemas cerramientos de fachada ventilada de revestimiento exterior, en consecuencia, la justificación de esta exigencia deberá adaptarse a las condiciones de la fachada en estudio y deberán analizarse y definirse las soluciones de puntos singulares equivalentes a las indicadas en el apartado 2.3.3 del DB HS1.

- ◊ Una resistencia del revestimiento a la filtración del agua alta (R2) para las hojas exteriores que tengan juntas abiertas y que no cumplan la condición de cámara ventilada indicada para el nivel de prestación B3, siempre que se disponga por la cara exterior de la hoja principal de un enfoscado de mortero, y una resistencia a la filtración del agua muy alta (R3) para las hojas exteriores de juntas cerradas entre placas o con geometrías específicas de juntas que impidan la filtración del agua a través del revestimiento.
- ◊ Una composición de la hoja principal C1 o C2 en función del espesor del ladrillo que se utilice.

En el caso de la resistencia del revestimiento, como se ha mencionado, existen varias posibilidades de composición del panel, pero siempre se terminará con una capa de mortero de cemento o con el propio GRC en la cara exterior de los paneles, para posteriormente aplicarle un acabado. En el caso del panel prototipo, se ensayó con el GRC, una capa de mortero con nanopartículas y una veladura metalizada de 0,5mm, los cuales cumplen perfectamente las condiciones a la filtración (R2). Sin embargo, cuando se habla de juntas abiertas o cerradas, es un tema que va a depender de cada proyecto, ya que los paneles que se proponen en esta tesis podrían funcionar con ambas juntas.

Respecto a la capacidad de evacuación del agua que pudiera filtrarse a la cámara de aire, el método de verificación está directamente relacionado con el diseño de los componentes de la hoja exterior y el análisis de las soluciones constructivas en los puntos singulares de la fachada, principalmente en los encuentros con los huecos, soluciones de coronación y arranque de la fachada. Ya que se considera al panel como un elemento casi monolítico.

Respecto a la limitación de condensaciones, tal como se indica en el DB HS1, los valores límite y métodos de verificación son los indicados en el DB HE1 y por ejemplo, son plenamente aplicables a los sistemas cerramientos de fachada ventilada con paneles de GRC fijado mecánicamente y con hoja interior de obra de fábrica de ladrillo.

Los cálculos de la limitación de condensaciones deberán realizarse según lo indicado en el apéndice G del DB HE1 para la hoja interior del cerramiento de fachada ventilada teniendo en cuenta que, tal como se indica en el Apéndice E, para cámaras de aire muy ventiladas, la resistencia térmica total del cerramiento se obtendrá despreciando la resistencia térmica de la cámara de aire y las de las demás capas entre la cámara de aire y el ambiente exterior, e incluyendo una resistencia superficial exterior correspondiente al aire en calma, igual a la resistencia superficial interior del mismo elemento.

Asimismo, se deberá tener en cuenta que las condensaciones superficiales dependen principalmente del aislamiento térmico del cerramiento de fachada, mientras que las condensaciones intersticiales dependerán de la combinación de aislamiento y

permeabilidad al vapor de cada una de las capas así como de su posición relativa dentro del cerramiento, debiendo ser las capas más exteriores del cerramiento más permeables al vapor de agua mientras que, de ser necesarias barreras de vapor, éstas deberían colocarse en las capas interiores.

5.5.4 Seguridad de utilización y accesibilidad (SUA).

Las exigencias básicas de seguridad frente a riesgo de impacto o atrapamiento (SUA2) y de seguridad frente al riesgo causado por la acción del rayo, no son directamente aplicables a los cerramientos de fachada ventilada en la forma en que se describen en el Artículo 12.2 y 12.8 del CTE, ya que estos artículos se refieren a reducir el riesgo de que los usuarios puedan sufrir estas acciones y no se refieren al riesgo de que estas acciones las sufran los sistemas constructivos de fachada.

Sin embargo, y puesto que la fachada debe ser funcional en las condiciones de uso previstas, cabe evaluar su comportamiento frente a los posibles impactos procedentes del exterior del edificio y procedentes del interior, para lo cual se deberían emplear los métodos de evaluación propuestos en el borrador de Guía de DITE 034 (*Kits for external wall claddings*) y de la Guía de DITE 003 (*Internal partitions kits*).

Para esta evaluación deben tenerse en cuenta las características del edificio, y las de sus usuarios (por el interior y por el exterior), lo cual condicionará la severidad de las posibles acciones.

Asimismo, en relación al riesgo de la acción de rayos, se deberá garantizar la equipotencialidad de los elementos metálicos que puedan formar parte del cerramiento de fachada ventilada, especialmente en la subestructura de la hoja exterior. Respecto al criterio de evaluación y método de verificación para la equipotencialidad de la subestructura metálica de la hoja exterior del cerramiento, se puede tomar como referencia lo indicado en la norma armonizada UNE EN 13830 de muros cortina.

5.5.5 Protección frente al ruido (HR).

La exigencia básica de protección frente al ruido se define en el Artículo 14 del CTE, siendo la principal característica a considerar el aislamiento a ruido aéreo procedente del exterior.

La justificación de esta exigencia básica puede realizarse si se considera que el elemento constructivo de fachada indicado en el DB HR es la hoja interior del sistema de cerramiento de fachada ventilada. Los valores límite relativos al aislamiento a ruido aéreo procedente del exterior indicados en el párrafo iv) del apartado 2.1.1 del DB HR y los métodos de verificación indicados en este mismo documento básico, pueden aplicarse completamente sobre esta hoja interior. Cabe destacar por otro lado que la prestación de aislamiento al ruido aéreo de esta hoja interior recaerá en gran medida en la prestación de los cerramientos de los huecos de la fachada, y su correcta incorporación y sellado

sobre la fachada.

5.5.6 Ahorro de energía y aislamiento térmico (HE).

La exigencia básica HE1 de limitación de la demanda energética se define en el Artículo 15.1 del CTE y se puede justificar a partir de las características prestacionales de aislamiento térmico y permeabilidad al aire.

Respecto al aislamiento térmico, los valores límite y el método de verificación indicados en el DB HE1 son completamente aplicables a la hoja interior. Sin embargo, en el caso de que se utilice la opción general para los cálculos, los resultados pueden ser menos favorables si no se considera la hoja exterior en estos cálculos, si bien, para que la hoja exterior y la cámara de aire ventilada puedan considerarse en los programas de cálculo establecidos hasta el momento, son necesarias ciertas adaptaciones.

Respecto al requisito de permeabilidad al aire, los valores límite y métodos de verificación indicados en el DB HE1 se refieren a la carpintería o huecos de los cerramientos. No obstante, en el caso de cerramientos de fachada ventilada esta característica debería justificarse también sobre la solución constructiva de la parte opaca de la hoja interior, así como de los encuentros de los distintos elementos de huecos con los elementos del sistema de cerramiento de fachada ventilada.

Existen ensayos del sistema DRACE realizados de acuerdo a las Normas UNE 92202:1998, DIN 52.612 y ASTM C-518, a placas de G.R.C. de 60 cm x 60 cm x 1 cm, en estado seco, dando como resultado $\lambda = 0,57 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ (Instituto Eduardo Torroja, 2006).

En este sentido, el criterio de evaluación deberá ir en la línea de no permitir la entrada de aire al interior del edificio, es decir, garantizar la estanqueidad al aire de la hoja interior. Los métodos de verificación que pueden ser aplicados dependerán principalmente de la naturaleza del sistema que constituye dicha hoja interior, si bien, como requisito transversal independiente de la naturaleza de la misma, debe considerarse el análisis de los puntos singulares y de los encuentros entre elementos de fachada.

5.5.7 Durabilidad.

La durabilidad de los revestimientos de fachada ventilada debe abordarse en primer lugar a través de buenas medidas de diseño en proyecto, prestando especial atención a la resolución de puntos singulares, y a su correcta ejecución y mantenimiento posterior. La durabilidad de los componentes será función principalmente de los ambientes, de las condiciones climáticas y de exposición a las cuales están sometidos.

Se debe tener en cuenta que la durabilidad y envejecimiento de estos paneles dependen directamente de la acción del tiempo sobre el GRC y el mortero, ya que la malla de PLA queda revestida completamente por estos materiales, sin tener contacto con

el exterior, lo que se evita el envejecimiento del termoplástico por exposición directa a los rayos UV.

De acuerdo a Sánchez Paradela & Del Águila, 1992, la adición de puzolanas no evita la pérdida de resistencia y tenacidad del GRC, pero reduce la velocidad de fenómeno, así como la utilización de cementos especiales, con menor pH que el cemento Portland ordinario y de baja alcalinidad. Por lo que se valora hacer una serie de ensayos para su posible incorporación.

Al ser este nuevo sistema para paneles autoportantes, no estructurales, el estudio realizado por Enfedaque et.al. 2010, concluyen que hay que resaltar la resistencia y la ductilidad del material a largo plazo, que es mayor que un mortero sin fibras. Por lo tanto la producción de GRC para elementos no estructurales es una buena solución ya que los esfuerzos que debe soportar el material son menores que los valores que resiste a largo plazo. Bajo estos condicionantes no son necesarias las adiciones y así los costes del material son razonables.

Una de las características directamente relacionadas con la durabilidad es la corrosión de los componentes metálicos, especialmente los componentes de la hoja exterior del cerramiento (elementos de fijación del revestimiento y subestructura), teniendo en cuenta tanto la corrosión por las condiciones del ambiente exterior como la posible corrosión por par galvánico.

Los métodos para la verificación de la corrosión, según la tipología de material y su protección, están prácticamente pautados si se toman como referencia las normas internacionales, sin embargo, aunque dichas normas establecen una clasificación de ambientes (rural, marino, industrial, etc.), es necesario establecer la relación entre estos ambientes y la localización específica donde se encontrará la edificación.

Otra vía para analizar la durabilidad de los componentes es su comportamiento frente a ciclos de envejecimiento acelerado representativos de las condiciones de servicio, como por ejemplo: ciclos de hielo-deshielo, ciclos de calor-lluvia, ciclos de calor-frío, cargas mecánicas cíclicas, etc. (Enfedaque, Paradela, & Sanchez-Galvez, 2012). En muchas normas de componentes de revestimiento exterior se consideran ciclos de envejecimiento acelerado (principalmente hielo-deshielo).

Nuevamente, tomando como referencia las pruebas realizadas al sistema DRACE, se aprecian los resultados de la aplicación a los paneles de GRC (Instituto Eduardo Torroja, 2006), que pueden ser asumidos y comparables al sistema propuesto por esta tesis.

- Inmersión y secado. Se someten a las probetas al siguiente ciclo:
 - ◊ Inmersión en agua a temperatura ambiente durante 18 horas.
 - ◊ Secado en estufa a 60 ± 5 °C durante 6 horas.
 - ◊ Ciclo de 50 ciclos:

Tensiones de rotura:

$$\sigma_{mB} = 15,91 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{mT} = 16,20 \text{ N/mm}^2$$

- Estufa a 80 °C

Tensiones de rotura después de 28 días en estufa:

$$\sigma_{mB} = 10,24 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{mT} = 16,43 \text{ N/mm}^2$$

Tensiones de rotura después de 56 días en estufa:

$$\sigma_{mB} = 19,18 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{mT} = 16,69 \text{ N/mm}^2$$

- Hielo - deshielo
Ensayo consistente en realizar el siguiente ciclo de hielo y deshielo:

- Enfriamiento en congelador a -20 °C, durante 3 horas.

- Inmersión en agua a temperatura ambiente durante 3 horas.

Tensiones de rotura después de 50 ciclos:

$$\sigma_{mB} = 11,36 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{mT} = 14,64 \text{ N/mm}^2$$

Tensiones de rotura después de 100 ciclos:

$$\sigma_{mB} = 11,26 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{mT} = 13,43 \text{ N/mm}^2$$

5.5.8 Identificación de los componentes.

Los distintos componentes que forman el sistema de cerramiento de fachada ventilada tienen una serie de características que están relacionadas directa o indirectamente con las características prestacionales del sistema. Para que la justificación de las exigencias básicas pueda realizarse, es fundamental que estas características de los componentes hayan sido declaradas.

Los valores de estas características deberán ser aportados por los proveedores de los productos o fabricantes, utilizando en la medida de lo posible, métodos de ensayo normalizados o incluidos en los documentos de referencia. Para la obtención de los valores resistentes de la ranura del revestimiento (cuando ésta exista), de las fijaciones del revestimiento exterior y de los componentes de la subestructura, pueden tomarse como referencia los criterios y métodos de ensayo descritos en la futura Guía de DITE 034. Estos valores estarán incluidos en los futuros DITE para kits cubiertos por dicha guía.

Tal como se ha indicado anteriormente, la justificación de las exigencias básicas del CTE en sistemas constructivos alternativos a los contemplados en los DB requiere de un conocimiento muy especializado del sistema, así como de otros documentos de referencia que puedan presentar datos objetivos sobre el nuevo sistema constructivo y sobre sus componentes.

Sin embargo, en la mayor parte de los casos, los técnicos no dis-

ponen de toda esta información que les permitiría realizar este análisis, y por tanto, trasladan estas cuestiones a las empresas titulares de los productos de construcción o sistemas constructivos.

Una de las opciones que tienen estas empresas es la de disponer de un documento DAU (Documento de Adecuación al Uso) o DIT (Documentos de Idoneidad Técnica) de su sistema constructivo, que supone una evaluación técnica favorable de la idoneidad del sistema para los usos previstos, en los términos previstos por el artículo 5.2 del CTE.

En el DAU y el DIT se evalúa el sistema constructivo propuesto de un modo particularizado y transversal respecto a las exigencias básicas del CTE, a partir de evidencias técnicas contrastadas. También se dan respuestas a los distintos vacíos normativos que puedan existir tomando como referencia documentos nacionales, europeos e internacionales que puedan estar relacionados con el sistema objeto del documento. Además, en el DAU y el DIT se consideran otros aspectos del sistema que son útiles para el proyectista, director de obra y demás agentes que intervienen en proceso constructivo.

Dado que se trata de un análisis complejo, sería preferible que los técnicos responsables de las obras concentrasen su atención en la particularización de las soluciones genéricas de sistemas a la casuística particular de la obra en cuestión, en función de las condiciones particulares de uso, dimensionales y ambientales que concurren en la misma, y concluyendo finalmente la suficiencia a los efectos de dicha obra de los valores cuantificados para la solución genérica.

Así pues, la redacción y ejecución de obras de construcción con soluciones técnicas alternativas podría resultar más óptima si se toma como punto de partida un DAU o DIT, ya que permite disponer, a priori, de la cuantificación de los valores de sus características prestacionales así como los criterios de proyecto y ejecución necesarios para el adecuado conocimiento del sistema a utilizar en la obra.

No obstante, para el nivel que se ha alcanzado con esta nueva propuesta de sistema alternativo para la fabricación de paneles de forma libre mediante GRC sin molde, se entiende que no existe al día de hoy un desarrollo tan extenso en materia técnica como para llegar a realizar dichas pruebas, pero que sería muy plausible a mediano plazo en el caso de que existiese alguna empresa interesada en desarrollarlo.

5.6 Análisis Económico

El análisis económico se propone con el objetivo de poner en situación un marco de referencia respecto a los costes y precios de los elementos que intervienen para poder hacer una comparación real con otro tipo de sistemas.

El panel a analizar consta de 1,00m², con 0,01m GRC, con núcleo de malla de PLA de 0,01m de grosor, acabado con mortero de cemento y pintura metalizada. Ver tabla 16.

Si se compara el precio de 1,00m² de panel realizado con el nuevo sistema propuesto, con el de un panel realizado con molde de goma o silicona como pieza única, la diferencia es muy alta, ya que para éste último se requiere de un especialista o artesano que realice primeramente el contramolde en escayola o madera, para posteriormente hacerlo con goma, lo que supone un incremento del precio pudiendo llegar a los 900 euros por m² y una semana o más para conseguir el molde.

En el caso propuesto por Henriksen, de panees de GRC de forma libre mediante una cama flexible con barras móviles en altura declara que tiene un precio de 250 €/m² (Henriksen et al., 2016), por lo tanto, ciertamente competitivo respecto a otras tecnologías y procesos. Aunque quisiera aclarar que el nuevo sistema propuesto en esta tesis permite la fabricación de formas más complejas y acusadas, y no requiere de tiempo de espera en la cama de encofrado como en el caso del sistema de Henriksen.

Tabla 16. Análisis económico del panel de forma libre de GRC sin molde.

Unidad	Concepto	Cantidad	Precio unitario*	Precio
M2	Proyección de GRC de 1 cm de espesor	1	89	89
Kg	PLA	2.89	11	31,79
kg	Mortero	12	0,46	5.52
l	Pintura metalizada	0,4	8.83	3.53
Ud	Repercusión de piezas especiales, elementos de conexión entre paneles y elementos estructurales	1	3	3
H	Oficial 1º revocador/pintor	2	17,82	35.64
H	Oficial 1º montador de paneles	0.20	17,82	3.56
H	Encargado impresión	2	23,15	46.3
%	Medios auxiliares	2	113.43	2.27
%	Costes Indirectos	3	115.70	3.47
Total				224.08

Nota *. Los precios se han obtenido de la base de datos de Sigrid Obras (<https://prosoft.es/Productos/Sigrid/Constructo-ras>).

Capítulo 6

CONCLUSIONES

General.

Se ha alcanzado el objetivo principal de la tesis, ya que se ha obtenido un sistema de paneles de forma libre sin molde de GRC, por tanto de coste razonable. Con este nuevo sistema se pretende universalizar la producción de dichos paneles bajando los precios, para hacerlos asequibles a cualquier proyecto que quiera incorporarlos, y no sólo para aquellos con grandes presupuestos. Por lo tanto, se concluye que dicha propuesta es viable para su industrialización en el sector de la construcción.

Se establece que el avance del nuevo sistema en esta tesis es lo suficientemente amplio como para tomar de base todo lo investigado y continuar con su desarrollo, ya que a pesar de no haber alcanzado la madurez tecnológica que se requiere para un producto comercial, sí que está preparado para alcanzar en poco tiempo su industrialización.

No se reivindica un nuevo proceso de producción, sino un nuevo sistema constructivo, ya que los métodos de fabricación utilizados (impresión 3D y la proyección de GRC), son ampliamente conocidos. La virtud radica en la conjunción de ambos procesos para crear este nuevo procedimiento de una manera eficaz y novedosa.

Tecnológicas.

Se ha puesto a punto un proceso de fabricación que combina la impresión 3D convencional con la aplicación de GRC convencional. Al ser técnicas existentes y comprobadas se facilita su introducción en el mercado.

Como bien se sabe, la impresión 3D, es una tecnología relativamente nueva, pero de la cual se ha expuesto el potencial que tiene a la hora de producir cualquier tipo de geometría sin comprometer de ninguna manera la fabricación, ya que cada vez que imprime puede realizar objetos únicos sin que por eso se encarezca la fabricación. Por lo tanto, se puede aseverar que la impresión 3D, es una tecnología apropiada para la producción de las mallas tridimensionales para paneles de fachada.

La inquietud de hacer que este proceso tuviera un mínimo impacto en el ambiente, se puede lograr gracias a la utilización del filamento de PLA para la impresión 3D, ya que es un material biodegradable que tiene una base orgánica, es de bajo coste y puede reciclarse. Este sistema al no necesitar molde, no produce residuos por el fresado de bloques de EPS o espumas, así como del propio molde, que tarde o temprano se tiene que eliminar.

El GRC es un material sumamente propicio para los paneles de fachada por todas sus características como rigidez, ligereza, moldeabilidad, aislante, entre otras. Por estas razones se eligió como el material apropiado para la fabricación de elementos de formas libres. Además, porque ya existe una tecnología y una sistematización muy asentada que favorece la incorporación de los paneles de forma libre fácilmente, ya que sólo se reemplaza el molde por una malla termoplástica, sin realizar ninguna modi-

ficación al proceso de GRC por proyección.

Como un tema secundario, pero no menos importante quisiera resaltar que este sistema se ha pensado para la fabricación de paneles de forma libre para la envolvente arquitectónica, ya que no sólo aporta un elemento estético, sino de protección, por lo que debe estar preparado para las inclemencias medioambientales, estructurales y de aislamiento. Al cumplir con todos estos requisitos es fácilmente incorporable en espacios interiores, como elementos de mobiliario urbano, o para la creación de piezas escultóricas, etc.

Inventivas.

Se ha solicitado una patente de invención del sistema propuesto en esta tesis, tras comprobar que no existe nada similar en el mercado, por lo que tiene novedad y actividad inventiva.

También se han presentado dos proyectos tecnológicos como el Iberoeka y el CDTi nacional, en los que uno de los requisitos primordiales es la incorporación de tecnología innovadora. Afortunadamente en el primero nos han calificado positivamente este aspecto y el segundo está en fase de estudio. El propósito en ambos proyectos es desarrollar el sistema de paneles de forma libre de GRC sin molde, en los cuales están involucradas tres empresas españolas.

Proyectuales.

El sistema propuesto amplía la libertad de diseño del arquitecto, posibilitando la construcción de formas libres incluso en obras de pequeño alcance. Las tendencias actuales de la arquitectura se enfocan en la construcción de edificios con formas sinuosas y complejas, por lo que hasta ahora era casi imposible incorporar formas libres en edificaciones de presupuestos medios.

Los programas informáticos de dibujo y diseño de formas libres están preparados para afrontar el reto de la fabricación de superficies complejas, ya que como se ha visto, dichas formas son fácilmente reproducibles en entornos digitales. Tanto los programas de diseño tridimensional, como de los software de producción, tienen todos los elementos necesarios para dibujar, segmentar y parametrizar las envolventes que se requieran.

Arquitectónicas.

Con esta tesis se impulsa la aparición de nuevas formas arquitectónicas, ya que al resultar viable la producción de nuevas superficies, resultará más fácil su difusión en edificios construidos.

Al presentar este nuevo sistema, se pretende que sea tan fácil dibujar una forma libre en el ordenador, como fabricarla.

Industriales.

En esta tesis se reivindica la necesidad comercial de los paneles de forma libre, ya que el problema de crear dichos elementos,

se convierte en una necesidad industrial, que en este documento se ha tratado de resolver.

Se posibilita la introducción de nuevos productos industriales liberados de la necesidad de la gran serie. Al realizar cada vez un elemento diferente, la fabricación por repetición ya no es imprescindible, creando un proceso de piezas únicas sin que por ello se encarezca el precio de producción.

Se ha realizado un presupuesto genérico de lo que podría suponer el fabricar 1,00 m² de un panel de forma libre de GRC sin molde, con un núcleo de malla termoplástica. El precio aproximado es de 220 €/m², lo que hace de este proceso una opción muy válida y al alcance de muchos proyectos que se quieran producir de esta manera. Si se compara con otros sistemas de producción habituales de paneles de GRC, supone más del 60% de reducción, debido a que no se utilizan moldes. Lo que hace de este sistema una opción muy viable y comercialmente asequible.

De cálculo.

Se propone una metodología de cálculo mediante software por elementos finitos (FEM) para este tipo de paneles de formas complejas, basado en un material isótropo, el cual se justifica por la necesidad de calcular geometrías complejas, ya que es inviable pensar hoy en día en calcular de manera manual cada una de las piezas singulares.

En cuanto a la simulación por FEM, se ha visto que el grosor efectivo en las pruebas a flexión es 0,015m, el cual es el grosor del GRC con un módulo de elasticidad muy cercano al del GRC, por lo que se desestima mediante este estudio la participación de la malla. Es decir, que sólo participa en el panel para aportar la forma como un encofrado perdido, pero no contribuye ni reduce ninguna característica mecánica o estructural.

Las pruebas de laboratorio a flexión del panel plano de GRC con alma de malla de PLA han servido como base para la comprobación del panel al someterlo a la simulación en el programa informático por elementos finitos. Además, se ha demostrado la capacidad del sistema como elemento autoportante y con unas características similares al GRC.

Metodológicas.

Se ha puesto a punto una metodología de diseño y desarrollo del panel, analizando y combinando prestaciones y soluciones técnicas que pueden ser aplicadas en un futuro próximo, y de esta manera encontrar la manera de llegar a la industrialización o producción de los paneles de GRC de forma libre sin molde.

Gracias a las pruebas experimentales, se ha visto que el proceso es viable, sobre todo si se centra en el prototipo a escala real, en el que se han incorporado todos los elementos apropiados para un panel de fachada listo para su colocación y en el que se ha resuelto de manera satisfactoria su comportamiento y sus

resultados.

Se han creado nuevas metodologías tanto experimentales, como de simulación y producción, ya que al ser un nuevo sistema constructivo, se partía de cero, creando paso a paso, inéditas maneras de realizarlo.

Nuevas aplicaciones.

Se han identificado nuevas aplicaciones para recubrimientos de mortero de pequeño espesor desarrollados para otras aplicaciones como el caso de la pintura metalizada automotriz, o del mortero con resinas y nano-partículas.

El gran potencial que tiene este sistema es la capacidad de poder incorporar varios materiales, incluso emular una chapa metálica, que es un avance muy apropiado si se quiere ser competitivos dentro de la industria de la construcción, ya que las chapas metálicas curvadas en dos direcciones son muy costosas y con este nuevo sistema se puede reemplazar sin tener que encarecer el coste total.

La investigación de este nuevo sistema continúa su camino hacia su industrialización, por lo que en el siguiente punto se desarrollarán las posibles líneas futuras de investigación.

6.1 Futuras líneas de investigación

La fabricación de paneles de forma libre de GRC sin moldes con núcleo de malla termoplástica está en una fase avanzada de desarrollo, pero aún le falta una serie de mejoras y pulimento para que pueda llegar a la madurez industrial. Por lo tanto, a continuación se exponen una serie de líneas futuras de investigación que se podrán resolver gracias al proyecto CDTi que se está desarrollando con varias empresas españolas, y mediante la creación de otros documentos científicos.

Una de las vías de investigación que pretendo desarrollar en el proyecto CDTi, es la simplificación de la impresión, ya que el G-Code que genera el programa dependiente de la impresora 3D, realiza una serie de pasos que podrían eliminarse para reducir el tiempo de ejecución. Se aplicaría especialmente a la impresión de las paredes de la malla, ya que al tener una boquilla de 0,01m, y el ancho de la pared es de la misma medida, lo lógico es pensar que la máquina sólo pase una vez al arrojar el filamento, sin embargo, hace dos pasadas, una para verter material y otra para posicionarse al inicio del elemento. Por lo que se propone modificar dicha vectorización haciendo que la boquilla continúe hacia la siguiente extrusión sin tener que volver a pasar por el mismo sitio, lo que reduciría mucho tiempo en el proceso. Esto se tiene que estudiar con programadores y especialistas en el tema de generación de código de fabricación industrial.

Como se ha mencionado anteriormente, la velocidad de impresión es uno de los grandes temas a mejorar. Se conocen impreso-

ras de grandes y medianas dimensiones que trabajan a una velocidad muy superior a la que se trabaja normalmente, pero no están comercialmente disponibles, aunque la tecnología para imprimir más rápido ya existe. Para mejorar este inconveniente, se deberían estudiar soluciones alternativas para que se puedan implementar en las impresoras, con técnicos especialistas en este campo, ya sea con varios extrusores, con motores más potentes, etc.

Los materiales termoplásticos que se utilizan como el PLA y ABS tienen el inconveniente de ser inflamables, por lo que se pretende averiguar si se puede incorporar al nuevo sistema un material que pudiera ser accesible, no contaminante y con un alto grado de protección contra el fuego. La industria de la impresión 3D está trabajando con mucho éxito en el desarrollo de una gran variedad de filamentos, como el de fibra de carbono, de aleación de metales, madera, cerámica, entre otros. Sin embargo, al ser materiales especiales, se incrementa el precio, por lo que se espera que con el paso del tiempo, se reduzcan y se pueda acceder fácilmente a ellos.

El sistema de anclajes y de solapes entre paneles es un tema pendiente de estudio, ya que en el presente documento se han dado algunas explicaciones muy someras de lo que podría hacerse, pero se necesita de un estudio pormenorizado de lo que podría ser más apropiado, ya que tal vez este tipo de paneles de forma libre no se puedan enganchar a una perfilera común, como se haría con elementos planos. También se deben investigar las tolerancias mínimas y máximas permitidas en las colindancias, así como investigar si se requiere de algún tratamiento especial en los cantos de los paneles o para piezas de esquina.

Finalmente, como se propuso en la discusión de resultados, existe la posibilidad de realizar un acabado de envoltente monolítico, esto se puede lograr mediante el tratamiento de las juntas y la colocación de una malla pre-tratada. Esta propuesta es muy interesante y se podría llevar a cabo mediante una prueba experimental o *mock-up*, para ver cómo se comporta el sistema.

Capítulo 7

ACTIVIDADES DE DIFUSIÓN

7.1 Artículos científicos en revistas especializadas

Dentro del ámbito del desarrollo de la tesis, he realizado una serie de artículos científicos, los cuales presenté a diversas revistas especializadas, algunas de las cuales están indexadas y se encuentran dentro del *Journal Citation Report*. El artículo indexado más importante que se ha publicado ya que está directamente relacionado con el tema de investigación es, "*Free-form architectural envelopes: Digital processes opportunities of industrial production at a reasonable price*" de la *Journal of Facade Design and Engineering* (Anexo 1.1) A continuación se presentan por orden cronológico:

2017

"*A Review on Experimental Research using Scale Models for Buildings: Application and Methodologies*".

Juan M. Lirola, Estéfana Castañeda, Benito Lauret, Mohamed Khayetb.

Energy and Building Journal. Elsevier.

DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.02.060

2015

"*Free-form architectural envelopes: Digital processes opportunities of industrial production at a reasonable price*".

Castañeda, Estéfana; Lauret, Benito; Lirola, Juan Miguel; Ovando, Graciela.

Journal of Facade Design and Engineering. IOS Press

DOI: 10.3233/FDE-150031

7.2 Comunicaciones a congresos

La publicación de artículos para congresos internacionales me ha permitido relacionarme en el ámbito científico concerniente a mi tema de tesis, y de esta manera poder realizar un análisis del estado en el que se encuentra el tema de las fachadas de forma libre en la actualidad. El congreso más importante al que he asistido es el ICAE de 2015, en el cual fue elegido mi artículo para ser publicado no sólo en las actas del propio congreso, sino en la revista especializada *Journal of Facade Design and Engineering*.

2016

"*La construcción modular ligera con módulos tridimensionales, antecedentes y situación actual*".

Ovando Vacarezza, Graciela; Lauret Aguirregabiria, Benito; Pérez-Pujazón Millán, Belén; Castañeda Vergara, Estéfana.

Actas para XXX Jornadas de Investigación y XII Encuentro Regional. SI+ Configuraciones, acciones y relatos. FADU-UBA

ISBN: Pendiente

2015

"Free-form architectural envelopes: Digital processes opportunities of industrial production at a reasonable price".

Castañeda, Estéfana; Lauret, Benito; Lirola, Juan Miguel; Ovando, Graciela.

Actas del VII International Congress of Architectural Envelopes.

ISBN: 978-84-88734-10-5

2014

"Free-Form Architectural Façade Panels: An Overview of Available Mass-Production Methods for Free-Form External Envelopes".
(Anexo 1.2)

Alonso, L.; Lauret, B.; Castañeda, E.; Dominguez, D.; Ovando, G.

Actas del 2nd International Conference on Construction and Building Research.

ISBN: 978-94-007-7789-7

DOI: 10.1007/978-94-007-7790-3_20

7.3 Proyectos de investigación y desarrollo y talleres internacionales

Los proyectos que he realizado a lo largo del desarrollo de la tesis doctoral han sido tanto de ámbito nacional como internacional.

El proyecto Iberoeka, se establece como un acuerdo bilateral entre dos países, como en este caso entre España y Argentina. Las empresas son las encargadas de realizar la petición de financiación, por lo que la ETSAM se presentó como una entidad subcontratada por la empresa española Prefabricados Ponce S.L. En una primera fase, el CDTi, organismo español encargado de gestionar dicho proyecto, nos otorgó en 2016 la posibilidad de desarrollar el proyecto, el cual consiste básicamente en mi tema de investigación, por lo que el interés de desarrollo de este Iberoeka por mi parte era muy grande. No obstante, por problemas financieros de la empresa argentina no se pudo afianzar dicho proyecto. No obstante, los revisores del CDTi insistieron en proseguir con este tema y pedir una financiación nacional, ya que bajo su punto de vista es un tema de mucha actualidad y al que le ven mucho futuro.

Por todo ello, se presentará el CDTi nacional en 2017, en el cual se continúa con el mismo tema de proyecto que con el Iberoeka, y la empresa Prefabricados Ponce, nos sigue apoyando, ya que están convencidos de su desarrollo industrial.

También, he asistido a una *Training School* denominada "*Adaptive Facade Systems*" dentro del *Adaptive Facade Network* del programa *COST Action* dentro de la *European Cooperation in Science and Technology*. Dicho taller se realizó en la *Hafen-City Universität*, en Hamburgo, Alemania, en la cual realicé dos proyectos. Primeramente se realizó una votación para evaluar dentro de los 74 doctorandos, cuáles eran los cinco temas más interesantes de todos los participantes, y mi tema sobre la manufactura de paneles de forma libre, salió seleccionado (Anexo

1.4).

"Manufacturing digital processes for free-form facade panels". Estéfana Castañeda Vergara, Technical University of Madrid, Department of Construction and Technology in Architecture. COST Action "Adaptive Facade Systems", HafenCity University, Hamburgo. (http://tu1403.eu/?page_id=421)

En la segunda fase del taller, se realizaron nuevos grupos y se sorteó el análisis de un edificio en el cual debíamos crear un sistema de fachada lo suficientemente eficiente y con métodos adaptativos para que pudiese aportar las máximas prestaciones a lo largo del año. En mi caso desarrollamos un edificio en Chicago, EE.UU y gracias a la colaboración de mis compañeros pudimos ser los ganadores de dicho concurso, del cual anexo el certificado (Anexo 1.5).

7.4 Patentes

En relación a las patentes, se ha presentado en 2015 mediante el Vicerrectorado de la UPM, una patente denominada "Panel reforzado para cerramientos opacos en construcciones" (Anexo 1.3) con el número de solicitud P201530690. Soy autora de dicha patente y representa el trabajo y la investigación desarrollada en esta tesis, en la cual se ha demostrado el método de trabajo más apropiado para la fabricación de paneles de forma libre mediante impresión 3D, y reforzados por GRC. Actualmente se ha llevado a cabo una serie de revisiones y estoy a la espera del dictamen final por parte del organismo competente.

Capítulo 8

BIBLIOGRAFÍA

A

- Adeyeye, O., Pasquire, C., Soar, R., Austin, S., & Pendlebury, M. (2006). Architectural freeform construction: potential use in repair for re-use, maintenance and manufacture of building components. *Conference of the Royal Institution of Chartered Surveyors. RICS, The Bartlett School, UCL and the contributors.*
- ACI 549.2R. (2004). *Report on Thin Reinforced Cementitious Products. ACI Committee 549.*
- Addlink. (2016). COMSOL Multiphysics. Accesible en <https://www.addlink.es/productos/comsol-multiphysics>.
- Afify, H. M. N., & Elghaffar, Z. (2007). Advanced Digital Manufacturing Techniques (CAM) in Architecture. *Em'body'ing Virtual Architecture: The Third International Conference of the Arab Society for Computer Aided Architectural Design.* 67–80. Alexandria, Egypt: The Arab Society for Computer Aided Architectural Design.
- Aiello, C. (2014). Digital & Parametric Architecture. *Digital & Parametric Architecture - eVolo 6 | Architecture Magazine*, 6. Accesible en <http://www.evolo.us/magazine/digital-parametric-architecture/>.
- Aigner, A., & Brell-cokcan, S. (2009). Surface Structures and Robot Milling - The Impact of Curvilinear Structured Architectural Scale Models on Architectural Design and Production. *Innovative Design & Construction Technologies – Building Complex Shapes and beyond*, 6–7.
- Allen, R., & Trask, R. (2015). An experimental demonstration of effective Curved Layer Fused Filament Fabrication utilising a parallel deposition robot. *Additive Manufacturing*, 8, 78–87. <http://doi.org/10.1016/j.addma.2015.09.001>.
- Alonso, L. (2012). *Sistema de Cerramientos Transparente de Alta Capacidad Energética y Forma Libre (F2TE3)*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Alonso, L., Bedoya, C., Lauret, B., & Alonso, F. (2014). F2TE3: sistema de cerramiento transparente, ligero, de altas prestaciones energéticas que permite el diseño con formas libres. *Informes de La Construcción*, 65(532), 443–456. <http://doi.org/10.3989/ic.12.068>.
- Alonso, L., Lauret, B., Castañeda, E., Dominguez, D., & Ovando, G. (2014). Free-Form Architectural Façade Panels: An Overview of Available Mass-Production Methods for Free-Form External Envelopes. *Construction and Building Research*, 149–156. Springer Netherlands. http://doi.org/10.1007/978-94-007-7790-3_20.
- Anderson, S. (2004). *Eladio Dieste :Innovation in Structural Art*. Princeton. Architectural Press. Accesible en <https://www.papress.com/html/book.details.page.tpl?isbn=9781568983714>.
- Anzalone, G. C., Zhang, C., Wijnen, B. A. S., Sanders, P. G., & Pearce, J. M. (2013). A Low-Cost Open-Source Metal 3-D Printer. *IEEE Access*, 803–810.
- Andia, A. (2002). Reconstructing the Effects of Computers on Practice and Education during the past Three Decades. *Journal of Architectural Education*, 56(2), 7–13. <http://doi.org/10.1162/10464880260472512>.
- Armstrong, K. (2016). *Ingersoll Machine Tools, ORNL to develop very large 3D printing system.*

- Arpak, A. (2008). *Physical and Virtual: Transformation of the architectural model*. The Middle East Technical University.
- ASTM. (2009). ASTM, Typologies for layered fabrication processes, in ASTM F2792, A. I. 2009 & C. F. on A. M. Technologies (Eds.), *Annual Book of ASTM Standards*. USA. <http://doi.org/10.1520/F2792-12A>.
- Aurenhammer, F. (1991). Voronoi Diagrams - a Survey of a Fundamental Geometric Data Structure. *ACM Computing Surveys*, 23(3), 345–405. <http://doi.org/10.1145/116873.116880>.

B

- Barazzetti, L. (2016). Parametric as-built model generation of complex shapes from point clouds. *Advanced Engineering Informatics*, 30(3), 298–311. <http://doi.org/10.1016/j.aei.2016.03.005>.
- Barkow, F. (2009). *Barkow Leibinger: An Atlas of Fabrication*. London: Architectural Association.
- Barros, A., Caballero, J.M., Zaldo, V. Aplicaciones del cemento reforzado con fibra de vidrio (GRC). *Informes de la Construcción*, 1981, 33 (333-334-335-336), 73-81.
- Bento, M. (2012). *Los sistemas de cerramiento de fachadas ventiladas y el CTE*. ItEC Instituto de Tecnología de Cataluña.
- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162. <http://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>.
- Bishop, E., & Wilson, J. (2011). Concept to Realisation : GRC and Complex Facades. *GRCA Congress 2011*. Istanbul.
- Blonder, A., & Grobman, Y. J. (2015). Design and fabrication with fibre-reinforced polymers in architecture: a case for complex geometry. *Architectural Science Review*. <http://doi.org/10.1080/00038628.2015.1020479>.
- Bobenko, A. I., & Suris, Y. B. (2008). *Discrete differential geometry. Integrable Structure. Graduate Studies in Mathematics, 404*. American Mathematical Society. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1090/gsm/098>.
- Boers, S. (2006). *OptiMal Forming Solutions*. FlexiMold, 1–2. Accesible en <http://www.optimalforming.com/>
- Bogner, D., Cook, P., & Fournier, C. (2004). *A Friendly Alien: Ein Kunsthaus fur Graz*. H. C. Publishers, Ed. Ostfildern, Germany.
- Bosia, D. (2011). Long Form and Algorithm. *Architectural Design*, 81(4), 58–65. <http://doi.org/10.1002/ad.1269>.
- Brell-Cokcan, S., & Braumann, J. (2011). Computer Numeric Controlled Manufacturing for Freeform Surfaces in Architecture. *E]motion in Architecture*. Luftschachtverlag: Kuhlmann D., S. Brell-Cokcan, K. Schinegger (eds.).
- Brell-Çokcan, S., & Braumann, J. (2016). *Robots in Architecture*. Accesible en <http://www.robotsinarchitecture.org/>
- Brell-Çokcan, S., & Braumann, J. (2010). A New Parametric Design Tool for Robot Milling. *Proceedings of the 30th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, 357–363.
- Brooks, H. (2010). A review of state-of-the-art large-sized foam cutting rapid prototyping and manufacturing technologies. *Rapid Prototyping Journal*, 16(5), 318–327. <http://doi.org/10.1108/13552541011065713>.

- Buswell, R., Soar, R., Gibb, A., & Thorpe, A. (2005). The potential of freeform construction processes. IN: *Proceedings of the 16th International Symposium on Solid Freeform Fabrication*, 503–512. Austin, Texas, USA: The University of Texas. Accesible en <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10145>.
- Buswell, R., Soar, R., Gibb, A. G. F., & Thorpe, A. (2006). Freeform construction application research. *Advances in Engineering Structures, Mechanics & Construction*, 8, 773–780. Waterloo, Ontario: Springer. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Buswell, R., Soar, R., Gibb, A., & Thorpe, A. (2007). Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction. *Automation in Construction*, 16(2), 224–231. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.05.002>.
- Buswell, R., Thorpe, A., Soar, R. C., & Gibb, A. G. F. (2008). Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction. *Automation in Construction*, 17(8), 923–929. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.03.001>.

C

- Cadenas, M. F., Javier, F., & González, N. (2015). Biomimicry in climate adaptive building skins : relevance of applying principles and strategies . *VII International Congress on Architectural Envelopes*. ICAE. Tecnalia.
- Cai, Z. Y., & Li, M. Z. (2002). Multi-point forming of three-dimensional sheet metal and the control of the forming process. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 79(4), 289–296. [http://doi.org/10.1016/S0308-0161\(02\)00017-0](http://doi.org/10.1016/S0308-0161(02)00017-0).
- Cai, Z.-Y., Li, M.-Z., & Lan, Y.-W. (2012). Three-dimensional sheet metal continuous forming process based on flexible roll bending: Principle and experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 120–127. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.08.014>.
- Calavera R., García, L., Rodríguez, R. (1992). *Cálculo de Flechas en Estructuras de Hormigón Armado*. Ed. INTEMAC.
- Caneparo, L. (2014). *Digital Fabrication in Architecture, Engineering and Construction*. Springer. <http://doi.org/10.1007/978-94-007-7137-6>.
- Cantrell, J., Rohde, S., Damiani, D., Gurnani, R., Disandro, L., Anton, J., Young, A., Jerez, A., Steinbach, D., Kroese, C., Ifju, P. (2011). Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts. *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*, 3, 89-105.
- Capone, M. (2011). The increasingly strong link between 3D modeling and automated manufacturing. *Proceedings of the IMProVe 2011 International conference on Innovative Methods in Product Design*, 1055–1062. Venice.
- Castañeda, E., Lauret, B., Lirola, J. M., & Ovando, G. (2015). Freeform architectural envelopes: Digital processes opportunities of industrial production at a reasonable price. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3(1), 1–13. <http://doi.org/10.3233/FDE-150031>.
- Cincinnati Incorporated. (2015). BAAM. Accesible en <http://www.e-ci.com/baam/>.

- Concrete Society Ltd. (2007). *Classification of Reaction to Fire Performance in accordance with EN 13501-1:2007*. http://doi.org/10.1111/j.1744-1617.2007.00179_1.x.
- COTEC. (2011). *Fabricación Aditiva*. Fundación COTEC para la Innovación. Accesible en http://informecotec.es/media/N30_Fabric_Aditiva.pdf.

D

- Dagneshgari, P., & Moore, H. (2013). *Industrialization of the Construction Industry*. MCA Inc. Accesible en <http://www.mca.net/media/PDF/industrialization-of-construction-architecture-whitepaper.pdf>.
- Del Águila, A. (1988). *Paneles de fachada prefabricados de G.R.C.* Revista de Edificación, 2, 12–14.
- Del Águila, A. (2006a). *La industrialización de la edificación de viviendas. Tomo 1: Sistemas*. Madrid: Mairea.
- Del Águila, A. (2006b). *La industrialización de la edificación de viviendas. Tomo 2: Componentes*. Madrid: Mairea.
- Design Fabrication Group. (2016). Accesible en <http://ddf.mit.edu/>.
- Dimas, E., & Briassoulis, D. (1999). 3D geometric modelling based on NURBS: a review. *Advances in Engineering Software*, 30(9–11), 741–751. [http://doi.org/10.1016/S0965-9978\(98\)00110-0](http://doi.org/10.1016/S0965-9978(98)00110-0).
- Dimitrov, D., Schreve, K., & Beer, N. De. (2006). Advances in three dimensional printing – state of the art and future perspectives. *Rapid Prototyping Journal*, 12(3), 136–147. <http://doi.org/10.1108/13552540610670717>.
- Dini, E. (2009). *D-SHAPE - The 21st century revolution in building technology has a name*, 1–16. Accesible en: http://www.cadblog.pl/podcasty/luty_2012/d_shape_presentation.pdf.
- Domínguez, D. (2012). *Industrialización de la Forma Libre en la Construcción de Envolventes Arquitectónicas*. Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.
- Domus. (2011). *Futuro at Boijmans*. Accesible en <http://www.domusweb.it/en/news/2011/03/19/futuro-at-boijmans.html>.
- Dunn, N. (2012). *Digital fabrication in Architecture*. London: Laurence King Publishing.
- DUS architects. (2015). *3D Print Canal House*. Accesible en from <http://www.dusarchitects.com/>.

E

- Eekhout, M. (2006). The GRP Shell Structures for the Rabin Center in Tel Aviv. *International Conference On Adaptable Building Structures*. Eindhoven, The Netherlands.
- Eigenraam, P. (2013). *Flexible mould for production of double-curved concrete elements*. Delft University of Technology.
- Eigensatz, M., Kilian, M., Schiftner, A., Mitra, N., Pottmann, H., & Pauly, M. (2010). Paneling Architectural Freeform Surfaces. *ACM Trans.Graph. SIGGRAPH '10*, 29(45), 1-10. New York. <http://doi.org/10.1145/1833351.1778782>.
- Eigensatz, M., Deuss, M., Schiftner, A., Kilian, M., Mitra, N., Pottmann, H., & Pauly, M. (2010). Case Studies in Cost-Optimized Paneling of Architectural Freeform Surfaces. *Advances*

- in *Architectural Geometry 2010*, 49–72. Springer. http://doi.org/10.1007/978-3-7091-0309-8_4.
- Eigensatz, M., & Schiffner, A. (2011). Case Studies in Optimization of Glass-panelized Architectural Freeform Designs. *Glass Performance Days Conference Proceedings: Glass and Solar in Sustainable Development*, 371–376. GPD. Accesible en <http://www.glassonweb.com/articles/article/765>.
- Elsevier. (2016). Accesible en <https://www.elsevier.com/>.
- Enfedaque Díaz, A., Sánchez Paradela, L., & Sánchez-Gálvez, V. (2010). El efecto del humo de sílice y el metacaolín en el proceso de envejecimiento de los morteros de cemento reforzados con fibras de vidrio (GRC). *Informes de la Construcción*, 60(300), 67–82. <http://doi.org/10.3989/mc.2010.52009>.
- European Façade Network. (2016). Accesible en www.facades.ning.com.

F

- Facade World. (2016). Accesible en <https://facadeworld.com/>
- Fehring, T. (1980). *Mechanical Engineering: A Century of Progress*. NorCENergy Consultants, LLC.
- Ford, E. R. (1996). *The Details of Modern Architecture. 2, 1928-1968*. Cambridge Univ Press.
- Franken, B. (2014). *Franken Architekten*. Accesible en <http://www.franken-architekten.de>.
- Frener Reifer. (2007). *BMW Welt Facades-Service Buildings*. Accesible en <http://www.frener-reifer.com/projects/bmw-welt-facades-service-buildings/>.

G

- Gao, M. (2015). Application of light-weight GRC cladding panel in Nanjing Youth Olympic Conference Centre. *GRC 2015 Congress*, 1–16. Dubai.
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., ... Zavattieri, P. D. (2015). The Status, Challenges, and Future of Additive Manufacturing in Engineering. *Computer-Aided Design*, 69(C), 65–89. <http://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>.
- García del Valle, M. (2015). *Diseño para Fabricación Digital: Definición unívoca entre formas y fabricación en arquitectura*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Gardiner, J. B. (2011). *Exploring the Emerging Design Territory of Construction 3D Printing*. RMIT University.
- Glymph, J., Shelden, D., Ceccato, C., & Mussel, J. (2002). A Parametric Strategy for Freeform Glass Structures Using Quadrilateral Planar Facets. *Proceedings of the 2002 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*, 303–321. Pomona, California: ACADIA.
- Glymph, J., Shelden, D., Ceccato, C., Mussel, J., & Schober, H. (2004). A parametric strategy for free-form glass structures using quadrilateral planar facets. *Automation in Construction*, 13(2), 187–202. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.09.008>.
- Goldberg, H. E. (2001). Scan your World with 3D Laser Scanners. *CADALYST Magazine*, 20–28.

- Google Scholar Alerts. (2016). Accesible en https://scholar.google.com/scholar_alerts?view_op=list_alerts.
- Gonzalez-Quintial, F., Barrallo, J., & Artiz-Elkarte, A. (2015). Free-form surfaces adaptation using developable strips and planar quadrilateral facets. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3(1), 59–70. <http://doi.org/10.3233/FDE-150033>.
- Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J., & Morel, P. (2016). Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. *Materials & Design*. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>.
- Gould, J. (2010). *Formtexx. Freeform facades with automotive precision*. London.
- Gould, J. (2014). *Formtexx*. Accesible en <http://www.formtexx.com/index.html>.
- Gramazio, F., & Kohler, M. (2014). Made by robots. Challenging architecture at the large scale. *AD*, 84(3). Accesible en <http://e-citations.ethbib.ethz.ch/view/pub:147371>.
- Gramazio, F., & Kohler, M. (2014). Made by robots. Challenging architecture at the large scale. *AD*, 84(3). Accesible en <http://e-citations.ethbib.ethz.ch/view/pub:147371>.
- GRCA. (2016). *International Glassfibre Reinforced Concrete Association (GRCA)*. Accesible <http://www.grca.org.uk/>.
- Griffith, K. (2006). *Design Computing of Complex-curved Geometry using Digital Fabrication Methods*. Massachusetts Institute of Technology. Accesible en <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/34986/71802696.pdf>.
- Grünewald, S., Schipper, R., & Hordijk, D. (2016). Double-curved Panels produced in a flexible Mould with self- compacting Fibre Reinforced Concrete. *Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials*, 27, 1–8. Accesible en <http://hdl.handle.net/1854/LU-7147033>.
- Gurka, R. (2016). *BigRep*. Accesible en <https://bigrep.com/>.

H

- Hack, N., & Lauer, W. (2014). Mesh Mould. Robotic fabrication for non-standard concrete constructions. *FCL Magazine Special Issue. Robotic High Rises*, (3), 30–55.
- Hauschild, M., & Karzel, R. (2011). *Digital Processes: Planning, Designing, Production*. Birkhäuser.
- Helm, V., Willmann, J., Thoma, A., Pis, L., Hack, N., Gramazio, F., & Kohler, M. (2015). Iridescence Print : Robotically Printed Lightweight Mesh Structures. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2(3), 117–122. <http://doi.org/10.1089/3dp.2015.0018>.
- Helvoirt, J. (2003). *Een 3D blob huid Afstudeerverslag 3370*. Technische Universiteit Eindhoven.
- Henriksen, T., Lo, S., & Knaack, U. (2015). An innovative approach to manufacture thin-walled glass fibre reinforced concrete for tomorrow's architectural buildings envelopes with complex geometries. *Journal of Building Engineering*. 4, 189-199. <http://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.09.006>.
- Henriksen, T., Lo, S., & Knaack, U. (2016). A new method to advance complex geometry thin-walled glass fibre reinforced concrete elements. *Journal of Building Engineering*. 6, 243-

- 251, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.04.002>.
- Hew, K. P., Fisher, N., & Awbi, H. B. (2001). Towards an integrated set of design tools based on a common data format for building and services design. *Automation in Construction*, 10(4), 459–476. [http://doi.org/10.1016/S0926-5805\(00\)00082-0](http://doi.org/10.1016/S0926-5805(00)00082-0).
- Hopkinson, N., & Dickens, P. M. (2003). Analysis of rapid manufacturing — using layer manufacturing processes for production. *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 217, 31–39. Accesible en <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/bits-tstream/2134/3561/1/HopkinsonAnalysisofRapid.pdf>.
- Hull, C. (2014). 3D Systems : Empowering Our Customers to Manufacture the Future. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 1(1), 55–59. <http://doi.org/10.1089/3dp.2013.1500>.
- Huzefa, A. (2013). *Rationalisation of Freeform Glass Facades from Concept to Construction*. University of Bath.

I

- ICD/ITKE. (2016). Accesible en <http://icd.uni-stuttgart.de/?cat=6>.
- IFR. (2015). *World Robotics 2015 Industrial Robots*. Accesible en <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>.
- Ingenio. (2016). *UPM Polibuscador*. Accesible en <http://upm.summon.serialssolutions.com/#!/>.
- International Glassfibre Reinforced Concrete Association (GRCA). (2016). Accesible en <http://www.grca.org.uk/>.
- Instituto Eduardo Torroja, D. (2006). *DIT. Sistema DRACE para cerramiento de fachadas con paneles prefabricados de GRC*. Spain.
- Instituto Eduardo Torroja, D. (2011). *DIT. Sistema PREINCO para cerramientos de fachadas con paneles prefabricados de GRC*. Spain.
- Iori, T., & Poretti, S. (2005). Pier Luigi Nervi's Works for the 1960 Rome Olympics. *Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, 605–613. Cádiz.
- Israeli, A., Miller, G., & Uzan, M. (2013). *MASSIVit 3D*. Accesible en <http://massivit3d.com/>.
- Iwamoto, L. (2013). *Digital fabrications: architectural and material techniques*. Princeton Architectural Press.

J

- Jaques, L., & Lagrange, T. (2014). *Moulding Device and Production Process*. US20140319719A1.
- Jeswiet, J., Micari, F., Bramley, A., Duflou, J., & Allwood, J. (2005). Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54(2), 88–114. [http://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60021-3](http://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60021-3).
- Jin, S., Maggs, S., Sadan, D., & Nan, C. (2013). *Large Scale 3D Printing. Minibuilders*. Accesible en: <http://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/minibuilders/>.
- Jokic, S., & Novikov, P. (2013a). *Large Scale 3D Printing. Mataerial*. Accesible en: <http://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/material/>.
- Jokic, S., & Novikov, P. (2013b). *Mataerial*. Accesible en <http://>

www.mataerial.com/.

Jurado E., J., Liébana C., O., & Gómez N., M. (2015). Uso de BIM como herramienta de integración en talleres de tecnología de Edificación. *EUBIM 2015. Congreso Internacional BIM*. Universitat Politècnica de València. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.4995/EUBIM.2015.1538>.

K

Kersten, T. P., & Lindstaedt, M. (2012). Image-based low-cost systems for automatic 3D recording and modelling of archaeological finds and objects. *Progress in cultural heritage preservation*, 28–30. Springer.

Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting - Related robotics and information technologies. *Automation in Construction*, 13, 5–19. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>.

Khoshnevis, B., Hwang, D., Yao, K.-T., & Yeh, Z. (2006). Mega-scale fabrication by contour crafting. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 1(3), 301–320. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1504/IJISE.2006.009791>.

Kilian, A. (2001). *Using Genetic Algorithms To Generate Developable Strips From Free formed Surfaces*. Accesible en <http://www.designexplorer.net/newscreens/stripsGA/writeups-screen.pdf>.

Kilian, A. (2006). *Design Exploration through Bidirectional Modeling of Constraints*. Massachusetts Institute of Technology. Accesible en <http://hdl.handle.net/1721.1/33803>.

Kilian, M., Flory, S., Chen, Z., Mitra, N. J., Sheffer, A., & Pottmann, H. (2008). Curved folding. *ACM Transactions on Graphics* 27, 75. ACM Inc. <http://doi.org/10.1145/1360612.1360674>.

Knaack, U., Klein, T., & Bilow, M. (2010). *Rapids*. Imagine 04. Rotterdam: 010 Publishers.

Kok, M. (2013). *Textile reinforced double curved concrete elements Manufacturing free-form architecture with a flexible mould*. Delft University of Technology.

Kolarevic, B. (2001). Designing and Manufacturing Architecture in the Digital Age. *Architectural Information Management, 19th eCAADe Conference Proceedings, Helsinki University of Technology.*, 117–123.

Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing*. Nueva York- Londres: Spon Press - Taylor & Francis Group.

Kolarevic, B. (2005). Digital Praxis: From Digital to Material. *3rd International Conference on Innovation in Architecture, Engineering and Construction (AEC)*, 5.

L

Laing O'Rourke. (2017). *Freefab*. Accesible en www.freefab.com.

Lasemi, A., Xue, D., & Gu, P. (2010). Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review. *CAD Computer Aided Design*, 42(7), 641–654. <http://doi.org/10.1016/j.cad.2010.04.002>.

Lauret, B. (2011). *Forma libre: el desafío tecnológico para la nueva arquitectura*. Accesible en: <http://flyerone09.blogspot>.

- com.es/2011/01/forma-libre-el-desafio-tecnologico-para.html.
- Le, T., Austin, S., Lim, S., Buswell, R., Gibb, A., & Thorpe, T. (2011). High-Performance Printing Concrete for Freeform Building Components. *fib Symposium Prague 2011*, 499–502. Prague.
- Lee, G., & Kim, S. (2012). Case Study of Mass Customization of Double-Curved Metal Façade Panels Using a New Hybrid Sheet Metal Processing Technique. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(11), 1322–1330. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000551](http://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000551).
- Lee, K., Blackburn, S., & Welch, S. T. (2015). Adhesion tension force between mould and pattern wax in investment castings. *Journal of Materials Processing Technology*, 225, 369–374. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.06.014>.
- Li, M., Liu, Y., Su, S., & Li, G. (1999). Multi-point forming: a flexible manufacturing method for a 3-d surface sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 87(1–3), 277–280. [http://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00364-1](http://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00364-1).
- Lim, S., Buswell, R. a., Le, T. T., Austin, S. a., Gibb, a. G. F., & Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, 21(1), 262–268. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>.
- Lim, S., Buswell, R., Valentine, P., Piker, D., Austin, S., & De Kestelier, X. (2016). Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction components. *Additive Manufacturing*. <http://doi.org/10.1016/j.addma.2016.06.004>.
- Llatas, C. (2011). A model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list. *Waste Management*, 31(6), 1261–1276. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.023>.
- Lloret, E., Shahab, A. R., Linus, M., Flatt, R. J., Gramazio, F., Kohler, M., & Langenberg, S. (2015). Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication. *CAD Computer Aided Design*, 60, 40–49. <http://doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.011>.

M

- Mairs, J. (2016). Coop Himmelbl(l)au combine flat and curving forms at huge Shenzhen art complex. *Dezeen Magazine*. Accesible en: <https://www.dezeen.com/2016/11/28/coop-himmelblau-flat-curving-form-contemporary-art-complex-shenzhen-robots/>.
- Magnusson, J. D. (2001). *National Winner Engineering Awards of Excelence. Experience Music Project. Modern Steel Construction*, Accesible en http://msc.aisc.org/globalassets/modern-steel/archives/2001/06/2001v06_experience_music.pdf.
- Malaeb, Z., Hachem, H., Tourbah, A., Maalouf, T., El Zarwi, N., & Hamzeh, F. (2015). 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 6, 14–22.
- Martins, P. F., Campos, P. F. De, Nunes, S., & Sousa, J. P. (2015). Expanding the Material Possibilities of Lightweight Prefabrication in Concrete Through Robotic Hot-Wire Cutting . *eCAA-De 33* (302), 1–11. Viena.

- Melaragno, M. (1991). *Thin Shells. An Introduction to Shell Structures SE* - 5, 115–127. Springer US. http://doi.org/10.1007/978-1-4757-0223-1_5.
- Menges, A., & Knippers, J. (2011). *ICD/ITKE Research Pavilion 2011*. Accesible en <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=6553>.
- Meshgin, P., Xi, Y., & Li, Y. (2012). Utilization of phase change materials and rubber particles to improve thermal and mechanical properties of mortar. *Construction and Building Materials*, 28(1), 713–721. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.039>.
- Ministerio de Fomento. Gobierno de España. *Catálogo de elementos constructivos del CTE (2010). Spain*. Accesible en: http://www.codigotecnico.org/web/recursos/aplicaciones/contenido/texto_0012.html.
- Ministerio de Fomento. *Real Decreto 842/2013, de 31 de octubre, por el que se aprueba la clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego*, 281BOE 93492–93527 (2013). España. <http://doi.org/BOE-A-2012-5403>.
- Miravete, A. (2004). *Materiales compuestos*. Asociación Española de Materiales Compuestos (AEMAC).
- MIT. (2013). *Numerically Controlled Milling Machine*. MIT Museum. Accesible en <http://museum.mit.edu/150/86>.
- Mitchell, W. J. (2001b). *Roll over Euclid: How Frank Gehry Designs and Builds. Frank Gehry, Architect. Frank Gehry, Architect*. New York: Guggenheim Museum Publications.
- Monolite Ltd. (2011). *D-Shape*. Londres: Monolite Ltd. Accesible en <http://d-shape.com/>.
- Moretti, M. (2015). *WASP. World's Advanced Saving Project*. Accesible en: <http://www.wasproject.it/w/>.
- Moya, Q., & Pons, O. (2014). Improving the design and production data flow of a complex curvilinear geometric Glass Reinforced Concrete façade. *Automation in Construction*, 38, 46–58. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.025>.
- Mueller, S., Im, S., Gurevich, S., Teibrich, A., Pfisterer, L., Guimbretière, F., & Baudisch, P. (2014). WirePrint: 3D printed previews for fast prototyping. *UIST '14: Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, 273–280. Honolulu, HI, USA. <http://doi.org/10.1145/2642918.2647359>.
- Mueller, S., Beyer, D., Mohr, T., Gurevich, S., Teibrich, A., Pfisterer, L., ... Guimbretière, F. (2015). Low-Fidelity Fabrication: Speeding up Design Iteration of 3D Objects. *ACM CHI'15 Conference on Human Factors in Computing Systems*, 327–330. Seoul, Korea: ACM New York, NY, USA. <http://doi.org/10.1145/2702613.2725429>.

N

- Naceur, S., & Hedi, B. H. S. (2013). Finite Element and Experimental Investigation of the Multipoint Flexible Hydroforming. *Key Engineering Materials*, 554–557, 1290–1297. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.1290>.
- Naboni, R., & Paoletti, I. (2015). *Advanced Customization in Architectural Design and Construction*. Springer International

- Publishing. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-04423-1>.
- Nassar, K., & Aly, E. A. (2012). Automated Planning and Design of Formwork for Freeform shell structures. *Construction Research Congress 2012, ASCE 2012. Construction Challenges in a Flat World*, 1165–1174. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1061/9780784412329.117>.
- National Centre of Competence in Research. Digital Fabrication. (2016). Accesible en <http://www.dfab.ch/>.
- NIO Architecten. (2003). The Amazing Whale Jaw. Accesible en: <http://nio.nl/the-amazing-whale-jaw/>.
- Normas Básicas de la Edificación. *Norma Tecnológica de la Edificación. Fachadas prefabricadas. Paneles* (1975). España: Boletín Oficial del Estado. Accesible en <http://www.boe.es/datos/pdfs/BOE/1975/112/R09797-10248.pdf>.

O

- Oesterle, S., Vansteenkiste, A., & Mirjan, A. (2012). Zero Waste Free-Form Formwork. *Icfff2012. Second International Conference on Flexible Formwork*, 258–267. BRE CICM, University of Bath.
- Oak Ridge National Laboratory. (2016). BAAM. Accesible en <http://web.ornl.gov/sci/manufacturing/>.

P

- Park, J. J., & Kim, Y. H. (2003). Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique. *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 447–453. [http://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00768-4](http://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00768-4).
- Paunoiu, V., Cekan, P., Gavan, E., & Nicoara, D. (2008). Numerical simulations in reconfigurable multipoint forming. *International Journal of Material Forming*, 1, 181–184. <http://doi.org/10.1007/s12289-008-0021-4>.
- Pegna, J. (1997). Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in Construction*, 5(5), 427–437. [http://doi.org/10.1016/S0926-5805\(96\)00166-5](http://doi.org/10.1016/S0926-5805(96)00166-5).
- Penttilä, H. (2006). Describing the Changes in Architectural Information Free-Form Architectural Expression. *ITcon, 11 (The Effects of CAD on Building Form and Design Quality)*, 395–408. Accesible en <http://itcon.org/2006/29/>.
- Pérez de Lama Halcón, J., Olmo Bordallo, J. J., Sánchez-Laulhé Sánchez de Cos, J. M., & Gutiérrez de Rueda García, M. (2011). Incorporación del diseño y fabricación digital a la arquitectura : docencia y práctica profesional. *IV Jornadas internacionales sobre investigación en arquitectura y urbanismo. Valencia*. Accesible en <http://hdl.handle.net/10251/15010>.
- Pham, D., & Gault, R. (1998). A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(10–11), 1257–1287. [http://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](http://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5).
- Pottmann, H., Asperl, A., Hofer, M., & Kilian, A. (2007). *Architectural Geometry*. Bentley Institute Press.
- Pottmann, H., Liu, Y., Wallner, J., Bobenko, A., & Wang, W. (2007).

- Geometry of multi-layer freeform structures for architecture. *ACM Transactions on Graphics*, 26(3), 65. <http://doi.org/10.1145/1276377.1276458>.
- Pottmann, H., Schiffner, A., Bo, P., Schmiedhofer, H., Wang, W., Baldassini, N., & Wallner, J. (2008). Freeform surfaces from single curved panels. *ACM Transactions on Graphics*, 27(3), 1. <http://doi.org/10.1145/1360612.1360675>.
- Pottmann, H., Schiffner, A., & Wallner, J. (2008). Geometry of Architectural Freeform Structures. *Internationale Mathematische Nachrichten*, 209, 15–28. <http://doi.org/10.1145/1364901.1364903>. Accesible en <http://www.geometrie.tugraz.at/wallner/arch-imn.pdf>.
- Pottmann, H., Eigensatz, M., Vaxman, A., & Wallner, J. (2015). Architectural geometry. *Computers and Graphics* (Pergamon), 47, 145–164. <http://doi.org/10.1016/j.cag.2014.11.002>.
- Pronk, A., Rooy, I. Van, & Schinkel, P. (2009). Double-curved surfaces using a membrane mould. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009*, Valencia, 618–628.
- Pronk, A., Seffinga, A., el Ghazi, H., & Schuijers, N. (2015). Flexible mould by the use of spring steel mesh. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*. Amsterdam.

R

- Rai, A., & Joshi, Y. P. (2014). Applications and Properties of Fibre Reinforced Concrete. *Journal of Engineering Research and Applications*, 4(5), 123–131.
- Raun, C., & Kirkegaard, P. H. (2015). Adaptive Mould - A Cost-Effective Mould System Linking Design and Manufacturing of Double-Curved Panels. *GRC 2015 Congress*, 1–7.

S

- Saikia, N., & De Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, 34, 385–401. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>.
- Sánchez Paradela, M. L., & Del Águila, A. (1992). El envejecimiento de las pastas de cemento reforzadas con fibras de vidrio. *Informes de la Construcción*, 42, 65–71.
- Sánchez Paradela, L. (2015). *Fachadas y Cubiertas Técnicas de Construcciones Convencionales y Avanzadas*. Mairia Libros.
- Sass, L., Shea, K., & Powell, M. (2005). Design Production : Constructing Freeform Designs with Rapid Prototyping. *Digital Design: The Quest for New Paradigms*, 261–268.
- Sass, L., & Oxman, R. (2006). Materializing design: The implications of rapid prototyping in digital design. *International Journal of Design Studies*, 27(3), 325–355. <http://doi.org/10.1016/j.des-tud.2005.11.009>.
- Sass, L., Chen, L., & Sung, W. (2016). Embodied prototyping: exploration of a design-fabrication framework for large-scale model manufacturing. *Computer-Aided Design and Appli-*

- cations, 13(1), 124–137. <http://doi.org/10.1080/16864360.2015.1059202>.
- Schiftner, A., Baldassini, N., Bo, P., & Pottmann, H. (2008). Architectural freeform structures from single curved panels. *Advances in Architectural Geometry*, 3(1), 45–48.
- Schiftner, A., Höbinger, M., Wallner, J., & Pottmann, H. (2009). Packing circles and spheres on surfaces. *ACM Transactions on Graphics*, 28(5), 1. <http://doi.org/10.1145/1618452.1618485>.
- Schipper, R., & Grunewald, S. (2014). Efficient material use through smart flexible formwork method. *ECO-Crete: International Symposium on Environmentally Friendly Concrete* 61–67. Reykjavik, Iceland. Accesible en: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:5f767d7f-6ad1-4e37-9efc-1817e9561274>.
- Schipper, R., Eigenraam, P., Grunewald, S., Soru, M., Nap, P., Overveld, B. V. A. N., & Vermeulen, J. (2015). Kine-Mould: Manufacturing technology for Curved Architectural Elements in Concrete. *Proceedings of the International Society Of Flexible Formwork (ISOFF) Symposium 2015*. Amsterdam.
- Schipper, R. (2016). *Flexible Mould Project*. Accesible en <http://homepage.tudelft.nl/6w3a0/FlexibleMouldProject.htm>.
- Schmiedhofer, H. (2007). *Discrete Freeform-Surfaces for Architecture*. Vienna University of Technology.
- Schodek, D., Bechthold, M., Griggs, K., Kao, K. M., & Steinberg, M. (2005). *Digital Design and Manufacturing: CAD/CAM Applications in Architecture and Architectural Design*. Wiley-Academy Press, New York.
- Seely, J. C. (2004). *Digital Fabrication in the Architectural Design Process*. MIT.
- Shelden, D. R. (2002). *Digital surface representation and the constructibility of Gehry's architecture*. Architecture, Accesible en <http://ocw.mesi.ru/NR/rdonlyres/Architecture/4-510Fall-2005/32225197-BF43-41D7-923C-7B282A0F79CE/0/shelden-thesis1.pdf>.
- Singh, M., & Schaefer, S. (2010). Triangle surfaces with discrete equivalence classes. *ACM Trans. Graph. SIGGRAPH '10*, 29, 46. ACM. <http://doi.org/10.1145/1778765.1778783>.
- Singh, M. (2011). *Discrete Triangulated Meses for Architectural Design and Fabrication*. Texas A&M University.
- Sischka, J., Schneider, B., & Ziegler, R. (2012). Freeform Architecture – from Concept to Completion. *Glass Performance Days 2012*, 8. Finland: GPD.
- Society Nuclear & Plasma Sciences. (2016). *Plasma Science and Applications*. Accesible en <http://ieee-npss.org/technical-committees/plasma-science-and-applications/>.
- Soler, J. (2013). " *Form Finding* " y *Fabricación Digital*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Song, Y. A., Park, S., Choi, D., & Jee, H. (2005). 3D welding and milling: Part I-a direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(9), 1057–1062. <http://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.11.021>.
- Sotomayor, M. E., Krupa, I., Várez, A., & Levenfeld, B. (2014). Thermal and mechanical characterization of injection moulded high density polyethylene/paraffin wax blends as phase change materials. *Renewable Energy*, 68, 140–145. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.036>.
- Sousa, J. P., & Duarte, J. P. (2005). Digital Desires , Material Rea-

- lities. eCAADe 23, 221–228. Lisbon, Portugal. Accesible en <http://cumincad.architexturez.net/doc/oai-cumincadworks-id-2005-221>.
- Springer. (2016). Accesible en <http://www.springer.com/gp/>.
- Stavic, M., Wiltsche, A., & Freißling, C. (2010). Geometric and Aesthetic Discretization of Free Form Surfaces. *25th national and 2nd International Scientific Conference, Conference Proceedings, mon Geometrija 2010*. Serbia.
- Steele, J. (2008). *Special Project – Chicago's Millennium Park Project*. Accesible en http://midwest.construction.com/features/archive/0410_feature7-2.asp.
- Strauß, H. (2013). *AM Envelope - The potential of Additive Manufacturing for façade construction*. A+BE Architecture and the Built Environment (3). Netherlands: <http://doi.org/10.7480/abe.2013.1>.
- Strauß, H., Emmer Pfenninger Partner AG, & Knaack, U. (2016). The potential of 3D printed parts for the building envelope. *Journal of Facade Design and Engineering*, 4, 1–11. <http://doi.org/10.3233/RNN-150534>.
- Stratays. (2016). Solid-Scape. Accesible en: <http://www.solid-scape.com/>.
- Strike, J. (2004). *De la Construcción a los Proyectos. La influencia de las nuevas técnicas en el diseño arquitectónico, 1700-2000*. Barcelona: Reverté.
- Sukhtian, L., Aboudi, S., & Ireland, L. (2016). *Dubai says opens world's first functioning 3D-printed office*. Accesible en <http://af.reuters.com/article/oddlyEnoughNews/idAFKCN0YF1OB>.

T

- Tang, C., Sun, X., Gomes, A., Wallner, J., & Pottmann, H. (2014). Form-finding with Polyhedral Meshes Made Simple. *ACM Trans. Graph.*, 33(4), 70:1–70:9. <http://doi.org/10.1145/2601097.2601213>.
- Taylor & Francis Group. (2016). Accesible en <http://taylorandfrancis.com/>.
- Teicholz, P. (2013). *Labor-Productivity Declines in the Construction Industry: Causes and Remedies (Another Look)*. Accesible en http://www.aecbytes.com/viewpoint/2013/issue_67.html.

V

- Van den Ende, B. (2011). *Standard Principles: Double Curved Facades*. TU Delft, Delft University of Technology.
- Van Rijbroek, E. (2015). *Fluid Mould*. Eindhoven University of Technology.
- Van Hennik, P. C., & Houtman, R. (2008). Pneumatic Formwork for Irregular Curved Thin Shells. E. Oñate & B. Kröplin (Eds.), *Textile Composites and Inflatable Structures II*, 99–116. Dordrecht: Springer Netherlands. http://doi.org/10.1007/978-1-4020-6856-0_7.
- Ver Bruggen, S. (2014). *Chinese company prints 10 homes in one day*. Accesible en: <https://www.thefuturescentre.org/articles/1981/chinese-company-prints-10-homes-one-day>.
- Vias y Construcciones. (2015). *3dcons*. Accesible en <http://www>.

3dcons.eu/
Voxeljet. (2016). Voxeljet VX4000. Accesible en <http://www.voxeljet.de/en/3d-printing-systems/vx4000/>.

W

- Wallner, J., Schiftner, A., Kilian, M., Flöry, S., Höbinger, M., Deng, B., ... Pottmann, H. (2010). Tiling Freeform Shapes With Straight Panels: Algorithmic Methods. *Advances in Architectural Geometry*, 73–86. Accesible en <http://www.springerlink.com/index/W3262V3357253452.pdf>.
- Wallner, J., & Pottmann, H. (2011). Geometric Computing for Freeform Architecture. *Journal of Mathematics in Industry*, 1(1). <http://doi.org/10.1186/2190-5983-1-4>.
- Web of Science. (2016). Accesible en: <https://webofknowledge.com/>.
- West, M. (2009). *Thin-Shell Concrete From Fabric Molds*. C.A.S.T. The Centre for Architectural Structures and Technology. Universidad de Manitoba.
- West, M., & Araya, R. (2009). Fabric Formwork for Concrete Structures and Architecture. *International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures*.
- Wohlers, T. (2016). *Wohlers Report 2016*. Accesible en <http://www.wohlersassociates.com>.
- Woodington, W., Bergsma, O., & Schipper, R. (2015). Shear-deforming textile reinforced concrete for the construction of double-curved structures. *International Association for Shell and Spatial Structures*. Amsterdam.
- Wu, P., Wang, J., & Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, 68, 21–31. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.005>.

Z

- Zanher Corporation, & Predock, A. (2014). *ZEPPS, Zahner*. Accesible en http://www.azahner.com/sys_zepps.cfm.
- Zhang, J., & Khoshnevis, B. (2013). Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting. *Automation in Construction*, 29, 50–67. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.08.006>.

Capítulo 9

FIGURAS Y TABLAS

Figuras

- Fig. 1. La Esfinge de Giza, Egipto
- Fig. 2. Restaurante Los Manantiales, México. Félix Candela. 1958
- Fig. 3. Centro de Vuelos TWA, Nueva York. Eero Saarinen. 1962.
- Fig. 4. Casa Milá, "La Pedrera", Antoni Gaudí. 1912
- Fig. 5. Iglesia del Cristo Obrero. Estación Atlántida, Uruguay, Eladio Dieste. 1952.
- Fig. 6. Casa Monsanto, Los Ángeles, California. 1957.
- Fig. 7. *Futuro House*, Idyllwild, California. 1968.
- Fig. 8. Máquina CNC denominada Milwaukee-Matic II, comercializada por la Empresa Kearney & Trecker, 1959.
- Fig. 9a. Centro de Prensa del Campo de cricket, de los Lords, Londres. Montaje temporal del casco de aluminio en astilleros Pendennis. *Future Systems*. 1999.
- Fig. 9b. Centro de Prensa del Campo de Cricket, de los Lords, Londres. Construcción terminada. Londres. *Future Systems*. 1999.
- Fig. 10a. *Kunsthaus Graz*, Peter Cook y Colin Fournier. 2003.
- Fig. 10b. *Hungerburg Station*, Innsbruck. Austria. Zaha Hadid. 2007.
- Fig. 11. Desarrollo de la envolvente mediante la segmentación en paneles del Centro Cultural *Heydar Aliyev* en Baku. Zaha Hadid. 2012
- Fig. 12. Escultura del "Pez" en el Paseo Marítimo de Barcelona. Frank O. Gehry. 1992.
- Fig. 13. Dibujos del proyecto el "Pez" realizados en el software CATIA
- Fig. 14. Pabellón BMW "*The Bubble*". Exhibición del Motor en Frankfurt. Bernhard Franken. 1999.
- Fig. 15. *Experience Music Project*. Seattle, EE.UU. Frank O. Gehry. 2001.
- Fig. 16. Museo de Arte de Graz, Austria. P.Cook y C. Fournier. 2003. La fachada "BIX" (combinación de "Big" y "Pixels") se convierte en una pantalla multimedia de grandes proporciones gracias a 930 luminarias circulares, las cuales son controladas por ordenador.
- Fig. 17. *Cloud Gate*, *Millenium Park*, Chicago. Anish Kapoor. 2006.
- Fig. 18. Maqueta interior 1:10 fabricada gracias a una fresadora CNC. Proyecto de la Ópera Metropolitana de Taichung, Taiwan. Toyo Ito. 2004.
- Fig. 19. Estación de Nordpark, Innsbruck. Zaha Hadid. 2007.
- Fig. 20. Panel de vidrio en molde metálico, sobre una base de vidrio perdido. Se utiliza una hoja de vidrio como subestructura sobre tubos metálicos que dan la forma, haciendo que la segunda hoja se amolde perfectamente, sin ninguna imperfección debida a los apoyos.
- Fig. 21. El primer edificio de oficinas impresa en 3D. Dubai. 2016.
- Fig. 22. Casa realizada con planchas de aluminio en Venecia, California. Arquitecto Mario Romano.
- Fig. 23. Pabellón temático de la Expo de Corea del Sur.

- SOMA. 2012. La construcción de las lamas móviles se realizó con GRC sobre moldes de poliestireno.
- Fig. 24. Estación de autobuses en Hoofddorp. Holanda NIO Architecten. 2013. La construcción es de espuma de poliestireno. Costó la mitad que si se hubiese construido en hormigón.
- Fig. 25. Pabellón de Vanke China, Expo de Milán. Daniel Libeskind. 2015. Forrado por azulejos rojos simulando una serpiente.
- Fig. 26. Harbin Opera House, China. Ma Yansong (MAD). 2015.
- Fig. 27. Museo Ordos, Mongolia. Ma Yansong. 2011. La envolvente del edificio se cubre con lamas metálicas, sin que se unan entre ellas. Envolvente realizada con planchas de aluminio blanco.
- Fig. 28. Iglesia de Martin Luther King, Austria. Coop Himmelblau. 2011. Edificio de paneles de acero, curvados mediante técnicas de conformado CAM/CAD específicas para la industria naval.
- Fig. 29. Render fotorrealista del proyecto "Centro Internacional Chanhsha Meixihu de la Cultura y las Artes", China. Diseñado por Zaha Hadid.
- Fig.30. Superficie creada con NURBS, se muestran los puntos de control, así como los pesos (Schmiedhofer, 2007).
- Fig. 31. Elemento de geometría compleja creado a partir de una malla con Rhinoceros.
- Fig. 32. Nube de puntos obtenida mediante un escaneo 3D. Geomagic.
- Fig. 33. Dibujo realizado con T-Splines y Grasshopper. www.grasshopper3d.com.
- Fig. 34. Panel con superficie "Rubber Sheet" del proyecto *Freeform Construction* de la Universidad de Loughborough, UK.
- Fig. 35. Proyecto ADAPA. Uso de la "Rubber Sheet" como base de la superficie de estudio.
- Fig. 36. Software Trimble Connect, Gehry Technologies Proyecto Museo Soumaya, Ciudad de México Fernando Romero. 2011.
- Fig. 37. Diseño paramétrico de panelización de una superficie. El software utilizado es Grasshopper *Paneling System*. Se muestran los diferentes patrones resultantes de la aplicación de una variedad de parámetros.
- Fig. 38. Clasificación de los paneles de fachada en función de su curvatura, según (Henriksen, Lo, & Knaack, 2015).
- Fig. 39. Envolvente post-racionalizada en la que se describen varios de los estadios de desarrollo, desde la superficie creada con NURBS, la malla discretizada y finalmente el modelo digital completo, el cual se analiza de acuerdo a la escala termográfica por su nivel de complejidad (Sischka, Schneider, & Ziegler, 2012).
- Fig. 40. Estructura de una cubierta curva segmentada mediante triangulación (Singh & Schaefer, 2010).
- Fig. 41. Cubierta de la Sala de exhibición de Arte islámico, en el Louvre, diseñado por Mario Bellini Architects y Rudy Ricciotti, está basada en una malla poliédrica híbrida, que combina los grados de libertad de los

- triángulos con la ligereza que aporta el pequeño número de partes de una malla.
- Fig. 42. Triangulación. *"The Blob"*, Eindhoven. Estudio Fuksas. 2010.
- Fig. 43. Segmentación por cuadriláteros. *"The Sage, Gateshead"*, Reino Unido. 2004. Foster + Partners.
- Fig. 44. Centro Nacional de Artes Escénicas, Pekín. Paul Andreu Arquitecto. 2007.
- Fig. 45. Superficies desarrollables por bandas. Uso de Algoritmos genéticos. Axel Kilian. 2001.
- Fig. 46. Edificio del Disney Concert Hall en Los Ángeles, CA., Diseñado por Frank Gehry. 2003. La envolvente fue creada mediante el procedimiento de superficies desarrollables como bien puede apreciarse en la foto 45b.
- Fig. 47. Método por puntos arbitrarios. Diferentes soluciones de panelización en superficies de curvatura positiva y negativa. Fuente: Stavic, Wiltsche & Freißling, 2011.
- Fig. 48. Segmentación triangular y colocación de esferas en los nodos, mediante *"Packing circles"* (Schiftner, Höbinger, Wallner, & Pottmann, 2009).
- Fig. 49. Envolvente diseñada mediante *"Packing Circles"*. Edificio Selfridges, Birmingham. *Future Systems*. 2003.
- Fig. 50. Invernaderos Manta de las destilerías de Bombay Spirit Co. Paneles de vidrio con curvatura cilíndrica y comportamiento estructural. Heatherwick studio. Arup. 2014.
- Fig. 51. Envolvente segmentada utilizando paneles cilíndricos y planos mediante un modelo de tiras desarrollables. Servita Square Tower, Budapest. Zaha Hadid.
- Fig. 52. Solución de ajuste local sobre una base cilíndrica. Se permiten desviaciones de 2 cm aprox. en cada tira (Eigensatz & Schiftner, 2011).
- Fig. 53. Segmentación de la pieza mediante tiras desarrollables con curvatura simple, del techo del Burj Khalifa, Gehry Technologies. 2010.
- Fig. 54. Panelización con elementos de doble curvatura, describiendo divergencias menores de 6mm y ángulos de torsión menores de 0,25 grados. (Eigensatz & Schiftner, 2011).
- Fig. 55. Segmentación de superficies de forma libre mediante algoritmos matemáticos, resueltos con paneles planos, en base a cilindros, paraboloides, toroides y cúbicos.
- Fig. 56. Túnel realizado con planchas metálicas curvadas mediante una rueda inglesa. Antony's College en Oxford, Zaha Hadid. 2015.
- Fig. 57. Resultado de la panelización aplicando el algoritmo con diferentes rangos de ángulo de torsión y divergencias entre paneles.
- Fig. 58. Ejemplo de la maqueta física original (dcha.) y la maqueta del mismo diseño después de haber sido escaneada, racionalizada y fabricada (izq.). (Shelden, 2002).
- Fig. 59. Brazo de medición 3D CMM. Escáner de contacto portátil.
- Fig. 60. Escáner 3D sin contacto. Modelo Sense, Cubify. Pre-

- cio 395 euros (Dic. 2015).
- Fig. 61. Digitalización de un objeto mediante una secuencia de fotografías (a), posteriormente mediante la fotogrametría informatizada se crea una nube de puntos (b) para así obtener un modelo digital (c). Fuente: Taller de prototipos 2013, UPM.
- Fig. 62. Proceso de digitalización de una maqueta tridimensional mediante escáner de contacto para posteriormente trasladarlo a una máquina CNC.
- Fig. 63. Moldes de cartón para crear un panel de forma libre de hormigón, cortados por máquina CNC. Proyecto de la Universidad de Liechtenstein en colaboración con la empresa Skateparks (Rudolph Concrete).
- Fig. 64. Parasol, Sevilla. Las piezas fueron realizadas en bloques que fueran fácilmente transportables, ya que el acceso a la Plaza complicaba las labores de abastecimiento.
- Fig. 65. Paneles de acero inoxidable cortados y perforados mediante corte láser. La empresa Formtexx realiza la curvatura de los paneles mediante una técnica formativa. Centro Comercial L'Atoll en Angers, Francia, diseñado por AAVP Architecture. 2013.
- Fig. 66. Edificio BMW Welt, Múnich. Coop Himmelblau. 2007.
- Fig. 67. Stand de la Universidad de Darmstadt. 20008. Hecho a partir de placas de cartón corrugado, cortadas por chorro de agua.
- Fig. 68. Diagramas explicativos del proceso de corte por chorro de agua pura (a) y con abrasivos (b).
- Fig. 69. Corte por hilo caliente de gran formato.
- Fig. 70. Corte por hilo caliente mediante robot de brazo articulado. Permite la creación de moldes de EPS con geometrías complejas. Universidad de Oporto.
- Fig. 71. Parada de autobús en Hoofddorp, Holanda. NIO Architecten. 2003. Piezas de EPS cortadas por hilo caliente.
- Fig. 72. a. Fresadora CNC de seis ejes. Permite la formación de piezas con formas libres. b. 335 paneles de hormigón armado para la Torre Zollhof, Düsseldorf, a partir de bloques de EPS, formados por una fresadora CNC. Frank Gehry. 2002.
- Fig. 73. Moldes de poliestireno expandido sobre los cuales se proyectó GRC. Proyecto Medienhaus K42, Friedrichshafen. Matthäus Schmid. 2002.
- Fig. 74. Vivienda realizada mediante plegado y doblado de acero corten. *Ship house*, Undercurrent Architects. 2012.
- Fig. 75. Máquina de MPF. Se muestra cómo mediante la presión de ambas matrices se puede deformar la plancha de material. Máquina fabricada por la Universidad Jilin, China.
- Fig. 76. Proceso ISF con brazo robotizado controlado por una central CNC. Deforma las láminas metálicas gracias a un punzón que va realizando una presión constante en los puntos requeridos para conseguir la forma deseada.
- Fig. 77. Prototipo a escala 1/8 de la sección frontal del Tren Bala (Shinkansen, Japón,) utilizando la técnica ISF.

- Fig. 78. Proceso *Flexible Roll Bending*, desarrollado por la Universidad Jilin de China.
- Fig. 79. Proceso de conformación mediante *Multipoint forming Stretch Bending* (Lee & Kim, 2012).
- Fig. 80. Exhibición de paneles de forma libre de 10m x 3m., de la empresa Formtexx en el *Building Centre* de Londres. Con esta técnica se producen paneles de 1,20m x 1,20m con doble curvatura cada veinte minutos.
- Fig. 81. Estudio de Dibujo de la Universidad de Artes Bournemouth, Reino Unido. 2015. Piezas de acero conformadas mediante rodillos controlados por ordenador, ensambladas y soldadas *in situ*. Empresa CIG.
- Fig. 82. Qatar *National Convention Centre*, Arata Isozaki. 2010. Paneles de acero conformadas con formas curvadas. Empresa Victor Buyck Steel Construction
- Fig. 83. Métodos de manufactura aditiva de Wong y Hernández (Wong & Hernandez, 2012)
- Fig. 84. Proceso de fabricación aditiva por estereolitografía.
- Fig. 85. Prototipo realizado mediante el proceso de estereolitografía por la empresa Materialise (<http://manufacturing.materialise.com>). La máquina denominada Mammoth tiene un área de impresión de más de 2 m² (2100 x 680 x 800 mm).
- Fig. 86. Sinterizado Selectivo por Láser.
- Fig. 87. Silla ONE_SHOT.MGX fabricada en SLS. El asiento, las patas y las articulaciones de la silla son creados en un solo procedimiento evitando el ensamblaje. Realizado en poliamida en Materialise por el diseñador Patrick Jouin 2006.
- Fig. 88. PolyJet. Pieza realizada en la máquina Object1000Plus de StratasyS con unas dimensiones de 1000 x 800 x 500 mm.
- Fig. 89. Fabricación por Fusión de Filamento Fundido (FFF)
- Fig. 90. StickFilament. Permite la impresión en FDM/FFF con gradientes de color.
- Fig. 91. Proyecto Escher. El tamaño máximo no está establecido, pero la plataforma de estudio es de 1200 x 300 mm, con una altura de 500 mm.
- Fig. 92. Impresoras de Fabricación por Fusión de Filamento (FFF) a. Impresora cartesiana. b. Impresora Delta. c. Impresora Polar.
- Fig. 93. D-Shape. Proceso de impresión a gran escala.
- Fig. 94. Pabellón Radiolaria fabricado mediante la tecnología *D-Shape*.
- Fig. 95. Proceso *Countour Crafting*. Simulación de Impresión de edificios completos.
- Fig. 96. Detalle de la boquilla y las paletas del *Contour Crafting*.
- Fig. 97. 3D *Big Delta Printer* del proyecto WASP. Imprime materiales cerámicos, arcilla, cementicios y plásticos.
- Fig. 98. Viviendas impresas por procedimiento aditivo de mortero. Empresa WinSun Co. China. 2014
- Fig. 99. Casa de hormigón impresa en 3D, de la empresa rusa Apis Cor, construida en 1 día.
- Fig. 100. Panel 1m x 1m, de hormigón reforzado, proyecto *Freeform Construction*, Universidad Loughborough.

- Fig. 101. Impresora de hormigón desarrollada en la Universidad Tecnológica de Eindhoven.
- Fig. 102. Impresora BAAM, realizando la impresión de un coche Shelby Cobra a escala real.
- Fig. 103. Sistema de impresión mediante raíles para permitir que las impresoras puedan fabricar en altura.
- Fig. 104. Impresora Voxeljet VX4000, con capacidad de 8m³ (4m x 2m x 1m).
- Fig. 105. KamerMaker es una impresora basada en una Ultimaker, pero agrandada con una plataforma de 2,20m x 2,20m x 3,50m.
- Fig. 106. Bloom (2015) es el nombre de esta instalación autoportante de 3,6m x 3,6m x 2,7m compuesto por 840 piezas impresas en 3D, con un composite de cemento sin partículas de óxido de acero, lo que le da ese color blanquecino.
- Fig. 107. Proyecto *WirePrint*. Impresión de una botella mediante hilos de plástico. Posteriormente se recubre el objeto, pero mantiene la forma.
- Fig. 108. Gráfico de la venta de robots en todo el mundo entre 2010 y 2014 (IFR, 2015).
- Fig. 109. Pabellón ICD/ITKE 2011. Dirigido por el Prof. Menges y el Prof. Knippers.
- Fig. 110. Pabellón 2014-2015. Se muestra el procedimiento aditivo mediante brazo robotizado.
- Fig. 111. Muro realizado con el sistema *MeshMould*.
- Fig. 112. *Mataerial*. Robot de brazo articulado que mediante proceso aditivo extruye un polímero termoestable.
- Fig. 113. *Minibuilders*. Una de las máquinas comienza señalando la base sobre la cual se añadirán las siguientes capas y posteriormente se pueden añadir más máquinas para crear las paredes, techos y el refuerzo exterior.
- Fig. 114. Proyecto creado por Joris Laarman como una investigación sobre la impresión a gran escala de estructuras sofisticadas. En la foto se ve dos robots construyendo un puente sobre un río. 2015.
- Fig. 115. Representación realista de la construcción de paneles de doble curvatura mediante robots. Coop Himmelblau.
- Fig. 116. Escultura para IMM 2010 en la exhibición Architonic, diseñada por Oskar Zieta. Proyecto realizado por soldado/hinchado.
- Fig. 117. Kine-Mould. Sistema de creación de paneles de formas complejas mediante la incorporación de unas barras móviles que se ajustan de acuerdo a las necesidades de producción (Schipper et al., 2015).
- Fig. 118. Panel de forma libre de poliéster reforzado con fibras de vidrio.
- Fig. 119. Prototipo para el ensayo de las propiedades de la cera como encofrado para elementos de hormigón (Oesterle, Vansteenkiste, & Mirjan, 2012).
- Fig. 120. Paneles a partir de FRP, que pueden ser utilizados en la arquitectura como elementos estructurales de grandes dimensiones o paneles arquitectónicos para la envolvente.
- Fig. 121. Generación de tiras desarrollables definidos median-

- te mallas poligonales en todas las fases de estudio. En la imagen de la derecha se aprecia las tiras desarrollables con un plano tangente constante a lo largo de la curva.
- Fig. 122 Las deformaciones en la chapa metálica mediante el uso de MPF es evidente en esta imagen, en donde se analizan de antemano los puntos de incidencia y deformación.
- Fig. 123 *Incremental forming* de una plancha de aluminio en una máquina CNC..
- Fig. 124 Formas que demuestran el potencial de *Incremental forming* en cuanto a prototipos y ensayos.
- Fig. 125 Conformado continuo de una plancha metálica mediante el sistema de doblado por tres rollos flexibles.
- Fig. 126 Modelo 3D de un pato desarrollado a partir de piezas planas ensambladas entre sí.
- Fig. 127 Muro impreso en 3D en hormigón de altas prestaciones. Desde la concepción en CAD hasta la fabricación mediante *Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete*.
- Fig. 128 Comparación de patrones de impresión entre capas planas y el patrón de capas curvadas sobre el diseño de un panel sándwich de doble curvatura.
- Fig. 129 Prueba del panel de GFRC en un proceso de pre-mezclado en una mesa flexible, la cual se ha colocado con una forma libre.
- Fig. 130 Modelo a escala de elementos arquitectónicos, impresos con la impresora Z-corp.
- Fig. 131 Prototipos de la fachada del Dongdaemun *Design Park* en distintas etapas con sistemas reales de anclaje e instalación. Fotos de Gang Lee.
- Fig. 132 Proceso de extrusión de la malla del proyecto *Mesh-Mould*, mediante un robot UR5.
- Fig. 133 El GRC es vertido encima del tejido, haciendo que flexe por el peso del material añadido, que previamente ha sido simulado.
- Fig. 134. *Kine-mould* desarrollado por la 4TU Federation.
- Fig. 135. *MegaRob* Proyecto de robot de brazo articulado para la fabricación de elementos de la industria aeronáutica.
- Fig. 136. Manual de Fabricación Aditiva editado por COTEC, 2011.
- Fig. 137. Pabellón ICD/ITKE 2015-2016.
- Fig. 138. Esquema del proceso de producción de moldes de cera para la creación de paneles de materiales cementicios proyectables.
- Fig. 139 Axonometría explicativa del Sistema F2TE3. Alonso, 2012.
- Fig. 140 Nodo de Perfilera de aluminio Nematox II, impresa en 3D mediante ConceptLaser system EOS ® FKM Sinter-technik GmbH.
- Fig. 141 Portada del libro "*Architectural Geometry*" (Pottmann, Asperl, Hofer, & Kilian, 2007).
- Fig. 142 Portada del libro "*Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*" (Fig. 138) (Kolarevic, 2003).
- Fig. 143 Portada del libro "*Digital Processes: Planning, Design, Production*" (Hauschild & Karzel, 2011).

- Fig. 144 Portada del libro "*Digital Fabrication in architecture*" (Dunn, 2012).
- Fig. 145 Portada del libro "*Rapids*" (Knaack, Klein, & Bilow, 2010).
- Fig. 146 Modelo de un automóvil y su desarrollo mediante doblado. La descomposición en superficies regladas se muestra mediante el esquema de color. La segmentación es necesaria hacerla mediante NURBS.
- Fig. 147 Diferentes propuestas de panelización con el algoritmo de Eigensatz.
- Fig. 148 Prototipo de paneles de doble curvatura con GRC en molde flexible.
- Fig. 149 Prototipo de paneles realizados mediante *Flexible Mould*.
- Fig. 150 Esquema de actuación en la fase metodológica.
- Fig. 151 Esquema general de la metodología experimental.
- Fig. 152 Imagen del desarrollo del panel "*Rubber Sheet*" en el programa Rhinoceros.
- Fig. 153 Imagen del programa CURA de impresión 3D.
- Fig. 154 Impresora Prusa i2.
- Fig. 155 Impresora M3.
- Fig. 156 Impresora Witbox.
- Fig. 157 Malla de plástico ABS de prueba 1.
- Fig. 158 Prueba 1. Experimento 1. Malla de plástico ABS con mortero.
- Fig. 159 Prueba 1. Experimento 2. Malla de ABS con GRC.
- Fig. 160 Malla de PLA con forma de sección de casquete esférico. Prueba 2.
- Fig. 161 Panel "*Rubber Sheet*" para Prueba 3.
- Fig. 162 Panel plano para prueba 4.
- Fig. 163 Panel reforzado con GRC y núcleo de malla de PLA. Soportes laterales y útil de carga.
- Fig. 164 Diagrama por carga uniforme.
- Fig. 165 Diagrama por cargas repartidas en los extremos a un cuarto de distancia.
- Fig. 166 Diagrama comparativo entre la carga uniforme y la repartida según Calavera, 1992.
- Fig. 167 Imagen del programa COMSOL *Multiphysics*.
- Fig. 168 Malla de termoplástico (ABS) con mortero de cemento Beisser, después de 24 hrs. de curado.
- Fig. 169 Prueba 1. Rejilla con GRC. Se puede comprobar que no se traspasa lo suficiente.
- Fig. 170 Dibujo en CAD de la prueba 2 con soportes prediseñados.
- Fig. 171 Prueba 2. Experimento 1. Casquete esférico de PLA con mortero enrasado por la cara exterior.
- Fig. 172 Prueba 2. Casquete esférico de PLA con mortero por la cara interior.
- Fig. 173 Casquete esférico impreso en 9 hrs, 10 minutos, con un gasto de material de 61 gr. de PLA.
- Fig. 174 Casquete esférico impreso en 24 hrs, 10 minutos, con un gasto de material de 309 gr. de PLA.
- Fig. 175 Gráfico de gasto de material para la prueba de soportes.
- Fig. 176 Gráfico del tiempo que tarda en imprimir los soportes.
- Fig. 177 Prueba 2. Casquete esférico con capas por fases.
- Fig. 178 Prueba 2. Casquete esférico con pintura automotriz

- como acabado final.
- Fig. 179 Propuesta de panel con el nuevo sistema. Ilustración de las capas contempladas.
- Fig. 180 Proceso de creación de panel en el programa Rhinoceros. a. Cuatro curvas NURBS. b. Superficie "Rubber Sheet" de forma libre. c. Panel volumétrico convertido en malla.
- Fig. 181 Representación del prototipo en archivo STL. En la imagen de la izquierda se puede observar la segmentación triangular de la pieza.
- Fig. 182 Panel "Rubber Sheet" con soportes visto en el programa de impresión Cura.
- Fig. 183 G-Code del prototipo a escala real.
- Fig. 184 Pruebas de Impresión de prototipo en la M3 de Moebius Machines.
- Fig. 185 Máquina de mezcladora GA 125, motor 7,5 Kw.
- Fig. 186 Colocación de la malla en una superficie apropiada con sujeción lateral.
- Fig. 187 Pulverizado del GRC sobre malla impresa en 3D.
- Fig. 188 .Alisado de las fibras de vidrio mediante cepillo metálico.
- Fig. 189 Cara interior del panel por el cual no traspasó el GRC, salvo algunos pequeños elementos.
- Fig. 190 Vertido de mortero con resinas de Cement Design.
- Fig. 191 Lijado del prototipo después del secado para dejar la pieza con una calidad lisa.
- Fig. 192 Pintado de la pieza con una veladura metalizada.
- Fig. 193 Visualización de panel plano de malla de PLA y refuerzo de GRC.
- Fig. 194 Medición del panel a experimentar.
- Fig. 195 Colocación del útil de carga sobre el panel.
- Fig. 196 Visualización de panel con útil de carga y apoyo en los extremos.
- Fig. 197 Prueba 4, panel con carga mediante útil.
- Fig. 198 Visualización de panel con carga puntual.
- Fig. 199 Prueba 4, panel con carga directa.
- Fig. 200 Panel de 0,03m de grosor con una carga repartida y un Módulo de Young de 20 GPa.
- Fig. 201 Panel de 0,03m de grosor con una carga repartida y un módulo de Young de 0,5 GPa.
- Fig. 202 Panel de 0,015m de grosor con una carga repartida y un módulo de Young de 20 GPa.
- Fig. 203 Panel de 0,015m de grosor con una carga repartida y un módulo de Young de 16 GPa.
- Fig. 204 Simulación de panel de forma libre de 0,01m de espesor con un Módulo de Young de 20 GPa.
- Fig. 205 Opción 1 de panel con capa de GRC + malla + acabado.
- Fig. 206 Opción 2 de panel con capa de malla + GRC + acabado.
- Fig. 207 Opción 3 de panel con capa de GRC + malla + GRC + acabado.
- Fig. 208 Sección de panel. Solución de abertura con elementos de borde.
- Fig. 209 Solución para piezas complejas o de gran tamaño mediante la segmentación en piezas más pequeñas. a. Pieza original. b. Simulación de impresión con so-

portes. c. Segmentación de la pieza. d. Colocación de las piezas lo más horizontales posibles para evitar el gasto de material y por lo tanto mayor tiempo de ejecución.

Tablas

Tabla 1	Clasificación de paneles de acuerdo a su precio de producción en diferentes materiales. (Eigensatz et al., 2010).
Tabla 2	Especificaciones de la impresora Prusa I2.
Tabla 3	Especificaciones de la impresora M3.
Tabla 4	Especificaciones de la impresora Witbox.
Tabla 5	Características de la Prueba 1.
Tabla 6	Características de la Prueba 2.
Tabla 7	Características de la Prueba 3. Prototipo a escala real.
Tabla 8	Características de la Prueba 4.
Tabla 9	Datos generales del panel para pruebas a flexión.
Tabla 10	Datos de carga-descarga con útil del panel prueba 4.
Tabla 11	Datos de carga-descarga con peso puntual.
Tabla 12	Cálculo del Módulo de Elasticidad para panel de 0,03m de grosor.
Tabla 13	Cálculo del Módulo de Elasticidad para panel de 0,015m de grosor.
Tabla 14	Datos del nuevo sistema.
Tabla 15	Requisitos. Exigencias básicas y características pres-tacionales aplicables al panel de GRC con malla de PLA y acabado de mortero (adaptación de la tabla de Bento, 2012).
Tabla 16	Análisis económico del panel de forma libre de GRC sin molde.