UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE MADRID

LA PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA EN LA ARQUITECTURA

MEDIANTE FABRICACIÓN DIGITAL

BASES PARA EL DESARROLLO DE UN PROTOCOLO DE CONEXIÓN
ENTRE DISEÑO E INDUSTRIA

Tesis Doctoral

ISABEL OLIMPIA MERRY DEL VAL MARIÁTEGUI

Arquitecto

Junio de 2017

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA ARQUITECTÓNICAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE MADRID

LA PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA EN LA ARQUITECTURA

MEDIANTE FABRICACIÓN DIGITAL

BASES PARA EL DESARROLLO DE UN PROTOCOLO DE CONEXIÓN
ENTRE DISEÑO E INDUSTRIA

ISABEL OLIMPIA MERRY DEL VAL MARIÁTEGUI

Arquitecto

Director

Dr. ENRIQUE AZPILICUETA ASTARLOA

Arquitecto

Junio de 2017

Tribunal nombrado por el Magfco. Y Excmo. 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 20...

En la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Calificación:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

SECRETARIO

AGRADECIMIENTOS

A Sofía, mi mayor orgullo y la mejor compañía para terminar esta tesis.

A Federico, mi mayor apoyo incondicional.

A mi padre, mi modelo de vida y guía permanente; esta tesis también es la tuya.

A mi tutor Enrique Azpilicueta, por sus buenos consejos y acompañamiento durante la tesis.

Esta tesis se ha desarrollado durante un recorrido vital entre Estados Unidos, España, Suiza y Bélgica. En cada etapa de este recorrido tengo que agradecer a muchas personas su apoyo para realizar la tesis, y en particular: a Dana Buntrock (U.C. Berkeley), por servir de inspiración para comenzar la tesis; a mis compañeros y amigos Inés Carrapico y Javier Hernández Ayllón, por ser ejemplos de fuerza y optimismo; a Eva Delgado (DCTA, UPM), por solucionarlo todo con una sonrisa; a Almudena Ribot (ETSAM, UPM), Riccardo Blumer (Academia de Architettura de Mendrisio) y Miguel Martínez Garrido (ETSAM, UPM), por darme la oportunidad de presentar la tesis a sus alumnos; a Alfonso del Águila (DCTA, UPM), por su apoyo en el inicio de la tesis; a Christophe Sigrist (BFH), por su calurosa acogida en la Berner Fachhochschule; a René Graf y Eduard Bachmann (BFH), por aceptar mi estancia de investigación en Suiza; a Stefan Sitzmann y Peter Zock, por ser mis guías durante mi estancia en la BFH; a Susana Labarga, por su ayuda con la edición; y a mi hermana María, por ser un apoyo constante y un gran ejemplo.

La mayor gratificación de este trabajo han sido los encuentros con fabricantes, consultores e ingenieros, que han aportado una enorme riqueza y humanidad al trabajo y me han enseñado un mundo fascinante, como ellos lo llaman, “el del otro lado de la valla”. Mi agradecimiento a los profesionales de Blumer-Lehmann (Suiza), Campolonghi (Italia), Centralstaal (Holanda), Control Glass (España), Creation-Holz (Suiza), Cricursa (España), Designtoproduction (Suiza), Dinitech (Italia), Ducret-Orges (Suiza), Erne Holzbau (Suiza), KLH (Austria), Preinco (España), Octatube (Holanda), Onlywood (Suiza), Poly Products (Holanda), Proiek (España), ROB Technologies (Suiza), Vari (Bélgica).

INDICE

AGRADECIMIENTOS.....	I
INDICE	III
RESUMEN	1
ABSTRACT.....	3
1 INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 LA ERA INDUSTRIAL.....	7
1.2 LA ERA DIGITAL	9
1.3 PERSONALIZACIÓN EN MASA.....	11
1.4 HIPÓTESIS.....	13
1.4.1 INTRODUCCIÓN	13
1.4.2 HIPÓTESIS GENERAL	14
1.5 OBJETIVO.....	15
1.5.1 OBJETIVO PRINCIPAL	15
1.5.2 OBJETIVOS PARCIALES	15
2 INDUSTRIALIZACIÓN EN ARQUITECTURA.....	19
2.1 LA PRIMERA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL	21
2.2 LA SEGUNDA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL	25
2.3 LA ERA DIGITAL	27
2.4 LA “TERCERA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL”	29
3 LA PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA EN LA ARQUITECTURA.....	33
3.1 LA PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA EN LA INDUSTRIA.....	35
3.1.1 CONDICIONES PARA LA PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA.....	36
3.1.2 TIPOS DE PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA.....	36
3.2 PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA EN LA ARQUITECTURA.....	39
3.2.1 INTRODUCCIÓN	39
3.2.2 CARACTERÍSTICAS	41
3.3 LA PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA MEDIANTE FABRICACIÓN DIGITAL.....	43
3.3.1 EL DISEÑO DIGITAL	43
3.3.2 TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA DESDE OTRAS INDUSTRIAS.....	46
3.3.3 LA FABRICACIÓN DIGITAL	47
3.3.4 PROCESO DE DISEÑO A FABRICACIÓN DIGITAL.....	49

3.3.5	PARADIGMA DE LA PERSONALIZACIÓN EN MASA EN ARQUITECTURA	52
4	METODOLOGÍA INVESTIGADORA	57
4.1	INTRODUCCIÓN	59
4.2	ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA.....	61
4.3	DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA	65
4.3.1	METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE CAMPO: REALIZACIÓN DE VISITAS A FÁBRICAS	66
5	ANÁLISIS DE PROCESOS DE FABRICACIÓN PERSONALIZADA EN ARQUITECTURA	71
5.1	METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS	73
5.1.1	GUIÓN DEL ANÁLISIS Y DESCRIPCIÓN DE CRITERIOS	74
5.1.2	¿QUÉ ES POSIBLE FABRICAR?: POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN	77
5.1.3	¿QUÉ ES POSIBLE GENERALIZAR?: EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN	78
5.1.4	EVALUACIÓN DE POTENCIAL PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA	82
5.1.5	CLASIFICACIÓN DE PROCESOS DE FABRICACIÓN PERSONALIZADA	85
5.2	PROCESOS DE CORTE	91
5.2.1	PROCESOS DE CORTE A PEQUEÑA ESCALA	93
5.2.2	CORTE DE MADERA: ASERRADO Y FRESADO	95
5.2.3	CORTE DE PIEDRA: ASERRADO, FRESADO Y CORTE POR CHORRO DE AGUA	105
5.2.4	CORTE DE METAL: FRESADO, CORTE LÁSER Y CORTE POR PLASMA.....	115
5.3	PROCESOS SUBTRACTIVOS.....	123
5.3.1	FRESADO A PEQUEÑA ESCALA	125
5.3.2	FRESADO DE MADERA.....	129
5.4	PROCESOS FORMATIVOS	139
5.4.1	PROCESOS DE DEFORMACIÓN MECÁNICA	141
5.4.1.1	Estampación de metal	143
5.4.1.2	Deformación de madera.....	154
5.4.1.3	Deformación de vidrio en frío.....	160
5.4.2	PROCESOS DE FORMADO POR MOLDEO	163
5.4.2.1	Termoformado de vidrio.....	167
5.4.2.2	Formado por moldeo de materiales compuestos.....	177
5.4.2.3	Moldeo con moldes reconfigurables	193
5.5	PROCESOS ADITIVOS.....	197
5.5.1	IMPRESIÓN 3D A PEQUEÑA ESCALA	197
5.5.2	IMPRESIÓN 3D A GRAN ESCALA	203
5.6	FABRICACIÓN ROBOTIZADA	211
5.6.1	FABRICACIÓN ROBOTIZADA A PEQUEÑA ESCALA.....	213
5.6.2	FABRICACIÓN ROBOTIZADA A GRAN ESCALA	215
5.7	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 5	229
5.7.1	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PROCESOS	229
5.7.2	OBSERVACIONES GENERALES	230
5.8	OBSERVACIONES.....	233
5.8.1	FILOSOFÍAS DE INDUSTRIA	234
5.8.2	FILOSOFÍAS DE FABRICACIÓN.....	235
5.8.3	FILOSOFÍAS DE MAQUINARIA.....	236
5.8.4	FILOSOFÍAS DE DISEÑO A FABRICACIÓN	238
6	BASES PARA PROTOCOLO DE CONEXIÓN ENTRE DISEÑO E INDUSTRIA	241
6.1	PROBLEMÁTICA.....	244
6.1.1	ESTRATEGIAS	249

6.2	DEFINICIÓN DEL PROTOCOLO	257
6.2.1	DEFINICIÓN	257
6.2.2	OBJETIVOS	257
6.2.3	ESQUEMA DEL PROTOCOLO	258
6.3	METODOLOGÍA Y DEFINICIÓN DE ELEMENTOS DEL PROTOCOLO.....	260
6.3.1	DISEÑO.....	261
6.3.2	A. LÓGICA DEL DISEÑO	262
6.3.3	B. LÓGICA DE FABRICACIÓN	268
6.3.4	C. LÓGICA DE CONSTRUCCIÓN	270
6.4	ESTUDIO DE CASOS	274
6.4.1	CASO 1: BMW PAVILION.....	276
6.4.2	CASO 2: CLUB DE GOLF YEOJU	282
6.4.3	CASO 3: OOSTCAMPUS.....	290
6.4.4	CASO 4: PORSCHE PAVILION.....	298
6.5	EL MONTAJE ROBOTIZADO	306
6.5.1	CASO 5: ITA DACH.....	310
7	CONCLUSIONES Y DESARROLLO FUTURO	320
8	BIBLIOGRAFÍA.....	323
8.1	LIBROS Y PUBLICACIONES.....	325
8.2	ARTÍCULOS	329
8.3	PÁGINAS WEB	333
9	TABLA DE ILUSTRACIONES.....	337
9.1	LISTADO DE FIGURAS	339
9.2	LISTADO DE TABLAS	359

RESUMEN

En las últimas décadas, debido a la crisis económica global y al rápido desarrollo urbano en países emergentes, la tendencia en la industria de la construcción ha sido la producción en masa de componentes a bajo coste. Sin embargo, los requisitos crecientes de eficiencia, sostenibilidad y singularidad en los edificios reclaman la personalización de la producción industrial. En este contexto, el concepto de personalización en masa es un concepto clave para aunar economía e individualidad.

Los nuevos medios digitales de producción impulsan la producción individualizada. Por un lado, los laboratorios de fabricación digital que emergen por todo el mundo promueven la exploración de los límites geométricos, materiales y técnicos a pequeña escala; por el otro, las industrias de prefabricados arquitectónicos, siguiendo las tendencias de otras industrias como la naval o la aeronáutica, buscan flexibilizar sus procesos y productos.

Estos avances en el campo de la fabricación dan la oportunidad para la conexión directa entre el diseño y la fabricación digital, impulsando el paradigma de la personalización en masa en la arquitectura. Para verificar esta hipótesis surgen las siguientes preguntas: ¿Es igual de fácil producir 1000 piezas distintas que 1000 piezas iguales? ¿Es lo posible también generalizable en la arquitectura?

A partir del análisis de los procesos de fabricación personalizada, el objetivo principal de esta tesis es entender la realidad de la personalización generalizada en la arquitectura a día de hoy.

Para alcanzar este objetivo, se han visitado una serie de industrias en Europa, pioneras en la fabricación personalizada con distintos materiales. A partir de las visitas, se ha comprobado la influencia de la singularidad en el proceso productivo y determinado el potencial y las limitaciones de cada proceso para la personalización. Finalmente, para facilitar el flujo de trabajo entre el diseño arquitectónico y la fabricación industrial, se propone una metodología de conexión en forma de protocolo.

Mediante la exploración del ámbito entre la experimentación académica y la fabricación industrial; entre el diseño digital y su materialización; y entre los arquitectos y los fabricantes, la tesis procura contribuir al conocimiento sobre la industrialización contemporánea en la arquitectura y, en última instancia, volver a conectar a los arquitectos con los procesos productivos.

ABSTRACT

In recent years, the global economic crisis together with fast urban growth in emerging countries has driven the mass production of construction goods at low cost. However, rising building efficiency standards and the ongoing search for singularity in architecture demand the customization of industrial production. In this context, mass customization becomes a key concept to merge economy and individuality in production.

The expansion of digital fabrication methods is encouraging customized production in architecture: on one hand, emerging fabrication labs all over the world support the exploration of geometric, technical and material boundaries; on the other hand, architectural prefabrication industries, following the lead of their homologues in the naval and aeronautical fields, are implementing more flexible processes and products.

These advances in the fabrication field give the opportunity to connect digital design and fabrication, supporting the paradigm of mass customization in architecture. To verify this hypothesis, the following questions arise: Is the fabrication of 1000 different pieces as easy as of 1000 identical pieces? Is it mass customization a fact in the field of architecture?

Through the analysis of custom production processes, the main objective in the thesis is to understand the reality of mass customization in architecture today. To achieve this objective, a series of field trips were made across Europe to visit state of the art custom fabrication industries in different materials. These visits were basic to understand the influence of design singularity in production processes, as well as to determine the potential and limitations of each fabrication process for customization. Finally, a connection protocol is proposed to smooth the workflow between architectural design and industrial production.

By exploring the link between academic experimentation and industrial fabrication; between digital design and its materialization; and between architects and fabricators, this thesis aims at contributing to contemporary knowledge on industrial fabrication in architecture, and ultimately, at reconnecting architects with building production processes.

1 INTRODUCCIÓN

"(...) La arquitectura depende de su tiempo.

Es la cristalización de su estructura interna, el lento despliegue de su forma.

Ésta es la razón por la que la tecnología y la arquitectura están tan estrechamente relacionadas. Nuestra verdadera esperanza es que crezcan juntas, que algún día una sea la expresión de la otra.

Sólo entonces tendremos una arquitectura digna de su nombre; una arquitectura como un símbolo verdadero de nuestro tiempo".¹

1.1 LA ERA INDUSTRIAL

1.2 LA ERA DIGITAL

1.3 PERSONALIZACIÓN EN MASA

1.4 HIPÓTESIS

1.4.1 INTORDUCCIÓN

1.4.2 HIPÓTESIS GENERAL

1.5 OBJETIVO

1.5.1 OBJETIVO PRINCIPAL

1.5.2 OBJETIVOS PARCIALES

¹"(...) Architecture depends upon its time. It is the crystallization of its inner structure, the slow unfolding of its form. That is the reason why technology and architecture are so closely related. Our real hope is that they will grow together, that someday the one will be the expression of the other. Only then will we have an architecture worthy of its name: architecture as a true symbol of our time". (Mies van der Rohe, 1953). Traducido en *Conversaciones Con Mies van der Rohe: Certezas Americanas* (Barcelona, Spain: Gustavo Gili, 2006), p. 6-7.

1.1 LA ERA INDUSTRIAL

DE LA PRODUCCIÓN ARTESANAL A LA PRODUCCIÓN EN MASA

El siglo XX marca la evolución en los métodos de producción en la arquitectura. Históricamente, la construcción arquitectónica se basaba en la producción artesanal: los artesanos fabricaban cada pieza de forma individualizada, y los arquitectos actuaban como maestros de obra, involucrados en la coordinación del proceso completo, desde el diseño a la fabricación y construcción de la obra.

La revolución industrial iniciada en Inglaterra en el siglo XIX introduce en la construcción nuevos materiales y métodos de fabricación, y con ello nuevos conceptos, como la eficiencia de plazos y costes, la producción en masa y la seriación. La producción pasa de ser manual y artesanal, coordinada por un maestro constructor, a ser industrial, repetitiva y controlada por procesos ingenieriles; la arquitectura pasa de ser artesanía a ser producto.

Con los avances vertiginosos de la revolución industrial, nace el sueño del arquitecto moderno: una arquitectura producida por máquinas para el consumo de las masas. Le Corbusier, máximo exponente de esta generación, halagaba la arquitectura cuyo estilo fuera el resultante de las leyes económicas de la producción (Larson, 2013).

Los principios del movimiento moderno y de la producción industrial en masa han estado vigentes hasta nuestros días, basando la producción en las leyes de eficiencia económica, con las que la producción artesanal, pausada e individualizada, no puede ser competitiva.

La producción en masa ha sido clave en momentos en que ha sido necesario un desarrollo rápido y económico, como los periodos de post-guerra o recientemente, el desarrollo urbano en países emergentes. Por otro lado, también ha contribuido a los extensos paisajes urbanos llenos de monotonía, donde la seriación prima sobre la individualidad, independientemente del contexto geográfico, socioeconómico, y climático. En este contexto, el rol del arquitecto se redefine, quedando relegado a un diseñador ajeno a la producción del edificio.

1.2 LA ERA DIGITAL

DE LA PRODUCCIÓN EN MASA A LA PERSONALIZACIÓN EN MASA

Tras la revolución industrial y de la era de la globalización, el final del siglo XX y principios del XXI están marcados por la revolución digital. La invención del ordenador a mediados de los años 40 se aplicó en un inicio con fines científicos y militares, y no fue hasta los años 80 cuando se empezó a utilizar el ordenador personal y en el ámbito de la arquitectura (Dunn, 2012). Desde entonces, se ha vivido una transformación radical en la práctica de la arquitectura, afectando al modo en que se conciben, se diseñan y se producen los edificios.

En un principio, las herramientas digitales se introdujeron en este ámbito a nivel representativo: la pantalla sustituye al a mesa de dibujo para representar los edificios en dos dimensiones (2D). Es con la aparición de modelos digitales en tres dimensiones (3D) y de los modelos BIM² en los años 90, cuando se desarrolla un nuevo lenguaje y una nueva manera de diseñar, a partir de objetos tridimensionales complejos. Los programas de dibujo 3D facilitan la complejidad en el diseño arquitectónico, que en muchos casos escapa del entendimiento de sus creadores y a la posibilidad de construcción.

Por otro lado, la materialización de estas nuevas geometrías demanda una fabricación personalizada que la construcción industrializada, fuertemente estandarizada, no está en medida de realizar. Sin embargo existen otros sectores donde tradicionalmente se fabrican piezas curvilíneas y singulares en la fabricación de barcos, coches de carreras o aviones. Los primeros edificios prefabricados con geometrías complejas tienen que tomar prestados los procesos constructivos de las industrias aeroespacial, naval y automovilística, las cuales utilizan nuevos materiales, técnicas de fabricación y programas informáticos, resultando en procesos mucho más flexibles.

Paralelamente, en las últimas décadas se han introducido en el campo de la arquitectura los métodos de fabricación digital; el desarrollo de estas técnicas de no sólo permite llegar cada vez más lejos en la fabricación de componentes singulares, sino que da la oportunidad para recuperar la fabricación artesanal que se ha perdido con la producción industrial en masa.

Una vez que las herramientas digitales participan en todo el proceso arquitectónico, desde la fase de diseño (CAD³ o *diseño asistido por*

²BIM: acrónimo en inglés de *Building Information Modeling*, definición en el apartado 3.3.1

³CAD: acrónimo del término en inglés *Computer Aided Design* (*diseño asistido por ordenador*)

ordenador), a la fabricación (CAM⁴ o fabricación asistida por ordenador), se pretende establecer una relación directa entre lo que se puede diseñar y lo que es posible construir; y así evolucionar desde la producción industrial en masa a la personalización en masa.

⁴CAD: acrónimo del término en inglés *Computer Aided Manufacturing* (fabricación asistida por ordenador).

1.3 PERSONALIZACIÓN EN MASA

En las últimas décadas, ciudades enteras se han desarrollado de forma vertiginosa en países emergentes, basadas en arquitecturas de bajo coste producidas en masa. Por otro lado, la reciente crisis global económica ha demandado a la industria de la construcción la producción de componentes a bajo coste.

En el momento actual, sin embargo, es necesario buscar alternativas de alta eficiencia adaptadas a cada lugar y cada clima, y la necesidad de individualidad y diferenciación son clave en el diseño arquitectónico.

Estos dos factores ponen en valor un nuevo concepto: el de la *personalización generalizada o personalización en masa*⁵, que se presenta como la oportunidad para aunar economía e individualidad en la industrialización arquitectónica. Aunque los medios de producción digitales promueven la producción individualizada, la personalización a bajo coste es todavía un desafío en el campo de la arquitectura.

Más allá de la producción de geometrías singulares, con la personalización en masa, la producción industrial podría responder a las demandas contemporáneas en el diseño arquitectónico: fabricación de piezas individuales que suplan necesidades particulares; edificios más eficientes, adaptados a un lugar y a un usuario concreto; la posibilidad de experimentar con distintos materiales y de recuperar procesos artesanales de construcción, etc.; y esto, al alcance de cualquier proyecto. Se presenta la oportunidad para que los arquitectos, armados con conocimiento sobre fabricación contemporánea, reconecten con los procesos productivos y recuperen el rol de verdaderos maestros de obra.

Mediante la personalización en masa en la arquitectura, el objetivo en el siglo XXI es devolver a los eficientes métodos industriales la producción artesanal individualizada, y así brindar la oportunidad de recuperar la individualidad en la arquitectura industrializada.

⁵ El término *personalización en masa* deriva del concepto de *la producción en masa*. Mientras este último concepto se basa en la producción eficiente de grandes volúmenes de productos estandarizados, la personalización en masa propone la personalización en masa propone la producción eficiente de grandes volúmenes de productos personalizados. El término se describirá en detalle el capítulo 3.

“(…) Las ciudades importan! En el futuro supondrán aproximadamente el 90 por ciento del crecimiento demográfico, el 80 por ciento de la creación de riqueza, y el 60 por ciento del consumo energético total. Desafortunadamente, la mayoría de ciudades están constituidas por “súper bloques” lúgubres y dispersos, conectados por autopistas congestionadas y polucionadas. Creemos firmemente que necesitamos reinventar nuestro pensamiento sobre las ciudades y aplicar el “pensamiento de personalización en masa” a este campo”.⁶

⁶ “(…) Cities matter! They will account for approximately 90 per cent of global population growth, 80 percent of wealth creation, and 60 per cent of total energy consumption. Unfortunately, most cities are made up of grim energy-intensive, sprawling and isolated “super blocks” connected by congested and polluted highways. We strongly believe that we need to reinvent our thinking about cities by applying “mass customisation thinking” to this domain”. Traducción de la autora. (Larson 2013, p.xix).

1.4 HIPÓTESIS

1.4.1 INTRODUCCIÓN

La utilización de herramientas digitales para el diseño y la fabricación digital ha generado el paradigma de la personalización generalizada o personalización en masa, que se basa en la siguiente afirmación: *es igual de fácil y barato para una fresadora CNC producir 1000 piezas únicas que 1000 piezas iguales*⁷.

El paradigma de la personalización en masa se basa en la conexión automática entre diseño y fabricación digital, y en la fabricación automatizada.

Esta tesis parte del cuestionamiento de este paradigma.

Sin embargo, a pesar de los avances en la investigación y en las técnicas de fabricación digital, a día de hoy estamos lejos de ver un proceso fluido entre diseño digital y fabricación personalizada de forma generalizada.

Hasta ahora, gran parte de la investigación académica ha buscado llevar al extremo la capacidad de las herramientas de fabricación digital, sin por ello generalizar la personalización en la fabricación. Por otro lado, el grueso de la industria del prefabricado arquitectónico ofrece productos estandarizados, y la personalización de productos implica incrementos importantes en los precios, que son asumibles sólo en proyectos singulares.

En el proceso de diseño a fabricación, el desconocimiento por parte del diseñador a menudo se traduce en la necesidad de apoyo técnico por parte del fabricante o de consultorías especializadas, incrementando los costes y plazos totales del proyecto.

Se identifican, por tanto:

- Una discordancia entre el potencial de las técnicas contemporáneas de fabricación y la producción comercial generalizada.

⁷ Esta afirmación se ha extraído de la cita: "(...) es igual de fácil y barato para una fresadora CNC producir 1000 piezas únicas que 1000 piezas iguales"

En su versión original: "(...) It is just as easy and cost-effective for a CNC milling machine to produce 1000 unique objects as to produce 1000 identical ones". Traducción de la autora. (Kolarevic, 2005, p.52).

- Un distanciamiento entre los arquitectos y la industria, marcado por el desconocimiento por parte de los diseñadores de las posibilidades reales de industrialización en los procesos existentes. Esta barrera de entendimiento dificulta, ralentiza y encarece la conexión entre diseño y de fabricación, y a menudo el resultado son proyectos que no corresponden con el diseño inicial.

A partir de estos problemas, se identifica la oportunidad de aclarar la discordancia entre la industrialización generalizada y el potencial real de personalización de la industria.

1.4.2 HIPÓTESIS GENERAL

La personalización generalizada en la arquitectura todavía no es un hecho.

A través del análisis de los procesos de fabricación personalizados, es posible determinar criterios para facilitar el proceso de diseño a fabricación, y por tanto favorecer la personalización generalizada en la arquitectura.

Esta tesis se plantea como una investigación sobre las posibilidades de personalización que la industria es capaz no sólo de realizar, sino de normalizar, para que la fabricación personalizada en el sector de la construcción sea generalizada.

Para ello, se realiza un análisis de la personalización en masa en el sector de la arquitectura, en base a dos factores:

- grado de personalización: ¿qué es posible fabricar?
- grado de normalización en la fabricación, midiendo la eficiencia del proceso: ¿qué es posible generalizar?

1.5 OBJETIVO

1.5.1 OBJETIVO PRINCIPAL

A través de la catalogación y del análisis de los procesos de fabricación personalizada en la arquitectura, el objetivo principal de la tesis es descubrir la realidad de la personalización en masa en la arquitectura, y proponer medidas para favorecerla.

Para ello, se definen dos objetivos generales:

1. Análisis de procesos de fabricación personalizada en la arquitectura.

Estado del arte sobre la personalización en masa a día de hoy: evaluación de la viabilidad de la personalización en masa para cada proceso de fabricación.
2. Propuesta de base de protocolo de conexión entre arquitecto e industria.

Definición de un protocolo simplificado: una metodología que apoye la fase de diseño y que facilite la conexión entre el diseño y la fabricación personalizada.

1.5.2 OBJETIVOS PARCIALES

Se establecen los siguientes objetivos parciales:

1. Definición de la personalización generalizada en la arquitectura.
2. Estado del arte de la industria del prefabricado arquitectónico personalizado:
 - a. Selección de los principales procesos de fabricación personalizada en el campo de la arquitectura.
 - b. Selección de fábricas representativas para cada proceso.
 - c. Análisis de los procesos de fabricación personalizados, evaluando las posibilidades geométricas y materiales, la eficiencia y flexibilidad del proceso, y la conexión entre las fases de diseño y fabricación.

- d. Análisis del proceso completo de producción de componentes personalizados, desde el diseño a la construcción, incluso la fabricación, el transporte y el montaje.
3. Extraer conclusiones:
- a. Posibilidades de personalización mediante el proceso de fabricación en cuestión: ¿qué es posible fabricar?
 - b. Posibilidades de normalización de la personalización de cada proceso: ¿qué es posible generalizar?
 - c. Identificación de criterios para facilitar la personalización generalizada.
 - d. Evaluación del potencial para la personalización generalizada para cada proceso.
 - e. Definición de una tabla comparativa de los procesos de fabricación.
 - f. Identificación de los retos a la personalización generalizada, y propuesta de posibles soluciones.
 - g. Definición de la base de protocolo de conexión entre arquitecto e industria:
 - i. Definición de la metodología para la conexión entre diseño (arquitecto) y fabricación (industria).
 - ii. Definición de la secuencia de etapas del protocolo.
 - iii. Ilustración del protocolo mediante análisis de estudio de casos.

El objetivo último de la tesis es crear una base para el conocimiento sobre la industrialización contemporánea en la arquitectura e impulsar la personalización generalizada en la arquitectura.

2 INDUSTRIALIZACIÓN EN ARQUITECTURA

"La era de la Información, al igual que la era industrial antes de ella, es un reto no sólo en la manera en que diseñamos edificios, sino también en cómo los fabricamos y los construimos..."

El potencial generativo y creativo de los medios digitales, junto con los avances en fabricación conseguidos ya en la industria automotora, aeroespacial y naval, está descubriendo nuevas dimensiones en el diseño arquitectónico"⁸.

- 2.1 LA PRIMERA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL
- 2.2 LA SEGUNDA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL
- 2.3 LA ERA DIGITAL
- 2.4 LA "TERCERA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL"

⁸"The Information Age, just like the Industrial Age before, is challenging not only how we design buildings, but also how we manufacture and construct them. (...). The generative and creative potential of digital media, together with manufacturing advances already attained in automotive, aerospace and shipbuilding industries, is opening up new dimensions in architectural design". Traducción de la autora. (Kolarevic, 2005, p.3).

Fundamentalmente, la industrialización aplicada al ámbito de la arquitectura consiste en el desplazamiento de una parte importante del proceso constructivo desde la obra a la fábrica. Pequeños componentes fácilmente manejables en la obra, como son los ladrillos, se sustituyen por componentes más grandes y complejos, que se ensamblan en el lugar de construcción de manera rápida y sencilla. Estos componentes pueden ser desde elementos estructurales, hasta superficies como paredes o suelos, o incluso elementos volumétricos como cocinas, baños o plantas enteras.

2.1 LA PRIMERA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

PRODUCCIÓN EN MASA Y FABRICACIÓN ESTANDARIZADA

La primera revolución industrial, iniciada en Gran Bretaña a finales del siglo XVIII con la mecanización de la industria textil, supuso el paso desde una economía rural y comercial a una economía de carácter urbano, mecanizada e industrializada.

Desde ese momento, los métodos industriales de producción fueron evolucionando poco a poco, y a principios del siglo XX, Henry Ford desarrolló la producción de automóviles en cadena, que dio lugar a la producción en masa. Los beneficios de la primera revolución industrial fueron la reducción de precios y el aumento de calidad de los productos, y como consecuencia, la democratización, la estandarización y la homogeneización de productos (Naboni y Paoletti 2015).

Tradicionalmente, la industrialización aplicada a la arquitectura se basa en la producción en masa. Según José Ramón Vilana Arto (2006), ésta se caracteriza por " (...) la disminución de los costes mediante la mecanización de procesos y producción de altos volúmenes de producción que permitan grandes economías de escala" (p.4). Para producir de forma rápida un determinado producto en grandes cantidades, es necesaria la planificación de procesos y de productos, así como el diseño de maquinaria específica. Los productos estandarizados se exponen en catálogos comerciales, los cuales permiten controlar, organizar y seleccionar los productos normalizados.

Un ejemplo de producción en masa en la arquitectura es la fábrica de viviendas prefabricadas *Sekisui*, en Japón, en la cual se fabrican 1000 viviendas al mes⁹. Los paneles de fachada de las viviendas contienen una

fig. 2-1:
Producción en masa: línea de montaje de Ford.

fig. 2-2:
Fabricación en línea de viviendas en la fábrica de Misawa.

⁹Datos recopilados por la autora en un viaje de investigación realizado a fábricas de industrialización de viviendas en Japón en febrero 2010.

estructura de perfiles metálicos, que se fabrican en largas líneas de producción donde se les aplican hasta 13 tratamientos, uno detrás de otro, para que adquieran la resistencia y dureza necesarias. Las estructuras se sueldan de forma automática y repetitiva por cuatro robots.

fig. 2-3:
Imagen de la publicidad para la
unidad prefabricada de Sekisui,
1971.

fig. 2-4:
Imagen de la publicidad para la
unidad prefabricada de Sekisui,
2016.

fig. 2-5:
Montaje de una vivienda
prefabricada por Sekisui.

fig. 2-6:
Ejemplo de vivienda prefabricada
por Sekisui, 2010.

La repetición en la fabricación facilita la producción de grandes volúmenes en poco tiempo, dado que sólo es necesario diseñar el proceso, fabricar la línea de trabajo, y programar la maquinaria una sola vez para un mismo proceso. Por otro lado, la fabricación estandarizada minimiza la necesidad de control de calidad; cualquier cambio en el diseño del producto afectaría al orden de procesos, a la colocación y la programación de la maquinaria, y la realización de pruebas se multiplicaría. En el caso de *Sekisui*, la personalización se ve frenada por problemas burocráticos, dado que los módulos deben ser aprobados por el gobierno y resulta difícil conseguir la aprobación de variantes. Los productos son diseñados, producidos y embalados en taller, tras lo cual se transportan a la obra donde podrán ser montados rápidamente. La fabricación de una vivienda en *Sekisui* dura un mes y medio, y su montaje, dos semanas.

Al realizarse en ambientes cerrados y controlados, las principales ventajas de los procesos industriales son la racionalización y el control de los procesos, por lo que se optimizan los plazos y costes, así como el consumo energético, el volumen de residuos y la seguridad en el trabajo.

Desde el punto de vista del diseño, los productos normalizados tienen la ventaja de ser compatibles y fácilmente intercambiables, lo cual facilita los diseños montables y desmontables, en forma de "kits". Como ocurre en otros sectores, como el automovilístico, el control del producto en fábrica le otorga mayor calidad. Por otro lado, la "arquitectura de catálogo", que vivió su apogeo en las décadas de los 60 a los 90, supone una arquitectura "anónima", ya que lo que se comercializa es el producto y la empresa que lo produce, sin mención del autor del diseño (Casado Galván, 2009). A menudo la creatividad del arquitecto se limita a la elección de productos entre catálogos comerciales, que son diseñados por otros creadores, los ingenieros de productos (Kieran y Timberlake, 2004).

El diseño arquitectónico queda limitado por la elección y combinación de productos estandarizados, producidos por unos pocos fabricantes y utilizados en multitud de lugares, resultando en paisajes monótonos y descontextualizados. Como dice Francesc Muñoz (2008), "(...) Si nos fijamos en el paisaje urbano, encontramos como ciudades distintas –con historia y cultura diversas, de población y extensión nada comparables, y localizadas en lugares muy diferentes del planeta–, experimentan transformaciones muy similares y acaban produciendo un tipo de paisaje estandarizado y común. La misma impresión nos produce visitar centros históricos o frentes marítimos en cualquier ciudad que conducir por cualquier autopista a través de regiones metropolitanas diferentes: un paisaje repetido y reincidente aparece ante nuestros ojos que van hilando retales de territorio cortados por el mismo patrón en un mismo relato visual" (p.4).

Llegados a este punto, resulta fundamental la flexibilización de la producción industrial para recuperar la singularidad en el diseño arquitectónico.

2.2 LA SEGUNDA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

LA FABRICACIÓN AUTOMATIZADA

Durante el siglo XX, los procesos industriales evolucionaron desde procesos mecánicos, donde el grueso de las operaciones las hacían operarios, a procesos automatizados, donde las operaciones se realizan de forma automática por máquinas en base a secuencias programadas, reduciendo la necesidad de operarios. Los primeros procesos automatizados se realizaron con máquinas tejedoras.

En la industria de la construcción, la automatización se introdujo tímidamente a finales del siglo XX, como transferencia desde otras industrias, sobretudo la industria automovilística. El ejemplo más literal es la fábrica de viviendas prefabricadas *Toyota homes*, creada en 1975 como filial de la automovilística *Toyota*, donde se introdujeron los mismos métodos de fabricación utilizados en las fábricas de automóviles (Piroozfar & Piller, 2013).

A día de hoy, muchas fábricas de viviendas han incorporado estos mismos procesos. En la fábrica de *Panahome*, competencia de *Toyota homes*, se producen 30 viviendas al día mediante procesos automatizados. En la línea de producción, los robots realizan soldaduras en la estructura y perforaciones en los paneles de fachada, los cuales recorren la fábrica por líneas de producción automáticas. Cada vivienda tarda 2 meses y medio desde su fabricación hasta el montaje, y cada componente de un pedido particular está identificado mediante un código de barras.¹⁰

Los robots intervienen sobretudo en la realización de tareas repetitivas, que deben ser realizados de forma rápida y exacta. En caso de que exista singularidad en el producto, es necesaria la intervención de operarios. En la fábrica de *Panahome*, éstos participan en el desarrollo de procesos complejos o que demandan la personalización de elementos, como la colocación de ventanas de distintos tamaños; además de en la supervisión del proceso y el control de calidad.

fig. 2-7:
Línea de fabricación automatizada de vehículos en la fábrica de Toyota.

fig. 2-8:
Planta de fabricación automatizada en la fábrica de Sekisui.

fig. 2-9:
Fabricación en línea de viviendas en Sekisui.

¹⁰Datos recopilados por la autora en un viaje de investigación realizado a fábricas de industrialización de viviendas en Japón, febrero 2010.

2.3 LA ERA DIGITAL

Las tecnologías digitales, hoy tan presentes en nuestro día a día, comenzaron a desarrollarse a finales del siglo XIX, a resultas de los desarrollos promovidos por la revolución industrial, como solución para gestionar de forma eficiente grandes cantidades de datos (Dunn, 2012). De las primeras tecnologías digitales fueron las tabuladoras eléctricas, que utilizaban tarjetas perforadas para controlar máquinas de tejer o para medir datos censales.

Tras la segunda guerra mundial se inventó la computadora, una máquina capaz de gestionar enormes cantidades de información utilizando la lógica matemática. En un principio, esta tecnología se desarrolló con fines militares, y poco a poco se aplicó a otros campos, llegando a introducirse en el ámbito doméstico en los años 80 (Dunn, 2012).

La *fabricación digital* es el método que utiliza datos digitales para dirigir un proceso de fabricación. Estos procesos, denominados de control numérico o CAM, se realizan por máquinas controladas por ordenadores para producir, en este caso, partes de edificios (Dunn, 2012).

Las primeras investigaciones sobre control numérico se realizaron a finales de los años 40 por el ingeniero John Parsons y por Frank Stulen, quienes diseñaron la primera fresadora controlada por tarjetas perforadas; esta máquina utilizaba coordenadas numéricas para mover la mesa de trabajo de la fresadora, y así producir de forma automática y precisa piezas complejas para aeronaves. El proyecto fue subcontratado por el *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), donde a partir del mismo principio, fabricaron en 1952 una fresadora vertical de tres ejes (Groover, 2007).

Como menciona Kalpakjian (2014), la revolución digital cualitativa empezó a cambiar el mundo de la producción en los años 60 y 70, y los ordenadores programables se extendieron en los años 80 (p.6).

Se considera que la era de fabricación digital empezó alrededor de 1990, cuando se produjo el cambio fundamental en la fabricación industrial: a partir de este momento, las operaciones de fabricación se realizan con potentes computadoras y programas, y hoy en día, la mayoría de empresas de diseño y manufactura han incorporado métodos digitales en su producción (Kalpakjian et al., 2014). Las universidades y centros de investigación han tenido un papel fundamental en el desarrollo de las técnicas de fabricación digital, empezando por el MIT, que desde la fabricación de la primera fresadora por control numérico en 1952, ha sido el epicentro de investigación en este campo.

Las máquinas de control numérico se utilizan a menudo con fines experimentales, por ejemplo en la fabricación de prototipos previos a la fabricación industrial de productos. En las últimas décadas, se han desarrollado incansablemente una gran variedad de máquinas controladas por ordenador capaces de realizar multitud de operaciones, que incluso se montan en plataformas móviles con el objetivo de expandir, además de sus posibilidades mecánicas, sus posibilidades físicas.

En los procesos industriales, el uso de computadoras es fundamental: por un lado, para programar las máquinas de control numérico en las operaciones de fabricación, ensamblaje y traslado de materiales; y por otro, para asegurar la exactitud y el control de calidad durante todo el proceso (Kalpakjian et al, 2014).

A pesar de su utilización desde los años 50 en los sectores aeronáutico, automovilístico y de bienes de consumo, hasta recientemente las herramientas de fabricación digital no se habían extendido en el ámbito de la construcción industrializada (Dunn, 2012). Las herramientas de fabricación, como cortadoras laser, fresadoras e impresoras 3d, se han extendido por escuelas de arquitectura y diseño por todo el mundo, siendo rápidas y fáciles de utilizar para fabricar maquetas y prototipos.

El siguiente avance, que está ocurriendo en la actualidad, es la introducción de estas máquinas en el ámbito doméstico, siendo posible diseñar, experimentar y fabricar en nuestra propia casa.

2.4 LA “TERCERA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL”

"La primera y segunda revoluciones industriales supusieron la democratización de productos, mientras que hoy en día lo que está ocurriendo es más bien la democratización de la producción"¹¹.

En el año 2000 se inventa el concepto de *Fablab*¹² en el *Centro de Bits y Átomos* (*Center for Bits and Atoms*, CBA) del MIT, dirigido por el profesor Neil Gershenfeld. Un *Fablab* es un laboratorio de fabricación digital de uso personal, compuesto por una serie de máquinas de fabricación digital de pequeño tamaño, que se ponen a disposición de cualquier usuario para la fabricación de todo tipo de objetos. Los *Fablabs* comenzaron a surgir en distintos países, y el CBA decide donar laboratorios en lugares remotos del planeta para facilitar la fabricación in situ de objetos que respondan a las necesidades locales. Desde entonces, la red de *Fablabs* se ha convertido en una red global y colaborativa extendida por todo el mundo, y en el año 2016, existían unos 1000 laboratorios en 78 países (fabfoundation, 2016).

El funcionamiento de los *Fablabs* parte del principio de "código abierto"¹³, basado en la colaboración abierta y el intercambio gratuito de ideas y de datos. Además, se promueve la fabricación personalizada a partir de la creatividad y las necesidades individuales, dando la posibilidad de materializar las ideas casi de forma inmediata.

La "tercera revolución industrial", llamada así por Gershenfeld, se basa en los dos siguientes principios: por un lado, la producción pasa de realizarse en fábricas a hacerse en cualquier sitio; por otro, se pasa de cantidades industriales de productos a pequeñas cantidades o unidades. Estos dos sencillos principios permiten subsanar necesidades básicas en cualquier punto del planeta, aunque éste sea inaccesible, y promover la creatividad y la iniciativa individual, dado que cada individuo se apodera de las técnicas de producción para resolver sus problemas concretos (Gershenfeld, 2007).

Las consecuencias globales y económicas de esta revolución pueden llegar a ser enormes, y afectar tanto a la producción industrial como a los servicios anexos, como el transporte o la logística.

fig. 2-10:
Máquinas de fabricación digital en un *Fablab*.

fig. 2-11:
Fabricación de viviendas según el sistema *Wikihouse*: fabricación CNC por un productor local, montaje por el usuario.

¹¹"The first and second industrial revolutions (...) were indeed a democratization of products, while nowadays what is happening is rather the democratization of production". Traducción de la autora. (Naboni y Paoletti 2015 p.15).

¹²El término *Fablab* es el acrónimo del inglés *Fabrication Laboratory*. Hoy en día, los *Fablabs* incluyen una cortadora laser, una cortadora de carteles de cobre, una fresadora NC de alta resolución, un router para madera, y una serie de componentes electrónicos y herramientas de programación (fabfoundation).

¹³Traducción del término inglés *open source*, utilizado en origen para denominar el software desarrollado libremente.

En el ámbito de la arquitectura, la fabricación digital a pequeña escala se desarrolla en varios frentes. Por un lado, la corriente "hazlo tú mismo"¹⁴ promueve el desarrollo y fabricación de proyectos por cada individuo; un ejemplo es la plataforma de "código abierto" *Wikihouse*, que permite a cualquier persona compartir diseños para fabricarlos con máquinas de control numérico (Piroozfar et al., 2013). Por otro lado, en el ámbito universitario, la exploración sobre fabricación digital abarca la experimentación con materiales y métodos de fabricación, la colaboración con industrias, y recientemente, el salto de escala a la producción industrial.

Tras los avances tecnológicos desarrollados en la primera, segunda y tercera revolución industrial, el ámbito de la producción vive un momento de verdadera transformación: por una parte, la fabricación a escala industrial se flexibiliza a marchas forzadas; mientras la fabricación a pequeña escala, doméstica y universitaria, vive una verdadera revolución. Los individuos fabrican sus propios proyectos a pequeña escala; grupos de investigación pretenden crecer para convertirse en industria; mientras las industrias tratan de producir de forma individualizada para responder a una demanda variable y personal.

Los arquitectos, quienes habían quedado relegados a un rol de diseño de envolventes con catálogos comerciales, tienen ahora la oportunidad de adaptarse a esta nueva realidad tecnológica y de recuperar su papel en el control integral de obra, a través de la coordinación de la información. Para ello, éstos deben conocer en profundidad los sistemas constructivos y de producción, e involucrarse en el proceso completo de diseño a construcción.

¹⁴La filosofía "hazlo tú mismo" (traducción del inglés "do it yourself") se basa en la práctica de fabricación o reparación de cosas por uno mismo, sin necesidad de recurrir a ayuda profesional; con esta práctica se consigue al mismo tiempo aprender y ahorrar dinero. Este movimiento, inicialmente aplicado a la reparación y realización de pequeños objetos y tareas, en este caso se refiere a la construcción de viviendas. Esta, por otro lado, ha sido una práctica común en Estados Unidos.

3 LA PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA EN LA ARQUITECTURA

"Los flujos de trabajo y los medios de producción digitales tienen el potencial de cambiar el modo en que se concibe la arquitectura. El paradigma de la personalización en masa es interesante para la arquitectura, dado que ésta siempre ha versado sobre la singularidad. En la era industrial, la singularidad se convirtió en un lujo, mientras que en la era de la información, está siendo de nuevo asequible.¹⁵".

- 3.1 LA PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA EN LA INDUSTRIA**
 - 3.1.1 CONDICIONES PARA LA PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA
 - 3.1.2 TIPOS DE PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA
- 3.2 PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA EN LA ARQUITECTURA**
 - 3.2.1 INTRODUCCIÓN
 - 3.2.2 CARACTERÍSTICAS
- 3.3 LA PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA MEDIANTE FABRICACIÓN DIGITAL**
 - 3.3.1 EL DISEÑO DIGITAL
 - 3.3.2 TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA DESDE OTRAS INDUSTRIAS
 - 3.3.3 LA FABRICACIÓN DIGITAL
 - 3.3.4 PROCESO DE DISEÑO A FABRICACIÓN DIGITAL
 - 3.3.5 PARADIGMA DE LA PERSONALIZACIÓN EN MASA EN ARQUITECTURA

¹⁵Digital workflows and digital means of production have the potential to change the way architecture is conceived. The paradigm of mass customization is interesting for architecture as architecture has always been about uniqueness. In industrial times uniqueness became a luxury, in the information age it's becoming affordable again". Traducción de la autora. (Leonhard y Heimo, 2004).

3.1 LA PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA EN LA INDUSTRIA

Las mejoras introducidas en los procesos de producción desde los años 70, como las herramientas de fabricación digital, la fabricación robotizada o las tecnologías de la información han mejorado la eficiencia y la flexibilidad de los procesos industriales de fabricación. Con la digitalización de la economía y de los medios de producción, se supera la necesidad de seriación industrial basada en la optimización de medios de producción repetitivos, y se descubre el valor añadido de una oferta personalizada a cada cliente. Las tecnologías de fabricación flexible dan la posibilidad de conseguir el equilibrio entre individualidad y eficiencia (Piroozfar y Piller 2013).

Desde los años 80, empresas como *Motorola* lideran el desarrollo de sistemas de producción flexible y participativa (Vilana Arto, 2006). La producción ya no tiene porqué realizarse en grandes volúmenes de objetos idénticos, y se puede responder de forma personalizada a clientes cada vez más exigentes.

En la década de los 90, surge el concepto de *personalización en masa* o *personalización generalizada*¹⁶: "A día de hoy, puedo definir la personalización en masa como la producción eficiente, a bajo coste y de grandes volúmenes de objetos personalizados de forma individual."¹⁷(Pine, 1993). La personalización en masa se basa en la combinación de una producción eficiente de grandes volúmenes con una personalización que responda a las necesidades de cada cliente (Vilana Arto, 2006). En estos procesos, la participación del usuario es fundamental.

En los últimos años, empresas como Dell, HP, Ford o *Toyota* han implementado la personalización en masa, y a resultados brindan al usuario la posibilidad de elegir o incluso de diseñar su producto a un coste competitivo. Existen también publicaciones y estudios académicos dedicados a la personalización en masa, de los que cabe destacar el grupo de investigación *Smart Customization Group*, el grupo colaborativo entre las Universidad Técnica de Aquisgrán(*RWTH Aachen University*) y el MIT, dirigido por el profesor Frank Piller, que reúne y estudia casos de personalización generalizada en la industria.

Ejemplos de personalización en masa en la industria:

fig. 3-1
Configurador para personalizar las zapatillas Adidas online, modelo Gazelle.

fig. 3-2
Configurador online del modelo de coche Opel Adam.

fig. 3-3
Configurador para personalizar las botellas de Coca-Cola.

¹⁶ La *personalización en masa* o *personalización generalizada* es traducción del término *mass customization*, introducido por Stan Davis en su libro *Future Perfect* (Davis, 1987) y desarrollado posteriormente por Joseph Pine (Pine, 1993).

¹⁷ "Today I define Mass Customization as the low-cost, high-volume, efficient production of individually customized offerings". Traducción de la autora, B. Joseph Pine (1993). Recuperado en <http://frankpiller.com>

3.1.1 CONDICIONES PARA LA PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA

Según Frank Piller, para que se dé la personalización en masa en una industria, son necesarias varias condiciones (Piller, 2016):

1. **Definición de posibilidades¹⁸**: cada industria debe identificar las necesidades de sus clientes, así como las particularidades del producto con sus posibles variaciones.
2. **Diseño robusto de procesos¹⁹**: el fabricante debe comprobar que los requisitos del cliente no alteran significativamente las operaciones de producción. En otras palabras, los productos personalizados deben producirse con una eficiencia cercana a la producción en masa.
3. **Exploración de opciones²⁰**: el fabricante debe dar un apoyo al cliente, para que éste identifique y elija su propio producto, minimizando la complejidad en la exploración y la elección.

3.1.2 TIPOS DE PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA

David Anderson (2008), experto en el tema del *diseño para fabricación*, definen distintos tipos de personalización en masa (cap.5):

1. **Personalización modular**: se basa en combinaciones de elementos estándar, como en el caso de la personalización de coches mediante la combinación de módulos estándar (motor, sistema de audio, asientos, etc.).
2. **Personalización ajustable**: el producto es estándar, pero del usuario tiene la posibilidad de adaptarlo (por ejemplo, un asiento cuya altura es ajustable).
3. **Personalización cosmética**: se realizan cambios en la estética del producto, como cambio de color o el tratamiento superficial en una pieza estándar (Gilmore y Pine, 1997), por ejemplo, las latas de Coca-cola con distintos nombres impresos.
4. **Personalización dimensional**: el producto se fabrica a medida, o se personalizan aspectos permanentes como el tamaño.

¹⁸ "Solution Space Development". Traducción de la autora. (Piller, 2016).

¹⁹ "Robust ProcessDesign". Traducción de la autora. (Piller, 2016).

²⁰ "Choice Navigation" Traducción de la autora. (Piller, 2016).

Para conseguir un compromiso entre la personalización del producto y la eficiencia del proceso industrial, es frecuente que la personalización de productos industriales consista en la combinación de varios componentes estandarizados (personalización modular). Sin embargo, en el campo de la arquitectura, la personalización debe ir más allá de la combinación libre de elementos estándar. En este caso, con las tecnologías de fabricación personalizada existentes en la industria, el objetivo es la personalización cosmética y dimensional.

3.2 PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA EN LA ARQUITECTURA

En el campo de la arquitectura, la personalización no es nada nuevo ni propio de la era digital. De hecho, la producción de la arquitectura se ha diferenciado siempre de otros procesos industriales porque aquella consiste en la producción de un prototipo, el edificio.

En el momento actual, en que los avances tecnológicos hacen que la prefabricación industrial resulte eficiente, competitiva y de alta calidad, es necesario, además, que sea suficientemente flexible para poder materializar las infinitas posibilidades del diseño arquitectónico.

3.2.1 INTRODUCCIÓN

La personalización en masa en la industria de la construcción se introduce en Japón en los años 60 por algunos fabricantes de casas prefabricadas, como *Toyota*, *Misawa* o *Panahome* (Davis, 1987).

En estas empresas, el desarrollo del producto comienza con una sesión conjunta entre el cliente y un comercial, donde se presentan al cliente catálogos con todas las posibilidades para cada componente. El diseño final resulta de una determinada distribución y de la combinación de los componentes elegidos. A continuación, la fabricación de la vivienda se hace de forma automatizada en líneas de fabricación extremadamente eficientes, que incluyen procesos robotizados. Las piezas son cargadas en camiones en orden inverso del montaje, y el montaje de la carcasa se puede realizar en un día por siete operarios (Davis, 1987).

En la fábrica de *Panahome*, filial de Panasonic, se producen 30 viviendas al día con un coste medio final de 35.000.000 yenes²¹. Las viviendas disponen de un sistema domotizado para regular y controlar los sistemas eléctricos, de seguridad, de climatización, y los paneles solares; así como una estructura sismo resistente, que las diferencian de la mayoría de viviendas prefabricadas.

fig. 3-4:
Sistema constructivo de la cubierta en la vivienda prefabricada de Sekisui.

fig. 3-5:
Sistema constructivo de la vivienda prefabricada de Sekisui, incluso cimentación prefabricada.

fig. 3-6:
Showroom con catálogo de materiales en Panahome.

²¹El precio mencionado fue recopilado en la visita a la fábrica de *Panahome* en Japón, en febrero del 2010. La cantidad equivale a 350.000\$ o 280.000€ en el momento de publicación de la tesis, en junio del 2017.

fig. 3-7
Personalización de lucernarios
mediante el configurador online
de E-Skylight.

fig. 3-8
Fabricación de un lucernario
personalizado en la empresa
e-Skylight

fig. 3-9
Diagrama del proceso de diseño y
fabricación del proyecto
PhysicalDesign Co

En general, en estas empresas prevalece la idea de fabricación en masa y eficiencia en la producción, y la personalización se basa sobre todo en la combinación de componentes estandarizados: "cada venta es personalizada, cada compra es estandarizada". Por ejemplo, se pueden colocar ventanas en ciertas posiciones dentro de una pared, pero éstas tienen tamaños estándar. Por otro lado, desde hace unos años los fabricantes se esfuerzan en aumentar la personalización: por ejemplo, en el modelo de vivienda CASART de Panahome, se puede modificar el diseño siguiendo incrementos de 150mm.

fig. 3-10:
Esquema proceso de fabricación en cadena de las viviendas en la industria Panahome.

Un ejemplo más avanzado de personalización industrial arquitectónica es la fábrica de lucernarios E-Skylight, con sede en Estados Unidos. A través de su página web, E-Skylight ofrece a sus clientes la posibilidad de diseñar los lucernarios de forma interactiva, variando tamaños y características de los elementos del lucernario (e-skylight, s.f.).

Más allá de la arquitectura personalizada por catálogo, las herramientas de fabricación digital abren un enorme campo de posibilidades para llevar la personalización a otro nivel, y algunos proyectos exploran sus posibilidades para la personalización en masa. Por ejemplo, la empresa Physical Design Co., derivada del grupo de investigación Design Fabrication Group del MIT dirigido por el profesor Larry Sass propone, a partir de diseños individuales, la fabricación en centros locales de pequeñas casetas de madera con máquinas de control numérico, que pueden ser recibidas y montadas por el usuario. Aunque se basan en componentes de pequeño tamaño, el interés de proyectos como éste o Wikihouse está en que permiten fácilmente la personalización dimensional de componentes fabricados en industrias locales, a precios asequibles.

3.2.2 CARACTERÍSTICAS

En el sector de la arquitectura, la personalización debe ir más allá de la de otras industrias:

- en primer lugar, por la flexibilidad que ofrecen las herramientas de fabricación digital, la personalización no debe limitarse a la libre combinación de componentes estandarizados (*personalización modular*), sino que debe afectar a todos los componentes (*personalización dimensional y personalización cosmética*);
- en segundo lugar, el usuario en este caso no es un comprador directo, enfrentado a varias opciones de un producto, sino un profesional capacitado para diseñar el producto. El diseñador necesita, más que un catálogo estático de productos, conocer los límites admisibles para su diseño, y los parámetros que debe tener en cuenta para que la fabricación de su diseño sea posible.

Partiendo de esta base, en la personalización en masa en el campo de la arquitectura se identifican los siguientes requisitos:

1. **Definición de posibilidades:** al igual que en otros sectores, se deben identificar las posibilidades para un determinado producto. Dado que, en este caso, el diseño digital permite un abanico infinito de soluciones formales, más que la definición de posibles variantes del producto, se podrían definir los límites admisibles para la personalización del diseño, según los siguientes parámetros:
 - geometría
 - material
 - acabados
2. **Diseño robusto de procesos:** el fabricante debe identificar el equilibrio entre eficiencia y flexibilidad en la producción. Para ello, se tendrán en cuenta los siguientes factores:
 - eficiencia económica: ofrecer un producto personalizado con un precio lo más parecido posible a un producto estandarizado. Para que exista verdadera personalización en masa en la arquitectura, los costes deben ser sostenibles y si posible equiparables a los de la fabricación en masa;
 - eficiencia material: uso eficiente de material;
 - eficiencia de tiempo: optimizar tiempo de las operaciones;
 - eficiencia de producción: afecta a los siguientes parámetros:
 - flexibilidad de procesos y de sistemas de producción ;
 - automatización y digitalización de procesos;
 - posibilidad de fabricar grandes volúmenes: en la producción en masa, es necesaria la producción de grandes

volúmenes para que se considere un proceso eficiente²². En el ámbito de la construcción, el volumen de producción no debe corresponder necesariamente con otros sectores, ya que ni en el tipo de fábricas ni los medios de producción son los mismos. En primer lugar, hay que tener en cuenta que los métodos de fabricación digital originalmente se han utilizado para la fabricación de pequeñas cantidades o prototipos, con el objetivo de comprobar la viabilidad de un diseño, el material o el método de producción a un coste y tiempo reducidos (Kalpakjian et al., 2014). En segundo lugar, las fábricas son distintas que de las de fabricación en masa, más pequeñas y especializadas en encargos singulares; se trata, a día de hoy, de fábricas que responden a un nicho de demanda. En estos casos, lo importante no es la cantidad de productos totales, sino la flexibilidad de los procesos.

3. **Exploración de opciones:** la industria debe dar un apoyo al cliente y comunicar criterios a tener en cuenta en el diseño del producto²³.

El objetivo de la personalización en masa real en la arquitectura es que este tipo de producción deje de ser un nicho y que su utilización esté más extendida. Para ello, los procesos deben ser flexibles y el volumen de producción sostenible para garantizar la eficiencia productiva.

²²Según Kalpakjian (2014), para considerar que un proceso es eficiente habría que considerar un volumen de producción de más de 100,000 unidades al año (p.24).

²³La comunicación de los criterios a menudo es el mayor fallo por parte de las industrias, en particular en el sector de la construcción. Idealmente, los criterios transmitidos deben ser sencillos y de fácil aplicación en el diseño, para evitar la necesidad de largos plazos y costes o la contratación de una consultoría especializada.

3.3 LA PERSONALIZACIÓN GENERALIZADA MEDIANTE FABRICACIÓN DIGITAL

*"(...) El desarrollo de herramientas de diseño y fabricación digital ha transformado no sólo la manera en que se representan las ideas, sino también la manera en que éstas se generan. Una variedad de herramientas digitales están disponibles: las herramientas explorativas permiten al diseñador investigar conceptos emergentes y desarrollar geometrías de forma generativa; las herramientas descriptivas, como el modelado y la visualización 3d, permiten entender un diseño y su desarrollo; las herramientas analíticas permiten predecir el funcionamiento de ideas y evaluar sus implicaciones; e incluso, las herramientas de producción permiten fabricar los elementos constructivos y coordinar el proceso de construcción"*²⁴.

La posibilidad de utilizar herramientas digitales en todo el proceso, desde el diseño a la fabricación de componentes, facilita la materialización de diseños singulares; además, el proceso digital continuo entre el diseño y la fabricación es una de las bases del paradigma de personalización en masa en la arquitectura.

3.3.1 EL DISEÑO DIGITAL

Las herramientas de dibujo han influido siempre en el diseño de la arquitectura. Según William Mitchell (2001), "los arquitectos dibujaban lo que podían construir, y construían lo que podían dibujar".²⁵

Desde su aparición en los años 60, el dibujo asistido por ordenador (CAD) se ha extendido casi por completo en la práctica de la arquitectura. El primer programa de dibujo computacional, *UniSURF*, fue desarrollado en 1971 por un ingeniero de Renault, Pierre Bézier, y permitía la delineación bidimensional y tridimensional.

A partir de los años 80, las herramientas digitales superaron el ámbito de la representación y empezaron a facilitar la exploración formal. El desarrollo de

²⁴ (...) From conceptual design to manufacturing and on-site assembly, computers and digital technologies have transformed not only the way we represent our ideas but also the means through which we generate them. A range of digital tools is now available: explorative ones allow the designer to investigate emergent concepts via novel computation and generative form finding; descriptive ones, such as three-dimensional modelling and visualization, enable us to understand a design and its development; predictive and evaluative analytical tools allow designers to test the implications and performance of design ideas; and some tools even act as part of the final production of building elements and coordination of construction". Traducción de la autora. (Dunn, 2012, p.18).

²⁵ (...) Architects drew what they could build, and built what they could draw". Traducción de la autora. (Mitchell, 2001, p.352-363.).

fig. 3-11:
Superficies generadas por NURBS
para el proyecto *iWeb* de ONL.

fig. 3-12:
pabellón *iWeb* (ONL, TU Delft,
2006).

fig. 3-13:
Imagen 3d para el diseño de l
proyecto *Blobwall* (Greg Lynn
FORM, Los Angeles, EEUU, 2008).

fig. 3-14:
Diseño paramétrico para la
instalación *Vivisys*
(FutureCitiesLab, Chicago, 2012).

programas de modelado digital tridimensional permitió la superación del espacio cartesiano y la exploración de formas complejas curvilíneas, hasta entonces difíciles de representar. Las superficies curvilíneas se representan bien con *mallas*, mediante la descomposición de superficies curvas en polígonos, y con NURBS²⁶, de acabado más suave y continuo (Dunn, 2012), modificables mediante puntos de control. Con estas herramientas, es muy sencillo generar formas complejas en sólo unos pasos, minimizando la cantidad de datos resultantes.

En las décadas de los 80 y 90, arquitectos de vanguardia como Greg Lynn exploraron las posibilidades formales que ofrecían los programas informáticos. Estos programas tienen una tendencia natural para desarrollar su propio lenguaje curvilíneo, y esto llevó a Lynn a diseñar objetos informes llamados "blobs"²⁷ (Dunn, 2012).

Si hasta este momento era posible generar geometrías a partir de otras geometrías o alterando formas, en los últimos años surge la "arquitectura paramétrica", mediante la cual se generan objetos a partir de relaciones matemáticas entre elementos (Dunn, 2012). En la arquitectura paramétrica, los objetos están controlados por parámetros relacionados mediante relaciones matemáticas, que son muy útiles para la racionalización de geometrías complejas. En el proceso de diseño a fabricación, la arquitectura paramétrica se utiliza a menudo para incorporar las leyes de racionalización geométrica necesarias para el despiece de una geometría para su fabricación, su montaje e incluso su estabilidad estructural.

Tanto los programas de diseño en 3D como la arquitectura paramétrica han potenciado el desarrollo de diseños de gran complejidad. Según Lisa Iwamoto (2009), "...durante muchos años, el proceso de hacer dibujos varió de lo analógico a lo digital, aunque el diseño de edificios no reflejó este cambio. El CAD sustituyó a los dibujos hechos con reglas y bolígrafos, pero los edificios tenían más o menos el mismo aspecto. Esto tal vez no sea tan sorprendente, dado que una forma de representación bidimensional sustituyó a otra. Fue necesario que el modelado computacional en tres dimensiones y la fabricación digital aparecieran, para impulsar el pensamiento y expandir los límites de la forma y la construcción arquitectónicas."²⁸.

²⁶NURBS: acrónimo del término en inglés *Non-Uniform Rational B-Splines*, (*B-splines racionales no uniformes*).

²⁷BLOB: acrónimo del término en inglés *Binary Large Object*, traducido como *grandes objetos binarios*. A partir de los BLOBS, Lynn desarrolla la idea de "arquitectura genética", que representa la evolución "genética" de los objetos hacia una infinidad de pequeñas variaciones automáticas, resultando en "razas" (Estevez, 2003).

²⁸"(...) Yet for many years, as the process of making drawings steadily shifted from being analog to digital, the design of buildings did not really reflect the change. CAD replaced drawings with a parallel rule and lead pointer, but buildings looked pretty much the same. This is perhaps not so surprising- one form of two-dimensional representation simply replaced another. It took three-dimensional-computer modeling and digital fabrication to energize design thinking and expand the boundaries of architectural form and construction ". Traducción de la autora. (Iwamoto, 2009, p.5)

Por otro lado, los programas de modelado tridimensional han fomentado el desarrollo de lenguajes arquitectónicos curvilíneos, sugerentes y complejos, que escapan el control de sus creadores, y que a menudo resultan difíciles o imposibles de construir. Además, el distanciamiento de los arquitectos con la construcción y los métodos productivos ha exagerado el problema, y aquéllos se han acostumbrado a generar formas con gran facilidad sin racionalizar su materialización. Como resultado, lo que pueden resultar formas sugerentes a menudo se quedan en diseños irrealizables o que requieren simplificaciones extremas para su materialización;"(...) la utilización temprana del CAD en el diseño complejo ha hecho innecesario que los diseñadores entiendan por completo las topologías geométricas de las superficies (...). Hasta ahora, los desarrolladores de software CAD no han proporcionado al usuario la información relevante para evaluar o analizar la posibilidad o no de construir superficies libres en arquitectura"²⁹.

Finalmente, aunque los programas informáticos permiten generar geometrías complejas con gran facilidad, hasta el reciente desarrollo de las tecnologías de fabricación digital fue muy difícil materializar este tipo de geometrías. Asimismo, la falta de conexión entre diseño y fabricación digital complicaba enormemente el proceso: en la práctica general, las fases de dibujo y de fabricación eran totalmente independientes, y era necesario imprimir planos en papel a partir del modelo digital para guiar la construcción.

Para resolver el diseño y fabricación del *pabellón del Pez dorado* en Barcelona, el estudio del arquitecto Frank Gehry, pionero en diseño digital y en la fabricación de diseños complejos, tuvo que importar un software desde la industria aeroespacial llamado CATIA³⁰. A pesar de ser poco intuitivo para la conceptualización, CATIA permitía incorporar en el diseño información sobre la producción, y extraer archivos de fabricación de un mismo modelo, facilitando así la continuidad entre el diseño y su materialización. En 2002, el estudio de Frank Gehry, *Gehry Partners*, fundó *Gehry Technologies*, una empresa de desarrollo de software donde se creó *Digital Projects*, una versión simplificada de CATIA. *Digital Projects* integra muchos aspectos del proceso constructivo, incluyendo códigos de edificación y aspectos mecánicos, estructurales y económicos.

Con la incorporación de estos programas, *Gehry Partners* abrió el camino a un mundo completamente nuevo, en el que el proceso de diseño a fabricación se apoya en un modelo digital compartido entre diseñador, consultor, fabricante y contratista mediante un proceso puramente digital y

fig. 3-15:
Pabellón del Pez Dorado
(GehryPartners, Barcelona, 1992)

fig. 3-16:
CATIA versión 3, en 1988.

fig. 3-17:
Modelo digital con Digital Project
para el estadio Nacional Olímpico
en Beijing (Herzog & de Meuron;
Pekín, China; 2006).

fig. 3-18:
Optimización de un diseño
arquitectónico por Gehry
Technologies, para minimizar
paneles con curvatura compleja.

²⁹The easy use of CAD in freeform design has made it more or less unnecessary for the designers to fully understand the geometric topologies of surfaces, the characteristics in the creation of surfaces, the quality of the necessary source curves behind the surface and curve commands. Up until now, CAD software developers have not provided users with relevant information, evaluation or analysis of the constructability or non-constructability of freeform surfaces in architecture". Traducción de la autora. (Brell-Çokcan & Braumann, 2011, p.21).

³⁰CATIA: acrónimo en inglés de *Computer Aided Three-dimensional Interactive Application*. CATIA fue utilizado por primera vez por *Dassault Systems* en 1977 para diseñar el avión de combate *Mirage*.

"sin papel"³¹. *Gehry Partners* fueron también pioneros en la incorporación de herramientas de reconocimiento electrónico y posicionamiento láser; además de la flexibilización de las relaciones contractuales en la construcción.

El último desarrollo en software digital son los procesos de modelado de información de construcción o BIM. El BIM, cada vez más extendido en la profesión, es un proceso de gestión de datos del edificio que permite integrar en un modelo digital tridimensional del edificio información completa sobre su geometría, estructura e instalaciones, presupuesto, y planificación; así como realizar ejercicios de optimización mediante simulaciones. En última instancia, el BIM permite disminuir la pérdida de tiempo y recursos durante el ciclo de vida del edificio.

Una vez más, *Gehry Technologies* participa en el universo BIM con su software *GTeam*. Como menciona Frank Gehry (2010), "(...) estoy entrenando a la competencia"³². En palabras de Dennis Sheldon (2015), cofundador de *Gehry Technologies*, "(...) si sólo unos pocos pueden trabajar de esta nueva manera, el coste de trabajar con otros es alto. Al hacer avanzar la industria, ayudamos a nuestra competencia pero también a nuestros socios, y en última instancia conseguimos hacer un mejor trabajo a menor coste"³³.

3.3.2 TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA DESDE OTRAS INDUSTRIAS

Al igual que Frank Gehry, en los años 90 otros arquitectos que utilizaban lenguajes arquitectónicos complejos se enfrentaron a una industria de la construcción estandarizada e inflexible, incapaz de materializar los diseños que era posible representar.

Sin embargo, en otros sectores como el naval, automovilístico o aeronáutico, la fabricación tradicional se basa en piezas de geometrías complejas, que una vez ensambladas resultan en barcos, coches de carreras, aviones o cohetes. Además, los procesos de trabajo a menudo son colaborativos entre arquitectos, ingenieros, fabricantes y contratistas, y utilizan tecnologías digitales de diseño, análisis, fabricación y ensamblaje (Kolarevic, 2005). En la industria naval, por ejemplo, se trabaja con modelos tridimensionales con los que se gestiona el proceso completo desde el diseño hasta la producción, y de los que se extraen los datos geométricos para dirigir la maquinaria de fabricación y ensamblaje automatizado. En la industria aeroespacial, se

³¹Traducción de la autora del término en inglés *paperless process*.

³²"I am training the competition". Traducción de la autora. (Tirnauer, 2010)

³³"If few can work in this new way, the cost of working with other people is high. By bringing the industry forward, you help your competitors but you also help your partners, ultimately letting you do better work at a lower price." Traducción de la autora. (Chang, 2015).

realizan "diseños sin papel"³⁴: el Boeing 777 fue diseñado de esta forma, con 2000 puestos de trabajo conectados a 8 servidores; no se construyeron prototipos ni modelos, y el 777 se construyó y ensambló directamente a partir del software de CAD/CAM donde fue desarrollado.

En estos sectores, es muy común trabajar con varios fabricantes para distintas piezas, que más tarde deben ensamblarse con un alto grado de precisión, por lo que la colaboración estrecha entre distintos fabricantes y la previsión de tolerancias de fabricación son fundamentales.

En los años 90, los arquitectos se vuelven a estas industrias para aprender de sus procesos, y los primeros edificios prefabricados con geometrías complejas toman prestados sus medios de producción a las industrias aeroespacial, naval y automovilística. Como se ha visto en el punto anterior, *Gehry Partners* importa el software CATIA de la industria aeronáutica. El *Lord's Media Centre* (Future Systems; Londres, Reino Unido; 1999) fue producido por un fabricante de barcos local y transportado en segmentos para su posterior ensamblaje; su geometría curva evoca incluso las geometrías de barcos o automóviles, y su estructura se basa en un sistema monocasco de aluminio, inspirado en las envolturas tensadas utilizadas desde hace tiempo en esas industrias (Kolarevic y Klinger 2008).

A diferencia de la fabricación de barcos y de aviones, en el sector de la construcción el diseñador suele estar distanciado o aislado del proceso de fabricación. Para evitar la falta de eficiencia y coordinación, el reto en esta industria es que la conexión entre fabricante y diseñador sea fluida y constante.

fig. 3-19 y fig. 3-20:
Diseño y fabricación de barcos y edificios en *Centralstaal*.

fig. 3-21:
Lord's Media Centre (Future Systems; Londres, Inglaterra; 1999), fabricado por *Centralstaal*

3.3.3 LA FABRICACIÓN DIGITAL

La *fabricación por control numérico* (CN³⁵) engloba los medios de fabricación controlados de forma automática; dentro de éstos, los medios *de fabricación por control numérico computacional* (CNC³⁶) están controlados y operados de forma programada por una computadora. Estos procesos también se denominan de *fabricación digital* o CAM. Con los sistemas de fabricación CNC, se puede controlar desde un ordenador prácticamente cualquier máquina de procesamiento y fabricación tradicional para que funcione de modo automático.

Además de las máquinas de control numérico, desde los años 70 se han introducido en la industria procesos robotizados, que ofrecen una enorme

fig. 3-22:
Una de las primeras máquinas de fabricación CNC, años 50.

³⁴Traducción de la autora del término en inglés *paperless design*.

³⁵CN: siglas del término *Control Numérico*.

³⁶CNC: siglas del término en inglés *Computer Numerical Control* (*Control numérico computacional*).

fig. 3-23:
Maquinaria CNC con 2 ejes de movimiento.

fig. 3-24:
Maquinaria CNC con 3 ejes de movimiento.

fig. 3-25:
Maquinaria CNC con 7 ejes de movimiento.

flexibilidad por sus movimientos y aplicaciones. Aunque éstos se utilizan habitualmente para operaciones repetitivas, desde varios años se utilizan en el campo de la arquitectura a nivel experimental, sobretodo en el ámbito académico. Estos procesos se describirán en el apartado 5.6.

En la fabricación digital, la flexibilidad formal se define por el número de ejes de la máquina, que corresponde a sus grados de movimiento. Las máquinas más sencillas, de 2 ejes, se mueven en un plano bidimensional x-y, y su programación se basa en posiciones x-y; las máquinas de tres ejes incorporan el eje vertical (eje z). Los sistemas de fabricación digital más recientes generalmente incluyen tres ejes lineales (x-y-z) y dos rotatorios, siendo máquinas con 5 ejes de movimiento. Los brazos robotizados, por ejemplo, suelen tener 5 o 6 grados de libertad. A medida que se añaden grados de libertad, la máquina podrá trabajar de forma más precisa en distintas direcciones, por lo que se podrá conseguir una mayor complejidad geométrica en la pieza trabajada. La mayoría de los sistemas funcionan fijando la pieza a una mesa de trabajo, y es el cabezal de trabajo de la máquina el que se mueve siguiendo los ejes de movimiento; el cabezal contiene las distintas herramientas necesarias para procesar la pieza. La otra posibilidad es que sea la mesa la que se mueva en relación con un cabezal de trabajo fijo.

Las máquinas de control numérico tienen una altísima exactitud y capacidad de repetición, además de ser muy rápidas. Las máquinas se componen de tres piezas: un *programa de piezas* o conjunto de comandos que especifica la posición o movimiento del cabezal de trabajo, definida mediante las coordenadas x,y,z; la *unidad de control de máquina* (CMU³⁷), una microcomputadora que ejecuta el programa y convierte cada comando en acciones; y un *equipo de procesamiento*, que realiza la secuencia de pasos para procesar la pieza (Groover, 2007).

Para la fabricación de un determinado diseño realizado en CAD, es necesario realizar la conversión desde el diseño al lenguaje de CAD a una serie de instrucciones apropiadas para la tecnología de una máquina específica mediante un software CAM. Esta conversión se hace bien de forma automática, mediante la extracción de archivos desde el software CAM, bien por el programador. En este caso, el programador de la máquina introduce una serie de instrucciones de forma manual, que corresponden con las acciones que debe hacer la máquina. Éstas incluyen la elección de herramientas, los recorridos a realizar, la secuencia de operaciones, el cambio de herramientas, etc. Una vez introducidas, estas instrucciones son convertidas a comandos de texto (*código-G*), que se envía a la unidad de control, la cual las convierte en acciones específicas para la máquina (*código M*). Las máquinas generalmente vienen acompañadas de un software con interfaz gráfico, el cual simula las operaciones antes de comenzar para comprobar que no haya conflictos.

³⁷CMU: siglas del término en inglés *Condition Monitoring Unit* (Unidad de monitorización de condiciones).

Cada programa y código suelen ser específicos para cada proceso, e incluso para cada máquina, por lo que es necesario disponer de personal cualificado que controle las máquinas. En definitiva, "las máquinas necesitan que se les diga exactamente lo que tienen que hacer, lo que significa que es necesario que el diseñador especifique de forma exacta la geometría compleja en un lenguaje numérico que el control de la máquina pueda entender"³⁸.

El proceso de conversión de diseño a fabricación es a menudo un proceso largo, donde se suceden fases de conversión, verificación y simulación de pruebas. Si para un objeto producido en masa es necesario realizar este proceso una sola vez, en la fabricación de objetos personalizados, este proceso se repite con cada diferencia, lo cual multiplica el tiempo total de producción.

3.3.4 PROCESO DE DISEÑO A FABRICACIÓN DIGITAL

*"Para conectar el proceso de diseño con la fabricación, es necesario traducir datos gráficos desde dibujos bidimensionales o tridimensionales a datos digitales que una máquina de control numérico (CNC) pueda entender"*³⁹.

Este proceso de traducción, que incluye decisiones como qué proceso de fabricación, qué material y qué máquina utilizar, debe ser una colaboración entre el diseñador, quien defiende la intención del diseño, y el fabricante, quien entiende la capacidad de fabricación. Mientras los detalles de programación de máquinas y conversión de lenguajes corresponden al ámbito del fabricante, es necesario que los arquitectos que desarrollen diseños complejos entiendan cómo funcionan estas herramientas, a qué materiales están dirigidas y qué posibilidades ofrece cada proceso de fabricación.

Según Nick Dunn (2012), "(...) la complejidad formal de las formas curvilíneas ha significado que muchos arquitectos se vuelvan a involucrar en el proceso de fabricación para asegurarse que la intención de sus diseños se materializara correctamente; y como consecuencia, los diseñadores tienen mayor control del proceso constructivo"⁴⁰. En general, los arquitectos suelen

³⁸ (...) Machines must be told exactly what to do, which means that it is necessary for the designer to exactly specify the complex shape in a numerically based language that the machine control system can understand". Traducción de la autora. (Schodek, Bechthold, & Griggs, p.8).

³⁹ "(...) To move from design to construction, it is necessary to translate graphical data from two dimensional drawings and three-dimensional models into digital data that a computer-numeric-controlled (CNC) machine can understand." Traducción de la autora. (Iwamoto, 2009, p.6)

⁴⁰ "(...) "The complexity of curvilinear formations has meant that numerous architects have returned to being highly engaged in the fabrication process to ensure the design intent is carried through into the making. As a consequence of this involvement, designers have inherited greater control of the construction process". (Dunn, 2012, p. 49).

colaborar con ingenierías o consultorías especializadas, que incluso pueden ser subcontratadas por los fabricantes. En algunos casos singulares, los estudios de arquitectura de gran tamaño pueden disponer de un departamento especializado en la racionalización del diseño, como es el caso del grupo *the Specialist Modelling Group* (SMG) en el estudio de *Foster and Partners* (Schodek, Bechthold, & Griggs, 2004), o de *Gehry Technologies* en el estudio de *Gehry Partners*.

Cuando no existen las herramientas o el conocimiento necesarios, el proceso desde el diseño a la fabricación puede ser muy complejo. Según Kalpakjian (2014), la fase de diseño es crítica, y se ha estimado que hasta el 80% del coste del desarrollo y producción del producto se determina por las decisiones tomadas en las primeras fases de diseño (p.7). Los típicos "lapsus" de los arquitectos incluyen la especificación de materiales inapropiados, la falta de conocimiento básico sobre técnicas básicas de construcción, y sobre todo, no comprender la posibilidad de construcción⁴¹, o la posibilidad de fabricar determinadas geometrías. La barrera entre los arquitectos y los fabricantes y constructores es todavía muy grande: en general, los diseñadores se enfocan en crear y describir objetos, mientras que los fabricantes se concentran en producir componentes de forma eficiente y gestionar procesos de ensamblaje.

Un ejemplo de previsión necesaria en el diseño son las tolerancias de fabricación, un concepto que en el caso de la arquitectura prefabricada es fundamental para que el montaje se realice sin problemas: las superficies de la geometría deben ser exactas, cerradas, sin ambigüedades ni elementos abiertos, y los modelos digitales deben tener en cuenta las especificaciones mecánicas y físicas de los materiales. En el *Abu Dhabi Bridge Pavilion* (Asymptote Architects; Abu Dhabi, UAE; 2009), el fabricante, *Centralstaal*, situado en Holanda, tuvo en cuenta en el cálculo la dilatación que se produciría en los módulos prefabricados de acero durante el transporte, de los 0°C en Groningen, Holanda, a los 40°C en Abu Dhabi, para que el montaje in situ se hiciera sin problemas. Efectivamente el puente dilató los 6cm previstos.⁴²

Para integrar los detalles de cada fase del proceso, en el ámbito del diseño industrial se han desarrollado conceptos como el *diseño para fabricación*⁴³, el *diseño para ensamblaje*⁴⁴, el *diseño para manufactura y ensamblaje*⁴⁵ y el

⁴¹Traducción de la autora del término en inglés *buildability*.

⁴² Datos recabados durante la entrevista a Wybren Terpstra, jefe de ventas de la empresa *Centralstaal* en Groningen, Holanda, el 20/12/2012.

⁴³Traducción del término en inglés *Design For Manufacturability*, conocido por sus siglas DFM; significa la práctica de diseñar productos para que sean fáciles de fabricar.

⁴⁴Traducción del término en inglés *Design For Assembly*, conocido por sus siglas DFA; es la práctica de diseñar productos fáciles de ensamblar.

⁴⁵Traducción del término en inglés *Design For Manufacture and Assembly*, conocido por sus siglas DFMA; es la práctica de diseñar productos fáciles de fabricar y ensamblar.

*diseño para desensamblaje*⁴⁶, los cuales incorporan información de cada fase en el diseño de objetos. Por otro lado, como todas las fases se deben considerar de forma simultánea, la comunicación entre todas las disciplinas relevantes es fundamental, como se propone en la *ingeniería concurrente*⁴⁷. (Kalpakjian et al., 2014).

En la arquitectura, el concepto de *diseño para fabricación* resulta importante para evitar problemas de producción, al incorporar en el diseño información sobre su fabricación y montaje. Cuanto antes se incorpore esta información en el proceso de diseño, más problemas se evitarán en las siguientes fases (Lyon, 2007). De esta forma, se facilitaría la conexión entre arquitecto e industria, reduciendo los costes en consultoría, aumentando la eficiencia y generalizando así la personalización.

A partir del análisis de los distintos métodos de fabricación, uno de los objetivos de esta tesis es la identificación de criterios que puedan ser incorporados en el diseño arquitectónico y alimenten el *diseño para fabricación*.

⁴⁶Traducción del término en inglés *Design For Disassembly*. conocido por sus siglas DFD: es la práctica de diseñar productos fáciles de desensamblar.

⁴⁷Traducción del término en inglés *concurrent engineering*.

3.3.5 PARADIGMA DE LA PERSONALIZACIÓN EN MASA EN ARQUITECTURA

*"(...) La idea de que la singularidad es hoy en día tan económica y fácil de conseguir como la repetición, reta los supuestos simplificadores del Modernismo y sugiere el potencial para un nuevo paradigma post-industrial, basado en las capacidades creativas mejoradas de la electrónica, más que de la mecánica."*⁴⁸

El potencial generativo de las herramientas de fabricación digital, junto con la perspectiva de un proceso digital continuo desde el diseño a la fabricación, abre las puertas a la fabricación de diseños complejos de forma fiel y eficiente. El paradigma de la personalización en masa en la arquitectura parte de la hipótesis de que "fabricar 1000 piezas distintas es igual de fácil y económico que 1000 piezas iguales"⁴⁹, permitiendo conciliar la eficiencia de la producción industrial en masa con la personalización existente en la construcción artesanal.

Sin embargo, el proceso digital continuo entre diseño y fabricación no es tan sencillo como apretar un botón desde el estudio de arquitectura para que se ponga en marcha una máquina en la fábrica. Como dice Katharina Lehmann (2013), presidenta de la fábrica de componentes en madera *Blumer-Lehmann*, "no va a ser posible dibujar y después trasladar el diseño a una máquina en un solo paso, sino que se necesita tener una interfaz técnica. El proceso será más fácil en el futuro que hoy en día, pero seguirá haciendo falta alguien que haga el diseño, y alguien que haga la interfaz entre el diseño y la máquina. (...) Así que, cuando soñamos en tener datos automáticos desde llevar los dibujos para las máquinas, todavía queda un largo camino por recorrer."⁵⁰

Como se ha visto en los apartados precedentes, algunas de las dificultades para la personalización en masa son las siguientes:

1. En la fase de diseño:

- a. **entendimiento del diseño:** los programas de dibujo 3d dan un acceso fácil al diseño de edificios con geometrías complejas. Sin

⁴⁸"(...) The notion that uniqueness is now as economic and easy to achieve as repetition, challenges the simplifying assumptions of Modernism and suggests the potential of a new, post-industrial paradigm based on the enhanced, creative capabilities of electronics rather than mechanics". Traducción de la autora. (Slessor, 2000, p. 53)

⁴⁹ Remitirse a la sección 1.4 Hipótesis: " (...) It is just as easy and cost-effective for a CNC milling machine to produce 1000 unique objects as to produce 1000 identical ones". Traducción de la autora. (Kolarevic, 2005, p.52).

⁵⁰Datos recabados durante la entrevista a Katharina Lehmann, presidenta de la empresa *Blumer-Lehmann* en Gossau, Suiza, el 02/05/2013

embargo, la primera barrera para la personalización en masa es el entendimiento por parte del arquitecto de las implicaciones de la complejidad del diseño en el proceso completo, así como la resolución de los problemas geométricos, físicos y materiales del diseño.

- b. **planificación del diseño:** si en lugar de fabricar la misma pieza muchas veces, éstas varían en su diseño, es necesario planificar la fabricación para cada pieza, y las horas de trabajo repercuten en el coste total de fabricación. *Designtoproduction*, empresa líder en la consultoría geométrica y de fabricación, lo explica de la siguiente manera: "algunas máquinas CNC permiten la fabricación de componentes individuales casi al mismo coste que la producción en masa. Pero mientras el precio de fabricación sigue siendo el mismo, el esfuerzo para la planificación y la logística aumenta con el número de partes diferentes. Y cuando se trata de miles, cada segundo perdido por parte suma a horas de trabajo en cada proyecto"⁵¹.
- c. **conversión y racionalización del diseño:** con el modelo tradicional de distribución de responsabilidades en obra, los fabricantes deben asegurar un producto impecable y no se pueden permitir trasladar errores desde el diseño transmitido por el arquitecto. Por ello, muchos fabricantes deciden simplificar o rehacer el diseño. En *Zahner*, industria líder en fabricación digital con metal, cuando reciben un archivo en 3d de un arquitecto, lo convierten directamente a CATIA y crean su propio modelo (V.Iovine, 2010). Esto, lógicamente, implica duplicar procesos, personal y recursos.
- d. **entendimiento del proceso de fabricación:** al elegir el proceso de fabricación, es necesario entender su idoneidad e implicaciones en el diseño. Según Kalpakjian (2014), la selección del proceso de fabricación depende de las características geométricas del componente, incluyendo las tolerancias dimensionales y la textura superficial; y a numerosos factores propios del material de trabajo y del proceso de fabricación que se decida utilizar(p.9).
- e. **distribución de responsabilidades:** la utilización de modelos digitales compartidos por muchos profesionales (arquitectos, ingenieros, constructores, fabricantes...) supone un conflicto en la división de responsabilidades, al no existir fronteras claras ni transferencia de información definitiva de unos a otros. Dado que el fabricante tiene la responsabilidad última del producto prefabricado, a menudo éste es el responsable de desarrollar y centralizar el modelo digital.

⁵¹CNC machines make it possible to fabricate individual components almost at the cost of mass production. But while the price for machining stays the same, the effort for planning and logistics rises with the number of different parts. And when it comes to the thousands, every second lost per part adds up to man-hours of work in the project". Traducción de la autora. (*designtoproduction*,s.f.)

2. en la fase de fabricación:

- a. **eficiencia de la producción:** para conseguir la personalización en masa es necesario asegurar la eficiencia económica, material y temporal (posibilidad de fabricar grandes volúmenes en poco tiempo a bajo coste), así como un precio competitivo, no muy alejado de producto estándar.
- b. **flexibilidad de procesos,** automatización y digitalización.
- c. **continuidad en el proceso digital:** el proceso digital de diseño a fabricación implica la necesidad de "traducir" desde ciertos formatos a otros, a menudo varias veces en el proceso, lo cual requiere la intervención de distintos especialistas e intermediarios. Por ejemplo, en el ámbito experimental académico, el diseñador es también el responsable del proceso de fabricación, por lo que conoce las necesidades de la fabricación y utiliza los programas CAD/CAM de traducción de datos. Al no existir pasos intermediarios, es posible conseguir un continuo digital.

Se confirma la necesidad de que los arquitectos adquieran una base de conocimiento sobre los nuevos modos de fabricación en la arquitectura, y más aún cuando, debido a la generalización de las herramientas digitales, la complejidad en los diseños arquitectónicos es creciente.

En el siguiente capítulo, se analizarán los distintos sistemas de fabricación personalizada en el sector de la construcción, procurando entender el proceso completo desde el diseño a la fabricación, e identificar los criterios de entendimiento para los arquitectos.

4 METODOLOGÍA INVESTIGADORA

"Tal es la naturaleza del conocimiento de la producción a día de hoy, en un mundo de economías de aprendizaje globales; un espacio (arquitectónico) extraño, seguro; donde no se trata tanto de lo que conoces, sino de cómo conoces las maneras para llegar adonde quieras llegar".⁵²

4.1 INTRODUCCIÓN

4.2 ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA

4.3 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

4.3.1 METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE CAMPO: REALIZACIÓN DE VISITAS A FÁBRICAS

⁵²"Such is the nature of knowledge production today in a world of global learning economies; a strange (architectural) space for sure, where it is not what you know so much as how you know the possible ways you can get to where you want to go". Traducción de la autora (Kolarevic y Klinger 2008, p.3) .

4.1 INTRODUCCIÓN

La tesis se organiza en dos partes principales:

- Definición de un estado del arte sobre la personalización masa en la arquitecturaa día de hoy, mediante el análisis de los procesos de fabricación personalizada en la industria del prefabricado arquitectónico (capítulo 5).
- Definición de la base de protocolo de conexión entre arquitecto e industria(capítulo 6).

En el capítulo 5, "ANÁLISIS DE PROCESOS DE FABRICACIÓN PERSONALIZADA ENARQUITECTURA", se analizan los procesos de prefabricación de componentes singulares en distintos materiales en el sector de la construcción; este análisis se basa en la visita a fábricas especializadas en los distintos procesos.

Tanto los procesos de fabricación como las fábricas elegidas se enfocan en la fabricación de componentes utilizados en la envolvente del edificio, que suele ser protagonista en el proceso de personalización. Ingrid Paoletti (2010) lo explica de la siguiente forma: "(...) Muchos sistemas del edificio están afectados por este proceso, desde la estructura a la cubierta, pero uno de ellos parece catalizar la mayor atención: la envolvente arquitectónica. (...) Esto ha ocurrido porque la envolvente representa el primer filtro entre el exterior y el interior, y es una inversión importante, particularmente cuando el cliente final quiere expresar su imaginación a través de la envolvente"⁵³.

En capítulo 6, "BASES PARA PROTOCOLO DE CONEXIÓN ENTRE DISEÑO E INDUSTRIA", se analiza el proceso completo de diseño a fabricación, y se propone una metodología en forma de protocolo que se ilustra mediante estudios de casos.

⁵³"Many systems of the building are concerned by this process, from the structure to the roof, but one seems to catalyze the major attention: architectural envelope. (...) This has happened because envelope represents the first filter between outside and inside and is an important investment, in particular when the final customer wants to express its imagine through the envelope."Traducción de la autora (Paoletti, 2010, p.28).

4.2 ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la tesis se ha seguido la siguiente metodología de actividades e hitos:

A. FASE DOCUMENTAL

1. Fase 1: FABRICACIÓN PERSONALIZADA EN LA ARQUITECTURA

- **Actividad 1.1.** Documentación sobre industrialización, fabricación digital y personalización generalizada en la arquitectura.
 - Hito 1.1: Definición de la personalización generalizada en la industria.
 - Hito 1.2: Definición de la personalización generalizada en la arquitectura.
- **Actividad 1.2.** Identificación de los criterios evaluables para el análisis de la personalización generalizada en la arquitectura.
 - Hito 1.3: Definición de criterios evaluables.

2. Fase 2: CATALOGACIÓN DE PROCESOS DE FABRICACIÓN PERSONALIZADA

- **Actividad 2.1.** Catalogación y análisis de procesos de fabricación.
 - Hito 2.1: Elaboración de catálogo de procesos de fabricación personalizada.
 - Hito 2.2: Selección de principales procesos de fabricación personalizada en la arquitectura.
 - Hito 2.3: Elaboración de catálogo de estudios de caso significativos.
- **Actividad 2.2.** Catalogación y análisis de industrias representativas.
 - Hito 2.4: Elaboración de catálogo de industrias significativas.
 - Hito 2.5: Selección de industrias para contacto y visita. Análisis de procesos de fabricación personalizada en la arquitectura.

B. TRABAJO DE CAMPO

1. FASE 3: REALIZACIÓN DE VISITAS

- **Actividad 3.1.** Preparación de visitas.
 - Hito 3.1: Elaboración de cuestionarios.
- **Actividad 3.2.** Visita a fábricas.

- **Actividad 3.3.** Contacto y/o visita a arquitectos y consultorías especializadas.
- **Actividad 3.4.** Documentación de las visitas.
 - Hito 3.2: Documentación de visitas: grabación, fotografías, recopilación de datos.
 - Hito 3.3: Análisis de la industria y evaluación de criterios para cada industria.
 - Hito 3.4: Elaboración de fichas-resumen de las industrias.
- **Actividad 3.5.** Análisis de los procesos de fabricación a partir de las visitas realizadas.
 - Hito 3.5: Análisis de cada proceso:
 - posibilidades de personalización: ¿qué es posible fabricar?
 - posibilidades de normalización del proceso ¿qué es posible generalizar?
 - evaluación del potencial y limitaciones para la personalización en masa.
 - Hito 3.6: Definición de una tabla sintética de cada proceso de fabricación, definición de una tabla comparativa con todos los procesos.
 - Hito 3.7: Observaciones y conclusiones parciales sobre la fabricación personalizada en la arquitectura.

C. FASE PRÁCTICA

1. FASE 4: PROTOCOLO DE CONEXIÓN INDUSTRIA- DISEÑO

- **Actividad 4.1.** Base para protocolo simplificado de conexión industria-diseño.
 - Hito 4.1: Identificación y definición de los criterios integrantes del protocolo de conexión.
 - Hito 4.2: Definición de esquema simplificado de conexión industria-diseño.
- **Actividad 4.2.** Ilustración del protocolo mediante estudios de casos.
 - Hito 4.3: Selección y análisis de estudios de casos.
 - Hito 4.4: Catalogación y análisis de los estudios de casos y descripción del proceso de conexión entre el diseño a la construcción.
- **Actividad 4.3.** Conclusiones de la tesis.

D. ACTIVIDADES DE INVESTIGACIÓN Y DIFUSIÓN

1. FASE 5: REALIZACIÓN DE ESTANCIA EN CENTRO EXTRANJERO

- **Actividad 5.1:** Realización de estancia de investigación en centro extranjero
 - Hito 5.1: 04-05/2013, 09-10/2014: Estancia internacional realizada en el grupo de investigación *Producción y Logística*, Tecnología de Automatización, Universidad de Ciencias Aplicadas de Berna (BHF); Biel, Suiza.
 - Participación en el proyecto *NFP-66 project: Additive Robotic Fabrication of Complex Timber Structures*, proyecto colaborativo entre la BFH y la Unidad de Arquitectura y Fabricación Digital del Instituto de tecnología Federal Suizo (ETH de Zúrich), grupo *Gramazio Kohler Research*); Biel, Suiza.
 - Hito 5.2: 04/2015: Participación en el taller de proyectos *Erne Holzbau*, organizado por el profesor Christophe Sigrist (BFH) en *Erne Holzbau*; Stein, Suiza.

2. FASE 6: DIFUSIÓN DE RESULTADOS

- **Actividad 6.1:** Ponencias en universidades y centros de investigación:
 - Hito 6.1: 08/05/2013: Ponencia en la Unidad docente de proyectos *Colab*; profesora Almudena Ribot; Escuela Técnica Superior de Arquitectura (ETSAM), Universidad Politécnica de Madrid (UPM); Madrid, España.
 - Hito 6.2: 26/09/2013: Ponencia en la Unidad docente de proyectos *Progetto: Tipologie Varie*; profesor Riccardo Blumer; Academia de Arquitectura de Mendrisio, Universidad de la Suiza Italiana; Mendrisio, Suiza.
 - Hito 6.3: 24/09/2013: Ponencia en la Unidad docente de ingeniería de la madera, Bachelor en Ingeniería en madera y acero; profesor Christophe Sigrist; BFH; Biel, Suiza.
 - Hito 6.4: 09/04/2014: Ponencia en el grupo de investigación *Geometrías de la Arquitectura Contemporánea*; profesor Miguel Martínez Garrido, ETSAM, UPM; Madrid, España.
- **Actividad 6.2:** Presentación en Congreso Internacional en España
 - Hito 6.5: 12/06/2014: Ponencia en congreso internacional *Constec 2014*, Congreso Internacional sobre investigación en Construcción y Tecnología Arquitectónicas; ETSAM, UPM; Madrid, España.
- **Actividad 6.3:** Presentación y publicación de artículo.
 - Hito 6.6: 2011: Publicación de artículo en revista indexada
- **Actividad 6.4:** Desarrollo, exposición y defensa del documento

4.3 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

De forma general, la investigación realizada durante la tesis se alimenta de varias fuentes:

- consultas documentales: consulta de libros, artículos en revistas y en páginas web especializadas, tesis doctorales y páginas web de fabricantes, especialistas e investigadores;
- estancias e intercambios: presencia en el congreso *Fabricate 2014* en Zúrich, Suiza; realización de una estancia de investigación de 3 meses en la Universidad de Ciencias aplicadas de Berna (BHF); participación como docente en los talleres de proyectos: *Projektwoche Cantercel* y *Projektwoche Erne Holzbau* sobre fabricación robotizada, de la BHF; conversaciones con investigadores, consultores, arquitectos y fabricantes;
- trabajo de campo y visitas: visitas a empresas de consultoría especializadas, arquitectos y fábricas de componentes personalizados para la arquitectura.

En el inicio de la tesis, se ha identificado el distanciamiento entre los arquitectos y las industrias de fabricación. Para afrontar este problema, la principal estrategia en la tesis ha sido realizar visitas a fabricantes, para comprobar in situ sus procesos de fabricación y entender directamente de parte de los fabricantes cuales son los principales retos a los que se enfrentan. Estas visitas son un componente fundamental de la tesis, ya que sirven para ver y entender de forma práctica el proceso de materialización de edificios singulares, así como para tener valiosos intercambios informales con los especialistas.

Si bien los ejemplos de fábricas visitadas sirven para ilustrar los procesos de fabricación, éstos no deben tomarse como datos absolutos sobre un determinado proceso, sino como ejemplos.

A continuación, se describe la metodología seguida para la fase de trabajo de campo (B). Las metodologías de la fase documental (A), y la fase práctica (C) se detallan en la introducción de los capítulos respectivos, para explicar el desarrollo del capítulo: en el capítulo 5, se describirá la metodología seguida para el análisis de procesos de fabricación personalizada en arquitectura; y en el capítulo 6, se describirá la metodología seguida en el desarrollo del protocolo de conexión entre diseño e industria.

4.3.1 METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE CAMPO: REALIZACIÓN DE VISITAS A FÁBRICAS

Las visitas a las industrias se han realizado durante 3 años (2012-2015), cubriendo 19 fábricas, 2 universidades y 3 consultorías especializadas situadas en 6 países europeos: España, Italia, Austria, Bélgica, Holanda y Suiza. Antes del comienzo de la tesis, se realizaron visitas a 3 fábricas de viviendas industrializadas en Japón (2010), de las que se habla en el capítulo 2.2.; y a Estados Unidos (2010).

fig. 4-1:
Mapa de las visitas realizadas.

Antes de realizar las visitas, éstas se han preparado con una consulta documental sobre la industria, principalmente a través de su página web. Se han preparado también cuestionarios con los temas a tratar, y en algunos casos éstos se envían previamente a la empresa. Finalmente, se ha tomado contacto con la industria y coordinado un día para la visita. La persona de contacto y encargada de la visita puede ser un comercial, un ingeniero, un jefe de producción, o incluso el dueño o presidente de la empresa, y todos ellos están bien informados sobre los procesos y problemáticas existentes.

Generalmente las visitas, de duración media de medio día, consistieron en una visita a la fábrica seguida de una entrevista. En la visita a la fábrica, se hizo un recorrido de la planta, se observaron las máquinas en funcionamiento y, si posible, se tuvo una charla con los operarios de la fábrica. Las visitas se documentaron mediante fotografías, vídeos, notas y grabaciones de voz. La segunda mitad de la visita consistió en una reunión en la oficina, donde se realizó una entrevista, y a menudo, se examinaron catálogos, muestras o presentaciones sobre la empresa o el producto.

Durante las entrevistas, en primer lugar se preguntaba sobre la empresa (historia, tamaño, servicios ofrecidos y producción); para luego recorrer los proyectos realizados, las técnicas de fabricación disponibles, el rol de la empresa en cada fase del proyecto, y la descripción del componente producido (posibilidades geométricas y materiales, coste, tiempo de fabricación, etc.). El enfoque de la conversación era sobre la fabricación de componentes singulares, para entender el proceso de desarrollo del producto en todas las fases, incluyendo el apoyo técnico, la fabricación, el transporte y el montaje. El objetivo de la entrevista es entender las implicaciones de la singularidad del diseño en el proceso de fabricación, los costes y los plazos totales.

Aunque el tema de la conversación principalmente giraba en torno a la fase de producción, también se discutió sobre la filosofía de la empresa sobre el tema de fabricación personalizada, sobre su relación y comunicación con los arquitectos, y los proyectos de inversión futuros de la empresa; a menudo éstas fueron conversaciones fascinantes en las que el interlocutor se mostró sincero, apasionado y crítico, siendo éstos encuentros extremadamente generosos y enriquecedores.

Tras la realización de las visitas, se combina el análisis documental de procesos de fabricación con los ejemplos, que permiten cuantificar ciertos parámetros y completar el análisis con una experiencia práctica. Con esta información, se han realizado unas tablas que presentan de forma sistemática las características del proceso en la industria visitada, a través del análisis de una serie de criterios. Tanto los criterios de análisis como las tablas se exponen en el capítulo 5.

Tabla 1: Visitas a fábricas según procesos de fabricación

VISITAS REALIZADAS A INDUSTRIAS					
familia	proceso	material	industria visitada		proyectos destacados
CORTE	corte con sierra, corte con fresa	madera	KLH	Austria	Biblioteca en Vennesla (Helen & Hard; Vennesla, Noruega; 2011).
	corte con sierra, corte por agua a presión	piedra	CAMPOLONGHI	Italia	Ópera de Oslo (Snøhetta; Oslo, Noruega; 2008);
	corte por plasma	metal	PROIEK	España	Museo san Telmo (Nieto Sobejano; San Sebastián)
SUBTRACTIVO	fresado	madera	BLUMER LEHMANN	Suiza	Club de golf Yeogu (Shigeru Ban Architects; Corea del Sur; 2010)
	fresado	composites	CNC DYNAMIX	Suiza	Piezas para cohetes
	fresado	piedra	CAMPOLONGHI	Italia	Ópera de Oslo (Snøhetta; Oslo, Noruega; 2008);
FORMATIVO	termoformado	vidrio	CRICURSA	España	Hospital Rey Juan Carlos (Rafael de la Hoz; Madrid; 2012)
	termoformado	vidrio	CONTROL GLASS	España	Hospital Rey Juan Carlos (Rafael de la Hoz; Madrid; 2012)
	estampado de chapa	metal	CENTRALSTAAL	Holanda	Pabellón Porsche (Henn Architects; Wolfsburg; 2012);
	moldeo, aspirado a molde	GRP	POLY PRODUCTS	Holanda	Edificio "the Rock" (Erik van Egeraat; Amsterdam, 2009)
	moldeo	GRP	PREINCO	España	Centro Andaluz de Arte Contemporáneo (Nieto y Sobejano; Córdoba,; 2013)
	moldeo	GRG	VARI	Bélgica	Oostkampus (Carlos Arroyo; Oostkamp, Bélgica; 2011)
	laminado curvo de madera	madera	DUCRET-ORGES	Suiza	Musée du sel
ADITIVO	impresión 3d	arena	DINITECH	italia	Escultura Radiolaria, (Andrea Mogante,Shiro Studio; 2010)
	montaje robotizado	madera	ONLYWOOD	Suiza	Viviendas prefabricadas
	montaje robotizado	madera	ERNE HOLZBAU	Suiza	ITA Dach (ETHZ; Zúrich, Suiza; 2016)

5 ANÁLISIS DE PROCESOS DE FABRICACIÓN PERSONALIZADA EN ARQUITECTURA

*"Lo fácil es entender lo que se puede hacer conceptualmente; lo difícil es entender la libertad total que ofrece."*⁵⁴

5.1 METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS

- 5.1.1 GUIÓN DEL ANÁLISIS Y DESCRIPCIÓN DE CRITERIOS
- 5.1.2 ¿QUÉ ES POSIBLE FABRICAR?: POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN
- 5.1.3 ¿QUÉ ES POSIBLE GENERALIZAR?: EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN
- 5.1.4 EVALUACIÓN DE POTENCIAL PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA
- 5.1.5 CLASIFICACIÓN DE PROCESOS DE FABRICACIÓN PERSONALIZADA

5.2 PROCESOS DE CORTE

- 5.2.1 PROCESOS DE CORTE A PEQUEÑA ESCALA
- 5.2.2 CORTE DE MADERA: ASERRADO Y FRESADO
- 5.2.3 CORTE DE PIEDRA: ASERRADO, FRESADO Y CORTE POR CHORRO DE AGUA
- 5.2.4 CORTE DE METAL: FRESADO, CORTE LÁSER Y CORTE POR PLASMA

5.3 PROCESOS SUBTRACTIVOS

- 5.3.1 FRESADO A PEQUEÑA ESCALA
- 5.3.2 FRESADO DE MADERA

5.4 PROCESOS FORMATIVOS

- 5.4.1 PROCESOS DE DEFORMACIÓN MECÁNICA
 - 5.4.1.1 ESTAMPACIÓN DE METAL
 - 5.4.1.2 DEFORMACIÓN DE MADERA
 - 5.4.1.3 DEFORMACIÓN DE VIDRIO EN FRÍO

⁵⁴"The easy part is to get what it can do conceptually; the hard part is to understand the total freedom it offers."
Traducción de la autora. (V.Iovine, 2010).

- 5.4.2 PROCESOS DE FORMADO POR MOLDEO
 - 5.4.2.1 TERMOFORMADO DE VIDRIO
 - 5.4.2.2 FORMADO POR MOLDEO DE MATERIALES COMPUESTOS
 - 5.4.2.3 MOLDEO CON MOLDES RECONFIGURABLES
- 5.5 PROCESOS ADITIVOS**
 - 5.5.1 IMPRESIÓN 3D A PEQUEÑA ESCALA
 - 5.5.2 IMPRESIÓN 3D A GRAN ESCALA
- 5.6 FABRICACIÓN ROBOTIZADA**
 - 5.6.1 FABRICACIÓN ROBOTIZADA A PEQUEÑA ESCALA
 - 5.6.2 FABRICACIÓN ROBOTIZADA A GRAN ESCALA
- 5.7 OBSERVACIONES**
- 5.8 CONCLUSIONES PARCIALES**

La primera parte de la tesis está dedicada al análisis de los principales procesos de fabricación personalizada utilizados en la construcción industrializada. Estos procesos se ilustran mediante la visita a fábricas especializadas en Europa la información recabada resulta de la combinación de una consulta documental (consulta de artículos, libros, ponencias...), con el aprendizaje recibido en las visitas.

El objetivo de este capítulo es contribuir al estado del arte de la industrialización personalizada en la construcción, evaluando el potencial y limitaciones de cada proceso para la personalización en masa.

5.1 METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS

En este apartado, se explica la metodología del análisis realizado para los procesos de fabricación personalizada.

En primer lugar, se hace una clasificación de los procesos más extendidos en la industria de la construcción: éstos pueden ser procesos realizados a pequeña escala (para la fabricación de objetos de pequeño tamaño), o a escala industrial (para la fabricación de componentes para edificios). Los procesos a pequeña escala se ilustrarán con una serie de ejemplos; mientras que los procesos a escala industrial se ilustran con la visita a una industria especializada.

Para cada fábrica visitada, se recaba la siguiente información:

- **datos generales:** creación, localización y tamaño de la empresa; mercado cubierto y servicios ofrecidos;
- **producción:** tipo y aplicaciones del producto fabricado, material, acabados y geometrías posibles; coste del producto y factores influyentes en el coste;
- **descripción del proceso de fabricación** y del proceso desde el diseño del proyecto hasta el montaje del edificio;
- **filosofía de la empresa** para la fabricación personalizada.

Tras describir la empresa y su producto de forma general, se analizará el proceso de fabricación a través de una serie de criterios que se explican a continuación. Al final de cada sección, el análisis se sintetiza en forma de fichas.

5.1.1 GUIÓN DEL ANÁLISIS Y DESCRIPCIÓN DE CRITERIOS

Esta tesis parte del cuestionamiento del paradigma de la personalización generalizada en el sector de la edificación. Como se ha visto en el capítulo 3.1., la personalización generalizada se basa en la combinación de una producción eficiente de grandes volúmenes con una personalización que responda a las necesidades de cada cliente (Vilana Arto, 2006).

Por lo tanto, el potencial para la personalización en masa se va a evaluar en función de dos puntos: la **eficiencia de la producción** y el **potencial para la personalización**.

$$\text{A.POTENCIAL PARA PERSONALIZACIÓN} + \text{B. EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN} \\ = \text{C. PERSONALIZACIÓN EN MASA}$$

Se analizan por tanto dos factores:

- **A. potencial para la personalización:** ¿qué es posible fabricar?
- **B. eficiencia de la producción:** ¿qué es posible generalizar?

fig. 5-1:
Esquema de la metodología de análisis de los procesos de fabricación personalizada.

5.1.2 ¿QUÉ ES POSIBLE FABRICAR?: POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN

A.POTENCIAL PARA PERSONALIZACIÓN + B. EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN = C. PERSONALIZACIÓN EN MASA

En este apartado, se definen las características físicas que permite cada proceso de fabricación, y se determinan los límites que debe tener el diseño.

A.1. POSIBILIDADES MATERIALES

- **A.1.1. Materiales posibles:** se definen los materiales que se pueden utilizar, las alteraciones posibles y las características del material (prestaciones, características mecánicas, físicas y químicas; posibilidades de utilización)
- **A.1.2. Cortes internos:** posibilidad de realizar cortes, por ejemplo para huecos de ventana en una fachada
- **A.1.3. Acabados y texturas:** se determina la posibilidad de personalizar los acabados⁵⁵
- **A.1.4. Prestaciones:** se describen las prestaciones del material, y la posibilidad de modificarlas
- **A.1.5. Montaje:** se describen, en su caso, las particularidades de los sistemas de montaje
- **A.1.6. Utilización de moldes:** se determina si es necesario su utilización, se define el tipo de molde y la posibilidad de reutilización

A.2. POSIBILIDADES GEOMÉTRICAS

- **A.2.1. Tamaño máximo de componente:** se determinan la altura, el ancho y el espesor máximo admisibles por el proceso de fabricación o transporte
- **A.2.2. Tolerancias:** se definen las tolerancias a tener en cuenta bien durante el proceso de fabricación, bien durante el montaje
- **A.2.3. Curvatura:** se define la fabricar componentes con curvatura, y los límites de curvatura permitidos, ya sea simple o doble

A. POTENCIAL PARA PERSONALIZACIÓN

A.1. POSIBILIDADES MATERIALES

A.1.1. MATERIALES POSIBLES

A.1.2. CORTES INTERNOS

A.1.3. ACABADOS Y TEXTURAS

A.1.4. PRESTACIONES

A.1.5. MONTAJE

A.1.6. UTILIZACIÓN DE MOLDES

A. POTENCIAL PARA PERSONALIZACIÓN

A.2. POSIBILIDADES GEOMÉTRICAS

A.2.1. TAMAÑOS MÁXIMOS

A.2.2. TOLERANCIAS

A.2.3. CURVATURA

⁵⁵La personalización de acabados y texturas es posible, por ejemplo, a partir de mediante alteraciones mecánicas (tallado, fresado, pulido, arenado...), alteraciones químicas, aplicación de tratamientos, o coloraciones del material.

5.1.3 ¿QUÉ ES POSIBLE GENERALIZAR?: EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN

$$\text{A. POTENCIAL PARA PERSONALIZACIÓN} + \text{B. EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN} \\ = \text{C. PERSONALIZACIÓN EN MASA}$$

Para evaluar la eficiencia de un proceso de fabricación personalizada, es necesario evaluar las fases que rodean el proceso de fabricación: la fase de diseño a fabricación, la fase de fabricación, y la fase de la fabricación hasta el transporte y montaje de piezas, todas influyentes en la eficiencia, el coste y los plazos globales. Para cada proceso de fabricación, se analizará por tanto la eficiencia en cada fase.

B.1. FASE DE DISEÑO A FABRICACIÓN: COMUNICACIÓN ENTRE ARQUITECTO Y FABRICANTE

La fase de diseño a fabricación se inicia cuando el arquitecto, el constructor o el responsable de obra contactan con el fabricante para poner en marcha la producción de una serie de componentes del edificio. Se evalúan los siguientes aspectos:

- **B.1.1. Comunicación entre diseñador y fabricante:** para evaluar la eficiencia en la fase previa a fabricación, es fundamental entender el tipo de relación de trabajo entre el diseñador y el centro de producción⁵⁶. Aunque esta relación es distinta entre cada industria y cada arquitecto, para hacer una clasificación del modo de comunicación, se utilizarán los ejemplos observados en las visitas realizadas, que se clasifican en los siguientes tipos:
 - **A. Transferencia directa del diseño al fabricante**⁵⁷: el arquitecto traslada el diseño final al fabricante, y éste se ocupa de materializarlo.
 - **B. Proceso "de idas y vueltas"**⁵⁸: el arquitecto traslada al fabricante su diseño, el cual propone una solución, la transmite al arquitecto con modificaciones, y vice-versa.

⁵⁶Es a menudo en esta fase donde se pierde mayor tiempo, bien por la falta de conocimiento del arquitecto, bien por la baja transferencia de información por parte de la industria, o incluso por la incompatibilidad de archivos entre arquitectos y fabricantes. Uno de los objetivos de esta tesis es entender y facilitar esta comunicación, para aumentar la eficiencia del proceso.

⁵⁷Traducción por la autora del término en inglés "over the fence design"; Este término se traduciría de forma literal por "diseño tirado sobre la valla". Esta expresión, utilizada por algunos fabricantes y consultores, explica de forma literal la manera en que algunos arquitectos les transmiten sus diseños para la fabricación, sin existir intención de realizar un trabajo colaborativo posteriormente.

El riesgo de esta práctica es que el diseño esté avanzado y los criterios de fabricación se incorporen demasiado tarde, y a resultas los cambios en el diseño obliguen a alargar plazos y costes.

⁵⁸Traducción por la autora del término en inglés "back and forth process". Este puede ser un proceso largo y complicado, que puede resultar en un diseño que se desvíe de la intención original.

- **C. Proceso con intermediarios:** en este caso, consultores expertos en procesos de fabricación y diseño computacional hacen de intermediarios entre arquitecto y fabricante⁵⁹.
 - **D. Comunicación de parámetros de fabricación:** el fabricante comunica a los arquitectos los parámetros que tiene que tener en cuenta para que el diseño sea realizable⁶⁰.
 - **E. Proceso interactivo y cooperativo:** el fabricante comunica información de fabricación al arquitecto, e incluso comparte con él un modelo digital 3d para coordinar el proceso⁶¹.
- **B. 1. 2. Comunicación del diseño con la fabricación:** en este punto se describe el proceso de preparación de dibujos y de exportación de archivos para fabricación, incluso la utilización de determinados software, la racionalización y optimización del diseño para fabricación, y las simulaciones realizadas.

B.2. PROCESO DE FABRICACIÓN

Una vez el diseño transmitido al fabricante y listo para la producción, comienza la fase de fabricación. Una fabricación eficiente se basa en los siguientes factores:

- **B.2.1. tipo de proceso de fabricación:**
 - **A. Procesos manuales:** procesos realizados por operarios de forma manual⁶².
 - **B. Procesos mecánicos:** se realizan por máquinas controladas por operarios cualificados, y utilizan dispositivos mecánicos, hidráulicos, neumáticos o eléctricos.
 - **C. Procesos automáticos:** los sistemas de manufactura y procesamiento funcionan de forma automática, siguiendo una secuencia predeterminada de operaciones con baja o nula participación humana (Kalpakjian et al., 2014).
 - **D. Procesos por control numérico⁶³:** el control de la maquinaria se realiza mediante herramientas de control numérico (CNC), y

B. POTENCIAL PARA GENERALIZACIÓN
B.2. FABRICACIÓN
B.2.1. TIPO DE PROCESO
A. MANUAL
B. MECÁNICO
C. AUTOMÁTICO
D. CONTROL NUMÉRICO (CNC)
B.2.2. VELOCIDAD DE FABRICACIÓN

⁵⁹ En el proceso de comunicación con intermediarios, los consultores pueden trabajar como subcontratistas bien del arquitecto o bien del fabricante, lo cual puede suponer un aumento de coste en el proyecto.

⁶⁰ En este caso, la transparencia en la comunicación facilita enormemente el proceso, dado que desde el principio, el diseñador conoce los factores que debe tener en cuenta en el diseño. Por otro lado, la comunicación de parámetros también puede limitar la libertad creativa del arquitecto.

⁶¹ Al existir un intercambio constante de información entre arquitectos y fabricantes, el diseño puede resolverse de forma colaborativa, los criterios de fabricación se incorporan en la fase inicial del proyecto, y el proceso es más eficiente.

⁶² Aunque esta tesis analiza preferentemente la fabricación personalizada mediante procesos digitales, todavía existen muchos procesos de fabricación personalizada que se realizan de forma manual. Éstos se han incluido para hacer un barrido lo más completo posible, y además entender los factores, y las posibilidades de optimización.

⁶³ Con los procesos por control numérico se alcanza un alto grado de automatización, dado que la máquina puede realizar varios procesos seguidos que están previamente programados. Los procesos

en el proceso se utilizan de forma generalizada sistemas de comunicación y software digitales (Kalpakjian et al., 2014).

- **B.2.2.Velocidad de fabricación:** se indica la velocidad del proceso de fabricación en cada fase, donde se disponga de datos.
- **B.2.3. Flexibilidad del sistema de producción:** se describe la configuración del sistema productivo, es decir, la organización de maquinaria, la escala del taller, y la filosofía en la fabricación, que son factores determinantes en la capacidad de producción y la flexibilidad de la fábrica. Los sistemas se pueden clasificar por orden creciente de capacidad de producción, de la siguiente manera (Kalpakjian et al., 2014):
 - **A. Taller de fabricación**⁶⁴: taller con maquinaria de uso general, con alta participación de operarios.
 - **B. Unidad de producción autónoma de control numérico**⁶⁵: el taller dispone de maquinaria de control numérico, con una alta interacción entre las máquinas y los operarios.
 - **C. Celdas de manufactura**⁶⁶: la fábrica dispone de celdas de fabricación que contienen grupos de máquinas controladas por computadoras, y a menudo con robots industriales.
 - **D. Sistemas de manufactura flexible**⁶⁷: combinan varias celdas de manufactura que trabajan de forma simultánea, utilizan control numérico en todos los aspectos de la fabricación, y disponen de maquinaria de traslado automatizado de materiales.
 - **E. Líneas de manufactura flexible:** la producción se realiza en líneas de trabajo controladas por control numérico en lugar de celdas individuales. El traslado de material de una zona a otra puede ser automático y el volumen de producción es mayor que en los sistemas de manufactura flexible.
 - **F. Líneas de flujo:** son grupos organizados de maquinaria con traslado automático entre máquinas de baja flexibilidad, diseñadas para la producción en masa⁶⁸.
- **B.2.4 volumen de producción:** Kalpakjian (2014) clasifica los distintos tipos de volumen de producción de la siguiente forma (p.24):

son rápidos, exactos y flexibles, y la fabricación puede ser programada de forma individual para componentes personalizados. Este tipo de procesos favorecen la posibilidad para la personalización en masa.

⁶⁴ Traducción por la autora del término en inglés *job shops*.

⁶⁵ Traducción por la autora del término en inglés *stand-alone NC production*.

⁶⁶ Traducción por la autora del término en inglés *manufacturing cells*.

⁶⁷ Traducción por la autora del término en inglés *flexible manufacturing systems*.

⁶⁸ En la fabricación personalizada no suelen darse este tipo de sistemas de producción.

- **A. Experimental o prototipos:** producción de 1-10 unidades/año.
- **B. Lote pequeño**⁶⁹: producción de 10-100 unidades/año; fabricación con maquinaria general multi-uso, a menudo equipada con CNC.
- **C. Lote mediano**⁷⁰: producción de 100-500 unidades/año; utilización de maquinaria avanzada CNC.
- **D. Producción en masa:** producción de más de 100,000 unidades / año; empleo de maquinaria especializada y de equipamiento automatizado.

- **B.3.Proceso de fabricación a montaje**

Una vez la fabricación finalizada, las piezas o módulos prefabricados se transportan a obra, donde se montan y se rematan hasta la compleción del edificio. Factores como el transporte, la logística y el montaje pueden influir en decisiones del diseño, por lo que deben tenerse en cuenta:

- **B.3.1. Parámetros de transporte:** tamaño de vehículo, condiciones de transporte y embalaje⁷¹.
- **B.3.2. Sistema de montaje:** diseño de un sistema de montaje adaptado al componente singular. Se consideran las siguientes características de la instalación:
 - **Velocidad de instalación**
 - **Tipo de instaladores:** necesidad de especialistas o posibilidad de montaje por instaladores no especializados.
 - **Tipo de accesorios:** fabricación de accesorios especiales o utilización de accesorios estándar.
 - **Acabados:** acabados y remates a realizar en obra tras el montaje.

⁶⁹ Traducción por la autora del término en inglés *job shops*.

⁷⁰ Traducción por la autora del término en inglés *batch production*.

⁷¹ El transporte, ya sea en camión, barco o contenedor a menudo es el factor que limita el tamaño máximo de fabricación en mayor medida que la maquinaria; también hay que tener en cuenta la necesidad de un embalaje especial (por ejemplo, para el diseño y fabricación de cajas especiales para piezas frágiles).

5.1.4 EVALUACIÓN DE POTENCIAL PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA

$$\text{A. POTENCIAL PARA PERSONALIZACIÓN} + \text{B. EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN} = \text{C. PERSONALIZACIÓN EN MASA}$$

Tras evaluar las características de cada proceso de fabricación, se define el potencial para la personalización en masa, mediante los siguientes pasos:

C.1. IDENTIFICACIÓN DE LOS FACTORES INFLUYENTES EN LA EFICIENCIA DE LA PRODUCCIÓN.

Éstos incluyen los factores influyentes en los plazos, el coste y la utilización del material; los factores influyentes en la ineficiencia en el proceso, así como la identificación de criterios a tener en cuenta por el arquitecto para facilitar el proceso de la personalización generalizada.

- **C.1.1. Factores económicos**

- **Factores influyentes en el coste:** incluyen factores del diseño que pueden encarecer el coste del producto.⁷²
- **Precios de venta:** se procura dar una idea del precio de venta del producto personalizado comparado con estándar.⁷³

- **C.1.2. Factores materiales**

- **Desperdicio de material:** se identifican las causas de desperdicio del material y las posibles estrategias para evitarlas.
- **Necesidad de moldes:** la utilización de moldes implica un mayor desperdicio; en caso de utilizarse moldes, se evalúa si éstos son reutilizables, y se identifican factores para un proceso más eficiente.

- **C.1.3. Factores temporales**

Se describen los factores influyentes en los plazos y las recomendaciones para agilizar el proceso:

⁷²Los factores influyentes en el coste pueden ser el tipo de personalización del producto, el tipo de acabado, las operaciones realizadas, el tiempo de maquinado o la necesidad de mano de obra, entre otros,.

⁷³El precio de los componentes resulta generalmente difícil de averiguar es, dado que por un lado, éste depende de muchos factores y a menudo se realiza caso a caso, y por otro, a menudo esta información es confidencial. Cuando no se dispone de este dato, se ha procurado identificar las causas de incrementos y las recomendaciones del fabricante para reducir el precio.

- **En el proceso de diseño a fabricación:** se define la duración del proceso de preparación de archivos y el potencial para mejorar la comunicación entre arquitectos y fabricantes.
- **En el proceso de fabricación:** se identifican detalles que complican el proceso, y operaciones para agilizar la fabricación.
- **En el proceso de montaje:** se define la velocidad y facilidad para el montaje, según el sistema sea estándar o personalizado, según el tamaño de componentes y según el grado de prefabricación.

C.2. POTENCIAL PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA

Para determinar el potencial para la personalización en masa, se evalúan los siguientes factores:

- **C.2.1. Eficiencia general:** se valora la eficiencia general del proceso, y se identifican aspectos para mejorarla.
- **C.2.2. Toma de decisiones por el diseñador:** se identifican, para cada proceso, decisiones sobre el diseño que faciliten la producción:
 - **Decisiones sobre la geometría:** características de la geometría que afecten a la fabricación.⁷⁴
 - **Decisiones sobre los acabados**⁷⁵: características de los acabados que afecten a la fabricación.
 - **Decisiones sobre materiales**⁷⁶: características de los materiales que afecten a la fabricación.
- **C.2.3. Toma de decisiones por el fabricante:** se definen líneas de exploración mejora de los procesos existentes:
 - **Fabricación manual:** en el caso en que la fabricación incluya secciones de trabajo manual, se definen posibilidades de optimización del proceso.
 - **Fabricación digital o CNC:** se sugiere la introducción de herramientas digitales en otras partes del proceso y se mencionan factores a consideraren las operaciones de fabricación digital.

C. POTENCIAL PARA PERSONALIZACIÓN EN MASA

C.2. POTENCIAL PARA PERSONALIZACIÓN EN MASA

C.2.1. EFICIENCIA

C.2.2. DECISIONES POR DISEÑADOR

C.2.3. DECISIONES POR FABRICANTE

⁷⁴Las decisiones sobre la geometría pueden referirse a limitaciones en los tamaños o en la curvatura de los componentes, o aprovechamiento de la materia prima.

⁷⁵ Por ejemplo, un diseño con una textura detallada aumenta el tiempo de fresado de un tablero de madera contralaminada, y por tanto encarece el producto.

⁷⁶En la fabricación, es importante tener en cuenta las características específicas del material: por ejemplo, respetar la continuidad de la fibra en las vigas de madera.

- **C.2.4. Tipo de personalización en masa⁷⁷**

- **A. Personalización modular:** personalización mediante la combinación de módulos estándar.
- **B. Personalización ajustable:** producto estándar con posibilidades de ajuste por parte del usuario.
- **C. Personalización cosmética:** personalización mediante cambios superficiales en la estética del producto
- **D. Personalización dimensional:** fabricación a medida.
- **E. Personalización material:** customización del material.

En base a los criterios enumerados, el análisis de cada proceso se expone en unas tablas sintéticas al final de cada sección.

En estas tablas, se describen y valoran los criterios uno a uno, y se con una evaluación del potencial para la personalización en masa del cada proceso de fabricación.

La valoración se indica de la siguiente forma:

Valoración positiva
Alto potencial
Valoración neutra
No aporta valor especialmente o es una combinación de puntos positivos y negativos
Valoración negativa
Bajo potencial o imposibilidad

⁷⁷Esta clasificación corresponde con los tipos de fabricación en masa definidos en el capítulo 3.1.2

5.1.5 CLASIFICACIÓN DE PROCESOS DE FABRICACIÓN PERSONALIZADA

En su libro *Architecture in the Digital Age. Designing and Manufacturing*, Branko Kolarevic (2005) identifica la personalización generalizada en la arquitectura con la utilización de procesos de fabricación de control numérico (CNC) (p.52). El autor clasifica los procesos de personalización en masa de la siguiente forma (p.34-46):

- **Procesos de corte o fabricación bidimensional:** corte de elementos planos con varias técnicas (corte mecánico, térmico, o por líquidos a alta presión).
- **Procesos substractivos:** substracción de un volumen de material de un sólido mediante procesos eléctricos, químicos o mecánicos.⁷⁸
- **Procesos formativos:** deformación geométrica de un material mediante aplicación de fuerzas mecánicas, calor, vapor o moldes⁷⁹. Los procesos formativos se pueden dividir en dos familias: los procesos de deformación mecánica, basados en la deformación por fuerzas mecánicas, y los procesos de formado por moldeo, por los que se definen geometrías al aplicar sustancias líquidas sobre un molde.
- **Procesos aditivos:** creación de un volumen por superposición de material capa a capa⁸⁰.

En esta tesis, además de estas cuatro familias, se analizarán con especial atención los **procesos de montaje robotizado**. Estos procesos, que se han desarrollado con especial intensidad en los últimos años, exploran las capacidades de los robots para la fabricación y el montaje automatizados. Al ser procesos que no se limitan a ninguna de las anteriores familias, se dedicará una sección especial en la tesis.

⁷⁸ Estos dos tipos de procesos, de corte y substractivos, se basan en la eliminación de material ya sea por arranque de viruta o por abrasión, y se llaman también procesos de maquinado (traducción de los términos en inglés *material removal methods or machining*)¹(Schodek, Bechthold, & Griggs, 2004)).

⁷⁹ Según la clasificación de Kolarevic, éstos incluyen los procesos *de moldeo, deformación, conformación y fundición* (traducción de los términos en inglés: *molding, deformation and casting*).

⁸⁰ Estos procesos se denominan también procesos de fabricación por capas, fabricación solida de forma libre, o procesos de prototipado rápido (Kolarevic, 2005).

Todos estos procesos se dividen a su vez en dos tipos de procesos:

- **Procesos directos:** el material se procesa de forma directa para conseguir el objeto final, sin necesidad de elementos intermedios. Éstos incluyen:
 - procesos de corte
 - procesos substractivos
 - procesos aditivos y de montaje
 - procesos formativos por deformación mecánica
- **Procesos indirectos:** es necesario un molde para generar una geometría. Incluyen los procesos formativos por calor o vapor y los de moldeo.

PROCESOS DIRECTOS

Tabla 2: Clasificación de procesos de fabricación personalizada: procesos directos.

CLASIFICACIÓN		PROCESO		MATERIAL		GEOMETRÍA				EJEMPLOS		EVALUACIÓN	
FAMILIA		PROCESO	PRINCIPIO	MATERIAL	MOLDE	potencial	tamaño max.	espesores	radios curvatura	EJEMPLOS / APLICACIONES	INDUSTRIAS	PRINCIPIO	
CORTE	CNC 2D	corde por laser	corde por calor	madera, metal fino, plastico	NO	2D	1200mm x 900	metales <13mm	-	maquetas, pabellones universitarios	Fablabs	facil, rapido y exacto, pero espesores bajos	personalización en masa
		corde por agua a presión	corde por agua con material abrasivo	metal, composites, piedra, plasticos y vidrio	NO	2D	habitual 1,5m x 3m	< 45cm	-	piedra Opera Oslo	Campolonghi	cualquier material, espesores grandes, pero aparatos y costoso	procesos de diseño a fabricación digital mas establecidos en arquitectura, comunicación con diseño directa o mediante conversión de archivos. Potencial para personalización en masa
		corde por plasma	corde por calor	aceros, hasta 30mm, materiales conductores	NO	2D	tamaño de base	<160mm	-	Museo San Telmo, pabellón Porsche	Centralstaal/ Proiek	corta materiales duros rapido	procesos de diseño a fabricación digital mas establecidos en arquitectura, comunicación con diseño directa o mediante conversión de archivos. Potencial para personalización en masa
		corde CNC por routing	corde por fresado	madera, plastico	NO	2D	tamaño de bases, 8-15,5 x 2,95 (KLH)	< 50mm (KLH)	-	viviendas de paneles contraluminales	BFH, KLH	preciso, incorpora varios cabezales (sierra, fresa,...)	personalización en masa
FRESADO	fresado	fresado 3D	subtracción de materia por fresa rotativa	madera, espumas, metales, piedra	NO	3D a partir de espesor de material	< 15,1m x 9m (EEW)	longitud de fresa, < 425m (EEW)	-	molde para acrílico de pabellón BMW	Blumer-Lehmann, Ducret-Orges	proceso lento utilizado para moldes	procesos lentos aunque con nivel de detalle muy alto. Proyecto reciente a gran escala
		tallado 3D lateral	subtracción de materia por fresa rotativa	madera	NO	3D a partir de espesor de material	< 9m largo (Blumer-Lehmann)	depende de longitud de fresa	-	vigas Yagui Golf Club, Centre Pompidou Metz	Blumer-Lehmann, Ducret-Orges	complemento para conseguir doble curvatura con vigas curvadas	procesos lentos aunque con nivel de detalle muy alto. Proyecto reciente a gran escala
		sinterización por laser (laser sintering)	capas de polvo fundidas y aglomeradas con laser	polvo de polimeros, poliestireno, metales, composites	NO	geometría libre	700x380x600 mm (Paramountind)	0,15mm (shapeways)	-	maquetas, mayor rango de materiales	Materialize Belgium, 3d systems	mayor definición y mayores cantidades	procesos lentos aunque con nivel de detalle muy alto. Proyecto reciente a gran escala
		estereolitografía (SLA)	foto-solidificación	resina fotocurable	NO	geometría libre	2100x700x800 mm (materialize)	0,05 mm to 0,15 mm	-	maquetas, prototipos	Materialize Belgium, 3d systems	mayor rango de materiales	procesos lentos aunque con nivel de detalle muy alto. Proyecto reciente a gran escala
ADITIVO	impresión 3D	impresión 3D con hormigón	aplicación de hormigón por cabezal y posterior endurecido	hormigón	NO	fabricación libre de componentes estructurales	2m x 2,5m	5m	-	piezas estructurales	Loughborough USC	potencial para aumentar de escala, menor precisión	basado en fabricación personalizada en masa
		montaje robotizado	montaje robotizado de módulos	madera, ladrillos	NO	estructuras completas 3D con piezas sencillas	3x3x8m con ladrillo (Rob Technologies)	-	-	estructura con piezas de madera encoladas y atornilladas	Rob Technologies, ETHZ, BFH, Ernt-Holzbau, Onlywood	posicionamiento exacto, flexibilidad de áreas	basado en fabricación personalizada en masa
		plegado de chapa, curvado de perfiles 2D/3D	maquinaria específica para plegado y curvado de chapas y perfiles	acero	NO	plegado 2D	habitual 5m largo	de 0,3 a 5,5mm	depende de espesor y ductilidad	habitual en plegado de chapa metálica	generalizando	proceso generalizado en industria	principio de personalización en masa, semi-manual
		estampación de chapa	estampación en prensas de distintos tonelajes	acero, aluminio,	NO	3D, curvatura simple y doble, sin textura	12 x 3,5m	de 4mm hasta 8-10mm	en función de espesor de chapa	Media Centre Lord's, Cricket Ground, pabellón Porsche	Centraalstaal	cada pieza distinta, gran flexibilidad geométrica pero costoso	posible trabajar material después
FORMATIVO	mecánico	madera laminada curva	madera laminada deformada por	madera	NO	3D, curvatura simple	36m x 2000 (ROTH Burgdorf)	max. 240 mm (ROTH Burgdorf)	en función de espesor de tabla	aeleey Nine Bridges Golf Clubhouse	Ducrot-Orges, Neuhofbau, Roth	grandes dimensiones, aplicaciones estructurales	posible trabajar material después
		curvado de vidrio en frío	laminas de vidrio se deforman por presión mecánica	vidrio	NO	3D, curvatura simple y doble	6,1 x 3,6 (Interactive corp.)	45cm (Interactive corp.)	en función de tamaño y espesor	Floride Pavilion, Interactive Corp. Gehry	Octatube	deformación in situ	no aplica a prefabricación

PROCESOS INDIRECTOS

Tabla 3: Clasificación de procesos de fabricación personalizada: procesos indirectos.

CLASIFICACIÓN		PROCESO		MATERIAL		GEOMETRIA				EJEMPLOS		EVALUACIÓN		
FAMILIA		PROCESO	PRINCIPIO	MATERIAL	MOLDE	potencial	tamaño max.	espesores	radios curvatura	EJEMPLOS / APLICACIONES	INDUSTRIAS	PRINCIPIO	personalización en masa	
FORMATIVO	moldeo	moldeo manual	aplicación de material fluido sobre molde	GRP, GRC, GRG	SI	3D, geometría depende de molde	en función de molde, criterio de transporte	GRG 4mm, GRC	corte de molde para extraer pieza	Oskampus (GRC)	Poly Products, Vari	proceso artesanal costoso, gasto de material		
		moldeo por spray	spray de composite atomizado sobre superficie		SI	3D, geometría depende de molde	en función de molde o in situ	0.2mm en pintura metalizante	-	Dorchester Collection's 45 park lane hotel	Luminaire	acabado in situ	mayor flexibilidad geométrica pero procesos muy artesanales, necesidad de automatización para personalización en masa	
		aspirado a un molde	aspiración de material en molde	GRP	SI	3D, geometría depende de molde	1900x 900 x 750 mm (materialize)	>1 mm, habitual 2.5 to 10 mm.	corte de molde para extraer pieza	piezas en serie por proceso automatizado	Poly Products, Materialize Belgium	potencial para automatización de moldeo, pero piezas en serie		
	termoformado	vidrio curvado templado	proceso de calentamiento, curvatura y rápido enfriamiento del vidrio	vidrio	SI	3D, curvatura simple	2440 x 5000 mm (CRICURSA)	espesor depende de radio de curvatura	doble curvatura, radio de 1 a 2m	Bodigas Protos, Torre Iberdrola, Denver Art Museum	Cricursa, Control Glass	mas generalizado pero solo piezas cilíndricas		
		vidrio curvado recocido	calentamiento lento vidrio sobre molde	vidrio	SI	3D, curvatura simple y doble	2950 x 7000 mm (CRICURSA)	4 a 25mm	max. 180º, radio min. 100mm	en función de molde	Hospital Rey Juan Carlos	Cricursa, Rifaiglass	mas flexibilidad geométrica pero proceso mas largo	fabricación especial industrial, difícil generalizar personalización
		plástico termoformado	calentamiento de plástico sobre molde en autoclave, estiramiento y enfriamiento	acrilico, pletileno, polipropileno, PVC	SI	3D, complejidad limitada	0.002 - 0.25 in	0.1 a 12 mm	en función de molde	en función de molde	estación funicular Hungerburg	Evonik Ploglas	necesidad de hornos o autoclaves	
	explosivo	explosion contra moldes	explosion subacuática contra moldes de hormigón armado	chapa metálica	SI	3D, curvatura simple y doble, con textura	hasta 10 x 2 m.	desde 0.3mm (aluminio) a 60mm	en función de molde	ING Amsterdam, teatro Castellum	Exploform	complicado y costoso, pero permite geometría con textura	bajo potencial para personalización en masa	
	moldes reconfigurables	moldeado al vacío	molde flexible adaptable a cualquier curva, combinado con molde de poliestireno	hormigón	SI	3D, geometría depende de molde	en exploración	hormigón de 25mm en LVMH	en exploración	en exploración	Fundación LVMH	Ductal Lafarge, Bonnasabla		
		moldeado al vacío	molde flexible reconfigurable con pistones	composites, termoplásticos, vidrio, hormigón	SI	membrana flexible	2,000 x 3,000 x 600	en exploración	radio estándar de 400mm	en proyecto		Adapa	en proceso o experimentación	potencial para optimizar los moldes y aumentar el grado de automatización
		moldes reciclables de cera	moldes de cera fabricados sobre superficie configurable	hormigón	SI	3D, geometría depende de molde	aprox. 1.5x1.5m	espesor de pieza de hormigón	doble curvatura, radio a partir de 0.5m	Hornacina de autobús Zurich	ETH Zurich			

5.2 PROCESOS DE CORTE

Los **procesos de corte por control numérico** son los más extendidos en el ámbito de la arquitectura tanto a pequeña como a gran escala. Estos procesos se basan en un mismo principio: se fija un componente plano en una mesa o plataforma, donde un cabezal realiza el corte siguiendo instrucciones dadas por datos numéricos. El dibujo del corte se define por el movimiento del cabezal, de la mesa, o de ambos.

Los procesos de corte se denominan también "procesos de fabricación 2D", dado que se aplican principalmente a componentes bidimensionales. Varían en función del material a tratar y del espesor de corte: para cortar un material específico, es necesaria una herramienta de un material más duro que el material tratado, o bien la utilización de un proceso eléctrico, térmico, químico, con láser, etc. (Kolarevic, 2005)

El corte se puede hacer bien en máquinas de uso único (máquinas de corte), bien en máquinas polivalentes (centros de mecanizado), capaces tanto de cortar un material o de substraer masa de éste. En el sector de la construcción, muchas industrias han incorporado maquinaria de corte CNC para materiales específicos (metal, vidrio, materiales compuestos, etc.), o bien centros de mecanizado (maquinaria que combina operaciones de corte y substracción) para madera y metal. Los centros de maquinado se analizarán en el capítulo 5.3.

Los procesos de corte tienen una serie de ventajas (Groover, 2007):

- se puede utilizar una amplia gama de materiales, desde metales a plásticos, vidrio o materiales compuestos.
- es posible producir formas geométricas de gran variedad y complejidad.
- son procesos más precisos que muchos otros, y se consiguen tolerancias muy bajas, de menos de ± 0.025 mm.
- se consiguen acabados de gran calidad.

Por otro lado, para algunos componentes producidos en serie, la fabricación por corte es más lenta que, por ejemplo, la fundición o moldeo en serie. Es un proceso que genera desperdicio con facilidad, por lo que es importante racionalizar la materia prima.

visitas realizadas

- madera: *KLH*
- piedra: *Campolonghi*
- metal: *Proiek*

estudio de caso

- metal: *Zahner*

fig. 5-2:
Corte por láser de madera

fig. 5-3:
Corte por láser de metal

fig. 5-4:
Corte por arco de plasma

fig. 5-5:
Corte de piedra por chorro de agua

Los sistemas de corte realizados en máquinas de uso único varían según el material, siendo los más comunes:

- **Corte por láser:** el corte se realiza por un cabezal que contiene un haz de alta intensidad o luz infrarroja mezclada con gas presurizado (Dunn 2012). En función de la potencia y del gas utilizado (helio, CO₂, oxígeno o nitrógeno), se pueden cortar materiales de distintos espesores.
 - o ventajas: económico, rápido, gran flexibilidad geométrica; por ello es el sistema más extendido a pequeña escala.
 - o materiales: cartón, madera, metales finos (hasta 13mm), plásticos.
- **Corte por arco de plasma:** el cabezal de corte contiene un arco eléctrico alterado por un gas comprimido a muy alta temperatura, con el que se funde una zona localizada del material.
 - o ventajas: corta piezas de gran espesor, hasta 160cm.
 - o materiales: metales, aceros de construcción hasta 30mm, materiales conductores
- **Corte por chorro a presión:** el corte se realiza por un chorro de agua a alta presión mezclada con un material abrasivo.
 - o ventajas: corta materiales duros.
 - o materiales: piedra, metal, composites, plásticos y vidrio.
- **Corte por diamante:** el cabezal de corte contiene una pieza recubierta con diamante policristalino o nitruro de boro cúbico, materiales producidos a partir de polvo de diamante que son los más resistentes utilizados en la industria.
 - o ventajas: rapidez, precisión.
 - o materiales: vidrio, fibra de carbono, fibra de vidrio, aleaciones metálicas, cerámicas.

5.2.1 PROCESOS DE CORTE A PEQUEÑA ESCALA

En los últimos años, la fabricación digital se ha extendido a pequeña escala en escuelas de arquitectura y laboratorios de fabricación digital. Las máquinas de corte láser, muy flexibles y de bajo coste, son las más utilizadas en talleres de fabricación, estudios de arquitectura y talleres de maquettistas profesionales para maquetas y objetos de pequeño tamaño.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

Entre los procesos de corte a pequeña escala, las máquinas más extendidas son las **máquinas de corte láser**, que permiten realizar diseños personalizados en una gran variedad de materiales.

Estas máquinas tienen las siguientes características:

- son relativamente pequeñas: suelen tener una superficie de trabajo de 120x60cm, con espesores de hasta 20mm en función de la potencia de la máquina;
- se puede cortar papel, cartón, plástico, madera, metales (aluminio, acero inoxidable, bronce), e incluso textiles;
- son una buenacombinación de alta precisión con rapidez, y se pueden fabricar geometrías complejas y muy detalladas;
- mediante el control de la intensidad del láser, se pueden realizar cortes, grabados o texturas en el material.

Para realizar cortes a pequeña escala, se utilizan también las máquinas de fresado CNC, que además de cortar, pueden dar relieve a las piezas mediante fresado. Su superficie habitual de trabajo es de aproximadamente 100 x 200 cm, y se pueden cortar espesores mayores que las máquinas láser, en función de la longitud de la fresa.

En función del tamaño de los laboratorios, éstos pueden incorporar también impresoras 3d o máquinas de carácter industrial (máquinas de corte por plasma, routers CNC, o robots).

EJEMPLOS

fig. 5-6:
CWall (Andrew Kudless Matsys
Design; Universidad de Ohio State;
2006)

fig. 5-7:
Voussoir Cloud (Iwamoto Scott;
SciArc, Los Angeles, EEUU; 2008)

fig. 5-8:
Corte con robot en ICD/ITKE
Stuttgart.

fig.5-9:
Pabellón ICD/ITKE Stuttgart 2010
(ICD/ITKE), Stuttgart, 2010).

En su libro *Digital Fabrications*, Lisa Iwamoto(2009) describe una serie de ejemplos fabricados a partir de la adición de piezas de pequeño tamaño, producidas mediante corte y fresado en laboratorios de fabricación digital con máquinas de fabricación digital a pequeña escala. Los proyectos, muchos de ellos proyectos académicos, se clasifican en distintas tipologías, en función de la operación de racionalización impuesta sobre la geometría para dar el paso a la fabricación: teselación, doblado, seccionado, plegado, contorneado, y formado.

Por otro lado, desde hace años, las escuelas de arquitectura han incorporado procesos de fabricación digital, y realizan con ellas exploraciones geométricas y materiales, pero también sobre la capacidad y combinación de los procesos productivos.

En el *Instituto de Diseño computacional* (ICD)de la Universidad de Stuttgart, los alumnos fabrican cada año un pabellón universitario con los robots del laboratorio de fabricación. En un principio, los robots se utilizaron para cortar piezas en madera mediante un cabezal de corte por fresa incorporado al robot (pabellones 2010-2011); estas piezas luego se numeraban y se montaban manualmente.

ANÁLISIS DEL PROCESO

Los laboratorios universitarios se han convertido en verdaderos centros de investigación en el campo del diseño y la fabricación digital. En este contexto, los sistemas de corte a pequeña escala permiten gran flexibilidad de materiales y geometrías, rapidez en el proceso, y, al producirse componentes de tamaño pequeño, una fácil manipulación y montaje. Además, la realización del diseño y la fabricación de los proyectos por las mismas personas facilitan y agiliza enormemente el proceso.

Actualmente, el potencial en el ámbito académico está en la combinación de herramientas y procesos, como por ejemplo la fabricación robotizada; también resulta muy interesante la colaboración de las universidades con industrias para aplicar sus sistemas experimentales a gran escala en la edificación.

5.2.2 CORTE DE MADERA: ASERRADO Y FRESADO

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

La madera es probablemente el material para el que la fabricación por CNC se ha extendido con mayor rapidez, por su fácil trabajo y manipulación. A día de hoy, es muy común que los talleres carpintería dispongan de centros de maquinado para madera.

El corte estándar de madera suele hacerse en máquinas de aserrado, donde se corta la madera rápidamente en piezas de tamaño predefinido. Para realizar cortes personalizados, en cambio, se suelen utilizar centros de maquinado multifuncionales CNC. Éstas son máquinas altamente automatizadas capaces de realizar multitud de operaciones bajo control numérico (Groover, 2007), y que combinan operaciones de aserrado, fresado, taladrado, perfilado o lijado.

Los centros de mecanizado suelen tener una mesa inmóvil, a la que se fija el tablero de madera con prensas o con ventosas, y un cabezal de maquinado móvil. Incorporan un tambor de almacenamiento de herramientas, que incluye fresas y sierras de distintos diámetros, al que accede el cabezal de maquinado de forma automática para realizar el cambio de herramientas entre operaciones.

El código de fabricación incorpora toda la información para obtener una determinada geometría: la lista de operaciones que se van a realizar, las herramientas que son utilizadas para cada operación, la velocidad de la operación, la geometría efectuada por cada herramienta, y el cambio de herramientas.

Para realizar el corte de madera, se pueden utilizar operaciones de aserrado o de fresado.

El corte con sierra se realiza generalmente con sierras circulares, aunque también existen sierras rectas o sierras flexibles. Las sierras circulares son rápidas y precisas, y se utilizan generalmente para cortes largos en línea recta. Las sierras son también herramientas idóneas para recortar los bordes de tableros o tablas, o bien para recortar bloques que a continuación serán tallados (Schodek, et al., 2004). Sin embargo, no son idóneas para cortes internos en el tablero, porque la geometría circular de la sierra impide rematar las esquinas del corte. En este caso, los remates se hacen por fresado o de forma manual. La profundidad máxima de corte depende del diámetro de la sierra.

El fresado consiste en la eliminación de material mediante fresas rotativas a gran velocidad, pudiéndose utilizar para cortar o para tallar un material. El corte por fresado se realiza al avanzar las fresas rotativas en una línea de

fig. 5-10:
Centro de mecanizado de madera a pequeña escala.

fig. 5-11:
Tambor de almacenamiento de herramientas para corte y fresado.

fig. 5-12:
Pantalla de control CNC en el centro de mecanizado.

corte. A diferencia del corte por sierra, este proceso se utiliza para cortes no lineales o irregulares en 2D, o para tallado tridimensional de madera. Es un proceso muy flexible que permite un alto nivel de detalle, pero también es un proceso lento en comparación con el aserrado.

Las fresas pueden ser de distintos diámetros, y éstos influyen en el detalle y la velocidad del proceso: a mayor detalle en el diseño, más lentitud en el proceso. La profundidad del corte por fresado está en función del alcance de la fresa o de la sierra, pudiendo llegar a 50cm. El proceso de fresado de madera se explicará con mayor detalle en el capítulo 0. Los cortes se pueden hacer también combinando operaciones: por ejemplo, en los cortes internos en un tablero se combina el aserrado en el corte de distancias largas con el fresado en el remate de esquinas y bordes.

En estas operaciones, los ejes de movimiento adicionales en la máquina permiten cortar o el tallar en distintos ángulos para fabricar geometrías tridimensionales de mayor complejidad.

DATOS

- **fecha de visita:** 16/07/2012.
- **localización:** Katsch and der Mur, Austria.
- **tamaño:** 135 empleados, de los cuales 100 en la fábrica.
- **mercado:** sector de la edificación.
- **servicio:** consultoría y fabricación en madera.

PRODUCCIÓN

- **producto:** paneles de madera contralaminada,
- **aplicaciones:** edificios de hasta 10 alturas.
- **volumen de producción:** 300m²/día, 80.000-85.000m³ al año, de los cuales el 70% es exportado.
- **material:** madera de pino en tablas macizas, proveniente de serrerías de la zona; madera de 19-40mm de espesor, secada al 12±2% de humedad.

DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Historia: *KLH* se funda en 1997. Tras explorarla fabricación de sistemas de prefabricación modular, *KLH* apostó por la especialización en un solo sistema constructivo, los paneles de madera contralaminada. *KLH* proporciona a sus clientes el material así como un sistema de montaje propio, que se describe en una serie de catálogos y detalles constructivos.

Servicios: los servicios de *KLH* incluyen el suministro del material, información detallada sobre el montaje y soporte técnico, que varía según el país. El montaje lo hacen montadores locales especializados.

Filosofía: El objetivo de la empresa es proporcionar la máxima personalización dentro de unos límites geométricos claros: “mientras los tableros sean bidimensionales y tratados en su fábrica, se puede hacer el tratamiento de corte/fresado que se quiera”⁸¹.

fig. 5-13:
Imagen aérea de la fábrica KLH.

fig. 5-14:
Fotografía de la fábrica KLH.

fig. 5-15 y fig. 5-16:
Biblioteca en Vennesla (Helen & Hard; Vennesla, Noruega; 2011).

fig. 5-17:
Bloque de viviendas en Judenburg (Mark Mach; Judenburg, Austria)

⁸¹Información proporcionada durante la visita a KLH.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

1. Diseño a fabricación

KLH comunica de forma detallada los principios constructivos en forma de catálogos descargables en su página web, para que arquitectos o carpinteros puedan adaptar sus proyectos. En estos catálogos, *KLH* proporciona información detallada sobre los parámetros geométricos de fabricación: tamaños y espesores máximos, posibles acabados, y tolerancias a tener en cuenta, entre otros, que sirven para ajustar el diseño a la fabricación.

Una vez recibida la solicitud de fabricación por parte del cliente, *KLH* aporta consejo técnico, hace una propuesta, un predimensionado y una primera estimación de coste. Después, el arquitecto o calculista realiza el dimensionado final con un software suministrado por *KLH*, descargable en la web. En España, el dimensionado lo hará el estructurista o arquitecto responsable del proyecto; en cambio en Francia, la filial de *KLH* tiene un calculista de estructuras en la plantilla de su filial.

El pedido de material se hace una vez confirmado el encargo. Cada tablero que *KLH* compra está adjudicado desde su llegada a fábrica a un proyecto determinado. Por tanto lo ideal es optimizar un panel para un solo proyecto. Aunque se podrían juntar varios proyectos por tablero esto no se suele hacer debido a la necesidad de controles de calidad diferenciados, lo cual aumenta el desperdicio.

2. Fabricación

Tras un primer control visual y una selección de las tablas según su contenido de humedad, resistencia y calidad de la madera, éstas se unen para conseguir tableros de gran tamaño (hasta 16.5m). La unión de tablas se hace por empalme testa dentada durante aproximadamente una hora.

A continuación, se realiza el proceso de contralaminado, mediante superposición de capas de tablas en distintas direcciones para conseguir tableros de gran formato. Las tablas se encolan bajo presión de 6 kg/cm², y el número de capas depende del espesor de tablero deseado. El encolado se hace con cola de poliuretano en dos líneas de encolado automáticas. En la línea más rápida, se tardan 12 minutos en encolar, y a continuación, se prensan durante 1 hora.

Tras el encolado de tablas, los tableros son procesados de forma personalizada. El corte de tableros se hace en 3 centros de mecanizado CNC de 5 o 6 ejes, que contienen sierras, fresas y taladros de distintos diámetros. Las líneas rectas se cortan con sierra, las esquinas se cortan con fresa de pequeño diámetro, y si tiene que haber ángulos completamente rectos, éstos se hacen a mano.

El acabado de paneles varía según su utilización: en bruto para paneles ocultos, o lijado para paneles visibles. El lijado de tableros puede ser manual

para pequeñas superficies o mecánico para grandes superficies. Tras el procesamiento de paneles, éstos se colocan en camión en orden inverso al montaje.

fig. 5-18:
Líneas de encolado de paneles contralaminados en KLH.

fig. 5-19:
Líneas de mecanizado de paneles KLH.

fig. 5-20:
Paneles mecanizados.

fig. 5-21:
Montaje en obra de vivienda prefabricada.

COSTE

El coste de los paneles varía sobretodo en función del tiempo de maquinado, que es proporcional a la complejidad del acabado.

ANÁLISIS

KLH es una empresa que combina una producción eficiente de grandes volúmenes con amplias posibilidades de personalización. Esto se consigue con una maquinaria CNC muy avanzada, de gran flexibilidad y eficiencia productiva.

El material, la madera, juega a su favor: debido a su facilidad de trabajo, en lugar de proponer un catálogo de opciones, la empresa ofrece libertad en el diseño siempre y cuando se sigan directrices básicas de fabricación y montaje. La comunicación transparente de parámetros por catálogos descargables en la web facilita enormemente el proceso, ya que el arquitecto conoce las limitaciones desde el principio.

Dentro de los límites para la personalización, se garantiza la eficiencia no sólo de la producción, sino del sistema constructivo completo, al disponer de un sistema estándar de montaje, probado y funcional. Además, el enfoque de la empresa está en la producción en masa, lo cual garantiza unos precios competitivos.

Por otro lado, las posibilidades de experimentación están limitadas a operaciones básicas de corte y taladrado de paneles bidimensionales, y el fresado 3d para lograr piezas tridimensionales o texturas encarece enormemente el proceso. El reto en este proceso sería ampliar el grado de personalización mediante la superación del diseño con tableros bidimensionales.

Este caso se acerca bastante a la filosofía de personalización en masa: grandes volúmenes de producción, fabricación individualizada para cada pieza, y precios competitivos a resultados de un proceso eficiente de fabricación y montaje.

CUADRO DE ANÁLISIS DE PROCESO: Corte de madera (KLH)

A. POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN					
A.1.	posibilidades materiales	A.1.1	materiales posibles	paneles de madera maciza contralaminada de gran formato; alabeo y contracción mínimas, muy alta resistencia estática y rigidez	
		A.1.2	acabados	bruto (calidad no visible); o lijado(calidad visible)	
		A.1.2	texturas	flexibilidad de texturas por fresado, aunque encarece enormemente el producto	
A.2.	posibilidades geométricas	A.2.1	tamaño de componentes	tamaño máximo de panel: 16.5m x 2x95m espesor máximo: 0,5m	
		A.2.2	cortes internos	flexibilidad de geometría y colocación; ángulos rectos con sierra, ángulos internos a mano	
		A.2.3	tolerancias	+/- 2 mm para madera con humedad del 12%.	
		A.2.4	curvatura	todos los paneles son bidimensionales	

B. POSIBILIDADES DE GENERALIZACIÓN					
B.1.	proceso de diseño a fabricación	B.1.1	comunicación	D. comunicación de parámetros de fabricación: comunicación de parámetros físicos por parte del fabricante	
		B.1.2	proceso	KLH dispone de un software propio	
B.2.	proceso de fabricación	B.2.1	tipo de proceso	A. manual: solamente para pequeños remates C. automático: encolado de tableros D. CNC: mecanizado de tableros	
		B.2.2	velocidad de fabricación	Encolado: 12min en encolar , 1h de prensar Mecanizado: en función de número de cortes, nivel de detalle en texturas, remates	
		B.2.3	flexibilidad del sistema	E. líneas de manufactura flexible; máquinas multi-tarea, gran flexibilidad geométrica (5 o 6 ejes)	
		B.2.4	volumen de producción	D. producción en masa: 80.000 - 85.000m ³ / año; máxima producción: 670.000 m ³ en 2011	
B.3.	proceso de fabricación a montaje	B.3.1.	transporte	el tamaño del camión limita el tamaño máximo del componente.	
		B.3.2.	montaje	el montaje es sistemático y sencillo, realizable por cualquier carpintero o montador especializado	

C. POTENCIAL PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
C.1	eficiencia económica	C.1.1.	factores influyentes en el coste	tiempo de maquinado: corte y fresado acabado visto, y si requiere lijado fresado de texturas detalladas	
		C.1.2.	precios de venta	el precio incluye un sistema constructivo comprobado. el coste total está equilibrado entre la producción en masa y un rango interesante de personalización	
C.2	eficiencia material	C.2.1.	desperdicio de material	el departamento técnico distribuye las piezas por paneles para maximizar el aprovechamiento, aunque cada panel debe ser de un solo proyecto	
C.3	eficiencia de tiempo	C.3.1.	diseño a fabricación	definición de dibujos de fabricación: 1 semana; generación de códigos de fabricación en software propio: 10 días aproximadamente.	
		C.3.3.	fabricación a montaje	una vivienda unifamiliar se monta en 2 días (dos plantas/día), por 4 carpinteros, un conductor de camión y una grúa móvil	
C.4	potencial para person. en masa	C.4.1	tipo de person.	C. cosmética: personalización de texturas E. dimensional: la personalización está limitada a tableros bidimensionales rectangulares para facilitar el montaje	
		C.4.2	eficiencia general	altos volúmenes de producción alta personalización. alto grado de automatización	
		C.4.3	potencial	alto: uso intensivo de herramientas CNC, grandes volúmenes el proceso es muy eficiente dentro de los límites establecidos por KLH	

CRITERIOS PARA MEJORAR LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
D.1	criterios para el diseñador	D.1.1	geometría	- limitar el diseño a tableros bidimensionales con espesores estándar. - elegir el tipo de unión entre tableros según los distintos remates.	
		D.1.2	acabados	- minimizar texturas especiales para reducir las operaciones de fresado – elegir entre dos tipos de acabado	
		D.1.3.	materiales	- maximizar aprovechamiento de tablero, - definir de la capacidad portante de los paneles: estructurales o de envolvente, para determinar el espesor de tablero.	

5.2.3 CORTE DE PIEDRA: ASERRADO, FRESADO Y CORTE POR CHORRO DE AGUA

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

En primer lugar, los bloques de piedra que provienen de la cantera se cortan para formar tablas planas de piedra.

El corte se realiza generalmente en **telares de flejes de acero** colocados en paralelo unos a otros, que sierran la piedra a gran velocidad en tablas estándar de 2 o 3cm de espesor. El corte se acompaña con un chorro de agua con cal y granalla de acero. Son procesos lentos, donde además se consume buena parte del material: 1cm de espesor de la piedra por el espesor de los flejes de acero.

El corte de los bloques se puede hacer también **con hilo de diamante**, en caso de necesitar cortes especiales. Este es un proceso más rápido y exacto, pero también más caro, que se utiliza, por ejemplo, para cortar piezas tridimensionales. En los dos casos, el bloque permanece estático mientras la máquina realiza el movimiento.

Una vez obtenidas las tablas de espesores estándar, se da el acabado necesario en trenes de arenado, flameado o pulido:

- El **pulido** se hace en un tren de pulido mediante brazos articulados con distintas muelas según la granulometría deseada.
- El **flameado** se hace con una “flameadora” que funde los cristales de cuarzo, seguido de un cepillado suave. Con este proceso se consigue, por ejemplo, el acabado para la piedra antideslizante.
- El **proceso de arenado** se hace con chorro de agua con arena sílicea a alta presión (1200-1400 bares), que elimina la parte más suave de la piedra.

El **corte final de las tablas** se hace de las siguientes formas:

- **con sierras o fresas**, similares al corte de madera pero continuamente refrigerados por agua;
- **por corte con chorro de agua**⁸² a muy alta presión mezclada con abrasivos, elegidos en función del material a cortar.

fig. 5-22:
Corte de bloques de piedra en
telares multiflejes

fig. 5-23:
Corte de bloque de piedra con hilo
de diamante

fig. 5-24:
Corte de piedra con sierra a 45°.

fig. 5-25:
Corte de piedra por chorro de
agua a alta presión.

⁸²Con este sistema se puede cortar piedra, pero también madera, plásticos, metal, cerámica, composites y vidrio. La mayoría de máquinas de chorro de agua se mueven en dos ejes.

El corte con chorro de agua tiene las siguientes ventajas:

- tecnología de muy alta precisión,
- alta velocidad de maquinado,
- posibilidad de hacer cortes o grabados en piedra,
- posibilidad de realizar cortes internos,
- por el efecto refrigerante del agua, se pueden cortar materiales sensibles sin causar un estrés excesivo(Schodek et al., 2004).

DATOS

- **fecha de visita:** 02/08/2013
- **localización:** Montignoso, Massa Carrara, Italia
- **tamaño:** 150 empleados, de los cuales 80 en fábrica
- **mercado:** sector de la edificación.
- **servicio:** corte y tratamiento de piedra.

PRODUCCIÓN

- **producto:** piedra elaborada de formato estándar o singular.
 - **producto estándar:** piezas cuadradas o rectangulares con formatos predefinidos.
 - **producto no estándar:** cortes en diagonal o curvos, piezas de espesores distintos de 2-3cm o piezas tridimensionales.
- **aplicaciones:** fachadas, solados, esculturas, etc.
- **volumen de producción:** cortan más de 1000 m² de piedra al día.
- **material:** cientos de piedras traídas de canteras de todo el mundo: granitos, mármoles, ónices, travertinos.
- **posibles acabados:** pulido, mate, flameado, esmerilado, arañado.
- **tamaños:** en función del bloque de piedra, que tienen unos 1.60mx2.40m.

DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Historia: fundada en 1961, *Campolonghi* es una empresa de suministro de piedra muy fuerte en el sector, que ha elaborado piedra para centenares de proyectos en todo el mundo, incluyendo rascacielos en EEUU, Japón, y Oriente Medio. Han realizado proyectos para Norman Foster, Santiago Calatrava, Cesar Pelli, o SOM, entre otros; y participado en proyectos singulares como la Opera de Oslo (Snøhetta; Oslo, Noruega; 2008), o la basílica Padre Pio (Renzo Piano; San Giovanni Rotondo, Italia; 2004).

Servicios: *Campolonghi* se dedica exclusivamente al suministro de piedra tratada, y no hacen diseño ni instalación. Disponen de un *showroom* dedicado a la difusión de las posibilidades de fabricación con piedra.

Filosofía

La filosofía de *Campolonghi* se basa en la producción en masa. Aunque han hecho varios experimentos en la producción personalizada, prefieren producir grandes cantidades estandarizadas a pequeñas cantidades personalizadas.

fig. 5-26:
Escultura en la Piazza Bad Kissingen (Pino Castagna; Marina di Massa, Italia; 2009)

fig. 5-27:
Basílica del Padre Pio (Renzo Piano; San Giovanni Rotondo, Italia; 2004)

fig. 5-28 y fig. 5-29:
Ópera (Snøhetta; Oslo, Noruega; 2008)

Por otro lado, *Campolonghi* ofrece posibilidades de acabados especiales en piedra, como el rellenado de poros con resina, o la combinación de piedra con vidrio.

fig. 5-30:
Fábrica Campolonghi: acopio de los bloques de piedra.

fig. 5-31:
Fábrica Campolonghi: zona de acopio de tablas.

fig. 5-32:
Fábrica Campolonghi: zona cubierta para el control de proyectos.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

1. Corte de bloques:

fig. 5-33:
Bloques de piedra tras el corte en los telares multiflejes.

fig. 5-34 y fig. 5-35
Corte de hilo de diamante

La fábrica de *Campolonghi* dispone de varios **telares multifleje** para el corte de bloques de piedra en tablas estándar, que funcionan de forma continua las 24h del día. Se tarda entre 3 y 5 días en cortar un bloque, de los cuales se tarda un día sólo para que el marco del telar atraviese la parte superior del bloque, dependiendo de la dureza de éste. Estas máquinas se lavan continuamente para proteger contra el óxido.

Campolonghi dispone también de una máquina de **corte con cuerda de diamante**, capaz de cortar bloques con gran rapidez y flexibilidad (tarda sólo 5 horas en cortar un bloque), pero también muchísimo más costosa. Esta máquina se utiliza bien para preparar los bloques para el corte en telares, bien para pedidos urgentes o para casos especiales como espesores mayores a 5cm, cortes curvos, columnas, etc.; y es posible realizar cortes curvos en una sola operación. Con este sistema se han realizado algunos proyectos muy singulares, como las dovelas de piedra maciza que componen los arcos de piedra en la *basílica del Padre Pío* de Renzo Piano. Se dice que esta máquina es la más grande del mundo.

Una vez cortados los bloques, los arquitectos a menudo visitan la fábrica para hacer una selección de tablas para su proyecto, si buscan garantizar una determinada estética, como la uniformidad de la piedra o la continuidad de las vetas.

2. Acabado

Campolonghi ofrece varias posibilidades de acabado de la piedra: pulido, apomazado, cepillado, flameado, envejecido, abujardado, arenado, arañado

con sierra, etc. Mientras otros fabricantes permiten cambiar algunos parámetros del proceso de acabado (por ejemplo, añadiendo productos químicos o cambiando la presión del arenado), para *Campolonghi* lo ideal es que los procesos de acabado sean estándares. En caso de querer personalizar los acabados, esto se puede hacer mediante la superposición de procesos estándares.

3. Corte de tablas

En función del tipo de piedra, el corte se hace bien con sierra bien con discos de diamante, continuamente refrigerados por agua. Para realizar cortes estándar en grandes volúmenes, las tablas se montan automáticamente en **trenes de corte automáticos**, donde unos escáneres láser detectan los tamaños de tabla, y 10 discos de corte paralelos cortan las tablas a un tamaño estándar. En estas líneas de corte se pueden cortar de forma automática más de 1000 m² al día, y los operarios intervienen en el control de calidad.

Para el corte de piezas especiales, la automatización no es total y tiene que intervenir un operario, quien planifica, prepara y configura el proceso en la máquina. En este caso, el desperdicio es mayor y el tiempo de procesado también.

Las piezas especiales se pueden cortar bien en centros de maquinado CNC, bien en cortadoras de puente CNC. En los **centros de maquinado CNC** se puede cortar o tallar la piedra con fresas con enorme flexibilidad, aunque más lentamente, mediante fresas rotativas. La **cortadora de puente CNC** es un sistema tradicional que combina gran velocidad y flexibilidad, en el que las tablas se cortan de forma línea la un tamaño configurado por un operario. La mesa de corte se mueve según la dirección y corte necesarios: se corta en una dirección y tras una rotación de la mesa, se corta en la otra. Tras el corte de piezas, se hacen los taladros.

Una vez la piedra tratada y cortada, ésta se expone en una zona cubierta de 4000 m², utilizada para inspeccionar los detalles y los cortes de la piedra y para previsualizar el aspecto final del proyecto.

COSTE

En estos procesos de corte de piedra, la personalización, aunque sea básica, tiene repercusión en el precio: en comparación con el coste de una pieza estándar, una muesca aumenta el precio un 15-20%, un corte en diagonal un 40%, y los cortes curvos un 80-100% .Esto se debe en gran parte a la necesidad de tratar estos encargos de forma especial: a diferencia de los métodos estándar, en estos procesos es necesario disponer de un operario dedicado, y dedicar mayor tiempo de preparación y maquinado.

fig. 5-36:
Desplazamiento automático de tablas.

fig. 5-37:
Corte de piedra a tamaños estándar en discos paralelos.

fig. 5-38 y fig. 5-39:
Cortadora de puente CNC con disco.

fig. 5-40:
Corte de piedra por fresado CNC.

ANÁLISIS

La piedra es tal vez el material que ha sufrido una mayor pérdida con los procesos industriales en el sector de la construcción. Antaño protagonista en la realización de las esculturas y obras arquitectónicas más representativas de la historia, con su procesamiento industrial en las últimas décadas este material se ha limitado a la composición de superficies planas para fachadas o solados. A diferencia de la madera, donde es habitual la personalización de piezas de gran formato, la fabricación industrial de piezas de piedra se basa en pequeñas piezas planas de tamaños estándar.

Como industria representativa en el sector, *Campolonghi* está enfocada a la producción en masa. En estas fábricas, interesa vender grandes volúmenes de piezas estándar, y no pequeñas piezas especiales que exigen más trabajo y tiempo. Además, la piedra se vende en formatos pequeños, por lo que la personalización repercute en gran medida en el precio de venta por m². Esto es comprensible porque la personalización no sólo afecta a la preparación, el diseño y el proceso de fabricación de las piezas, sino también a la manipulación, al embalaje, y el transporte de muchas piezas pequeñas.

Por otro lado, este fabricante dispone de la tecnología para hacer prácticamente cualquier forma en piedra: tanto por corte y fresado CNC de piezas planas, como por corte y tallado 3d con hilo de diamante. El reto está en optimizar los procesos de fabricación personalizada con maquinaria CNC para producir mayor volumen de diseños personalizados.

El sector de la producción de piedra representa la oportunidad que dan las tecnologías CNC de retornar a la producción artesanal que se ha perdido con la producción industrial. Un ejemplo de esto es la *basílica del padre Pío*, obra de Renzo Piano. En esta basílica, el arquitecto reproduce antigua técnicas de construcción de basílicas con arcos de piedra estructurales, que fueron contruidos con dovelas macizas de piedra *Apricena beige* producidas por *Campolonghi* por corte de hilo con diamante.

Este tipo de ejemplos, hasta ahora excepcionales y muy costosos, podrían generalizarse en caso de facilitarse la personalización en masa en este sector.

CUADRO DE ANÁLISIS DE PROCESO: Corte de piedra (Campolonghi)

POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN					
A.1.	posibilidades materiales	A.1.1	materiales posibles	gran variedad de piedras: granitos, mármoles, ónices, travertinos.	
		A.1.2	acabados	pulido, apomazado, cepillado, flameado, abujardado, arenado, arañado con sierra	
		A.1.3	prestaciones	piedra translúcida (travertino), piedra impermeable (con resina); piedra antideslizante (flameado)	
A.2.	posibilidades geométricas	A.2.1	tamaño de componentes	Estándar: piezas de 60x40cm, cortadas en líneas automáticas Tamaño máximo: en función del bloque, habitualmente 1.60mx2.40m	
		A.2.1	espesores	2-3cm, corte en telares multifleje Si tienen más de 3cm: corte con hilo de diamante	
		A.2.4	curvatura	flexibilidad para curvatura simple o doble si se hace corte con hilo de diamante	

POSIBILIDADES DE GENERALIZACIÓN					
B.1.	proceso de diseño a fabricación	B.1.1	comunicación	A. transferencia directa: si se desvía de la producción estándar, el arquitecto transmite lo que quiere al fabricante, y éste lo resuelve dentro de los límites posibles.	
		B.1.2	proceso	para piezas estándar: proceso rápido y eficiente; para piezas singulares: preparación y supervisión por un operario especializado	
B.2.	proceso de fabricación	B.2.1	tipo de proceso	A. manual: algunos detalles son más rápidos a mano B. mecánico: corte de bloques en telares, acabados C. automático: corte de bloques en telares, acabados D. CNC: corte y fresado CNC de piezas singulares, corte con hilo de diamante	
		B.2.2	velocidad de fabricación	Producción de piezas estándar: 1000 m2 al día Corte CNC: más lento, en función del detalle	
		B.2.3	flexibilidad del sistema	B. Unidad autónoma: combinación de líneas de producción estándar y máquinas CNC con alta participación de operarios;	
		B.2.4	volumen de producción	B. lote pequeño: para pedidos especiales D. producción en masa: para piezas estándares	
B.3.	proceso de fabricación a montaje	B.3.1.	transporte	el transporte se hace en cajas de madera, cumpliendo criterios de resistencia y compacidad	
		B.3.2.	montaje	en general se utilizan sistemas estándar para suelos o fachadas, que se colocan rápidamente	

POTENCIAL PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
C.1	eficiencia económica	C.1.1.	factores influyentes en el coste	Geometría: corte oblicuo + 40%, corte curvo +80-100% taladrado, muescas: +15-20% el fresado de textura es muy lento y costoso	
		C.1.2.	precios de venta	Las variaciones aumentan substancialmente el precio (+20,40,100% en función del tipo de variación)	
C.2	eficiencia material	C.2.1.	desperdicio de material	gran desperdicio por el corte en telar (1cm por la sierra), y por corte de bordes para piezas singulares: gran desperdicio, sobretodo en piezas tridimensionales	
C.3	eficiencia de tiempo	C.3.1.	diseño a fabricación	Dedicación especial por operarios especializados: preparan los dibujos, controlan y manipulan las máquinas.	
		C.3.3.	fabricación a montaje	el sistema de montaje generalmente es estándar y se hace rápidamente	
C.4	potencial para person. en masa	C.4.1	tipo de person.	C. cosmética: variedad de texturas disponibles, posibilidad de superponer texturas para personalizar el acabado E. dimensional: gran flexibilidad geométrica en dos dimensiones (corte personalizado) y tres dimensiones (corte con hilo de diamante)	
		C.4.2	eficiencia general	altos volúmenes de producción grado de personalización medio. alto grado de automatización	
		C.4.3	potencial	Medio: potencial para evolucionar desde la fabricación en masa a la personalización en masa, optimizando la fabricación de piezas especiales	

CRITERIOS PARA MEJORAR LA PERSONALIZACIÓN EN MASA				
D.1	criterios para el diseñador	D.1.1	geometría	- minimizar el número de piezas
		D.1.2	acabados	- personalización de acabados mediante superposición de acabados estándar - la textura por fresado encarece y ralentiza el proceso
		D.1.3.	materiales	- minimizar el desperdicio intentando aprovechar las piezas sobrantes en el diseño
D.2	Criterios para el fabricante	D.2.1	comunicación	- potencial para el desarrollo de un proceso colaborativo

5.2.4 CORTE DE METAL: FRESADO, CORTE LÁSER Y CORTE POR PLASMA

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

El corte de metal se puede hacer mediante procesos mecánicos, térmicos, electroquímicos, eléctricos o químicos; con chorro de agua, y con llama de fuego.

Los **procesos estándares de corte** de metal consisten en el corte rápido de formas repetitivas con cuchillas o herramientas estándares. Incluyen, entre otras, el *cizallado* (corte de metal en línea recta), el *punzonado* (corte en una línea cerrada para obtener una pieza); el *ranurado* (corte de agujeros alargados), el *perforado* (corte de varios agujeros) y el *muescado* (corte de una forma específica) (Groover, 2007).

Entre los **procesos personalizados de corte** por control numérico, los más habituales son los siguientes (Tesko laser, s.f.):

- **Corte láser:** utilizado generalmente para metales de espesores finos, el corte láser puede llegar a cortar aceros de 1.5cm (mediante corte láser con oxígeno), aceros inoxidables de 1cm o aluminio de 6mm (mediante corte láser con nitrógeno) (Schodek, et al., 2004). Tiene la ventaja de poder realizar cortes o grabados, según la potencia de láser utilizada.
- **Mecanizado:** el corte y fresado se hacen en centros de mecanizado, con fresas rotativas. Este sistema es válido para metales blandos, como el aluminio.
- **Oxi-corte o corte con Oxígeno combustible:** es un método muy extendido en la industria desde principios del siglo XX, capaz de cortar aceros de hasta 25cm. No es posible cortar metales no ferrosos, así que se utiliza principalmente en la industria del acero para la preparación de bordes de placa y para soldaduras (Praxair, 2013).
- **Corte con arco de plasma:** similar al *oxi-corte*, es un sistema extendido a nivel industrial para cortar muchos tipos de metales, incluyendo el acero, acero inoxidable, algunas aleaciones de cobre y aluminio. Los espesores de corte en acero llegan hasta 8-10cm, aunque el calentamiento del metal puede causar deformaciones y no es el sistema más adecuado para los remates (Schodek et al., 2004).

Controlados por control numérico, estos sistemas son capaces de realizar cortes muy precisos con tolerancias muy reducidas (0.02-0.2mm), para geometrías extremadamente variables.

DATOS

- **localización:** sede en Kansas City, Missouri y fábrica en Dallas, Texas (EEUU)
- **mercado:** sector de la edificación
- **servicios:** consultoría, ingeniería, fabricación y montaje

fig. 5-41:
imagen de la fábrica de Zahner en
Kansas City

PRODUCCIÓN

- **producto:** sistemas de fachada y obras de arte personalizados
- **materiales:** acero, acero inoxidable, acero galvanizado, cobre, zinc, titanio, aluminio, aleaciones metálicas,
- **posibles acabados:** oxidado, granallado, deposición química de vapor, aplicación de pátinas personalizadas, coloración, acero recubierto, azulado o ennegrecido, etc.

Una parte importante de la investigación en *Zahner* se centra en los tratamientos para protegerlos metales de las distintas condiciones climáticas. En particular, han enfocado su investigación en los tratamientos con pátinas personalizadas, por un lado para proteger el metal del sol, viento y humedad; y por otro, para permitir la evolución y maduración continua del material con el tiempo.

Por ejemplo, el acabado *Angel Hair* se emplea para reducir la reflectancia solar en acero inoxidable, cobre, zinc, aluminio, o nickel; el “GB-60™” es un proceso de arenado uniforme con granos de vidrio finos utilizado para el acero inoxidable, cobre, aluminio, o nickel; y existen tratamientos de envejecimiento de metales como *DirtyPenny™* para el cobre, *Solanum Steel* para oxidar acero sin marcas de chorreo, *Roano Zinc™* para el zinc, o *Star Blue™* para el cobre (A. Zahner Company, s.f).

fig. 5-42:
Museo de Young (Herzog & de
Meuron; San Francisco , EEUU;
2005)

fig. 5-43:
Universidad Cooper Union
(Morphosis; Nueva York, EEUU;
2006)

DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Historia: *Zahner* fue fundada en 1897 como empresa familiar de fabricación artesanal en metal. A finales del siglo XX, *Zahner* expandió su mercado se expandió y comenzó a realizar proyectos de alta gama para arquitectos como Gehry, Libeskind o Herzog & de Meuron. Hoy en día, es una de las fábricas referentes en la producción de componentes metálicos especiales.

Proyectos representativos: Terminal D del Aeropuerto Dallas Fort Worth, Museo de Young (Herzog & de Meuron; San Francisco, EEUU; 2005), Universidad Cooper Union (Morphosis; Nueva York, EEUU; 2006).

fig. 5-44:
Sistema de fachada *ImageWall* en el estadio Kauffman (Populous Architects, Kansas City, EEUU; 2009)

fig. 5-45:
Sistema de fachada *CloudWall* en la fábrica de Zahner (Crawford Architects; Kansas City; EEUU)

Servicios: en *Zahner* están dedicados a la realización de proyectos singulares; sus servicios se enfocan en acompañar al arquitecto para la realización de su proyecto, dándole nuevas ideas sobre posibilidades materiales y de fabricación.

Filosofía: Desde el origen de la empresa, la filosofía de *Zahner* se basa en la realización de diseños personalizados. Tanto es así, incluso han desarrollado dos sistemas personalizables para fachadas mediante procesos de diseño y fabricación digital:

- **ImageWall:** es un sistema de fachada perforada bidireccional, basado en la generación de una imagen o diseño en una superficie metálica a través del punzonado, troquelado, y estampado. La fachada del museo de Young, de los arquitectos Herzog & Meuron, fue la primera iteración de este proceso
- **CloudWall:** es un sistema de fachada tridimensional consistente en la colocación de perfiles curvilíneos metálicos en paralelo para recrear una geometría curva.

Estos dos sistemas se pueden diseñar a través de plataformas de simulación online accesibles desde la web de *Zahner*, y están basados en un diseño paramétrico patentado por *Zahner*.

En el caso de *ImageWall*™, el cliente puede diseñar la fachada a través de la interfaz, donde es posible definir el tamaño, elegir el tipo de metal y acabado, y el tamaño y tipo de perforación; o bien introducir una imagen o diseño que se traslada a la superficie metálica mediante perforaciones y deformaciones personalizadas. Una vez obtenida la geometría final, ésta se distribuye en una serie de paneles y se extraen los ficheros de fabricación para realizar los distintos procesos de troquelado, estampado, y cortes.

Automáticamente, se puede conocer el precio del panel diseñado, y una vez confirmado el encargo desde la web, se recibe el panel en 8 semanas.

fig. 5-46:
Producción del sistema *IMAGEWALL*™, desde la aplicación de una fotografía hasta la instalación de los paneles de fachada en el Museo de Young

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

1. Diseño a fabricación

En la mayoría de los casos, esta empresa comienza a colaborar con los arquitectos en la fase de desarrollo del diseño, como consultoría, mediante un servicio que llaman "asistencia al diseño". Una vez disponen del diseño inicial del arquitecto, los ingenieros de *Zahner* lo redibujan con sus propios estándares, para garantizar el control de calidad; además, desarrollan los detalles de fabricación y construcción, cuidando de mantenerse fieles al concepto original. La relación entre el diseño y la fabricación se basa en modelos digitales (BIM) que aseguran la colaboración constante entre arquitecto e industria. Las envolventes con geometría singular implican generalmente el desarrollo de un sistema integrado entre paneles de fachada y el sistema de montaje.

2. Fabricación

El corte se realiza principalmente por chorro de agua y por fresado; y la personalización de paneles se consigue mediante personalización y combinación de procesos de rayado, perforado, plegado, punzonado, troquelado, y estampado por maquinaria CNC.

3. Montaje

En *Zahner* están especializados en el diseño integral de sistemas de fachadas complejos, que incluyen el suministro del material de fachada tratado, así como el sistema de montaje y la resolución de detalles constructivos. El montaje se basa en dos principios

- Utilización de módulos de mediano y gran tamaño pre-ensamblados en fábrica. Estos módulos permiten reducir tiempos y costes de montaje, y la posibilidad de montaje por otros montadores.
- Utilización de sistemas de montaje prediseñados, bien estándar, bien adaptados al diseño personalizado de fachada. En el sistema Cloudwall®, los paneles se montan con un sistema que *Zahner* describe en su catálogo para montadores.

ANÁLISIS

Zahner es una de las fábricas con más experiencia en la fabricación y montaje de sistemas personalizados en metal a nivel mundial. El interés de esta empresa va más allá de las tecnologías de fabricación que emplea: éste deriva de su filosofía de adaptación y anticipación al mercado de la arquitectura singular.

La particularidad de *Zahner* se apoya en dos servicios singulares: su servicio de consultoría y seguimiento continuo del proyecto, quien resuelve el diseño de forma colaborativa con el arquitecto y lo maneja en software BIM; y su

fig. 5-47, fig. 5-48 y fig. 5-49:
Montaje del sistema de fachada
Cloudwall en el Edificio Liverpool
Interlomas (Rojkind Arquitectos;
Huixquilucan, Mexico; 2011)

propuesta de sistemas patentados de diseño paramétrico trasladables a fabricación y montaje. La previsión y acompañamiento desde el principio del diseño permiten la optimización de plazos y costes en el diseño global.

Además, la empresa promueve la experimentación y el desarrollo de nuevos métodos tanto de diseño, como de fabricación y montaje. Este fue el caso del *Broad Art Museum* (Zaha Hadid Architects; East Lansing, EEUU; 2012), donde se desarrolló un nuevo proceso de maquinado para paneles de acero inoxidable corrugado de gran tamaño. En el *Museo de Young* (Herzog & de Meuron; San Francisco, EEUU; 2005), los arquitectos querían trasladar los efectos de luces y sombras del bosque circundante a la envolvente del museo a través de perforaciones y texturas. *Zahner* desarrolló un sistema algorítmico trasladable a la fabricación personalizada de chapas mediante punzonado y estampado, el cual originó el sistema de fachada IMAGEWALL™.

Aunque en este caso no se ha realizado una visita a esta industria, el ejemplo de *Zahner* resulta pertinente por su interés para la personalización generalizada en la arquitectura. En *Zahner* exploran continuamente la combinación de una oferta personalizada con un proceso de fabricación eficiente y competitivo. Por su combinación de grandes volúmenes de producción a precio competitivo con una oferta personalizada basada en el trabajo con herramientas digitales, se puede concluir que es una empresa con enfoque en la personalización en masa.

CUADRO DE ANÁLISIS DE PROCESO: Corte de metal (Zahner)

D. POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN					
A.1.	posibilidades materiales	A.1.1	materiales posibles	acero, acero inoxidable, acero galvanizado, cobre, zinc, titanio, aluminio, aleaciones metálicas	
		A.1.2	acabados	oxidado, granallado, deposición química de vapor, aplicación de pátinas, coloración, etc..	
		A.1.2	texturas	perforado, granallado, punzonado, troquelado, doblado, etc.	
		A.1.4	montaje	combinación de varios metales en un panel	
A.2.	posibilidades geométricas	A.2.1	tamaño de componentes	ZIRA: tamaño máximo de aprox. 6mx3m, tamaños máximos limitados por transporte. ZEPPS: espesor máximo 35 cm	
		A.2.2	Cortes internos	perforado y punzonado con varios diámetros y geometrías	
		A.2.4	curvatura	el metal no se pliega en dos direcciones de forma natural, es necesario desarrollar un sistema específico para conseguirlo	

E. POSIBILIDADES DE GENERALIZACIÓN					
B.1.	proceso de diseño a fabricación	B.1.1	comunicación	A. proceso interactivo: proceso colaborativo con los arquitectos: servicio de consultoría y asistencia al diseño.	
		B.1.2	proceso	empleo de sistemas prediseñados por Zahner, definición del diseño con software BIM	
B.2.	proceso de fabricación	B.2.1	tipo de proceso	A. manual: pre-montaje en fábrica y montaje en obra D. CNC: Corte por chorro de agua, fresado, punzonado, troquelado	
		B.2.3	flexibilidad del sistema	Posiblemente, (D) sistemas de manufactura flexible en el maquinado CNC	
		B.2.4	volumen de producción	D. producción en masa de componentes para muchos encargos	
B.3.	proceso de fabricación a montaje	B.3.1.	transporte	Cada panel está numerado y listo para instalar	
		B.3.2.	montaje	diseño de sistemas de montaje rápido; instalación por montadores no experimentados	

5.3 PROCESOS SUBTRACTIVOS

Los procesos substractivos consisten en la eliminación de material de un sólido para generar una textura o volumetría mediante procesos eléctricos, químicos o mecánicos.

En la industria del prefabricado arquitectónico, los procesos de substracción más habituales son los **mecánicos**, que incluyen las siguientes operaciones (Groover, 2007) :

- **El torneado** consiste en la eliminación de material mediante la rotación de un elemento sobre un eje. Se emplea para procesar elementos metálicos de pequeño tamaño.
- **El taladrado** se utiliza para crear agujeros en todo tipo de materiales, y en general es un proceso que se integra en los centros de mecanizado CNC.
- **El fresado** consiste en la extracción del exceso de material de un objeto tridimensional para generar una forma final (Groover, 2007). Estos procesos permiten una gran flexibilidad geométrica para una gran variedad de materiales, como madera, espumas, metales o piedra.

De estas tres familias, los procesos de fresado tienen un mayor número de aplicaciones en el sector de la construcción. En estos procesos, la extracción de material se hace con herramientas de corte rotativas, llamadas “fresas”. Las fresas, que pueden ser de distintos diámetros, disponen de filos en su perímetro, llamados dientes, labios o plaquitas cortantes, y al rotar cortan formas torneadas.

Las fresas se caracterizan por su longitud, su diámetro exterior, el número de dientes, la distancia entre los dientes y el sistema de fijación a la máquina. Cuanta mayor es la longitud de la fresa, se extraerá material a mayor profundidad; y cuanto menor es su radio, mayor nivel de detalle tendrá la geometría creada, pero también más lento será el proceso.

Al igual que las herramientas de corte, las fresas deben ser de un material más duro que el material que se trabaja. Para materiales blandos, como las espumas y maderas, se emplean fresas de acero, pero para el fresado de piedra, composites o vidrio son necesarias fresas de diamante.

El fresado puede realizarse sobre objetos planos o volumétricos, y la flexibilidad geométrica depende del número de ejes de movimiento permitidos por la máquina. Las máquinas de fresado de 3 ejes bastan para realizar una gran cantidad de operaciones, pero hoy en día hay máquinas de hasta 6 ejes que son comunes para la producción de objetos de geometrías complejas (Dunn, 2012).

visitas realizadas

- madera:
Blumer-Lehmann
- metal y compuestos:
CNC Dynamix

fig. 5-50
Operaciones de mecanizado:
torneado, taladrado, fresado y
brocheado.

5.3.1 FRESADO A PEQUEÑA ESCALA

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

A pequeña escala, los procesos substractivos se hacen en *routers*, que son máquinas muy similares a las máquinas de fresado. Mientras que las fresadoras son máquinas robustas, utilizadas para procesos industriales, los routers son máquinas de fabricación CNC de menor tamaño, menos sólidas, pero muy flexibles y precisas y con mayor velocidad de giro. Son capaces de cortar distintos materiales como madera, espumas, plástico o metales finos. El cabezal de maquinado está acoplado a un sistema de aspirado de la viruta de madera eliminada en el proceso.

Los routers se utilizan a menudo en los *Fablabs*, las escuelas de arquitectura y en carpinterías, pero también en talleres de fabricación de prototipos y talleres de fabricación de moldes, que se utilizan por ejemplo en la fabricación de barcos. Para fabricar superficies tridimensionales, éstas se seccionan con planos horizontales, dando lugar a *mapas de contornos*⁸³, por donde se realiza el movimiento de fresado. La distancia entre los mapas de contorno se denomina *espesor de fresado* (Lyon, 2007), y se define en función del nivel de detalle del tallado: un espesor de fresado amplio (por ejemplo de 8mm) resultará en un acabado suave para superficies sin demasiado detalle; un espesor más fino con una fresa de menor diámetro (por ejemplo de 2mm), dará mayor detalle, pero el proceso de fresado será más lento.

El fresado tridimensional se hace en máquinas de 3,4 o 5 ejes. Mientras que las máquinas de corte bidimensionales se mueven sólo en los ejes, x e y, el eje adicional de un router permite realizar procesos de tratamiento superficial, conocidos como fresado 2.5D.

fig. 5-51:
Router CNC.

fig. 5-52:
Fresado CNC de volumen por
mapas de contornos.

fig. 5-53:
Fresado de moldes para la parad
de autobus en Hoofddorp (NIO-
architecten; Hoofddorp, Holanda;
2003)

EJEMPLOS

El fresado se ha utilizado frecuentemente en la fabricación de moldes utilizados en los procesos formativos. Un ejemplo de proyecto donde se ha utilizado este proceso es el pabellón temporal de BMW *the Bubble* (Bernhard Franken/ABB Architekten; Múnich, Alemania; 1999), edificio pionero en la producción CNC. El pabellón, cuya geometría se inspiró en la unión de dos gotas de agua, tenía un tamaño de 24 m de largo, 16 m de ancho, y una altura de 8 m. Para la fabricación, la geometría se racionalizó y

⁸³ Los mapas de contornos son líneas horizontales con el mismo eje z.

dividió en piezas de menor tamaño, resultando en 305 láminas de plexiglás transparente⁸⁴ con doble curvatura.

En la fabricación, las láminas de doble curvatura se formaron por calentamiento del plexiglás a 150-160°C sobre moldes de poliuretano, que se fabricaron por fresado CNC. Dado que cada pieza era única, el proceso de fresado fue muy lento y la cantidad de desperdicio muy significativa.

ANÁLISIS DEL PROCESO

El fresado resulta un proceso relativamente ineficiente por varias razones:

- gran cantidad de desperdicio;
- requiere mucho tiempo de maquinado, sobre todo si hay mucho detalle;
- es un proceso caro porque lleva mucho tiempo.

Comparado con otros procesos, el fresado es ineficiente para la fabricación de piezas de gran tamaño por la cantidad de tiempo que tarda, y no tiene sentido para la fabricación de piezas repetitivas. Aunque es frecuente su utilización para fabricar moldes, algunos pequeños fabricantes prefieren fabricarlos a mano para evitar los costes elevados.

Sin embargo, al incorporar control numérico, se pueden fabricar fácilmente piezas únicas sin necesidad de repetición, y una misma pieza puede fabricarse años después simplemente reutilizando el mismo código. Otra ventaja es la flexibilidad material: se pueden procesar materiales económicos como madera o espumas de poliuretano para moldes, pero también componentes en materiales resistentes, como corian, metal o piedra.

Para resolver los problemas de desperdicio y lentitud en el proceso de fresado, se están explorando procesos alternativos para la fabricación de moldes, como son los moldes reutilizables. Algunos ejemplos se explicarán en el capítulo 5.4.2.3.

Es en los procesos de maquinado a pequeña escala donde se ha llegado más lejos en la personalización en masa, por los siguientes factores:

- el fabricante y el diseñador es a menudo el mismo (estudiantes, pequeños talleres), con lo que el diseño incluye desde el origen los parámetros de fabricación y no son necesarias las fases de comunicaciones de ida y vuelta con diseños optimizados;
- proximidad física, posibilidad de experimentar y corregir errores sobre la marcha;

⁸⁴El plexiglás transparente se denomina también PMMA o vidrio acrílico.

- experimentación avanzada en los campos de diseño y fabricación digital a pequeña escala, facilitando la resolución de problemas de comunicación entre diseño y fabricación.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO A FABRICACIÓN

Las fresadoras están estrechamente relacionadas con la fabricación por control numérico desde su origen en 1952. Debido a la flexibilidad y economía del fresado de madera, este proceso se ha extendido ampliamente en las industrias de prefabricado en madera, y con él se realizan una gran variedad de piezas con distinta funcionalidad: estructuras, envoltentes, o mobiliario, entre otros.

Como se ha mencionado en el capítulo 5.2.2, a menudo las operaciones de corte y fresado de madera suelen hacerse en centros de mecanizado que contiene herramientas intercambiables.

Para comenzar la fabricación, una vez definida la geometría, el fabricante debe preparar el código y la máquina para la fabricación. La programación de la máquina se puede hacer de forma manual⁸⁵, introduciendo directamente un código en el ordenador de la máquina, o de forma automática.

Para la programación automática, es necesario transformar los archivos de dibujo a códigos de maquinado por un programador. A modo de ejemplo del proceso previo a la fabricación, se describen a continuación los pasos para la programación automática.

En primer lugar, se debe importar el archivo de diseño en el programa de fabricación; transformación que a veces genera errores geométricos. En segundo lugar, se hace una verificación del proceso de fabricación, que sirve para anticipar errores u operaciones conflictivas⁸⁶. Después se define, para una determinada geometría, qué operaciones se harán, en qué orden, por qué herramientas y de qué tamaño son las herramientas. Por último, se hace una simulación del proceso completo de maquinado, que sirve para comprobar el tiempo de maquinado y para verificar que no existan conflictos. Tras esta preparación del código de fabricación (código G), se hace la transferencia a código de maquinado (código M), el cual varía en función de la máquina.

El trabajo de programación depende de la geometría del objeto y de la máquina utilizada: es sencillo, por ejemplo, si el maquinado se hace con máquinas de 3 ejes de forma perpendicular a la superficie, y se complica

fig. 5-54:
Fresadora de madera CNC.

fig. 5-55:
Fresas de distintos diámetros.

fig. 5-56:
Fresado de madera.

⁸⁵ La programación manual del centro de maquinado se hace generalmente para operaciones sencillas o repetitivas.

⁸⁶ En la verificación de operaciones se anticipan ciertos problemas, como por ejemplo colisiones entre distintas operaciones. A consecuencia de esta verificación se determina si es necesario dividir la geometría en varias piezas.

cuantos más ejes de procesamiento tenga la máquina y cuanto más complejas sean las superficies.

Como se puede ver, la preparación de la fabricación generalmente es un proceso largo que requiere personal cualificado. El proceso de diseño a fabricación se alarga y complica con la diversificación de piezas, dado que cada para cada pieza es necesario repetir los pasos.

Para agilizar este proceso, se han desarrollado programas que permiten la transferencia directa de archivos de diseño a fabricación: un ejemplo de esto son los modelos paramétricos que exportan automáticamente los datos de fabricación desde el diseño, como el plugin *Woodpecker*, diseñado por la empresa *Designtoproduction*⁸⁷. Este plugin, insertado en el software de diseño paramétrico *Grasshopper*, permite exportar los datos de fabricación de forma directa a la maquinaria de fabricación. En estos casos, los pasos intermedios de conversión de datos se eliminan y el proceso se agiliza muchísimo.

Para facilitar el proceso, es fundamental asegurar una buena comunicación entre el diseñador y el fabricante. El diseñador debe comprender la implicación de ciertas decisiones de diseño en la fabricación. También debe transmitir los conceptos fundamentales de su diseño al fabricante, para que éste seleccione el modo de fabricación más eficiente posible y a la vez respete los principios básicos del diseño. En la preparación de archivos, el programador debe decidir, en función de la complejidad geométrica, la manera más eficiente en el proceso de fabricación: esto incluye decisiones sobre qué máquina y qué proceso utilizar, pero también debe evaluar si es necesario modificar la geometría y comunicarlo al diseñador.

De forma simplificada, el coste de maquinado de madera depende de varios factores:

- el tipo de máquina⁸⁸;
- el tiempo de programación;
- el tiempo de preparación del material;
- la preparación de la máquina: es necesario prever la fijación o prensado de las piezas sobre la mesa de maquinado⁸⁹;
- el tiempo de maquinado: en función del nivel de detalle debido al diámetro de fresa.

⁸⁷ Información recabada durante la asistencia al congreso *Fabricate 2014*, organizado por la unidad de Arquitectura y Fabricación Digital de la *ETH de Zúrich*, en colaboración con la *Escuela de Arquitectura Bartlett, University College London*, y que tuvo lugar los días 14 y 15 de Febrero del 2014 en Zúrich, Suiza.

⁸⁸ El precio por hora es más caro en la utilización de una máquina de 5 ejes que una de 3.

⁸⁹ La utilización de piezas estándar simplifica el proceso de fijación sobre la mesa, mientras que si se procesan geometrías complicadas, será necesario fabricar prensas especiales y esto será más lento y más costoso.

DATOS

- **fecha de visita:** 01/05/2013
- **localización:** Gossau, Suiza
- **tamaño:** aprox. 100 empleados, de los cuales hay 25 ingenieros.
- **mercado:** sector industrial, agrícola y de la edificación
- **servicios:**
 - consultoría e ingeniería sobre edificios singulares
 - fabricación de componentes en madera.
 - constructora especializada en madera.
 - central eléctrica de biomasa integrada en la fábrica y producción de pellets

fig. 5-57:
Ejemplo de construcción de edificios en madera por Blumer-Lehmann.

fig. 5-58:
Ejemplo de construcción modular por Blumer-Lehmann.

PRODUCCIÓN

- **producto:** estructuras de madera, moldes, módulos tridimensionales para edificios modulares.
- **aplicaciones:** edificios de viviendas, edificios comerciales, de oficinas, industriales y silos de madera.
- **material:** principalmente madera de pino y abeto. Madera local, comprada a productores suizos.
- **acabados** posibles: liso o con textura (superficies procesadas por maquinaria CNC para conseguir textura).les, de curvatura simple o doble.
- **tamaños:** el tamaño generalmente está limitado por el transporte.⁹⁰

fig. 5-59:
Ejemplo de construcción de silos por Blumer-Lehmann.

fig. 5-60:
Fábrica Blumer-Lehmann en Gossau, Suiza.

fig. 5-61:
Personal de la fábrica de Blumer-Lehmann en Gossau, Suiza.

⁹⁰Con la maquinaria más moderna, se pueden hacer componentes de hasta 27m de largo, 5.5m de ancho y 1.35m de alto.

fig. 5-62:
Club de golf Yeogu (Shigeru Ban Architects; Corea del Sur; 2010)

fig. 5-63:
Edificio Tamedia (Shigeru Ban Architects; Zúrich, Suiza; 2013)

fig. 5-64:
Centro de artes escénicas Kilden (Ala Architects; Kristiansand, Noruega; 2012),

DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Historia: *Blumer-Lehmann* es una empresa familiar, fundada en 1875 como carpintería. A lo largo de su historia, esta empresa se ha dedicado ha fabricado edificios y estructuras de madera de todo tipo, y se especializó en la fabricación de todo tipo, incluyendo silos y arquitectura modular.

Con su participación en el proyecto del *Club de golf Yeogu* (Shigeru Ban Architects; Corea del Sur; 2010), entraron en el mercado de construcción de proyectos singulares. A raíz de esto, en julio del 2015 se creó *Lehmann Timber Code AG*, empresa especializada en la fabricación y construcción compleja en madera. Esta empresa se ocupa de desarrollar, programar, fabricar y transportar componentes singulares para edificios.

Servicios: la fábrica de *Blumer-Lehmann* cubre casi todo el ciclo de fabricación en madera, desde el aserrado de troncos en tablas⁹¹, a la utilización de desechos para fabricar pellets⁹².

Además del centro de fabricación, disponen de un servicio de consultoría que acompaña al cliente o arquitecto durante el proceso. Para la fabricación de geometrías complejas, lo ideal para ellos es evitar los gestores de proyectos y trabajar de forma colaborativa, directa y sencilla con otros técnicos y fabricantes. Han creado la red colaborativa *Freeformtimber*⁹³, una asociación de varios profesionales de la madera que ofrece un servicio integral en la fabricación de edificios complejos en madera. En algunos casos esta empresa ha tomado las riendas en el proceso y gestionado la colaboración con otros fabricantes o constructores.

En varios proyectos singulares, *Blumer-Lehmann* ha contratado los servicios de la empresa suiza *Designtoproduction*, una empresa de consultoría especializada en resolución, programación y fabricación de geometrías complejas. *Designtoproduction* se ocupa de integrar los criterios de fabricación en el modelo geométrico, de optimizarlo para conseguir una fabricación eficiente. y de convertir el diseño para la fabricación.

Filosofía

Blumer-Lehmann tiene los valores de una empresa familiar, y su misión principal es 'dar de comer a las 100 familias de la compañía'. Esta industria

⁹¹ Tras el aserrado de troncos, venden las tablas a empresas de encolado; una vez encoladas, vuelven a comprar las vigas laminadas para mecanizarlas.

⁹² La fábrica de *Blumer-Lehmann* dispone incluso de una central eléctrica, por lo que se aseguran de que utilizar todo el desperdicio con un objetivo.

⁹³ *Freeformtimber* representa la asociación de *Blumer-Lehmann* con los ingenieros *SJB KempterFitze*, y con la empresa *Designtoproduction*, pioneros en la resolución de diseño y fabricación compleja(*Freeform Timber*, s.f.).

combina el trabajo tradicional de carpintería con las tecnologías más avanzadas CNC, con el objetivo es conseguir un producto de máxima calidad.

La empresa enfoca la fabricación de forma pormenorizada, dado que el objetivo no es producir cantidad sino calidad. Consideran que no venden productos estandarizados sino que cada proyecto es único, y cada proceso diferente. Se consideran una fábrica individualizada y especial.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

1. Diseño a fabricación

Blumer-Lehmann proporciona servicios que cubren todo el proceso del proyecto, desde el diseño al montaje. En este proceso, implementan un trabajo colaborativo con ingenieros e incorporan en su equipo a especialistas en diseños complejos, como *Designtoproduction*. El servicio es integral, incluyendo la optimización del diseño, el proceso de fabricación, y el pre-montaje y el montaje del proyecto. La colaboración es clave y constantemente se resuelven puntos de conflicto con otros gremios.

Normalmente, tras confirmar el encargo, el arquitecto envía la geometría, aunque esté poco definida. *Blumer-Lehmann* se ocupa entonces de optimizar el diseño integrando la lógica del material, los parámetros de fabricación, la optimización de material y el cálculo estructural. Se encargan de hacer el diseño de conexiones, los dibujos de detalles y de tener en cuenta las normativas y estándares. Esto se realiza con modelos 3d que el arquitecto puede supervisar.

Un punto fundamental para ellos es el enfoque en lo que llaman “resolución de interfaces” entre componentes y sistemas, como por ejemplo los encuentros entre cubierta y fachada, o entre sistemas producidos por distintos fabricantes. Procuran interactuar lo antes posible con otros fabricantes y montadores, para compartir información y evitar problemas. El mensaje que transmiten es que hay que darse cuenta de que éstos no son edificios normales, y que es necesario un gran trabajo global y de entendimiento de geometría.

En función de la complejidad del proyecto, la fase previa a fabricación es compleja y lenta: en el proyecto del *Centro de Artes Escénicas Kilden* (Ala Architects; Kristiansand, Noruega; 2012), se tardó 45 minutos para programar la fabricación de cada viga, por lo que fue necesario mucho tiempo y personal dedicado. Para simplificar este proceso en otros proyectos, *Designtoproduction* programó un plugin para la generación automática de códigos de fabricación (código M).

2. Fabricación

Aparte de maquinaria para fabricación de componentes estándares, en la fábrica de *Blumer-Lehmann* han incorporado maquinaria CNC de última tecnología para realizar componentes singulares. En *Lehmann Timber Code*

fig. 5-65 y fig. 5-66:
Proceso de diseño a fabricación:
preparación de datos para
fabricación (Centro de artes
escénicas Kilden).

fig. 5-67 y fig. 5-68
Proceso de fabricación: fresado en
máquina CNC de 5 ejes (Centro de
artes escénicas Kilden).

fig. 5-69:
Montaje de módulos en taller
(Centro de artes escénicas Kilden).

fig. 5-70:
Transporte de los módulos en
barco (Centro de artes escénicas
Kilden).

fig. 5-71 y fig. 5-72:
Montaje de módulos en obra
(Centro de artes escénicas Kilden).

AG disponen de una máquina robotizada de 5 ejes y 8 carros de transporte, creada exclusivamente para ellos, que puede procesar piezas tridimensionales enormes. La singularidad de su máquina de 5 ejes es que ésta puede girar mientras hace su recorrido, y por tanto llega a las 6 caras de un componente paralelepípedo.

3. Montaje

Blumer-Lehmann suele privilegiar el montaje de módulos de gran tamaño en taller. En lugar de transportar miles de piezas de pequeño tamaño a obra, se montan módulos en taller, hasta el tamaño permitido por el transporte. Estos módulos luego se desplazan a la obra y se montan rápidamente. De esta forma, se resuelve la parte más compleja del trabajo en la fábrica.

En el capítulo se describirá un ejemplo de proyecto producido por *Blumer-Lehmann*, y todos los pasos seguidos en el proceso.

COSTE

Al igual que para los procesos de fresado, el precio varía en función de la máquina utilizada y el tiempo de maquinado; pero también influyen:

- **la geometría:** la complejidad geométrica influye en el precio, por ejemplo, si es curvatura sencilla o doble. Los elementos fabricados con curvatura doble son hasta 8-10 veces más caros que los de curvatura sencilla. Por esta razón, se suele partir de vigas con curvatura sencilla y fresar la geometría de doble curvatura;
- **la complejidad de la pieza en función de su tamaño:** una pieza pequeña y compleja es mucho más cara que una grande y sencilla

ANÁLISIS

La filosofía de trabajo de *Blumer-Lehmann* para la fabricación de geometrías complejas se basa en la “fabricación compleja para un montaje sencillo”. Las piezas son diseñadas al mínimo detalle, incorporando detalles que facilitan su funcionamiento estructural, su fabricación, su transporte y su montaje, y a continuación se fabrican con la máxima precisión en máquinas de última generación. Es por ello que en esta fábrica llaman a estas máquinas “máquinas de comunicación”, dado que comunican, o trasladan a la pieza toda la información que debe tener.

Este es un proceso extremadamente complicado y lento, tanto por el tiempo dedicado para la preparación del diseño, la programación de máquinas y el fresado de las piezas de madera. Además, resulta ineficiente por la gran cantidad de desperdicio generada. Por otro lado, al introducir tanta información en las piezas y prefabricar módulos de mayor tamaño, se reduce el tiempo de montaje en obra.

En el caso de la madera, el tallado CNC es la única forma de conseguir piezas de determinadas geometrías. Para conseguir un proceso más eficiente, más que buscar otro proceso de maquinado, puede ser necesario explorar otro tipo de geometría que permita una fabricación más sencilla. Un ejemplo es la investigación sobre el montaje robotizado de estructuras de madera a partir de la combinación de elementos simples, que se explicará en el capítulo 5.6.2.

CUADRO DE ANÁLISIS DE PROCESO: Fresado de madera(Blumer-Lehmann)

POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN					
A.1.	posibilidades materiales	A.1.1	materiales posibles	madera de pino y abeto; material muy flexible y fácil de maquinar, muy resistente en el sentido de la fibra.	
		A.1.2	Acabados y texturas	flexibilidad total por fresado; el detalle es en función del diámetro de la fresa	
A.2.	posibilidades geométricas	A.2.1	tamaño de componentes	tamaño máximo: 27m de largo, 5.5m de ancho espesores: 1.35m de alto.	
		A.2.2	cortes internos	no se pueden hacer ángulos exactos, debido a la geometría cilíndrica de la fresa	
		A.2.3	tolerancias	tolerancias de fabricación: 1/10mm	
		A.2.4	curvatura	La curvatura simple es más sencilla de realizar por laminado curvo, pero sólo es exacto al 90% - la exactitud al 100% se consigue por fresado. El laminado a doble curvatura es muy caro; para abaratar, se suelen fresar las vigas con curvatura simple a doble curvatura.	

POSIBILIDADES DE GENERALIZACIÓN					
B.1.	proceso de diseño a fabricación	B.1.1	comunicación	D. proceso con intermediarios: Para edificios complejos, subcontratan la resolución geométrica y de preparación para la producción a consultores.	
		B.1.2	proceso	Creación de un modelo paramétrico para realizar la optimización geométrica, integrar parámetros materiales, de fabricación y montaje, y convertir a archivos de fabricación.	
B.2.	proceso de fabricación	B.2.1	tipo de proceso	D. CNC: Centros de maquinado CNC, máquina robotizada de 5 ejes y 8 carros de transporte	
		B.2.2	velocidad de fabricación	1 pieza de 9 metros tarda 5/6 horas en la maquina	
		B.2.3	flexibilidad del sistema	C. celdas de manufactura: máquinas CNC multi-tarea individuales operadas por especialistas, flexibilidad geométrica muy alta: maquinaria de 5 o 6 ejes	
		B.2.4	volumen de producción	C. lote mediano: gran volumen de fabricación de piezas singulares para unos pocos encargos	
B.3.	proceso de fabricación a montaje	B.3.1.	transporte	piezas numeradas, transporte de módulos pre-montados de gran tamaño	
		B.3.2.	montaje	pre-montaje de módulos de gran tamaño en taller, montaje rápido de módulos en obra	

POTENCIAL PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
C.1	eficiencia económica	C.1.1.	factores influyentes en el coste	<p>complejidad: lo más caro son componentes pequeños y complejos; lo ideal son grandes y sencillos</p> <p>fabricación: la pieza curvada más cara, la doblemente curvada hasta 8/10 veces más cara</p> <p>acabado: el precio depende de las horas de maquinado y la máquina utilizada</p>	
		C.1.2.	precios de venta	<p>son proyectos costosos, pero hay que tener en cuenta que es un servicio completo</p> <p>Incluye un trabajo muy importante de consultoría</p>	
C.2	eficiencia material	C.2.1.	desperdicio de material	gran desperdicio por fresado, que se quema en su central eléctrica	
C.3	eficiencia de tiempo	C.3.1.	diseño a fabricación	el proceso de diseño es lento porque se desarrolla un modelo digital complejo que incorpora toda la información sobre fabricación y montaje en el diseño	
		C.3.2.	fabricación	el proceso de fabricación por fresado es muy lento	
		C.3.3.	fabricación a montaje	el montaje en obra es rápido porque se pre-montan módulos de gran tamaño en taller	
C.4	potencial para person. en masa	C.4.1	tipo de person.	<p>C. cosmética: posibilidad de tallado de superficie, inclusión de detalles de montaje</p> <p>E. dimensional: flexibilidad en tamaño y geometría</p>	
		C.4.2	eficiencia general	<p>bajo volumen de producción</p> <p>alto nivel de personalización.</p> <p>uso de herramientas digitales avanzadas</p>	
		C.4.3	potencial	Medio: uso de tecnología avanzada pero volumen de producción; proceso de diseño complejo	

CRITERIOS PARA MEJORAR LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
D.1	criterios para el diseñador	D.1.1	geometría	<p>incorporar en el diseño detalles de montaje y de interfaces entre sistemas del edificio</p> <p>evitar vigas doblemente curvadas: procurar desarrollar el diseño con vigas planas o de curvatura sencilla</p>	
		D.1.3.	materiales	en el fresado de piezas estructurales, hay que cuidar de minimizar la rotura de fibras para no perder rigidez	
D.2	Criterios para el fabricante	D.2.1	comunicación	comunicar y coordinar desde el inicio con otros fabricantes, compartir detalles y modelos geométricos	
		D.2.3	fabricación digital	<p>elección del sistema de fabricación para cada pieza</p> <p>elección de herramientas: utilización de fresa de diámetro adecuado para minimizar tiempo de maquinado</p> <p>exploración de líneas de manufactura flexible</p>	

5.4 PROCESOS FORMATIVOS

Los procesos formativos, también llamados procesos de formado, utilizan fuerzas mecánicas o geometrías restrictivas como base para la formación o deformación de materiales hasta una geometría deseada (Kolarevic, 2005).

Los procesos formativos incluyen:

- **Procesos de deformación mecánica:** se utilizan fuerzas mecánicas para deformar materiales, generalmente en frío, e incluyen el doblado, el prensado, el estirado o el cizallamiento. Son procesos directos, dado que en el proceso no es necesario el uso de un molde.
- **Procesos de formado o moldeo:** por medio de estos procesos se dan forma a sustancias líquidas o semifluidas calientes con un molde, y éstas se enfrían y solidifican con la geometría deseada (Groover, 2007). Esta familia engloba muchísimos procesos, tanto en la producción personalizada como en la producción en masa de piezas repetitivas en plásticos (procesos de moldeo), metales (procesos de fundición), vidrios o cerámicas. Son procesos indirectos, dado que se utiliza un molde para generar una geometría.
- **Procesos de sinterizado o procesamiento de partículas:** se compactan polvos calentados para aumentar la resistencia mecánica de la pieza, y se solidifican con la geometría deseada (Groover, 2007). Estos procesos se utilizan fundamentalmente en la producción en masa de piezas metálicas (por ejemplo herramientas, rodamientos, piezas de maquinaria), cerámicas o piedras artificiales⁹⁴.

visitas realizadas

- madera:
Ducret-Orges
- metal:
Centralstaal
- vidrio:
Cricursa,
Control Glass,
Octatube
- materiales
compuestos:
PolyProducts
Vari
Preinco

⁹⁴Un ejemplo de producto cerámico producido por sinterizado es el material para encimeras de cocina *Dekton*, una superficie de piedra artificial ultra compacta fabricada por *Costentino*.

Estos procesos se basan en la deformación de un sólido dúctil sobre el que se aplica una fuerza única, repetida o continua, que excede la resistencia del material y por tanto lo deforma. El material deformado debe ser suficientemente dúctil para evitar que se fracture durante la deformación (Groover, 2007). Dentro del abanico de materiales analizados en esta tesis, en los procesos de fabricación personalizada por deformación mecánica se procesan componentes de vidrio, metal y madera.

Los procesos de deformación mecánica van desde la deformación de materia prima, como la deformación de metales en bobinas (Schodek et al., 2004), hasta la deformación de materia procesada, como el curvado en frío del vidrio o de madera laminada. En algunos casos, estos procesos se acompañan de calentamiento, aunque los procesos analizados en este capítulo se refieren a la deformación de componentes en frío.

Los procesos son distintos para cada material:

- **La deformación en frío de metal** se aplica a láminas, chapas, tubos o alambres, e incluye los siguientes procesos:
 - **Doblado:** deformación de una pieza metálica alrededor de un eje recto; con formas sencillas, o formando bridas o dobleces.
 - **Embutido:** deformación por presión con un punzón en una cavidad. Con este proceso se producen lavabos o piezas para carrocería de automóviles.
 - **Planchado:** combinación de embutido con un adelgazamiento de la pared metálica, para la producción, por ejemplo, de latas de bebidas.
 - **Estampado o prensado:** deformación con prensas, utilizado por ejemplo para producir superficies curvas para barcos.
 - Existen otros procesos singulares, como la **deformación de metales por explosión**. Este proceso lo realiza una la empresa holandesa, *3dmetalforming* (también llamada *Exploform*) para producir chapas metálicas de geometría compleja para fachada⁹⁵.
- **La deformación mecánica del vidrio** se realiza mediante la deformación en frío de láminas de vidrio templado, para obtener vidrios con una curvatura ligera.

⁹⁵En este proceso, se introducen las chapas metálicas en tanques subacuáticos, y se explosionan contra moldes de hormigón armado previamente fabricados a partir de otros moldes. Se pueden deformar casi todos los metales, incluyendo el acero, aluminio, acero inoxidable, níquel o titanio. Los componentes llegan a un tamaño máximo de 10x20 metros y un espesor de 6cm. La ventaja de este método es la posibilidad de deformar la geometría a la vez que se obtienen piezas con relieves, y la desventaja la combinación de excesivos procesos y el alto gasto material.

- **La deformación de madera** abarca los procesos de curvado de madera laminada, para la producción de vigas curvas.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

Los metales se utilizan para una variedad de aplicaciones en la construcción: elementos estructurales, envolventes, conectores, sistemas de fijación, etc. Aunque tradicionalmente la fabricación industrial con metal se dedica a la producción de piezas estándares, debido a la flexibilidad de este material es posible producir componentes personalizados con varios métodos de fabricación.

En el proceso de estampación de metal, la deformación de chapas se hace en frío, para no alterar las características del material. La deformación se hace por estirado o estampado del metal en prensas de distintos tonelajes. Durante el estampado, las prensas realizan un movimiento en el eje z, mientras que la chapa metálica, sujeta con cadenas, se mueve en el plano x-y.

La estampación de metal es uno de los ejemplos más claros de transferencia tecnológica desde la industria naval a la industria de la construcción. Tradicionalmente, con este proceso se fabricaban piezas para barcos cargueros o de recreo, y desde hace unos años, se ha utilizado el mismo sistema para fabricar componentes arquitectónicos singulares.

Uno de los primeros edificios fabricados con esta tecnología es el pabellón para el estadio de cricket *Lord's Media Centre* (Future Systems; Londres, Reino Unido; 1999). La envolvente, formada por piezas de aluminio de doble curvatura, se fabricó por fabricantes de barcos entre Inglaterra (por el fabricante *Pendennis Shipyard*) y Holanda (por el fabricante *Centraalstaal*). Este edificio es un ejemplo de fabricación por estampación de estructuras monocasco, donde la envolvente, formada por chapas de gran espesor, trabaja en conjunto con la estructura. La posibilidad de deformar chapas de espesores importantes permite un aumento de capacidad estructural de la envolvente, y por tanto una reducción en el dimensionado de la estructura. Por otro lado, la combinación entre estructura y envolvente permite mayor resistencia estructural además de muy grandes luces.

fig. 5-73 y fig. 5-74:
Proceso de estampación de chapa metálica en prensas.

fig. 5-75:
Lord's Media Centre (Future Systems; Londres, Reino Unido; 1999) .

DATOS

- **fecha de visita:** 20/12/2012
- **localización:** Groningen, Holanda.
- **tamaño:** aproximadamente 100 empleados en la fábrica, de los cuales 20 están en la unidad de arquitectura.
- **mercado:** sector naval, energético y edificación.
- **servicio:** consultoría, fabricación y montaje de kits prefabricados en metal de alta precisión.

fig. 5-76:
F-side (ONL-Kaas Oosterhuis;
Amsterdam, Holanda; 2007)

PRODUCCIÓN

- **productos:** perfiles, estructuras y chapas metálicas cortadas y deformadas para kits prefabricados en metal.
- **aplicaciones:** barcos cargueros, yates de grandes esloras, edificios singulares, y molinos de viento.
- **material:** metales a partir de 4mm: acero, acero inoxidable, aluminio, acero corten y cobre.
- **posibles acabados:** metal visto brillo o mate (granallado con abrasivos), acabado pintado.
- **tamaños:** Los espesores van desde un mínimo de 4mm (mínimo espesor para evitar estiramientos), hasta 8-10cm (espesor máximo para evitar que pese demasiado). El espesor normal en una pieza de un puente está en torno a 4-5cm. El tamaño de las chapas está limitado por la superficie de trabajo en las prensas⁹⁶, que tienen un ancho de 4m. El tamaño de módulos prefabricados está limitado por el medio de transporte, ya sea camión o barco. Idealmente, se procura maximizar el tamaño de la chapa metálica para reducir el trabajo de soldadura.
- **volumen de producción:** la producción total está en torno a las 100.000 toneladas / año, y para el sector de la edificación, han realizado 15-16 proyectos desde 2006 a 2012.

fig. 5-77:
Abu Dhabi Bridge Pavilion
(Asymptote Architects; Abu Dhabi,
UAE; 2009)

fig. 5-78:
Pabellón Porsche (Henn
Architects; Wolfsburg, Alemania;
2012).

⁹⁶La mayor pieza que han fabricado tenía 12 x 3.5m.

DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Historia: fundada en 1972, la empresa *Centralstaal* forma parte del grupo *CIG (Central industry group)*, un conglomerado de empresas industriales del sector naval y de la construcción. En los años 80, eran proveedores del material para el 90% de astilleros en Alemania y el 70% de Holanda, y fabricaron la mayoría de yates de grandes esloras en Holanda. Debido al carácter fluctuante de la industria naval y a su dependencia del petróleo, en 2006 decidieron expandir el mercado y abrirse al sector de edificación. En este momento, se dan cuenta de que tienen mucho conocimiento, buenos ingenieros e instalaciones para la fabricación, y además que realizar obras para edificación e ingeniería civil sería más fácil que hacer barcos.

El primer encargo completo fue la fachada del edificio *F-side* (ONL-Kaas Oosterhuis; Amsterdam, Holanda; 2007). Esta fachada está formada por chapas de aluminio estirado con textura, y para realizarla *Centralstaal* invirtió en una máquina especial, capaz de deformar aluminio con textura. Entre 1994 y 1999 participaron en la construcción del estado de críquet *Lord's Media Center* (Future Systems; Londres, Reino Unido; 1999), primer edificio realizado con esta técnica, y en 2012 construyeron el *pabellón Porsche* (Henn Architects; Wolfsburg, Alemania; 2012). Estos dos ejemplos consisten en estructuras monocasco, formadas por paneles metálicos que cumplen una doble función de estructura y envolvente.

Hoy en día, la fábrica de *Centralstaal* tiene una unidad dedicada a proyectos de arquitectura, y éste es el mercado de mayor crecimiento⁹⁷.

Servicios: *Centralstaal* ofrece un servicio completo dedicado a la entrega de kits prefabricados acabados en metal para barcos y edificios. Sus servicios incluyen:

- **servicios de ingeniería:** consultoría, desarrollo de software, dibujo de modelo digital, análisis estructural y de material, y exportación de archivos para producción;
- **producción de componentes metálicos:** corte y formado de chapas metálicas en 2D y 3D;
- **montaje de estructuras metálicas:** prefabricación, transporte, soldadura, acabado y supervisión de obra. El servicio es altamente especializado, y los operarios de las máquinas necesitan 5 años de entrenamiento antes de ser autónomos.

Filosofía

Centralstaal ofrece una enorme flexibilidad formal en metal. En la fabricación de barcos cada pieza es distinta, por lo que el proceso de estampación en prensas se basa en la deformación personalizada y la

⁹⁷ En el momento de la visita, el 50% de la producción de la fábrica era para la edificación.

repetición de piezas no supone ninguna ventaja. Esta filosofía se aplica también para la arquitectura⁹⁸.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

1. Diseño a fabricación

En una primera fase ,*Centralstaal* ofrece un servicio de consultoría, que ofrece asistencia con la geometría y el cálculo del precio aproximado.

Una vez confirmado el encargo, los ingenieros verifican el modelo 3d enviado por el arquitecto, y lo transforman a su propio software (*Nupas Cadmatic*).

El trabajo se hace exclusivamente en 3d, a partir de un modelo BIM centralizado en *Centralstaal* y compartido con arquitectos e ingenieros, a los que pueden dar licencias. Este software realiza los cálculos estructurales, el análisis de la envolvente 3D, incorpora las características del metal utilizado, simula el proceso de fabricación, y optimiza el material en función de los tamaños dados por el proveedor. La utilización de un software propio supone un ahorro del 20% de tiempo.

Una vez definido el diseño, el modelo se congela y la chapa deformada se exporta a dibujos 2D para fabricación. Los dibujos 2D son la proyección bidimensional de la forma geométrica tridimensional final, e incluye todos los detalles geométricos (como los bordes de paneles biselados para la soldadura), para que los procesos de corte y deformación de chapa resulten en esa geometría tridimensional precisa. A partir de los dibujos de fabricación se determina el número de chapas necesarias, y se exportan dibujos para otros fabricantes, montadores, instaladores y subcontratistas.

En la oficina, cuatro especialistas se ocupan de exportar desde el software de diseño los códigos CNC para la fabricación, los cuales dan la información a las máquinas sobre cuánta presión tiene que poner la prensa en cada punto xy para conseguir la deformación determinada (algo así como una retícula virtual con deformación y presión en cada punto).

A modo de ejemplo del trabajo de consultoría, en el proyecto para el *Abu Dhabi Bridge Pavilion* (Asymptote Architects; Abu Dhabi, UAE; 2009), el cálculo de las piezas incluyó la previsión de dilatación que se produciría en un módulo durante el transporte de los 0°C en Holanda a 40°C en Abu Dhabi. El edificio se compone de 10 piezas prefabricadas en 3 astilleros de Holanda y transportadas en un barco propiedad de *Centralstaal* hasta Abu Dhabi; como estaba previsto, el puente dilató 6cm.

fig. 5-79 y fig. 5-80:
Modelo digital en el software
Nupas Cadmatic (Pabellón
Porsche)

fig. 5-81 y fig. 5-82:
Simulación estructural en el
software Nupas Cadmatic
(Pabellón Porsche)

⁹⁸Según Wybren Terpstra, director creativo y jefe de ventas en *Centralstaal*, para ellos no existe límite formal, porque no hay limitaciones técnicas, sino que el único límite es el presupuesto. Esta información fue recabada durante la visita a *Centralstaal*.

2. Fabricación

Antes de comenzar la fabricación, se realiza un prototipo para el cliente con la geometría y acabado finales. Tras confirmación del pedido las chapas, que están numeradas y localizadas, se cortan en máquinas de corte por plasma a su tamaño y geometría. Las chapas sólo se cortan una vez, antes de ser deformadas, con lo que en esta fase deberán cortarse con la geometría exacta en previsión de su deformación.

fig. 5-83:
Corte por plasma de chapa metálica

fig. 5-84:
Estampación de chapa metálica en prensa.

fig. 5-85:
Verificación de curvatura con plantillas.

fig. 5-86:
Montaje en taller de la estructura para la escultura Traiano (Anish Kapoor; Nápoles, Italia; 2014)

fig. 5-87:
Transporte de módulos para el Abu Dhabi Bridge Pavilion (Asymptote Architects; Abu Dhabi, UAE; 2009).

En segundo lugar, la deformación de chapas se hace en prensas de distintos tonelajes, de hasta 6.000 kN. Se elige la prensa según su tonelaje en función del material y la deformación final, y en cada presa se pueden cambiar los cabezales en función del material (por ejemplo, se utiliza un cabezal de teflón para aluminio y un cabezal de acero para el acero).

Durante el proceso, un operario especializado comprueba la curvatura de cada sección de la geometría con plantillas de madera. Como la chapa resultante no se corta después, tras su deformación deberá quedar con una geometría exacta lista para montaje.

3. Montaje

El montaje se puede realizar bien en obra, bien parcialmente en fábrica. Si el montaje de chapas se hace en obra, es necesario que lo haga un equipo especializado que garantice suficiente calidad en la soldadura. De lo contrario, la estrategia es prefabricar módulos estructurales de gran tamaño en taller, que se transportan a obra y se montan por otro equipo, controlado por un ingeniero y un especialista de soldadura de *Centralstaal*. Para ellos, es fundamental realizar el control de calidad, y si posible, realizar la mayor parte del trabajo para garantizar su calidad.

La realización de todo el trabajo (consultoría, fabricación, soldadura y montaje) por técnicos de *Centralstaal* garantiza la optimización de tiempo y una mayor calidad en el acabado.

fig. 5-88:
Proceso de diseño a montaje en Centralstaal.

COSTE

En el proceso de estampado, la maquinaria para deformar chapas de grandes dimensiones supone una inversión muy importante. En el caso de *Centralstaal*, la maquinaria, de más de 40 años, está amortizada por la fabricación de barcos, por lo que son capaces de garantizar precios competitivos. En cambio, cualquier otra fábrica que tenga que invertir en maquinaria tendrá que recuperar los costes de inversión y repercutirlos en el coste del producto.

Durante la fabricación, el coste no se ve afectado por la repetición: si el producto es estandarizado los tiempos de producción no bajan ni el precio tampoco. Esto quiere decir que la producción en serie no tiene ninguna ventaja y que este proceso está orientado a la producción en masa.

Los precios para estos kits prefabricados tienen una media de 1000 €/m², incluyendo pintura y soldadura. El precio se calcula teniendo en cuenta la totalidad del proceso, desde la diseño hasta al montaje. Teniendo en cuenta el proceso global, un factor para reducir el precio es aumentar el tamaño de chapas: esto implica menos soldaduras, menos puntos de conexión, y si los paneles son espesos, tendrán mayor valor estructural por lo que hará falta menos estructura adicional. Por otro lado, cuanto menor es la deformación menor el coste, dado que el tiempo de procesado y comprobación es menor.

ANÁLISIS

- **Ventaja geométrica:** la ventaja de este proceso es la realización de geometrías complejas en metal con fabricación CNC sin necesidad de moldes. Comparado con el proceso de deformación de metales por explosión (realizado por *3dmetalfforming*), la desventaja de la deformación por prensado es que no es posible conseguir una geometría combinada con una textura. *3dmetalfforming* no es concurrencia para *Centralstaal* porque se basa en la repetición de piezas, y el producto de *Centralstaal* será más económico al precisar menos pasos y menos material.
- **Ventaja material:** al ser un proceso que no necesita moldes, se optimizan los plazos y minimiza el desperdicio. El proceso de estampación metálica es óptimo para la realización de estructuras monocasco, ya que es posible la deformación de piezas de espesores grandes. En las estructuras monocasco, es posible conseguir mayor resistencia estructural y muy grandes luces con una subestructura menor. Cuanto mayor el espesor de la chapa, mayor su resistencia propia, menor el tamaño de la estructura, y menor la necesidad de puntos de sujeción⁹⁹. Por otro lado, las

⁹⁹ En el puente del *hotel Marina del circuito F1* en Abu Dhabi, las chapas tenían 8-9m de largo sin estructuras intermedias.

chapas deformadas tienen mayor resistencia estructural que las chapas planas, siendo ideal la utilización de superficies curvas.

CONCLUSIÓN

Este proceso es un ejemplo de prefabricación completa y eficiente. La empresa no sólo ofrece un producto optimizado, sino un servicio completo de consultoría, coordinación mediante su propio software, y montaje final del proyecto. Con la optimización del diseño y la fabricación, es posible minimizar el montaje y la estructura, y reducir costes.

Además, es un ejemplo de que el coste y la eficiencia de una envolvente deben medirse en el proceso global de construcción, incluyendo el montaje y la subestructura en caso de necesitarse. A nivel económico, si se compara la fabricación de la misma geometría singular en acero y en hormigón, el proyecto podría resultar más económico en acero: el montaje es mucho más rápido, las chapas cumplen una doble función como envolvente y estructura, y además el acabado mucho más suave.

Este ejemplo también es interesante porque tanto el sistema de fabricación como el principio estructural justifican el empleo de geometrías complejas. Mientras en otros materiales, como el vidrio o la madera laminada, la geometría compleja va “contra natura” y requiere procesos de fabricación insólitos, en el caso de la chapa metálica puede ser un proceso relativamente sencillo que juega a favor de la estabilidad estructural.

CUADRO DE ANÁLISIS DE PROCESO: estampación de metal(Centralstaal)

POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN					
A.1.	posibilidades materiales	A.1.1	materiales posibles	acero, acero inoxidable, aluminio, acero corten, y cobre. Alta dureza, resistencia, y durabilidad	
		A.1.2	acabados y texturas	chapa metálica pretratada: inox,óxido,y granallado. posibilidad de textura en caso de aluminio	
		A.1.3	prestaciones	mayor resistencia cuanto más espesor la deformación de chapa puede favorecer la resistencia	
A.2.	posibilidades geométricas	A.2.1	tamaño de componentes	Tamaño máximo: ancho de 4m mayor pieza realizada:12 x 3.5m. espesores: de 4mm hasta 8-10cm	
		A.2.4	curvatura	curvatura en función del espesor de chapa y del metal	

POSIBILIDADES DE GENERALIZACIÓN					
B.1.	proceso de diseño a fabricación	B.1.1	comunicación	F. proceso interactivo: comunicación constante entre fabricante, arquitecto e ingenieros; software BIM propio (ahorro de tiempo del 20%)	
		B.1.2	proceso	software BIM para cálculos estructurales, análisis de envolvente, simulación de fabricación, y optimización del material. Exportación a diagramas 2D y <i>código G</i> de las prensas	
B.2.	proceso de fabricación	B.2.1	tipo de proceso	D. CNC: máquinas de corte CNC (por plasma), prensas de distinto tonelaje (hasta 6000 kN)	
		B.2.2	velocidad de fabricación	2-3 días para fabricar desde que el modelo 3D está definido, incluyendo comprobación de chapas	
		B.2.3	flexibilidad del sistema	B. unidad autónoma CNC: Maquinaria mono-tarea especializada CNC, alta participación de operarios y flexibilidad geométrica	
		B.2.4	volumen de producción	A. prototipos: 2-3 proyectos al año	
B.3.	proceso de fabricación a montaje	B.3.1.	transporte	chapas identificadas para facilitar el montaje	
		B.3.2.	montaje	la prefabricación de módulos grandes simplifica el montaje (menos soldadura)	

POTENCIAL PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
C.1	eficiencia económica	C.1.1.	factores influyentes en el coste	material: tipo de metal, costes del material en el momento de compra, acabados montaje: coste de personal ; el coste sube por las horas de soldaduras y montaje si el producto es estándar ni el precio ni los tiempos de producción bajan	
		C.1.2.	precios de venta	Hay que tener en cuenta el precio global (fabricación + montaje), precio medio = 1000 €/m ²	
C.2	eficiencia material	C.2.1.	desperdicio de material	la geometría se racionaliza en chapas de tamaño máximo para maximizar el aprovechamiento de chapa y optimizar la estructura	
C.3	eficiencia de tiempo	C.3.1.	diseño a fabricación	optimización del diseño con software BIM, proceso colaborativo	
		C.3.2.	fabricación	maximizar tamaño de chapa para simplificar montaje, considerar aporte estructural de la envolvente (mayor espesor para reducir subestructura),	
		C.3.3.	fabricación a montaje	el montaje es más rápido cuanto mayores son las chapas	
C.4	potencial para person. en masa	C.4.1	tipo de person.	C. cosmética: Es difícil combinar textura y geometría, excepto para aluminio con prensa especial E. dimensional: Flexibilidad geométrica 2D y 3D, límite geométrico en función de ductilidad de chapa metálica	
		C.4.2	eficiencia general	bajo volumen de producción alto nivel de personalización. uso de herramientas digitales	
		C.4.3	potencial	Medio: bajo volumen de producción, pero procesos eficientes por fabricación digital	

CRITERIOS PARA MEJORAR LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
D.1	criterios para el diseñador	D.1.1	geometría	libertad geométrica (2D-3D), curvatura en función de espesor de chapa maximizar el tamaño de chapa para simplificar montaje	
		D.1.3.	materiales	aprovechar la capacidad estructural de las chapas metálicas para optimizar el conjunto envolvente-estructura mayor capacidad estructural cuanto mayor espesor de chapa, con la posibilidad de reducir la subestructura (estructuras monocasco)	
D.2	Criterios para el fabricante	D.2.1	comunicación	potencial para incluir o informar al arquitecto en mayor medida	
			fabricación digital	exploración de líneas de manufactura flexible, combinando procesos de corte y prensado de chapas	

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

fig. 5-89:
Curvado de madera con vapor

fig. 5-90:
Curvado de madera laminada por
prensado en una dirección.

fig. 5-91:
Vigas laminadas curvas en una
dirección.

fig. 5-92:
Vigas laminadas curvas en dos
direcciones.

El curvado de madera es una técnica muy antigua. El principio básico de es el curvado de láminas de madera sin romperlas, estirando las fibras hacia el lado convexo y comprimiéndolas hacia el cóncavo. Este proceso es una práctica artesanal antigua empleada en la fabricación de instrumentos musicales, que con el tiempo se extendió a la fabricación de mobiliario (Colorado, 2014). En el proceso de curvado de la madera, es fundamental tener conocimientos sobre el comportamiento del material y adaptarse a cada especie de madera.

Existen dos formas principales de curvar madera:

- **Curvado tras calentamiento:** se realiza principalmente con agua hirviendo, vapor de agua o calor seco. Se utiliza para deformar piezas macizas, sobre todo para mobiliario.
- **Curvado de madera laminada:** se cortan y pegan tablas de poco espesor y se curvan aprovechando la flexibilidad del material (Colorado, 2014).

En ambos procesos, la madera se curva de forma mecánica en base a un molde o patrón que define la geometría.

El **curvado de madera laminada** es la técnica más utilizada para edificios. Con este proceso se curvan tablas delgadas y flexibles, pegadas y prensadas entre sí, para obtener piezas de espesores relativamente gruesos. El resultado son grandes piezas curvadas con pequeños radios.

El curvado se suele hacer en prensas hidráulicas. En primer lugar, las tablas de madera se pegan con adhesivo y se colocan en paralelo sobre el canto, en horizontal o en vertical. Después, una serie de pistones presionan sobre ellas para generar el curvado. Habitualmente el curvado laminado se hace en una dirección, aunque excepcionalmente, existen fábricas capaces de producir de vigas de madera laminada con doble curvatura, como *Hess Timber* en Alemania.

DATOS

- **fecha de visita:** 04/10/2010
- **localización:** Orges, Suiza
- **tamaño:** 30 empleados en total (25 en la zona de fabricación y 5 ingenieros en oficina).
- **mercado:** sector de la edificación, agrícola e industrial.
- **servicio:** Fabricación y montaje de estructuras singulares y de gran tamaño en madera laminada.

PRODUCCIÓN

- **producto:** estructuras de madera laminada y sistema de montaje patentado "Ferwood"¹⁰⁰.
- **aplicaciones:** estructuras lineales o curvas, forjados prefabricados, forjados acústicos, estructuras portantes en madera.
- **material:** madera de abeto y alerce en tablas secas, proveniente de dos serrerías locales. Se pueden tener varias calidades de madera laminada bajo pedido.
- **posibles acabados:** estructuras de madera vista, forjados acabados en tableros de virutas orientadas, yeso o madera.
- **tamaños máximos:** forjados prefabricados de hasta 14x2,5m; estructuras de hasta 42m de largo por 2,5m de altura. El límite de tamaño está determinado fundamentalmente por el transporte.
- **volumen de producción:** aproximadamente 10.000m³/año.

fig. 5-93, fig. 5-94 y fig. 5-95:
Obras realizadas por Ducret-Orges.

DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Historia: es una empresa familiar creada en 1984.

Servicios: *Ducret-Orges* está especializado en la realización de estructuras complejas y de gran tamaño. Entre sus servicios, se incluyen el diseño, la fabricación y el montaje. No venden madera encolada o curvada a otras fábricas, sino que producen exclusivamente para construcción propia.

Filosofía

Gracias a su avanzada maquinaria CNC, la empresa destaca en el mercado por la construcción de proyectos únicos y singulares de gran tamaño, y por su sistema patentado de madera armada.

¹⁰⁰El sistema "Ferwood" es un sistema patentado de conexiones de madera armada desarrollado por Ducret-Orges en colaboración con el HES de Yverdon-Les Bains (Alta escuela especializada de Yverdon-Les Bains, profesor R. Oguey).

Dado que fabrican todo lo que construyen, en *Ducret-Orges* tienen flexibilidad para hacer piezas estándares o singulares. Prefieren producir en su fábrica todo lo que hacen, porque les da mayor flexibilidad e independencia, además de reducir costes.

La estandarización de piezas simplifica el proceso de programación y diseño.

DESCRIPCION DEL PROCESO

1. Diseño a fabricación

Ducret-Orges se dedica a la realización de estructuras singulares, desde el diseño hasta el montaje. Si el cliente es un arquitecto, se encargan de desarrollar los detalles de construcción y de fabricación; mientras que si el cliente es un carpintero, se encargan de verificar los detalles de fabricación y montaje. En este segundo caso, los carpinteros son intermediarios entre el arquitecto y el fabricante. Para la fabricación, parten de datos DXF/DWG.

2. Fabricación

El pedido de material se hace en función de los proyectos que estén confirmados. Tras la llegada del material, se realiza un control de calidad mecánica y de humedad con un escáner, y se desechan las piezas que tengan nudos o defectos. Para aumentar la longitud de tablas, éstas se pegan mediante empalme a testa dentada, y después éstas se cepillan.

Para el proceso de laminado, las tablas se pegan con cola de poliuretano sin formaldehidos y se presionan en prensas hidráulicas. El proceso de laminado por encolado tarda entre 3 y 4 horas, tanto en recto como en curvo.

El laminado curvo se hace de forma artesanal, siguiendo el trazado de curva dibujado en un plano a escala 1:1. Los pistones se colocan de forma manual por varias personas. En otras fábricas como la alemana *Hess timber*, los pistones pueden moverse de forma automática por control numérico, lo que facilita la fabricación de piezas con curvaturas distintas. De forma excepcional, en esta fábrica, además, las vigas pueden tener doble curvatura.

Tras el laminado de tablas, el mecanizado de las piezas se hace en dos máquinas CNC de 5 ejes. Estas máquinas permiten trabajar con varias piezas a la vez, y piezas rectas o curvas lineales de gran tamaño, y combinan operaciones de fresado, taladrado y aserrado de madera.

Finalmente, las piezas se preparan para el montaje, colocando fijaciones metálicas, y las estructuras se prefabrican lo más posible en taller. En el caso de realizarse la construcción de un producto en madera armada, se emben varillas metálicas en la madera con una resina especial.

fig. 5-96 y fig. 5-97:
Curvado de madera laminada
encolada en prensas hidráulicas.

fig. 5-98:
Fresado CNC de madera laminada

COSTE

Los factores influyentes en el coste son el tiempo de mecanizado, así como la complejidad de las piezas. Si las piezas son distintas, y cuanto mayor su complejidad, se multiplica el tiempo de programación y maquinado. La repetición de piezas simplifica y reduce los costes.

ANÁLISIS

Al igual que el prensado de metal, el curvado de madera laminada es un proceso singular que implica una inversión importante en maquinaria y una gran superficie de fábrica, y que se realiza sólo en unas cuantas fábricas a nivel mundial. Estas fábricas proveen con vigas curvas al resto de industrias por lo que se trata de un producto caro. Si el prensado es por control numérico, se evita la utilización artesanal de plantillas y permite mayor continuidad entre el diseño y la fabricación digital.

De forma excepcional se pueden laminar vigas con doble curvatura en prensas 3D; por tanto, las vigas de doble curvatura pueden costar hasta 8 o 10 veces más que vigas de curvatura sencilla. Para economizar lo normal es que se curve primero la viga con curvatura simple en las prensas, y luego se haga el fresado de la curvatura doble, lo que supone un importante desperdicio.

En esta fábrica resulta interesante la filosofía de empresa familiar que hace una inversión en alta tecnología. Se ha observado que la apuesta por alta tecnología de las empresas familiares resulta frecuente en el contexto suizo. En este país de tradición maderera, es frecuente encontrar empresas de fabricación personalizada en madera, dado que es un material que se trabaja con facilidad, además de relativamente económico y de fácil suministro.

Por otro lado, llama la atención el hecho de que, a pesar de la inversión realizada en maquinaria de última generación y de su enfoque en proyectos singulares, los proyectos que realiza *Ducret-Orges* son relativamente estándar. En las visitas realizadas, se han encontrado varios casos donde, a pesar de realizar una importante inversión en tecnología de última generación, no ha habido oportunidad ni encargos singulares para utilizar la maquinaria a su mayor potencial.

CUADRO DE ANÁLISIS DE PROCESO: Deformación de madera (Ducret-Orges)

POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN					
A.1.	posibilidades materiales	A.1.1	materiales posibles	madera laminada: gran flexibilidad, grandes tamaños y altas prestaciones estructurales	
		A.1.2	Acabados y texturas	flexibilidad por fresado de piezas planas y curvas A más detalle más lento y costoso es el proceso	
A.2.	posibilidades geométricas	A.2.1	tamaño de componentes	limitado por transporte forjados hasta 14x2,5m; estructuras hasta 42m x 2.5m espesor: en función del número de tablas encoladas; espesor máx. 2,5m	
		A.2.4	curvatura	simple: deformación por prensado de madera laminada; curvatura en función de longitud de viga doble: prensado a doble curvatura (excepcional); o por fresado de vigas de curvatura simple	

POSIBILIDADES DE GENERALIZACIÓN					
B.1.	proceso de diseño a fabricación	B.1.1	comunicación	A. transferencia directa los clientes suelen ser carpinteros, que conocen los detalles; si son arquitectos es necesario transmitir parámetros de fabricación y montaje	
		B.1.2	proceso	Varía el espesor final, la longitud total del elemento y la curvatura; se imprimen plantillas para definir la curvatura	
B.2.	proceso de fabricación	B.2.1	tipo de proceso	B. mecánico: prensado hidráulico con colocación manual D. CNC: Corte y fresado de madera	
		B.2.2	velocidad de fabricación	Curvado simple: 3-4 horas para encolado, en recto y en curvo Para dar curvatura doble, si se fresa la doble curvatura el proceso es mucho más lento y costoso	
		B.2.3	flexibilidad del sistema	D. sistemas flexibles: Celdas CNC, combinadas con celdas mecánicas	
		B.2.4	volumen de producción	C. lote mediano: hay algunos encargos singulares, pero la mayoría de encargos son estándar	
B.3.	proceso de fabricación a montaje	B.3.1.	transporte	Las piezas son pesadas pero resistentes; el transporte es complejo para estructuras de gran tamaño	
		B.3.2.	montaje	Es más sencillo cuanto mayor el grado de prefabricación	

POTENCIAL PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
C.1	eficiencia económica	C.1.1.	factores influyentes en el coste	Geometría: la doble curvatura se consigue bien por fresado, bien en fábrica muy especializada; en ambos casos es muy costosa Fabricación: el precio aumenta con el tiempo de mecanizado complejidad de las piezas, dedicación de ingenieros, tiempo de programación de la máquina	
		C.1.2.	precios de venta	La pieza curvada es más cara que la recta, la pieza doblemente curvada hasta 8/10 veces más cara	
C.2	eficiencia material	C.2.1.	desperdicio de material	Hay desperdicio en la producción de tablas, en el corte de vigas curvas, en el fresado a doble curvatura	
C.3	eficiencia de tiempo	C.3.1.	diseño a fabricación	el conocimiento de detalles constructivos facilita el proceso: si el cliente es un arquitecto, los desarrollan por completo; si es un carpintero solo los revisan si las piezas son estándares, el tiempo de programación de las maquinas se reduce	
		C.3.2.	fabricación	Se dibuja una plantilla para colocar la prensa, cuanto más sencilla la curvatura, mejor	
		C.3.3.	fabricación a montaje	El montaje en obra es rápido porque se premontan módulos de gran tamaño en taller	
C.4	potencial para person. en masa	C.4.1	tipo de personalización	C. cosmética: aunque no es habitual, acabados personalizados mediante fresado, E. dimensional: Geometría personalizable	
		C.4.2	eficiencia general	bajo volumen de producción alto nivel de personalización. uso de herramientas digitales para mecanizado	
		C.4.3	potencial	Bajo: proceso costoso con bajo volumen de producción	

CRITERIOS PARA MEJORAR LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
D.1	criterios para el diseñador	D.1.1	geometría	evaluar necesidad real de curvatura doble, subdividiendo o simplificando el diseño maximizar prefabricación para facilitar montaje	
		D.1.3.	materiales	la curvatura depende de la longitud y espesor de viga	
D.2	Criterios para el fabricante	D.2.1	comunicación	comunicación de detalles constructivos al arquitecto para facilitar proceso de diseño a fabricación	
		D.2.2	fabricación digital	exploración de líneas de manufactura flexible configuración automática de la prensa hidráulica prensas CNC para vigas de doble curvatura	

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

fig. 5-99:
Curvado en frío en la fábrica
Freeformglass, Holanda

fig. 5-100:
Zuidpoort Canopy (Mick Eekhout;
Delft, Holanda; 2006)

fig. 5-101:
Aparcamiento Westerlaan
(Ector Hoogstad Architecten;
Rotterdam, Holanda; 2008)

fig. 5-102:
Pabellón Floriade (Asymptote;
Haarlemmermeer, Holanda; 2002)

El curvado en frío de vidrio es un proceso relativamente novedoso que se basa en la deformación mecánica del vidrio en frío, forzando su curvatura por presión mecánica.

Tradicionalmente, el vidrio se ha deformado siempre en fábrica, calentando el vidrio a altas temperaturas sobre un molde. En los procesos de curvado de vidrio en frío, las láminas de vidrio templado se deforman mediante fijaciones mecánicas o con su propia carpintería. La deformación mecánica se hace generalmente por control manual bien en fábrica bien en obra.

Debido a la tensión aplicada previamente al vidrio en el proceso de templado, es posible deformar el vidrio sin causar tensión en su superficie. El efecto secundario de esta deformación es que el vidrio templado pierde resistencia, por lo que es necesario subdividirlo en piezas de menor tamaño (BRS, s.f.). Lo ideal es que el vidrio de base sea rectangular.

Para realizar el proceso, es importante prever las propiedades de curvado y rotura del vidrio en cada contexto. Al ser vidrio laminado, el vidrio curvado en frío puede ser aislante o incluso integrar células fotovoltaicas.

Durante el montaje, el vidrio deberá colocarse en una subestructura curva que acompañe su geometría.

EJEMPLOS

Octatube es una empresa de consultoría situada en Delft (Holanda) que está especializada en diseño, ingeniería y fabricación de proyectos complejos, sobretudo en vidrio. Han utilizado la técnica de curvado en vidrio desde 2001, para la cual hacen cálculos de comportamiento, dimensionado, fabricación de prototipos, ensayos mecánicos y gestión de obra.

Con esta técnica, *Octatube* ha realizado una variedad de proyectos. En la hornacina de la *parada de tranvía en Zuidpoort* (Mick Eekhout; Delft, Holanda; 2006), se logró una superficie con doble curvatura continua en vidrio laminado templado, llevando al límite las posibilidades de curvado en frío (Kolarevic y Klinger 2008). La superficie se dividió en piezas de 1.5x3 metros, con una deformación de 100mm por panel. La hornacina está fijada sobre una subestructura tubular de acero.

En el *pabellón Floriade*, también llamado *Hydra Pier* (Asymptote; Haarlemmermeer, Holanda; 2002), se combinaron piezas de vidrio curvado

en frío y en caliente para la fachada sur. Los paneles laterales de fachada se curvaron en caliente con un diámetro de 2.5m; los paneles centrales, de tamaños 2x2m y menor curvatura, se curvaron en frío.

ANÁLISIS DEL PROCESO

La deformación industrial de vidrios de gran tamaño para la construcción es un proceso complejo. El proceso de curvado de vidrio en frío surgió como alternativa al termoformado de vidrio, un proceso que es lento y muy costoso, y que necesita maquinaria especializada.

Comparado con el curvado en caliente, en este proceso se consiguen piezas con un radio de curvatura mucho más limitado (el radio mínimo es de 6 metros), ya que el vidrio en frío se puede romper más fácilmente. Por otro lado, el vidrio puede ser más fino, y las tolerancias son pequeñas (1/2 mm por 2cm de espesor).

La calidad óptica del vidrio curvado laminado en frío es superior a la del vidrio termoformado por curvado laminado, pero igual al vidrio termoformado por curvado recocido, sólo que no presenta tensiones en los bordes. Comparado con este proceso, se pueden fabricar piezas de grandes dimensiones y confiere al proyecto una gran suavidad y continuidad entre los paneles de vidrio.

Por último, el precio final es mucho menor, lo que facilita la substitución de vidrios en caso rotura.

Cada proyecto tiene que ser estudiado de manera individual para determinar cuál es el proceso más adecuado.

Estos procesos se basan en la colocación de una sustancia líquida o blanda en un molde, el cual define la geometría final cuando el material se enfría y solidifica.

Los procesos de moldeo son los sistemas de fabricación más antiguos de la humanidad: los metales se formaban en moldes de metal o piedra para joyas o armas; y más tarde, se fabricaron de esta manera el vidrio y la cerámica. A partir de los años 60, con el desarrollo de los materiales sintéticos, se fabrican rápidamente cantidades masivas de objetos de plástico con una gran variedad de técnicas.

En la construcción industrializada, los procesos de moldeo se han utilizado extensamente en obra, siendo el más común la construcción con hormigón en masa formado con encofrados. En el contexto del prefabricado industrial arquitectónico, estas técnicas se pueden dividir en dos familias:

- **Extrusión o fundición:** con estas técnicas se fabrican grandes cantidades de piezas estandarizadas, como perfiles metálicos, conectores, piezas metálicas, etc.
- **Moldeo:** esta técnica se utiliza para la fabricación de prototipos o pequeñas cantidades de piezas no estandarizadas, las cuales nos ocupan en esta tesis. Estos procesos se basan en la utilización de moldes negativos o positivos, fabricados con máquinas de control numérico mediante fresado, impresión 3d, o a mano.

En los procesos de moldeo se utilizan materiales líquidos o semifluidos que se aplican sobre un molde. Los materiales más comunes son el vidrio, el metal, la cerámica, los plásticos y los materiales compuestos.

La fabricación por moldeo se utiliza tanto en la producción en masa de objetos estandarizados (como en el caso de objetos de metal, plástico o cerámica), como en la fabricación personalizada de pequeños volúmenes (como en el caso del vidrio y los materiales compuestos).

visitas realizadas

- GRG: *Vari*
- GRP: *PolyProducts*
- GRC: *Preinco*
- vidrio:
Cricursa,
Control Glass

En función del material tratado, estos son algunos de los procesos existentes en la industria (Groover, 2007):

- **Producción en masa de plásticos:**
 - **Moldeo por extrusión:** el plástico se fuerza a través del orificio de un troquel, con el fin de obtener un producto largo y continuo.
 - **Moldeo por inyección:** el plástico se calienta y se fuerza hacia la cavidad de un molde, donde se solidifica.
 - **Moldeo por compresión y transferencia:** se introduce una cantidad de plástico en la mitad inferior de un molde calentado, se comprime con una pieza superior, y se retira de la cavidad.
 - **Moldeo por soplado:** se utiliza presión del aire para inflar un plástico dentro de la cavidad de un molde.
 - **Moldeo rotacional:** se moldea el plástico en un molde rotatorio para lograr una forma hueca.
 - **Moldeo por vacío:** se utiliza una presión negativa para empujar una hoja precalentada contra la cavidad de un molde.
 - **Termoformado:** se calienta y se deforma una hoja plana termoplástica para que adquiera la forma deseada; este proceso se utiliza también en la fabricación personalizada de láminas acrílicas para la edificación.
 - **Fundición:** vertido de una resina líquida a un molde por gravedad para llenar la cavidad, hasta que endurezca.
- **Producción en masa de componentes metálicos:**
 - **Fundición en molde de arena:** se vierte metal fundido en la cavidad de un molde de arena comprimida alrededor de un modelo. Es el proceso más utilizado.
 - **Fundición en moldes desechables:** los moldes se deshacen, se colapsan o se funden al verterse el metal líquido. Son moldes negativos o positivos hechos de cascarón de arena compactada, de poliestireno expandido, de cera, yeso o cerámica, utilizados para aleaciones con puntos de fusión bajos.
 - **Fundición en moldes permanentes:** los moldes son de acero o de hierro fundido, y son abribles.

- **Producción en masa de vidrio:**
 - **Fabricación por girado:** para objetos con forma de embudo.
 - **Prensado de vidrio:** para fabricar moldes, lentes, etc.
 - **Soplado de vidrio:** para fabricar contenedores o botellas.
 - **Fundición:** vertido del vidrio en un molde para fabricar objetos macizos.
 - **Rodado de placas planas:** compresión del vidrio en rodillos para producir hojas de vidrio.
 - **Flotación:** el vidrio fluye desde el horno de fundición a la superficie de un baño de estaño derretido donde se enfría y solidifica. Se utiliza también para la producción de hojas de vidrio; comparado con el rodado, se consiguen hojas más uniformes.
- **Producción personalizada de vidrio:**
 - **Vidrio curvado templado:** calentamiento, curvatura y enfriamiento rápido de las hojas de vidrio sobre moldes que pueden ser reconfigurables.
 - **Vidrio curvado recocido:** calentamiento, curvatura y enfriamiento lento de las hojas de vidrio sobre un molde hecho a medida.
- **Producción personalizada de materiales compuestos:**
 - **formado por moldeo:** aplicación sobre un molde del material compuesto, generalmente de forma manual.

EL MOLDE

El elemento *molde* tiene una gran importancia en los procesos de moldeo, dado que influyen en el coste final de la pieza, en el tiempo de ejecución y en el acabado. El molde es la pieza sobre la que se aplica el material líquido, el cual endurece sobre él. Los moldes se suelen formar con el negativo de la geometría final deseada.

El tipo de molde depende del material y de la geometría de la pieza, de la necesidad de seriación, y de la limitación en el coste total. El material se elige en función de la necesidad de reutilización del molde, y de la temperatura y la dureza del material vertido. Los moldes son de arena para los metales, de metal para el vidrio, de metal o madera para los materiales compuestos, etc.

- **En función de su utilización,** los moldes pueden ser:
 - **desechables,** cuando son de uso individual o para lotes pequeños, los moldes se destruyen, se queman, se derriten o

se evaporan con la temperatura en el proceso de desmoldado. Se hacen con materiales económicos, como madera, arena, escayola o poliestireno.

- o **reconfigurables:** la base del molde se reutiliza, pero al mover algunas piezas se pueden conseguir distintas geometrías. Son moldes reconfigurables, por ejemplo, los moldes formados por costeros de madera utilizados para fabricar piezas de cemento reforzado con fibra de vidrio (GRC), donde se mueven los costeros para variar el tamaño de las piezas.
- o **moldes reutilizables:** se hacen con materiales duros y resistentes a altas temperaturas. Son desmontables o flexibles para el desmoldado y se utilizan principalmente para la producción de grandes, y son más costosos de fabricar lotes (Schodek, et al., 2004). Son moldes reutilizables, por ejemplo, los moldes metálicos o de poliéster con fibra de vidrio que se reutilizan hasta 150 veces.
- o **encofrados perdidos:** para la construcción in situ.

Los moldes se pueden fabricar de manera artesanal o por CNC: en procesos de fabricación digital, normalmente se fabrican moldes de materiales blandos, como espuma de poliuretano, madera o metales blandos. Finalmente, a los moldes se les puede añadir piezas interiores para conseguir texturas especiales, como piezas de goma.

- **Materiales para moldes:**

- o **madera:** maderas duras secadas en horno, a las que se les aplica un barniz para tapar los poros; para series cortas o prototipos.
- o **escayola con fibra de vidrio:** se utilizan para pequeñas series o prototipos.
- o **poliéster reforzado con fibra de vidrio:** se utiliza para series de hasta 500 piezas.
- o **colada epoxi,** son de mayor resistencia y soportan temperaturas grandes, por lo que se aplica a series de mayor producción, hasta 1000 piezas. Es necesario un modelo para fabricar el molde.
- o **aluminio:** es un material fácil de mecanizar y con gran capacidad de evacuación del calor. Son muy utilizados en grandes series.
- o **acero:** permiten fácil mecanizado y buenos acabados de superficie; sobre todo si se emplean aceros blandos.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

El **vidrio plano** se fabrica en unas pocas fábricas en el mundo, mediante procesos continuos, predominantemente el flotado de vidrio. El resultado son hojas de vidrio plano de grosor uniforme, con tamaños de hasta 6m x 3.5m, que son suministradas a las cristalerías para que los procesen.

En el **termoformado de vidrio**, se parte de hojas de vidrio plano que se calientan y curvan por gravedad sobre un molde. Debido a las altas temperaturas del vidrio, los moldes suelen ser metálicos o de materiales refractarios, como arena, cerámica, o grafito. El tiempo de curado es largo debido a que las fuerzas internas durante el secado pueden provocar su ruptura fácilmente (Schodek, et al., 2004).

El **curvado** se hace de tres maneras:

- **Curvado templado:** se consigue mediante el proceso de calentamiento, curvado y enfriamiento rápido del vidrio en hornos sobre moldes formados por tubos de hierro que se colocan según la curvatura necesaria. Este proceso incrementa la resistencia mecánica a la flexión, a la compresión y al impacto del vidrio (Cricursa, 2009). El proceso de formado es muy rápido, y la resistencia alcanzada muy alta, aunque la calidad visual no es perfecta. Las geometrías resultantes son piezas de curvatura sencilla, cilíndricas y con un recorrido máximo de 180°. Los moldes utilizados en el curvado templado son reconfigurables, dado que los tubos se pueden recolocar para formar piezas de vidrio de distintos diámetros. La colocación de tubos se hace de forma manual, colocando los tubos de hierro con plantillas o, en algunos casos, de forma programada.
- **Curvado recocido:** el vidrio se calienta lentamente y al alcanzar el punto de plasticidad, cae por gravedad sobre un molde hecho a medida. Una vez conseguida la geometría deseada, empieza el proceso de enfriamiento lento, llamado recocido (Cricursa, 2009). Este proceso es mucho más lento y el vidrio resultante menos resistente, aunque con calidad visual muy alta. En este caso la libertad geométrica es mayor, dado que, a diferencia del vidrio curvado templado, se pueden crear piezas convexas y piezas de doble curvatura. Los tamaños están limitados por el tamaño de los hornos. Los moldes que se utilizan son metálicos, y pueden ser reconfigurables o fabricados a medida con chapa metálica deformada.

fig. 5-103, fig. 5-104, fig. 5-105y, fig. 5-106:
Proceso de fabricación de vidrio curvado templado.

fig. 5-107:
Molde de hierro para el termoformado del vidrio curvado recocido.

- **Curvado en frío:** deformación mecánica del vidrio en frío. La deformación geométrica es mucho más limitada. Este proceso se ha descrito en el capítulo 5.4.1.3.

Se han realizado visitas a dos fábricas de termoformado de vidrio: *Control Glass*, y *Cricursa*.

DATOS

- **fecha de visita:** 06/08/2015
- **localización:** Teruel, España.
- **tamaño:** 120 empleados, de los cuales 100 están en la fábrica y 20 en las oficinas.
- **mercado:** sector de la edificación, automovilístico, naval, fabricación de vidrios especiales como mamparas. Sus clientes son sobretodo vidrieros, fabricantes de ventanas, fachadistas e industriales. El 40% de ventas se hacen en el extranjero.
- **servicio:** Fabricación de vidrios especiales.

PRODUCCIÓN

- **producto:** vidrio templado, laminado-templado, vidrio de doble acristalamiento, vidrio serigrafiado, y vidrio curvado.
- **aplicaciones:** puertas, mamparas de ducha, ventanas en edificios, trenes, tractores, automoción, y barcos.
- **material:** vidrios templados, laminados, curvos, serigrafiados, vidrios con placas fotovoltaicas, vidrio de cristal líquido.
- **tamaños:** el vidrio llega a fábrica en tamaños 6m x 3,21m, y a partir de ahí se cortan al tamaño deseado. El vidrio curvado recocido tiene un tamaño máximo 4,20m x 2,70m limitado por el horno; la altura máxima la marca la flecha máxima de curvatura.
- **volumen de producción:** 20 toneladas de vidrio/día, el 30% es vidrio curvo.

DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Historia: la empresa se crea en 1965 con el nombre de la *Unión vidriera aragonesa*. En 2005 surge *Control Glass*, una rama dedicada a la fabricación de vidrios especiales.

La primera obra que realiza *Control Glass*, es la *gasolinera Repsol* situada en la calle Alberto Aguilera de Madrid. Una de sus obras emblemáticas son los vidrios del interior del *hospital Rey Juan Carlos* (Rafael de la Hoz: Madrid; 2012) el vidrio de la envolvente se produjo en la fábrica de *Cricursa*.

Servicios: fabricación de vidrios especiales, sin montaje.

fig. 5-108:
Gasolinera Repsol en Alberto Aguilera, Madrid (2011);
fabricación de la fachada por
Control Glass.

fig. 5-109:
Hospital Universitario Rey Juan Carlos (Rafael de la Hoz: Madrid;
2012); vidrios interiores fabricados
por Control Glass.

fig. 5-110:
Hospital Universitario Rey Juan Carlos (Rafael de la Hoz: Madrid;
2012); fachada fabricada por
Cricursa.

Filosofía

En *Control Glass* se fabrican vidrios curvos especiales, pero el 70% de su producción siguen siendo vidrios planos, incluyendo vidrios procesados, templados o con doble acristalamiento.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

1. Diseño a fabricación:

En *Control Glass* tienen un departamento reducido de consultoría, que da un apoyo previo a fabricación. Este departamento técnico prepara el despiece de la geometría y los archivos de fabricación. Otras empresas como *Cricursa* han priorizado el servicio de venta, consultoría y atención al cliente para destacar en el mercado, sobre todo hacia los arquitectos, lo cual, por otro lado, encarece sus precios.

2. Fabricación:

A partir de las láminas de vidrio bruto de tamaño 6m x 3,21m, el vidrio se modifica en distintas líneas de procesado, en el siguiente orden:

- **Corte del vidrio con diamante:** el corte se realiza de forma manual o con maquinaria CNC. Para el corte de vidrio laminado, se utiliza una resistencia que calienta el plástico. Para el vidrio curvo, tiene que cortarse antes del curvado, previniendo la forma final.
- **Cantado del vidrio:** se hace para suavizar los cantos y aumentar la seguridad. El cantado de vidrios estándar se hace en una línea automática; mientras que los cantos de los vidrios singulares se pulen de forma manual.
- **Realización de taladros:** se hace con muela de diamante en una máquina de control numérico programada por un operario.
- **Templado de vidrio plano:** el templado se hace para aumentar la fuerza mecánica y la resistencia al choque térmico del vidrio. El vidrio templado se utiliza en fachadas, puertas, mamparas, ventanas de coches, trenes, barcos y tractores, y vidrios oscuros, entre otros. El proceso consiste en el calentamiento en horno a 700° y enfriado rápido posterior. Tras el templado, el vidrio no se puede manipular.
- **Serigrafiado:** en caso de necesitarse, el vidrio se pinta por completo o mediante la aplicación de pantallas. Es posible curvar el vidrio una vez serigrafiado.
- **Curvado del vidrio:**
 - **Curvado templado**
En este proceso, se calienta el vidrio en el horno hasta 630°C sobre tubos de hierro colocados formando una curva; el vidrio luego se enfría rápidamente, en un proceso que en total dura 6min. El centro del panel se mantiene viscoso, contrayéndose y

fig. 5-111:
Geometrías del vidrio curvado
templado.

fig. 5-112:
Geometrías del vidrio curvado
recocido.

enfriándose y ganando resistencia. Al igual que el vidrio templado plano, el vidrio resultante es resistente pero no tiene una buena calidad óptica.

- o **Curvado recocido** (curvado por gravedad):

Se fabrica un molde a partir de tubos metálicos o bien con chapa deformada, que se coloca en la base de un horno. Se introduce la lámina plana de vidrio en el horno, que al calentarse se vuelve maleable, va cediendo por gravedad y coge la forma del molde. El proceso tarda unas 8 horas: 4 horas de calor, y 4 horas de enfriado lento, para que el vidrio no se rompa.

Para la fabricación de vidrios con doble curvatura, se utiliza un molde especial metálico hecho por encargo. Es un proceso mucho más lento, y el vidrio resultante tiene resistencia baja pero alta calidad óptica.

- **Laminado**

Control Glass es una de las 20 cristalerías de España donde se realiza el laminado del vidrio. Este proceso consiste en la adición de una lámina entre dos vidrios para alterar sus características, como el comportamiento térmico o el color. Tras el lavado del vidrio por osmosis con agua sin cal, éste se mete en una cámara de temperatura y humedad controladas, donde se añade la lámina de butiral o de otro material como tejidos, leds, materiales naturales, o mallas metálicas. Después, se introduce el vidrio en un horno llamado calandra, donde se asegura la unión entre la lámina y el vidrio, y a continuación se introduce en una autoclave donde se extrae el aire entre vidrios mediante presión. En caso del vidrio curvo, el laminado se hace después del curvado.

3. Montaje

Finalmente, el vidrio se puede montar en un doble acristalamiento. El montaje de vidrios estándares se hace en líneas automatizadas, mientras que el montaje de doble acristalamiento de vidrios curvos se hace de forma manual.

La fábrica de *Control Glass* tiene tres máquinas de corte, tres pulidoras, una línea de serigrafía, dos líneas de laminado, tres autoclaves, tres hornos de templado plano, y uno para vidrios curvos templados, cinco hornos para el curvado recocido, seis líneas de doble acristalamiento, un horno de *heat soak test*¹⁰¹ y un taller de carpintería dedicado a la fabricación de los embalajes de madera.

fig. 5-113 y fig. 5-114:
Horno de vidrio curvado templado
en Control Glass

fig. 5-115:
Horno de vidrio curvado recocido
en Control Glass

fig. 5-116:
Preparación de molde para el
termoformado del vidrio curvado
recocido.

fig. 5-117:
Centro de laminado de vidrio

¹⁰¹ El proceso de *heat soak test* consiste en someter al vidrio templado a un ciclo de calentamiento a 280°C con el objetivo de minimizar los riesgos de rotura espontánea.

COSTE

En Control Glass, los precios varían en función de la geometría y el tratamiento del vidrio. Por ejemplo, un vidrio curvado templado laminado de curvatura simple cuesta unos 300 €/m², mientras que un vidrio curvado recocido laminado de doble curvatura puede costar hasta 1500 €/m².

Algunos factores que influyen en el precio son el aprovechamiento de material, o la elección del proceso adecuado para el curvado.

ANÁLISIS

El moldeo del vidrio es un proceso complicado y lento: la fabricación se hace pieza a pieza, sin prácticamente automatización ni fabricación en línea. Debido al bajo grado de automatización, no se puede hablar de fabricación en masa, sino más bien de producción artesanal, lo cual se refleja en los precios. Por ello, a menudo se sustituye el vidrio por paneles termoplásticos transparentes, más económicos.

La automatización del curvado de vidrio se aplica solamente en los hornos de curvado templado, donde es posible recolocar las barras metálicas de forma automática. El proceso de curvado recocido, que necesita moldes individuales, se realiza de forma totalmente artesanal.

El producto se abarata cuanto más repetitiva es su geometría y más rápida su producción. Por ejemplo, el curvado templado, donde se utilizan moldes reconfigurables para producir rápidamente varias piezas de forma simultánea, es más económico que el recocido.

Por otro lado, es posible optimizar el producto sencillamente al incorporar sentido lógico o información básica en el diseño arquitectónico, al tener en cuenta el aprovechamiento del material, o las necesidades fundamentales del proyecto; por ejemplo si se requiere un curvado recocido para una calidad óptica óptima en vidrios donde la diferencia es despreciable. En definitiva, el sentido lógico en la elección de proceso influye mucho en el precio.

CUADRO DE ANÁLISIS DE PROCESO: Moldeo de vidrio (Control Glass)

POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN					
A.1.	Moldes	A.1.1	materiales	vidrio producido por 6 fabricantes mundiales; duro, frágil y transparente; difícil de moldear	
		A.1.2	Acabados y texturas	Acabados: Vidrios tintados, serigrafiados, control solar, bajo emisivos, impresos, fundidos, y anti reflectantes Texturas: Serigrafía y fresado excepcionalmente	
		A.1.3	prestaciones	Control de cualidades ópticas, térmicas, y control solar el templado mejora la resistencia del vidrio mayor aislamiento en doble vidrio con cámara de aire	
		A.1.5	moldes	materiales: arena, cerámica, tubos metálicos reconfigurables o metal deformado	
A.2.	posibilidades geométricas	A.2.1	tamaño de componentes	Curvado templado : hasta 4500x2440 (cricursa) curvado recocido: hasta 5,8x2,5m (cricursa) Espesor máximo: 10+10mm vidrio laminado / 3 a 19mm vidrio monolítico	
		A.2.4	curvatura	Curvado templado: curvatura simple, radio 1m a 2m curvado recocido: el máximo de curvatura son 180º curvatura doble, no se pueden hacer piezas cóncavas	

POSIBILIDADES DE GENERALIZACIÓN					
B.1.	proceso de diseño a fabricación	B.1.1	comunicación	B. proceso 'de idas y vueltas': enfoque individualizado, proceso largo que encarece el producto final.	
		B.1.2	proceso	Apoyo técnico: trabajo de despiece de la geometría y preparación de archivos de fabricación	
B.2.	proceso de fabricación	B.2.1	tipo de proceso	A. manual: manipulación y montaje de vidrios curvos C. automático: tratamiento de vidrios planos: canteado, montaje y manipulación D. CNC: corte de vidrio	
		B.2.2	velocidad de fabricación	vidrio curvado templado: 6min para calentamiento y enfriado en un horno muy largo con gran capacidad Curvado recocido: 6 a 8 horas en horno de menor tamaño	
		B.2.3	flexibilidad del sistema	C. celdas de manufactura: maquinaria específica para cada proceso; bajo grado de automatización	
		B.2.4	volumen de producción	A. prototipos: vidrio templado recocido B. lote pequeño: vidrio curvado templado	
B.3.	proceso de fabricación a montaje	B.3.1.	transporte	diseño y fabricación de cajas especiales	
		B.3.2.	montaje	ventosas especiales para vidrios singulares; montaje con sujeciones de fabricación especial	

POTENCIAL PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
C.1	eficiencia económica	C.1.1.	factores influyentes en el coste	fabricación: la fabricación con moldes es costosa en general; lo ideal es utilizar moldes reutilizables para curvatura sencilla, con tubos de hierro reconfigurables personalización: si hay doble curvatura aumenta el precio, hacen falta moldes hechos a medida	
		C.1.2.	precios de venta	el vidrio curvado cuesta unos 300 €/m ² , unas 10 veces más que un vidrio plano estándar	
C.2	eficiencia material	C.2.1.	desperdicio	desperdicio por no aprovechar el tamaño de hoja;	
		C.2.2.	Necesidad de molde	el curvado recocido con moldes a medida es ineficiente; lo ideal es utilizar moldes reconfigurables	
C.3	eficiencia de tiempo	C.3.1.	diseño a fabricación	potencial para reducir el tiempo de consultoría si arquitecto incorpora información de fabricación	
		C.3.3.	fabricación a montaje	El montaje en obra es más rápido si se utilizan piezas estándar, y ventosas estándar para transporte	
C.4	potencial para person. en masa	C.4.1	tipo de personalización	C. cosmética: Flexibilidad en acabados y prestaciones E. dimensional: Flexibilidad en tamaños y geometrías	
		C.4.2	eficiencia general	bajo volumen de producción alto nivel de personalización. baja digitalización del proceso	
		C.4.3	potencial	Medio: Costes muy elevados, Fabricación de moldes a medida en el vidrio curvado recocido	

CRITERIOS PARA MEJORAR LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
D.1	criterios para el diseñador	D.1.1	geometría	Curvado recocido: racionalización de la geometría para repetir la utilización de moldes y abaratar Curvado templado: racionalización de la geometría con curvatura sencilla	
		D.1.3.	materiales	Aprovechamiento de hoja para reducir desperdicio Evaluar características fundamentales para abaratar: es fundamental que el vidrio deformado tenga calidad visual óptima?	
			montaje	Evaluar características fundamentales para abaratar: es fundamental que el vidrio deformado sea el cerramiento de tipo climalit?	
D.2	Criterios para el fabricante	D.2.1	comunicación	Comunicar y coordinar desde el inicio con otros fabricantes, compartir detalles y modelo geométrico	
		D.2.3	fabricación digital	Fabricación digital de moldes metálicos (por estampado) Exploración de moldes reconfigurables para vidrio templado y recocido, programables mediante CNC	

5.4.2.2 FORMADO POR MOLDEO DE MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos se utilizaron a partir de los años 50 en la industria naval, automovilística y aeronáutica, para fabricar prototipos, piezas únicas o pequeñas series de piezas para barcos de recreo, coches de carreras o fuselajes. En las últimas décadas, su desarrollo en la industria de la construcción ha abierto un inmenso abanico de posibilidades formales, materiales y estructurales.

Los materiales compuestos consisten en la combinación de dos o más materiales distintos físicamente, cuya adición combina las propiedades de sus componentes.

El material de base, o *matriz*, es un material de carácter continuo, líquido o viscoso que se endurece tras su aplicación. La matriz, que puede ser de metal, cerámica, o polímero, se combina con un *agente reforzante*, que suele ser fibra de vidrio, fibra de carbono o de polietileno. El agente reforzante aporta resistencia y fuerza al elemento resultante, además de evitar agrietamientos. La matriz, en cambio, protege las fibras de la abrasión y de las reacciones químicas.

Mediante la combinación de dos materiales, se consiguen elementos extremadamente delgados y ligeros, pero a su vez muy fuertes y resistentes, con relaciones resistencia-peso varias veces mayores que las del acero o las del aluminio (Groover, 2007). Aparte de su capacidad estructural, una gran ventaja de estos materiales es la posibilidad de moldearlos a formas libres y de hacer piezas de grandes tamaños, por ejemplo, barcos. La desventaja es que en general, son materiales caros, y los métodos de manufactura son lentos y costosos.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

Los procesos de moldeo de materiales compuestos en general son muy artesanales, y a menudo la única fase automatizada es la elaboración de los moldes con maquinaria CNC. Para el moldeo, el producto se aplica de forma manual sobre el molde, bien con pincel o rodillo, bien con un spray, lo cual asegura un espesor fino de capa. Tras la aplicación, el producto debe secar para endurecerse y para poder desmoldarse.

Existen algunas posibilidades de automatización para algunos procesos:

- **El moldeo al vacío de poliéster reforzado con fibra de vidrio (GRP):** se aspira el material dentro de una funda hermética para fabricar piezas estandarizadas.
- **El moldeo por spray:** para grandes series como vehículos o depósitos.

- **La fabricación robotizada:** utilizada en la fabricación de paneles de hormigón reforzado con fibra de vidrio (GRC), también estándares.

POSIBILIDADES MATERIALES

Los materiales compuestos ofrecen una enorme variedad de posibilidades, en función de la matriz y del agente reforzante; los agentes reforzantes más comunes son las fibras de vidrio, aunque también pueden ser fibras de carbono o aramida.

En el sector de la construcción, los materiales más utilizados son:

- **GRC:** hormigón armado con fibra de vidrio. Es uno de los materiales compuestos más utilizados en el sector de la construcción, y se utiliza sobre todo para paneles de fachada. Tiene buena resistencia al fuego y a la corrosión, alta resistencia a flexión, tracción e impacto, y se consiguen paneles muy ligeros de poco espesor (capa de GRC de 1cm).
- **GRP:** poliéster reforzado con fibra de vidrio. Se utiliza sobretodo en el sector naval para la fabricación de barcos de recreo, en el sector automovilístico y en el aeronáutico. En las últimas décadas, se ha utilizado además para la fabricación de piezas de edificios singulares. La matriz son materiales plásticos de tipo epoxi, poliéster, viniléster y otrostermoplásticos (Anon., s.f.).

El GRP y GRC tienen un comportamiento estructural similar; el GRP es más duradero e impermeable, y tiene menos problemas de fragilidad y agrietamiento.

- **GRG:** yeso reforzado con fibra de vidrio. Este material se utiliza de forma singular, sobretodo en interiores, dado que el yeso no aguanta bien la humedad. Permite espesores muy finos y alta definición en los detalles. Al ser ignífugo, se utiliza por ejemplo, para las puertas resistentes al fuego.

En los materiales reforzados con fibra de vidrio, la resistencia estructural final depende de la continuidad de las fibras. Se emplean rollos continuos de fibras para elementos con que necesitan resistencias altas, como barcos de recreo; rollos de presión para elementos de la industria automovilística y aeroespacial, y fibras trituradas en spray para objetos pequeños con baja resistencia estructural, como bañeras o paneles de fachada de GRC (Schodek, et al., 2004).

VISITA A FÁBRICAS: POLY PRODUCTS, VARI, PREINCO

Se han realizado visitas a varias fábricas de fabricación de componentes personalizados con materiales compuestos. Dado que existen muchas similitudes entre estos procesos, se presentarán de forma combinada, resaltando las singularidades de cada caso.

DATOS

- **fecha de visita:** 20/12/2012
- **localización:** Werkendam, Holanda.
- **situada** junto a un canal, junto a otros fabricantes de barcos.
- **tamaño:** 30 empleados, 10 en oficina y 20 en fabrica.
- **mercado:** industria naval, piezas de mobiliario y edificios.
- **historia:** creada en 1970.
- **servicios:** apoyo técnico, fabricación y montaje de piezas de GRP.

PRODUCCIÓN

- **producto:** moldes y piezas de GRP¹⁰².
- **aplicaciones:** yates, yates de grandes esloras, edificios, mobiliario estándar (sillas para tren de montaña rusa), depósitos de agua.
- **material (GRP):** resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio, tiene gran flexibilidad formal y alta resistencia. Se elige el tipo de resina en función de las necesidades del objeto final.
- **posibles acabados:** dependen del molde, de los aditivos y los acabados.
- **tamaños:** es ideal para piezas de grandes tamaños, y muy ligero.
- **volumen de producción:** una persona puede trabajar en 8 piezas al mismo tiempo en un día.

FILOSOFÍA Y PROCESOS

- **personalización:** especialistas en fabricación de prototipos. Ofrecen alta personalización geométrica, de acabados y de prestaciones del material (en función del tipo de poliéster).
- **proceso de diseño a fabricación:** hacen recomendaciones para la fabricación en base a su experiencia con el material.
- **proceso de fabricación** aplicación manual del producto sobre moldes de madera, metal o poliéster; capa a capa con rodillo. Existe la posibilidad de automatizar únicamente si se aplica el producto con aspirado o con spray, para la producción de grandes series.

Coste: Es variable en función del tipo de resina, de la complejidad geométrica de la pieza, y de la reutilización de moldes. Comparado con otros materiales, el producto es caro por la mano de obra y la necesidad de moldes. Los precios van desde 200€/m² a 2000 €/m².

fig. 5-118 y fig. 5-119:
imágenes del taller de
Polyproducts

fig. 5-120 y fig. 5-121
Edificio "the Rock" (Erik van
Egeraat; Amsterdam, Holanda;
2009)

¹⁰² GRP: siglas del término en inglés *glassfibrereinforced polyester*.

CUADRO DE ANÁLISIS DE PROCESO: Moldeo de GRP (PolyProducts)

POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN					
A.1.	posibilidades materiales	A.1.1	materiales	Matriz: resina de poliéster: resistente a fuego y rayos UVA; duradero, ligero pero tóxico en la aplicación Reforzante: fibra de vidrio en rollos	
		A.1.2	Acabados y texturas	Muy variable; Visto: Opaco, rugoso, translucido (según aditivos); Pintado: Pintura lisa, metálica Texturas: en función del molde y de los aditivos; altas posibilidades de personalización	
		A.1.4.	prestaciones	Variación de resistencia, ligereza, durabilidad en función del tipo de resina y de fibra de vidrio	
		A.1.6.	Moldes	Desechables: poliestireno y madera Reutilizables: GRP, metal:reutilizables hasta 150 veces	
A.2.	posibilidades geométricas	A.2.1	tamaño de componentes	Tamaño máximo realizado: 17.5m. Estructuras ligeras Espesores: de 2 a 6mm	
		A.2.4	curvatura	Gran flexibilidad en curvatura, no hay ninguna ventaja en simplificar	

POSIBILIDADES DE GENERALIZACIÓN					
B.1.	proceso de diseño a fabricación	B.1.1	comunicación	B. proceso 'de idas y vueltas': el fabricante aconseja tipo de resina y moldes, sugiere división de geometría	
		B.1.2	proceso	División según la geometría, la facilidad de moldeo y desmoldado, y el diseño de juntas vistas	
B.2.	proceso de fabricación	B.2.1	tipo de proceso	A. manual: Fabricación manual de moldes de madera, aplicación manual del GRP sobre molde C. automático: Aspirado, moldeo con spray D. CNC: Fabricación CNC de moldes (más caro)	
		B.2.2	velocidad de fabricación	Moldes: fabricación lento (más de 3 semanas) GRP: se aplica capa tras capa con un rodillo, esperando el endurecido de la capa anterior; se tarda de varias horas a un día en hacer una pieza Moldeo por aspirado: aplicación en una hora, pero necesita mayor preparación	
		B.2.3	flexibilidad del sistema	A. taller de fabricación: Proceso manual, alta participación de operarios	
		B.2.4	volumen	A. prototipos: barcos; B. lote pequeño: mobiliario	
B.3.	proceso de fabricación a montaje	B.3.1.	transporte	Fácil (son piezas ligeras y resistentes)	
		B.3.2.	montaje	proceso manual detallado: tratado, lijado, sellado y acabado con laca o pintura	

POTENCIAL PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
C.1	eficiencia económica	C.1.1.	factores influyentes en el coste	Material: El material de base es caro, varía en función del tipo de resina utilizada y del molde Fabricación: Gran coste de mano de obra; varía en función de cantidad de tests y experimentación. Personalización: en función de la dificultad geométrica (fabricación del molde y aplicación de resina)	
		C.1.2.	precios de venta	El GRP es caro de por sí (200-2000 €/m2)	
C.2	eficiencia material	C.2.1.	desperdicio de material	conviene hacer la pieza más grande para recortar los bordes, pero al ser un proceso manual se controla el desperdicio.	
		C.2.2.	necesidad de molde	Molde individual: Si se quiere abaratar en el molde Molde reutilizable: Si se fabrican muchas piezas con el mismo molde, aunque son mucho más caros	
C.3	eficiencia de tiempo	C.3.1.	diseño a fabricación	Proceso sencillo a no ser que se personalice el material	
		C.3.2.	fabricación	La personalización del material y realización de tests alargan mucho el proceso	
C.4	potencial para person. en masa	C.4.1	tipo de personalización	C. cosmética: por personalización del material E. dimensional: por personalización del molde	
		C.4.2	eficiencia general	muy bajo volumen de producción alto nivel de personalización. muy baja digitalización del proceso	
		C.4.3	potencial	Bajo: Necesidad de fabricación de moldes, proceso de fabricación manual	

CRITERIOS PARA MEJORAR LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
D.1	criterios para el diseñador	D.1.1	geometría	División de geometría utilizando moldes existentes; desmoldado de la geometría: ¿puedo desmoldar la pieza?	
		D.1.3.	materiales	Minimizar cantidad de tests: utilización de producto existente, utilización de plantillas estándar de goma	
D.2	Criterios para el fabricante	D.2.1	Comunicación	Comunicar entre diseñador, fabricante y fabricante de moldes lo antes posible, para optimizar y reutilizar moldes	
		D.2.2	Fabricación manual	Grandes geometrías: considerar el molde como encofrado perdido; Maximizar el molde teniendo en cuenta el desmoldado	
		D.2.3	fabricación digital	Fabricación CNC de moldes de poliestireno o madera; explorar la automatización para piezas singulares	

DATOS

- **fecha de visita:** 13/12/2013
- **localización:** Hoevenen, Bélgica.
- **tamaño:** empresa familiar de pequeño tamaño.
- **mercado:** arquitectura de interiores, industria naval
- **servicio:** fabricación de piezas de GRG y apoyo técnico.

PRODUCCIÓN

- **producto:** elementos prefabricados de GRG¹⁰³ para interiores.
- **aplicaciones:** puertas de yeso resistentes al fuego, barcos, cornisas especiales, falsos techos y paneles acústicos.
- **material:** yeso reforzado con fibra de vidrio (material natural, no toxico, antihongos), producto singular con poca concurrencia. Es mucho más duro y resistente que el yeso tradicional, y es resistente al fuego.
- **peso:** 4 a 9 kg/m² (40% menos que productos tradicionales de yeso)
- **posibles acabados:** yeso natural, pigmentado o pintado.
- **tamaños:** en función del molde, el máximo es alrededor de 3x3m.

DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Historia: la empresa se crea en 1996.

Servicios: fabricación de piezas en GRG; apoyo técnico para el diseño y montaje. Están especializados en la fabricación de puertas RF y en componentes para hospitales.

Filosofía y procesos :

- **personalización:** especialistas en componentes singulares y prototipos.
- **proceso de diseño a fabricación:** es necesario racionalizar la geometría para reutilizar los moldes porque éstos se fabrican a mano.
- **proceso de fabricación:** aplicación manual de capas alternadas de yeso y fibra de vidrio sobre un molde.

ANÁLISIS

Se trata de un producto de uso limitado y coste elevado por la materia bruta y la fabricación artesanal. Hoy en día no hay posibilidad de automatización.

fig. 5-122 y fig. 5-123:
Imágenes del taller de Vari.

fig. 5-124, fig. 5-125 y fig. 5-126:
Montaje del edificio Ooskampus
(Carlos Arroyo; Oostkamp,
Bélgica; 2011)

¹⁰³ GRG: siglas del término en inglés *glass fibre reinforced gypsum*.

CUADRO DE ANÁLISIS DE PROCESO: Moldeo de GRG (Vari)

POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN					
A.1.	posibilidades materiales	A.1.1	materiales	Matriz: yeso natural, resistente al fuego, muy ligero, uso en lugares secos (interiores), no tóxico, antihongos Reforzante: fibra de vidrio en rollos, da ligereza y resistencia	
		A.1.2	Acabados y texturas	Acabado visto : Yeso natural (blanco- blanco/gris) Coloreado: con pigmentos de colores o pintado Texturas: en función del molde (alto nivel de detalle)	
		A.1.4.	prestaciones	variación de dureza en función de la fibra; la matriz es la misma.	
		A.1.6.	Moldes	Desechables: madera, yeso Reutilizables: poliéster, plástico , silicona para detalle más fino	
A.2.	posibilidades geométricas	A.2.1	tamaño de componentes	Tamaño máximo realizado: 3m de long. x 3m de altura Espesores: 7-9 mm, peso entre 7 y 9 kg/m ²	
		A.2.4	curvatura	Gran flexibilidad en curvatura, no hay ninguna ventaja en simplificar	

POSIBILIDADES DE GENERALIZACIÓN					
B.1.	proceso de diseño a fabricación	B.1.1	comunicación	B. proceso 'de idas y vueltas': el fabricante procura adaptarse al diseño arquitectónico, racionalización con arquitecto	
		B.1.2	proceso	Racionalización de geometría para reutilización de moldes con recorte de piezas a posteriori. subdivisión de geometría para facilitar desmoldado.	
B.2.	proceso de fabricación	B.2.1	tipo de proceso	A. manual: Fabricación manual de moldes de madera, aplicación manual sobre molde con esponja	
		B.2.2	velocidad de fabricación	Fabricación manual de moldes de silicona, GRP, madera aplicación manual de GRG sobre moldes, muy lento; realizado por mano de obra cualificada.	
		B.2.3	flexibilidad del sistema	A. taller de fabricación: Proceso manual, alta participación de operarios	
		B.2.4	volumen	A. prototipos; B. lotes pequeños : puertas RF	
B.3.	proceso de fabricación a montaje	B.3.1.	transporte	Fácil (son piezas ligeras y resistentes)	
		B.3.2.	montaje	Estándar, igual a placas de yeso, acabado a mano. Por su ligereza, la estructura portante es mínima Acabado: proceso manual detallado: corte con sierra metálica, sellado de juntas con yeso, pintado	

POTENCIAL PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
C.1	eficiencia económica	C.1.1.	factores influyentes en el coste	Material: El material de base es caro, viene de las dos únicas minas cerradas en el mundo. Fabricación: artesanal, gran coste de mano de obra. Personalización: aumenta si la geometría es compleja, con moldes distintos	
		C.1.2.	precios de venta	se asume que es un producto caro por ser especial El coste disminuye si el molde es estándar (10 €/ml en cornisas);	
C.2	eficiencia material	C.2.1.	desperdicio de material	al ser un proceso manual se controla el desperdicio.	
		C.2.2.	necesidad de molde	Molde individual de silicona, se despegas del objeto Molde reutilizable: madera o GRP. <i>Vari</i> guarda contenedores con moldes existentes.	
C.3	eficiencia de tiempo	C.3.2.	fabricación	Fabricación lenta; evaluar si la producción es en fábrica o in situ según los plazos necesarios	
		C.3.3.	montaje	Maximizar tamaño de piezas para facilitar montaje	
C.4	potencial para person. en masa	C.4.1	tipo de personalización	C. cosmética: Se aprovechan las propiedades del material para explorar nuevos productos: puertas RF, piezas antichoque en hospitales; aunque el material sigue siendo el mismo. E. dimensional: Por personalización del molde: gran flexibilidad	
		C.4.2	eficiencia general	muy bajo volumen de producción alto nivel de personalización. ninguna digitalización del proceso	
		C.4.3	potencial	Bajo: Necesidad de fabricación de moldes, proceso de fabricación totalmente manual	

CRITERIOS PARA MEJORAR LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
D.1	criterios para el diseñador	D.1.1	geometría	Estandarización o combinaciones geométricas con el mismo molde Al ser de aplicación manual, tiene que caber el pincel y la mano para aplicar capa a capa el producto en el molde	
D.2	Criterios para el fabricante	D.2.2	Fabricación manual	La fabricación de componentes en GRG es artesanal, no existe automatización hoy en día	
		D.2.3	fabricación digital	Se podría automatizar la fabricación de moldes si son de madera, pero interesa invertir en la maquinaria a partir de cierto volumen.	

DATOS

- **fecha de visita:** 31/07/2015
- **localización:** San Martín de la Vega, Madrid, España.
- **mercado:** edificación.
- **tamaño:** actualmente 10 empleados en una fábrica.
- **servicio:** consultoría y fabricación de paneles GRC¹⁰⁴.

PRODUCCIÓN

- **producto:** paneles de hormigón arquitectónico y de GRC.
- **aplicaciones:** paneles sándwich, paneles de lámina sencilla GRC, y paneles *studframe* para envoltentes de edificios.
- **material:** micro hormigón de cemento armado con fibras de vidrio trituradas. Los paneles tienen alta resistencia a flexión, tracción, impacto y corrosión; son incombustibles e impermeables.
- **acabados:** lisos o con textura en función del molde o de la plantilla de goma colocada en el interior del molde.
- **tamaños:** el espesor de la capa de GRC es de 1cm, el espesor del panel es de 10-12cm.
- **volumen de producción:** 12 personas en fábrica fabrican unos 100m² de paneles GRC al día, en un proceso relativamente estandarizado. El volumen de producción en la fábrica robotizada era de 1000 m²/día.

DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Historia: empresa fundada en 1988; llegaron a tener tres fábricas y 100 empleados, una de ellas con producción robotizada.

Servicios: desarrollo y fabricación de prefabricados de GRC

Filosofía y procesos:

- **personalización:** generalmente fabrican productos estandarizados, aunque han construido edificios singulares. Han explorado la automatización con robots para la producción en masa.
- **proceso de fabricación:** hoy en día toda la producción es manual.

Coste: El coste medio son 110 €/m², variable en función del acabado (por ejemplo si se emplean plantillas de goma), de la variación de moldes y del tamaño.

fig. 5-127:
Imagen del taller de Preinco.

fig. 5-128:
Aplicación de GRC con spray.

fig. 5-129:
Fachada en el Centro Andaluz de
Arte Contemporáneo (Nieto y
Sobejano; Córdoba, España; 2013)

fig. 5-130:
Aplicación automatizada de GRC
en la fábrica robotizada (Pastor et
al., 2005)

¹⁰⁴ GRG: siglas del término en inglés *glass fibre reinforced gypsum*.

CUADRO DE ANÁLISIS DE PROCESO: Moldeo de GRC (Preinco)

POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN					
A.1.	posibilidades materiales	A.1.1	materiales	Matriz: Microhormigón, ligero y resistente en exteriores Reforzante: Fibras de vidrio trituradas	
		A.1.2	Acabados y texturas	Acabado: Cemento blanco o gris; variaciones: pigmentos, óxidos, variación del árido Texturas: en función del molde de goma Textura lisa o con chorro de arena	
		A.1.4.	prestaciones	Cemento fotocatalítico, cemento autolimpiable	
		A.1.6.	Moldes	Desechables: madera, yeso Reutilizables: poliéster, plástico, silicona	
A.2.	posibilidades geométricas	A.2.1	tamaño de componentes	Tamaño máximo: 8m de longitud x 3m de altura en paneles "studframe", 4-5m de largo x 3m de altura en paneles sándwich Espesores: 0.5cm-1cm capa de GRC, 10cm por panel	
		A.2.3	Tolerancias	Tolerancia de montaje: queda una unta vista de 1cm	
		A.2.4	curvatura	En general son paneles planos, pero hay flexibilidad en el dibujo con huecos de tamaño suficiente	

POSIBILIDADES DE GENERALIZACIÓN					
B.1.	proceso de diseño a fabricación	B.1.1	comunicación	B. proceso 'de idas y vueltas', diseño según catálogos para las texturas con plantillas de goma	
		B.1.2	proceso	Subdivisión, procurando reutilizar los moldes	
B.2.	proceso de fabricación	B.2.1	tipo de proceso	A. manual: Fabricación manual de moldes de madera, aplicación manual del GRC sobre molde	
		B.2.2	velocidad de fabricación	Moldes: se externalizan moldes de madera si son complejos, hay catálogos de plantillas de goma GRC: 1000m2 / día; un panel se hace en dos días; 10 personas fabrican unos 100m2 de paneles en un día.	
		B.2.3	flexibilidad del sistema	A. taller de fabricación: Proceso manual, alta participación de operarios	
		B.2.4	volumen	C. lotes medianos: en función de los pedidos; en la fábrica robotizada es posible producir 1000m2 / día	
B.3.	proceso de fabricación a montaje	B.3.1.	transporte	Fácil (son piezas ligeras y resistentes)	
		B.3.2.	montaje	Piezas autoportantes, se montan directamente en fachada (panel sándwich), o con estructura metálica	

POTENCIAL PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
C.1	eficiencia económica	C.1.1.	factores influyentes en el coste	Material: Según cantidad de material y si es muy específico (autolimpiable, fotocatalítico...). Fabricación: Gran coste de mano de obra Personalización: el coste aumenta si hay moldes distintos, si se usan moldes de goma (+10€/m2), si la manipulación es complicada (con agujeros...)	
		C.1.2.	precios de venta	El panel de GRC es más caro que el hormigón (20€ más por panel), pero el precio de la obra terminada es más o menos igual por la facilidad de montaje	
C.2	eficiencia material	C.2.1.	desperdicio de material	al ser un proceso manual se controla el desperdicio.	
		C.2.2.	necesidad de molde	Conviene reutilizar los moldes de madera La fabricación en mesa es por moldes reconfigurables, moviendo los costeros para variar el tamaño	
C.3	eficiencia de tiempo	C.3.3.	montaje	El montaje es rápido y sencillo, más cuanto mayores las piezas	
C.4	potencial para person. en masa	C.4.1	tipo de personalización	C. cosmética: Gran variación de acabados pero conviene repetir el material E. dimensional: Gran variación de acabados pero conviene repetir el molde, o bien recortar piezas a posteriori	
		C.4.2	eficiencia general	volumen medio de producción nivel medio de personalización. baja digitalización del proceso	
		C.4.3	potencial	Medio: potencial para volver a explorar la fabricación automatizada; para aumentar la flexibilidad de moldes	

CRITERIOS PARA MEJORAR LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
D.1	criterios para el diseñador	D.1.1	geometría	Procurar combinaciones geométricas con el mismo molde; si hay agujeros: permitir el paso de la pistola para proyectar GRC y colocar perfiles metálicos (espacio mínimo 10-12cm); uniformizar tamaños de agujeros para reutilizar moldes colocados en negativo Integrar las juntas vistas de 1cm en el diseño Maximizar tamaño de piezas para facilitar montaje	
			material	uniformizar material para grandes pedidos	
D.2	Criterios para el fabricante	D.2.3	fabricación digital	volver a explorar la automatización con robots, pero con mayor flexibilidad de producción	

ANÁLISIS

Las fábricas de materiales compuestos generalmente están especializadas en un tipo de material que se utiliza para una o distintas aplicaciones. Por ejemplo, el GRP se utiliza tanto para embarcaciones de recreo como para submarinos, depósitos de agua o piezas de edificios.

Las fábricas varían en tamaño en función de la demanda del producto: las fábricas de GRC, un producto orientado a la fabricación en masa, tienen mayor tamaño¹⁰⁵, mientras que las de GRP y GRG, orientados a la producción de prototipos o pequeñas series, suelen ser fábricas pequeñas.

Si comparamos con los métodos de fabricación substractiva, los procesos de moldeo a menudo son más rápidos y se utiliza el material de forma más eficiente, ya que no hay desperdicio en el propio material de vertido (Schodek, et al., 2004).

El gran inconveniente es que es necesaria la elaboración de un molde, lo cual supone un gasto de tiempo y de material. Además, son procesos casi totalmente manuales, con un coste elevado por la mano de obra, y en algunos casos, por el coste del material. La velocidad de fabricación es lenta y depende del tamaño y la capacidad de la industria. La velocidad de producción es mayor si existe la posibilidad de automatizar alguna parte del proceso, como en el moldeo por aspiración de piezas estandarizadas. También agiliza mucho el proceso el hecho de reutilizar o de reconfigurar los moldes. El montaje de las piezas es manual.

Por otro lado, estos procesos ofrecen una enorme flexibilidad para la personalización, de las más altas comparado con otros materiales. El sistema de producción es muy flexible dado que se orienta a la fabricación individualizada y los cambios son habituales.

Existen las siguientes posibilidades de personalización:

- Personalización geométrica: las geometrías de doble curvatura son habituales en materiales como GRP o GRG. Se pueden hacer elementos de muy gran tamaño con espesores mínimos, que son rígidos y ligeros a la vez. Los límites están marcados por la capacidad de la fábrica, el transporte y el montaje en obra.
- Personalización de las propiedades físicas: éstas se modifican en función de la matriz y del agente reforzante. Por ejemplo, en el GRC el cemento utilizado puede ser fotocatalítico o autolimpiable.
- Personalización de acabados: se pueden conseguir distintos acabados o texturas superficiales, en función de:

¹⁰⁵ Swisspearl, una fábrica de GRC en Suiza, tiene 500 empleados. (swisspearl, s.f.)

- el acabado del molde o de láminas colocadas en el interior del molde: existen catálogos de láminas de goma con texturas para producir componentes en GRP y en GRC;
- la agregación de pigmentos o aditivos en la matriz;
- la adición de colorantes o materiales translúcidos en el caso del GRP y GRC;
- la variación del color y del grano del acabado final, o dándole un chorro de arena tras la fabricación para eliminar árido fino, en el caso del GRC.

El coste del producto varía en función de los siguientes factores:

- la complejidad geométrica ;
- la reutilización de moldes: los moldes de uso individual complican el proceso, tanto del montaje y fijación de cada molde en la mesa, como para la preparación del material;
- el material del molde: los moldes son más caros si son metálicos o de GRP;
- la fabricación del molde: externalizar su fabricación alarga y encarece el proceso;
- el material utilizado, la cantidad de producto, y la personalización del material;
- las horas de trabajo manual.

A modo de ejemplo, un componente en GRP puede costar 200 €/m² en caso de suministro de paneles iguales, 5 veces más en una fachada personalizada, y 10 veces más en caso de experimentar con un material especial¹⁰⁶.

Para un proceso más eficiente, es necesario tener en cuenta los siguientes criterios:

- una elección del material acorde con la vida útil del elemento y su necesidad de dureza;
- la optimización de material del molde y de su tamaño, en función de la necesidad de reutilización, evaluando el coste de su preparación;
- el diseño del molde: la geometría tiene que ser desmoldada, y por tanto no debe ser cóncava. El molde debe tener aberturas lo suficientemente grandes para que se pueda aplicar bien el material.
- la racionalización de la geometría, mediante su descomposición en piezas para reutilizar los moldes al máximo;
- la reutilización de moldes: con ello se minimiza el material y el trabajo en fábrica, la cantidad de tests necesarios, y en algunos

¹⁰⁶ Este es el caso del proyecto "the Rock" (Erik van Egeraat; Amsterdam, Holanda; 2009), producido por *PolyProducts*, donde se utilizó GRP para fabricación de los componentes de la fachada. Se buscaba dar un aspecto "rocoso" al edificio, y para conseguir un material que diera ese efecto pero al mismo tiempo fuera ligero, fue necesaria la realización de muchas pruebas.

casos se posibilita la fabricación automatizada. Para variar la forma, las piezas generalmente se pueden recortar después.

5.4.2.3 MOLDEO CON MOLDES RECONFIGURABLES

En la fabricación por moldeo, la principal desventaja de es el excesivo trabajo necesario para la fabricación de los moldes. Esto implica un proceso de fabricación previo, que genera pérdida de tiempo y de material. La utilización de moldes tiene sentido si hay repetición, por lo que la investigación de moldes reconfigurables o flexibles es fundamental para la fabricación personalizada por moldeo.

Existen varios trabajos de investigación y experimentación sobre moldes flexibles y reconfigurables, cuyo objetivo es reducir la cantidad de material, de tiempo y de recursos necesarios para la fabricación de moldes. El principio de estos trabajos se basa en la reutilización de un mismo molde, que es manipulado para conseguir distintas geometrías.

MOLDES FLEXIBLES

Uno de los métodos más tradicionales de moldeo flexible es la utilización de textiles, método que exploró de forma extensa el arquitecto Miguel Fisac en los años 60 y 70. Fisac utilizó textiles, como por ejemplo láminas de polietileno, como encofrados de hormigón para generar distintas geometrías y texturas. Este mismo método se investiga hoy en día en centros como el CAST (Centro de Estructuras y Tecnología Arquitectónicas de la Universidad de Manitoba, Winnipeg, Canadá), dedicado a la exploración de moldeo con textiles para la arquitectura, o el ETH de Zúrich (Grupo de Investigación *Block(BRG)*), donde se explora, entre otros, el diseño computacional de encofrados textiles para estructuras de hormigón.

La empresa *Adapa* ha desarrollado un sistema de moldes flexibles controlados por CAD/CAM. Se trata de un sistema de pistones, que, controlados digitalmente, deforman una membrana flexible, generando una superficie curvilínea sobre la que se puede moldear un objeto. La membrana flexible de moldeo es capaz de aguantar temperaturas de hasta 180°C, permitiendo la manipulación de materiales como hormigón, termoplásticos, yeso, vidrio, fibra de vidrio, fibra de carbono, corian o GRG a gran velocidad (menos de 2min). La geometría del molde permite un radio de 400mm para geometrías, de tamaño 1200 x 1200 x 400 mm.

El proceso de diseño a fabricación es el siguiente: la superficie deseada, por ejemplo una pared, deberá ser segmentada en paneles con un tamaño máximo marcado por la superficie de trabajo de *Adapa* (1). Cada uno de los módulos se importa al sistema *Adapa* mediante un plugin de *Rhino 3d*. A continuación, se colocan unos bordes que delimitan la superficie de moldeo, y, tras una primera verificación geométrica, se aplica el material sobre la membrana (2). El sistema *Adapa* se activa con el movimiento de pistones hasta generar una superficie curva y continua (3). Una vez el material

fig. 5-131:
SistemaAdapa (1)

fig. 5-132:
SistemaAdapa (2)

fig. 5-133:
SistemaAdapa (3)

fig. 5-134:
SistemaAdapa (4)

fig. 5-135:
Sistema de pistones para formar los moldes de cera para el proyecto TailorCrete (GramazioKohlerResearch; 2009-2013).

fig. 5-136:
Vertido de la cera sobre la superficie reconfigurable (proyecto TailorCrete).

fig. 5-137:
Formado de piezas de hormigón a partir de moldes de cera (proyecto TailorCrete).

endurecido, el molde vuelve a su configuración inicial y el elemento se extrae (4) (Adapa, s.f.).

La ventaja de este sistema es la rapidez del proceso y la posibilidad de evitar la utilización de moldes al crearse los objetos directamente. Y sobre todo, permite un proceso continuo digital desde el diseño y la fabricación de geometrías libres, acercando este proceso, dentro de sus limitaciones geométricas. Aunque se encuentra en fase experimental, este sistema está orientado a la personalización en masa.

MOLDES REUTILIZABLES

Entre 2009 y 2013, la unidad de fabricación digital de la ETH de Zúrich (*Gramazio Kohler Research*) desarrolló un sistema llamado *Tailor Crete*, basado en moldes reconfigurables de arena compactada por robots. En este proceso, un robot controlado digitalmente forma una superficie de arena compactada, y después vierte cera sobre la arena. Una vez endurecida, la cera, un material económico y reutilizable, sirve como molde para vertido de hormigón, tras lo cual se derrite para su reutilización. Este proceso permite la configuración de geometrías libres en un proceso libre de residuos y de desperdicio, y además explora la continuidad digital entre diseño y fabricación. Este sistema fue premiado en marzo del 2012 por los premios *Global Holcim Innovation Prize*.

fig. 5-138:
Ilustración del proceso de fabricación con moldes de cera Tailorcrete, 2009-2013 ((Gramazio y Kohler, s.f.)(ETHZ, s.f.))

CONCLUSIÓN

La exploración de moldes flexibles y reconfigurables, que se encuentra actualmente en fase de exploración, tiene un enorme potencial para la optimización de los procesos de moldeo. La aportación de estos métodos es la eliminación de desperdicio, la reducción o eliminación de procesos intermedios, y la posibilidad de un proceso flexible y controlable de forma digital.

5.5 PROCESOS ADITIVOS

Según la definición de Kolarevic (2005), los procesos aditivos consisten en la formación de geometrías tridimensionales mediante adición de capas (p.36).

La impresión 3d es uno de los sistemas de fabricación digital que más se ha extendido en los últimos años; además, es de los pocos sistemas de fabricación digital que se ha implantado a escala comercial y doméstica.

visitas realizadas

- Impresión 3D:
Dinitech

5.5.1 IMPRESIÓN 3D A PEQUEÑA ESCALA

El primer sistema comercial de impresión 3d fue comercializado en 1988 por la empresa *3D systems*. Desde entonces, se han desarrollado una multitud de tecnologías capaces de imprimir en 3d con una variedad de materiales y de tamaños.

Las técnicas de impresión 3d también se llaman *técnicas de prototipado rápido*, y las principales son las siguientes (I.Materialise, s.f.):

Técnica		materiales	Tamaño (mm)	precisión	características
SLA	Estereolitografía	resina	2100 x 700 x 800	±0.2%	gran calidad, rápido
SLS	Sinterización selectiva por láser	poliamida, nylon, madera, poliuretano	2100 x 700 x 800	±0.3%	gran libertad geométrica, variedad de materiales
DMLS	Sinterización directa por láser	aluminio titanio	250 x 250 x 255	± 2% ± 0.2%	objetos resistentes, equivalentes a piezas industriales
FDM	Deposición de material fundido	ABS	400 x 355 x 400	±0.1%	lento pero necesita menor tiempo de acabado
MJM	Impresión 3D por Inyección Multi-jet/Polyjet	fotopolímeros	500 x 400 x 200	±0.1%	producción de geometrías complejas, preciso, multi-material
	Impresión 3D por deposición de aglutinante	cemento, sal, metales, arena	Grandes tamaños		económico, multi-material, producción de grandes tamaños

Los procesos de prototipado rápido más extendidos son los siguientes:

- **Estereolitografía** (SLA¹⁰⁷) consiste en la solidificación capa a capa de una resina líquida mediante aplicación de un haz de luz ultravioleta. El haz de luz traza la geometría deseada sobre la resina colocada sobre una superficie de soporte, solidificándola. El soporte desciende, un cabezal aplica una nueva capa de resina, y ésta se solidifica con el haz de luz; hasta que el objeto alcance la forma deseada.
- **Sinterización selectiva por láser**(SLS¹⁰⁸):un haz de láser derrite capa a capa un polvo para crear objetos sólidos. El láser impacta en el polvo, lo funde y éste se solidifica; un cabezal aplica una nueva capa de polvo, que el láser recorre para solidificar con la geometría deseada. El material desechado se reutiliza, por lo que no se desperdicia nada. A diferencia del SLA, el SLS permite utilizar una variación de materiales en polvo: cerámica, cristal, nylon, poliestireno, poliamida, etc.
Esta misma técnica se utiliza para imprimir en 3d con metales (como el aluminio), en cuyo caso se llama *sinterización por láser directa* (DMLS¹⁰⁹).

Con estas dos tecnologías (SLA y SLS) se consigue gran precisión y velocidad de impresión.

- **Impresión por deposición de material fundido** (FDM¹¹⁰): se deposita un filamento plástico cada capa, que se derrite se solidifica al enfriarse. El material se suministra en rollos. Esta técnica es la más extendida en el ámbito comercial y doméstico. La precisión es menor que en el SLA y SLS, y actualmente se utilizan una gran variedad de materiales, entre los que predominan el ABS y PLA.
- **Impresión 3D por Inyección** (MJM¹¹¹):un cabezal de impresión deposita un fotopolímero acrílico en capas muy finas; al mismo tiempo se inyecta a su alrededor cera o gel para dar soporte a la geometría. Las capas de acrílico se solidifican con una lámpara de rayos UVA. Una vez finalizada la impresión, la cera o el gel se eliminan, dejando un objeto tridimensional aislado de muy alta precisión.

¹⁰⁷ SLA: siglas del término en inglés *stereolithography*.

¹⁰⁸ SLS: siglas del término en inglés *selective laser sintering*.

¹⁰⁹ DMLS: siglas del término en inglés *direct metal laser sintering*.

¹¹⁰ FDM: siglas del término en inglés *fused deposition modeling*.

¹¹¹ MJM :siglas del término en inglés *multi-jet manufacturing*.

- **Impresión 3D por deposición de aglutinante¹¹²**: de forma similar a la impresión con tinta, el cabezal de la impresora deposita estratégicamente un material aglutinante que, al combinarse con un determinado material en polvo, lo solidifica. Dado que funciona por reacción química sin necesidad de fuente de luz o calor, este sistema es sencillo y económico.
A partir de este sistema se ha explorado la impresión 3d con una variedad de materiales (metales, arena, cerámica, sal,...) a pequeño y gran tamaño.
- Una variante de este sistema es **la impresión multicolor¹¹³**, en la cual el aglomerante son pegamentos de distintos colores que, al colocarse gota a gota sobre capas finas de polvo, lo solidifican con distintos colores.
- Siguiendo el mismo principio, **la impresión 3d con acero inoxidable** se consigue mediante deposición de polvos de acero inoxidable con una impresora de inyección de tinta, cuyo cabezal deposita un producto aglomerante que solidifica el polvo capa a capa; tras la impresión, el objeto se mete en un horno a 1300°C.

La mayoría de estas técnicas utilizan materiales relativamente costosos y tecnologías sofisticadas, por lo que generalmente se producen objetos de pequeño tamaño como prototipos, piezas de joyería, piezas médicas, piezas de recambio, etc. Estos procesos rara vez se ven aplicados al campo de la arquitectura, con la excepción de la realización de maquetas o prototipos de pequeño tamaño.

Sin embargo, estas tecnologías evolucionan muy rápidamente y se han abaratado con los años, y hoy en día existen distintas empresas y grupos de investigación que exploran su utilización de forma más generalizada, con otros materiales y a distintas escalas.

¹¹²Traducción del término en inglés *binder jetting*.

¹¹³Traducción del término en inglés *color jet printing*.

fig. 5-139
Materiales para impresión 3D

fig. 5-140:
P_Ball: Impresión 3D con cemento
(Emerging Objects, Matsys Design,
2012)

fig. 5-141:
Rubber Pouf: Impresión 3D con
goma (Emerging Objects, 2016)

fig. 5-142:
Wood block: Impresión 3D con
madera (Emerging Objects, s.f.)

Hoy en día existen muchas empresas comerciales que ofrecen servicios de impresión 3D en una variedad de materiales.

La empresa *iMaterialise*, situada en Bélgica, ofrece a sus clientes la posibilidad de imprimir elementos en uno o varios materiales, incluyendo plásticos (poliamida, resina, cerámica, metales (titanio, bronce, plata, oro, acero inoxidable, etc.), madera o goma, con 10 técnicas distintas de fabricación (I.Materialise, s.f.).

En *iMaterialise*, imprimen objetos a partir de archivos 3D enviados por el usuario a través de la web. En función del material elegido, se determina el tamaño máximo posible del objeto, y se comunican consejos para el diseño, como el espesor de la pared del objeto o la resolución que se puede esperar según la técnica en cuestión. Los objetos se pueden recibir en casa 48 horas tras la confirmación del pedido.

Para la impresión 3D de metales, se da la posibilidad, bien de imprimir directamente en 3D (con aluminio o acero inoxidable); bien de fabricar las piezas en dos pasos. Primero, se fabrica un modelo 3D en cera con *estereolitografía*, que se envuelve en un volumen de yeso. El volumen se calienta, la cera se derrite y se expulsa, y se vierte el metal líquido dentro de la cavidad. Al endurecer, el metal toma la geometría del objeto de cera original.

En el ámbito experimental, hay otras empresas y grupos que han desarrollado técnicas de impresión 3D con el objetivo de ampliar las posibilidades geométricas y materiales. El principio es siempre el mismo: la solidificación capa a capa de un material fluido bien mediante la adición de un aglomerante, bien mediante el endurecimiento con luz o gas, etc.

La empresa californiana *Emerging Objects*, creada por los arquitectos Rael y San Fratello, la impresión de objetos hechos con cemento, cerámica, papel, goma, sal, arena y madera a partir de propone a partir del proceso de impresión 3D por deposición de aglutinante (Emerging Objects, s.f.).

También se han explorado técnicas para imprimir en 3D a gran escala que se verán en el siguiente apartado.

En *Materialise* proponen los siguientes técnicas de impresión 3d:

Material		Técnica	Tamaño	Acabado
plásticos	poliamida	SLS	650 x 330 x 560	poroso, granular
	resina	SLS	2100 x 700 x 800	suave, transparente u opaco
	ABS	FDM	400 x 355 x 400	en función de la bobina utilizada.
	multicolor	impresión <i>colorjet</i>	254 x 381 x 204	granular
cerámica	polvo aluminosilíceo	impresión Cerámica	200 x 150 x 150	mate, granular
metales	titanio	DMLS	250 x 250 x 255	mate, granular
	Aluminio (proceso experimental)	DMLS	250 x 250 x 295	mate, rugoso
	latón	impresión 3d con cera	88 x 63 x 125	arenado, pulido o lijado
	bronce	impresión 3d con cera	88 x 63 x 125	arenado, pulido o lijado
	cobre	impresión 3d con cera	88 x 63 x 125	arenado, pulido o lijado
	oro y plata	impresión 3d con cera	88 x 63 x 125	pulido
	acero, acero inoxidable	solidificación con aglomerante	762 x 393 x 393 y 45 x 45 x 45	pulido de forma mecánica
madera	polvo de madera	SLS	250 x 250 x 200	granular, poco resistente
goma	poliuretano termoplástico (TPU)	SLS	320 x 270 x 300	poco detallado, granular

5.5.2 IMPRESIÓN 3D A GRAN ESCALA

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

Desde el inicio del desarrollo de las tecnologías de impresión 3d, un reto constante ha sido el salto de escala para imprimir objetos de gran tamaño y edificios.

Desde hace casi una década, investigadores de la escuela de ingeniería de la edificación de la Universidad de Loughborough (Reino Unido) han desarrollado una impresora 3d que imprime a gran escala. Esta máquina deposita capas sucesivas de hormigón de secado rápido y altas prestaciones con la geometría deseada.

Desde 1994, Behrokh Khoshnevis, investigador en la Universidad de Southern California (USC) ha desarrollado un sistema de impresión 3d a gran escala que llama *Contour Crafting*. Esta máquina, que será transportable a la obra, sería capaz de imprimir edificios de hormigón de hasta 250 m² en 20 horas.

Enrico Dini, creador de *D-shape*, persigue desde hace décadas el mismo sueño; este ingeniero italiano se propone imprimir objetos a gran escala con arena, ejemplo que se analizará en la siguiente sección.

Hasta recientemente, estos desarrollos han sido predominantemente teóricos y con ellos se han producido tan sólo prototipos.

En la carrera para la fabricación en 3d a gran escala, la empresa china *Shanghai WinSun Decoration Design Engineering Co.* fue la primera en construir un complejo inmobiliario mediante impresión 3d. En 2014, anunciaron que habían construido 10 viviendas en hormigón en un día; y en 2015, presentaron una villa de 1100 m² y un edificio de 5 plantas, también impresos por 3d. La fabricación se hace con hormigón y desechos reciclados de la construcción, con una máquina de 150m de largo, 10m de ancho y 6.6m de alto (3ders, 2016).

fig. 5-143
Impresión 3d con hormigón
(Loughborough University, 2014)

fig. 5-144, fig. 5-145 y fig. 5-146
Simulación de la impresión 3d de edificios, (Behrokh Khoshnevis, USC, s.f.)

fig. 5-147 y fig. 5-148:
Impresión 3d de edificios con hormigón
(ShanghaiWinSunDecorationDesignEngineering Co. ; 2016)

Enrico Dini, creador de *Dinitech*, desarrolló su empresa a partir de un sueño de infancia: construir esculturas de arena de gran tamaño. Para ello, en su taller toscano cercano a Pisa fabricó una de las primeras máquinas capaces de imprimir en 3d a gran tamaño. Con esta máquina, fijada a una estructura de 4x4 metros de tamaño, produce objetos sólidos en piedra a partir de la solidificación de arena.

DATOS

- **fecha de visita:** 31/07/2013
- **localización:** Pisa, Italia
- **tamaño:** estructura de 4x4m
- **servicio:** fabricación de prototipos y esculturas

PRODUCCIÓN

- **producto:** objetos y esculturas en piedra de gran tamaño fabricados por impresión 3D.
- **materiales utilizados:** como matriz, se utilizan distintos tipos de arena, y como aglutinante, cloruro de magnesio con óxido de magnesio. Al unirse los dos materiales, se acelera el proceso de solidificación de la arena y éstos se vuelven indivisibles. El resultado es un objeto de arena endurecida, similar a la piedra.

La arena utilizada depende del proyecto. Por ejemplo, para realizar la escultura *Underwater MOMA*, que pretendía imitar rocas lunares dentro del mar (artistas varios; Porto Santo Stefano, Italia; 2011), se utilizó arena puzolana volcánica, óxido, y agua salada del mar. Este material es muy poroso, y en este caso, la reacción con el agua salada hace que las piezas se consoliden, aumentando su resistencia de forma natural y asegurando que las piezas se puedan introducir en el mar.

- **posibles acabados:** el objeto final es rugoso como la piedra, aunque se pueden dar otros acabados, como pulido o arenado.
- **tamaños:** la limitación la marca sobretudo el transporte y el peso de las piezas generadas (actualmente una pieza pesa aproximadamente entre 300 y 400 kg). La máquina desarrollada por Dinitech permite realizar piezas de hasta 4.3m x 3.5m en planta, y aproximadamente 2m de altura. Aunque el objetivo es hacer piezas grandes de una sola vez para casas o iglesias, suelen hacer piezas de baja altura para limitar el peso. Las piezas se producen en fábrica y desde allí son transportadas a su localización final.

fig. 5-149
Impresora 3d fabricada por Dinitech.

fig. 5-150
Casa Ferreri (Marci Ferreri; trienal de Milán, Italia; 2010)

fig. 5-151
Radiolaria, (Andrea Mogante, Shiro Studio; 2010)

fig. 5-152
Underwater MOMA (artistas varios; Porto Santo Stefano, Italia; 2011)

- **volumen de producción:** el volumen se basa en los encargos recibidos, generalmente una o varias piezas para esculturas o piezas singulares.

DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Historia: Enrico Dini, fundador de *Dinitech*, cuenta que todo empezó por un sueño de su infancia: construir esculturas de arena de gran tamaño. Acompañado por su hermano, creó su taller en una nave industrial en Pisa, donde desarrolló una máquina para imprimir en 3d con arena.

Servicios: *Dinitech* ofrece servicios de consultoría, preparación y fabricación para cada proyecto, así como diseño de conceptos.

La empresa original, *Dinitech*, se llama ahora *D-Shape UK*, también fundada por Enrico Dini pero con sede en Londres. *D-Shape* ofrece servicios más amplios de fabricación digital y robótica, incluyendo consultoría de fabricación, diseño y procesos digitales, fabricación robotizada en piedra, e impresión 3d con distintos materiales.

fig. 5-153
Enrico Dini junto a una de sus esculturas.

fig. 5-154
Fotografía de la fábrica Dinitech en Pisa.

FILOSOFÍA

Más que una fábrica, *Dinitech* es un laboratorio artesanal. Para cada proyecto, buscan los materiales adecuados, experimentan con el proceso químico de solidificación y de fabricación, resuelven problemas prácticos, y planifican plazos y costes. Dentro de los límites de tamaños, la personalización geométrica es total.

PROCESO DE FABRICACIÓN

1. Diseño a fabricación

En general, la impresión 3d se hace importando archivos desde software 3d como *Rhino*. En el caso de *Dinitech*, hay que alimentar la máquina con imágenes planas.

Una vez recibido el modelo 3d, éste se convierte en una serie de imágenes pixelizadas, donde cada pixel tiene 5mm, correspondiendo con el espesor de capa y tamaño del cabezal. Este proceso tarda unos 2 o 3 días.

2. Fabricación

La impresión funciona igual que una impresora normal de 3 ejes: primero se deposita una capa de arena de 5mm de espesor, que se extiende y aplanan. Sobre esta capa, el cabezal de impresión, que consta de 300 boquillas, deposita sobre la capa de arena un aglutinante que actúa como una "tinta estructural", se siguiendo el dibujo 2D. Al combinarse con el aglutinante, la arena se solidifica, y se procede a fabricar la siguiente capa. Cada capa tarda

en imprimirse unos 10 minutos: 3-4 minutos para colocar la arena, y 3 minutos para depositar el aglutinante.

La impresión se hace de abajo arriba, en capas de 5mm de espesor, cuyo espesor se ha establecido de forma empírica. Una vez la geometría tridimensional impresa, se elimina la arena residual con un aspirador, se confirma la solidificación con otro aglomerante, y se pule y arena el objeto final. El secado tarda unas 17 horas en total.

Se imprimen espesores de 200 mm al día (el equivalente a 40 capas en 8 horas) y de 1 metro en 1 semana. Una escultura completa se puede fabricar en un mes. El proceso es lento debido a la reacción exotérmica del material, dado que hace falta tiempo para que el calor se disipe. El proceso de impresión debe hacerse de forma continua en una sesión, sin interrupciones: si se para el secado y se retoma unos días después, las capas ya no se pegarán. Para aumentar la producción, lo ideal es imprimir varias piezas a la vez, una al lado de otra.

COSTE

sin datos

ANÁLISIS

Dinitech ha desarrollado un método de fabricación 3d artesanal con pocos medios. El proceso es mecánico, incapaz de autoregularse y la impresión es lenta. Gran parte de su trabajo está en la resolución de problemas del proceso, y es necesario que la impresión se haga en una sola vez. Para mejorar el proceso, será necesario mejorar la tecnología y convertirla en un proceso verdaderamente digital y autoregurable.

En la práctica, este método de impresión 3d es un proceso muy flexible en el que se pueden emplear muchísimos materiales, desde goma para decorados, celulosa, sal, o varios tipos de arena. Para cada tipo de material, es importante encontrar el material aglutinante y controlar el proceso químico de solidificación. Gran parte del trabajo está dedicado a resolver una gran cantidad de problemas prácticos, como la limpieza de la máquina, la viscosidad del material, el tiempo de secado, etc. Según Dini, para conseguir un proceso 100% eficiente, harían falta elementos de alta tecnología como termoestabilizadores o sensores.

CUADRO DE ANÁLISIS DE PROCESO: Impresión 3D (Dinitech)

POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN					
A.1.	posibilidades materiales	A.1.1	materiales	Matriz: Arenas de varios tipos aglutinante: cloruro de magnesio con óxido de magnesio	
		A.1.2	Acabados y texturas	Acabado: Rugoso, rocoso , Pulido o arenado Textura de capas visibles de 5mm por el proceso, para eliminarlas hay que tratarlo	
		A.1.3	prestaciones	Material resultante sólido y resistente como la roca; pero muy pesado	
A.2.	posibilidades geométricas	A.2.1	tamaño de componentes	4.3m (eje x),3.5m (eje y), aprox. 2m (eje z) división en piezas por el gran peso	
		A.2.3	Tolerancias	Inexactitud geométrica: capas visibles cada 5mm, porque las boquillas son anchas para colocar arena	
		A.2.4	curvatura	dibujo 2D: el dibujo se pixeliza Volumen 3D: libertad geométrica total	

POSIBILIDADES DE GENERALIZACIÓN					
B.1.	proceso de diseño a fabricación	B.1.1	comunicación	A. transferencia directa: El diseñador entrega el dibujo 3d al fabricante para la impresión	
		B.1.2	proceso	Subdivisión de la geometría 3D: éstos se secciona en dibujos 2D para cada capas de 5mm	
B.2.	proceso de fabricación	B.2.1	tipo de proceso	D. CNC: Se coloca la capa de arena de 5mm; las boquillas se mueven en los ejes x e y para colocar el aglomerante y dibujar capa a capa, dejando tiempo de secado entre medias;	
		B.2.2	velocidad de fabricación	La capa de 5mm se imprime en 10 minutos (3-4 min. colocación de capa, 3 min. deposición del aglutinante y solidificación). se imprimen 200 mm/ día, (40 capas en 8 horas), y 1 metro / semana Fabricación, transporte y montaje de una escultura en un mes; montaje a mano	
		B.2.3	flexibilidad del sistema	B. maquinaria autónoma CNC: Una sola maquina con alta participación de operario	
		B.2.4	volumen	A. prototipos: Fabrican uno o dos proyectos al año	
B.3.	proceso de fabricación a montaje	B.3.1.	transporte	división en piezas para limitar su peso y tamaño; lo ideal sería transportar la máquina a la obra	
		B.3.2.	montaje	Piezas montadas unas sobre otras con armaduras, unidas con poliuretano	

POTENCIAL PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
C.1	eficiencia económica	C.1.1.	factores influyentes en el coste	Material: la exploración de material y el aglomerante pueden encarecer el producto Fabricación: El proceso se resuelve caso a caso, según el material y el proceso, de forma artesanal la personalización geométrica no influye en coste	
		C.1.2.	precios de venta	Sin datos: Se trata de obras de arte, objetos y esculturas, no de fabricación en masa	
C.2	eficiencia material	C.2.1.	desperdicio de material	La arena no solidificada se aspira y reutiliza	
C.3	eficiencia de tiempo	C.3.1.	Diseño a fabricación	Es necesario encontrar el aglomerante para cada tipo de material, controlar el proceso químico y los tiempos de solidificación.	
		C.3.2.	fabricación	La impresión debe hacerse en una sola vez, sino las piezas no se pegan El tiempo de endurecimiento depende del tipo de arena y aglomerante, de la disipación del calor generado El aspirado y limpieza de máquina alargan el proceso	
C.4	potencial para person. en masa	C.4.1	tipo de personalización	E. dimensional: Personalización geométrica total	
		C.4.2	eficiencia general	volumen muy bajo de producción nivel alto de personalización. alta digitalización del proceso	
		C.4.3	potencial	alto: potencial para la exploración de materiales eficientes, aumento de volumen de producción con maquinaria móvil de mayor tamaño	

A. CRITERIOS PARA MEJORAR LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
D.1	criterios para el diseñador	D.1.1	geometría	- Geometría libre, sin necesidad de alta precisión	
		D.1.3.	materiales	- Utilización de material más ligero - Para fabricación en masa: material de secado rápido pero resistente, como el hormigón	
D.2	Criterios para el fabricante	D.2.1	comunicación	- mejora del proceso: Importar archivos 3d sin alterarlos	
		D.2.3	fabricación digital	- Maquinaria: aumentar tamaño de máquina para la fabricación simultánea de varias piezas - Máquina móvil : Impresión in situ de piezas en una sola vez para evitar transporte - Posibilidad de autoregulación de la máquina: detección y corrección de problemas, ajuste de velocidad, de grosor de capa, de nivel de detalle, etc.	

5.6 FABRICACIÓN ROBOTIZADA

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

Un **robot industrial** es una máquina programable de uso general que posee un brazo mecánico con articulaciones similares a las del cuerpo humano, capaz de ejecutar movimientos y rutinas sofisticadas (Groover, 2007).

El primer robot industrial se instaló en la *General Motors Company* a principios de los años 60 para realizar soldaduras. Desde entonces, éstos se han utilizado frecuentemente para sustituir a trabajadores en ciertas tareas repetitivas donde se requieren fuerza, velocidad y precisión, y en tareas potencialmente peligrosas. La introducción de robots industriales conlleva un aumento de productividad y de la calidad en el producto.

Los robots son particularmente eficaces para mover material, cargar y descargar máquinas, así como para realizar operaciones de ensamblaje y acabados, como la realización de soldaduras, o la pintura por aspersión. Los robots inteligentes poseen además capacidades senso-perceptivas y son capaces de realizar movimientos que simulan los de un ser humano (Kalpakjian et al., 2014).

Los robots industriales típicos tienen cinco o seis articulaciones o ejes de movimiento.

En el ámbito de la arquitectura, los robots se han introducido muy recientemente. A diferencia de la producción industrial, en que los robots están programados para ir del mismo punto al siguiente y realizar las mismas tareas durante toda su vida útil, en las tareas relacionadas con la arquitectura, el interés de utilizar robots es la fabricación de piezas únicas, lo cual implica la realización de movimientos y de tareas no repetitivas.

En este sentido, la programación del robot ha sido siempre un gran reto, porque los software básicos no incluían la programación de tareas múltiples ni la programación automática, y tampoco existía software que permitiera importar datos desde CAD para convertirlos en archivos CNC (Aigner & Brell-Cokcan, 2009).

ANÁLISIS DEL PROCESO

Las principales ventajas de los robots son su flexibilidad de movimiento, su flexibilidad para realizar distintas aplicaciones, su exactitud y su rapidez. Por ejemplo, es posible combinar tareas tradicionales de fabricación CNC con

visitas realizadas

- *Erne Holzbau*
- *Onlywood*
- *ETHZ*
- *BFH*

fig. 5-155
Primer robot industrial llamado Unimate, (Devol, 1954)

fig. 5-156
Robots utilizados para el montaje y desmontaje de cajas.

fig. 5-157
Robots utilizados para el clavado de paneles.

tareas de montaje. Todo esto permite explorar una gran variedad de aplicaciones, que se investigan e inventan en las distintas escuelas de arquitectura.

Por otro lado, los robots son difíciles de programar, tienen una fuerza limitada, y no es posible controlar el recorrido en las operaciones, sino el proceso punto por punto. Por ello no están tan extendidos como las máquinas CNC, y se encuentran en fase experimental para la mayoría de procesos.

5.6.1 FABRICACIÓN ROBOTIZADA A PEQUEÑA ESCALA

La fabricación con robots en el ámbito de la arquitectura comenzó hace una década con de su incorporación en algunas escuelas de arquitectura. Universidades como la TU en Delft (Instituto de Tecnología de Delft), la ETH en Zúrich, el IAAC en Barcelona (Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña), y el ICD en Stuttgart disponen de unidades dedicadas a fabricación robotizada en arquitectura. De hecho, con los años, cada universidad se ha especializado en un tipo de aplicación de fabricación robotizada, siendo los resultados muy variados.

Los robots más utilizados en la fabricación arquitectónica son de la marca KUKA¹¹⁴. Estos robots son capaces de realizar tareas muy variables: impresión 3d, montaje, corte, fresado, o incluso tejido. Su flexibilidad permite infinitas aplicaciones, basadas en un principio sencillo: la colocación de distintas herramientas en el brazo articulado del robot, que éste manipula siguiendo los movimientos programados.

Los siguientes son referentes en la investigación de la fabricación robotizada a pequeña escala:

- **Laboratorio de fabricación robótica del Instituto de Diseño computacional (ICD), Universidad de Stuttgart :**

La investigación en este centro se basa en la exploración de métodos de generación geométrica, de la simulación computacional y de la fabricación robotizada. Desde el año 2010, el ICD fabrica anualmente un pabellón universitario con robots en colaboración con el Instituto de Estructuras de la Edificación y Diseño Estructural (ITKE). Los primeros pabellones se fabricaban en madera y la fabricación robotizada se aplicaba al corte y fresado del material. En los últimos años, la fabricación es completamente robotizada y la investigación se basa en el tejido robotizado de geometrías biomiméticas con fibras de vidrio y de carbono.

- **Laboratorio de fabricación robótica, *Gramazio Kohler Research*, ETH de Zúrich:**

Es el centro de referencia en la fabricación robotizada desde 2006. Una gran parte de su trabajo se basa en la fabricación aditiva, siendo una de sus realizaciones más conocidas la construcción de muros de ladrillos por robots. Han investigado además el moldeo de texturas en distintos materiales, el montaje por robots voladores, la impresión 3d con robots, y la fabricación de estructuras de madera. Recientemente, su investigación se ha aplicado en la

fig. 5-158
Fresado de juntas por un robot
(ICD_ITKE)

fig. 5-159
Pabellón ICD/ITKE Stuttgart (ICD/
ITKE, Stuttgart, 2011)

fig. 5-160
Tejido por robots para el Pabellón
ICD/ITKE Stuttgart (ICD/ ITKE,
Stuttgart, 2012)

fig. 5-161
The programmed wall (ETHZ;
Zúrich, Suiza; 2006)

fig. 5-162
Robotic clay molding (ETHZ;
Zúrich, Suiza; 2012)

¹¹⁴ *Robots in Architecture* es una asociación que se ocupa de promover el uso de estos robots industriales para la fabricación robotizada aplicada a la arquitectura. Sus tareas son, entre otras, la organización de conferencias internacionales y el desarrollo de software para facilitar la utilización de los robots. Su red de colaboradores incluye sobretodo escuelas y estudios de arquitectura.

fig. 5-163
Mesh mould (ETHZ; Zúrich, Suiza;
2014)

fig. 5-164:
Impresión 3d en el espacio,
"MX3D Metal Printing"(Joris
Laarman Lab con IAAC; Barcelona,
España; 2013)

construcción de un edificio, el *Arch_Tec_Lab* del *Instituto de Tecnología arquitectónica (ITA)*, en el que la estructura de cubierta se ha fabricado por montaje robotizado¹¹⁵.

- Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña (IAAC):

En esta escuela exploran la impresión 3d con robots. Un proyecto interesante ha sido su colaboración con el estudio de fabricación experimental, *Joris Laarman Studio*, cuyo resultado es el método de fabricación aditiva con metal *MX3D Metal* (MX3D, s.f.). El método se basa en la combinación de un robot industrial con una máquina de soldadura.

¹¹⁵ Este edificio se analizará en el capítulo 6.5.1.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

Históricamente, los robots industriales se han utilizado sobre todo para la realización de tareas repetitivas en procesos de fabricación estandarizada.

Sin embargo, algunas industrias han invertido en plataformas robotizadas capaces de realizar tareas repetitivas, o tareas únicas. Dos casos concretos se encuentran en Suiza: las fábricas de *Onlywood* (*MivelazTechniques Bois*) y de *Erne Holzbau*. En este país, en la última década se ha investigado intensivamente la fabricación robotizada de componentes de madera, tanto en el ámbito universitario como en el industrial.

Para fabricar componentes industriales en madera con robots, se han analizado dos opciones:

- **Combinación de robot con una línea de maquinaria:** el robot se combina en una línea de trabajo con otras máquinas estándar (fresadora, sierra, etc.) para la realización coordinada de tareas. Este proceso es eficiente pero la coordinación de tareas es difícil. Resulta complicado combinar distintas máquinas de distintos fabricantes, y por tanto con distintos lenguajes de programación, y es necesario tener distintos tipos de especialistas
- **Pórticos robotizados multifunción:** son plataformas robotizadas de gran tamaño fabricadas a medida. En función de la tarea, los cabezales y herramientas para el robot también se diseñan y fabrican a medida. La existencia de una sola máquina simplifica la programación de operaciones, y el tamaño y versatilidad del pórtico favorece fabricación personalizada.

En una línea normal de maquinaria, son necesarios operarios para trasladar el material, colocarlo, supervisar, retirarlo y moverlo a la siguiente máquina. Un pórtico robotizado multifunción es prácticamente autónomo, capaz de realizar distintas operaciones en serie tan sólo con un operario para supervisar los procesos.

En *Onlywood*, disponen de un Pórtico robotizado *Wood Flex 32* de 6 ejes que permite realizar tareas de mecanizado y montaje de componentes hasta un tamaño de 15m x 3m. El tamaño final de los componentes está limitado por el transporte (13mx3m) y por el peso del componente total.

fig. 5-165
Montaje robotizado en la BFH, combinación de operaciones por robot y otra maquinaria.

fig. 5-166
Pórtico robotizado *Wood Flex 32* de 6 ejes en *Onlywood*.

fig. 5-167
Detalle del pórtico robotizado en *Erne Holzbau*.

DATOS

- **fecha de visita:** 20-26/04/2015
- **localización:** Stein, Suiza
- **tamaño:** más de 1000 empleados.
- **mercado:** edificación (colegios, oficinas, hospitales, tiendas, etc.), en Europa, sobretodo Suiza, Alemania, Francia y Reino Unido.
- **servicio:** ofrecen un servicio completo llave en mano, que incluye la promoción, construcción, ingeniería y producción de componentes y edificios en madera, además de servicios post-venta, y servicios de inmobiliaria.

PRODUCCIÓN

- **producto:** productos en madera (ventanas, puertas, híbrido madera-metal), sistemas en madera (fachadas, suelos y techos), construcción modular (escuelas, hospitales, oficinas etc.).
- **material:** madera, sistemas híbridos madera-metal, composites.
- **tamaños:** módulos prefabricados de 15mx3mx3m; estructuras por fabricación robotizada de 15m de largo x 1.15m de altura.
- **volumen de producción:** 500 módulos por año, en total unos 20.000m².

DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Historia: fundada en 1906, esta empresa es una de las principales industrias de madera en Suiza. Hoy en día dispone de 22 fábricas, dedicadas a los distintos aspectos de la construcción en madera.

La fábrica de Stein, donde se hizo la visita, tiene unos 90 empleados y se dedica sobre todo a la producción de módulos en madera (73% del mercado), así como de fachadas y ventanas (17%). Cuando la ETH de Zúrich lanzó un concurso para la fabricación y construcción del nuevo pabellón *Arch_Tec_Lab* en su campus. *Erne Stein* ganó el concurso e invirtió en un nuevo pórtico robotizado. Con este pórtico, se abrieron al mercado de la fabricación personalizada con madera.

Servicios: Esta empresa tiene un carácter único, ya que ofrece un servicio integral como promotora, constructora y productora de edificios en madera, incluyendo servicios de ingeniería, consultoría, postventa y gestión inmobiliaria.

fig. 5-168
Edificio en la fábrica de ErneStein.

fig. 5-169:
Interior de la fábrica de ErneStein con el pórtico robotizado.

fig. 5-170
Fachada del Südpark (Herzog & de Meuron; Basilea, Suiza; 2012), realizada por Erne.

fig. 5-171
Edificio de investigación Microcity (Bauart Architectes; Neuchâtel, Suiza)

FILOSOFÍA

Históricamente, la fábrica de *Erne-Stein* se ha dedicado a la fabricación de módulos y componentes estándar en madera. Con la incorporación del pórtico robotizado para la fabricación del *Arch_Tec_Lab* en la ETH de Zúrich, la empresa se abre al mercado de la fabricación personalizada. Esta máquina tiene el potencial de optimizar la producción de componentes estándar, pero sobretodo de descubrir nuevas aplicaciones y de ponerse a disposición de los arquitectos para realizar nuevos tipos de proyectos.

fig. 5-172
El robot coge la pieza y la coloca en posición para cortarla.

fig. 5-173:
Se recorta la pieza con una sierra estática.

fig. 5-174
Se coloca la pieza en su posición sobre la cercha.

fig. 5-175
Clavado de las uniones por el robot.

PROCESO DE FABRICACIÓN

El pórtico robotizado permite combinar distintas funciones de fabricación como la colocación, el corte, el fresado, y el clavado de tablas de madera, así como el control de calidad de la estructura mediante fotografías. A diferencia de una máquina CNC, el robot tiene autonomía para diseñar los pasos entre operaciones por lo que no hay que programar cada movimiento. Sólo es necesario un operario en permanencia que supervise el proceso completo.

Para la realización de la estructura del *Arch_Tec_Lab* en la ETH de Zúrich, el proceso es el siguiente:

1. el robot coge la pieza con una pinza, la pone en posición en la mesa de trabajo donde una sierra corta la pieza. Como el robot conoce la dimensión inicial y final cada pieza, la colocación de cada pieza en la mesa para su corte se hace de forma exacta.
2. una vez cortada la pieza, el robot la recoge y coloca en su posición sobre la cercha. Primero fija la pieza en sus dos extremos con 2 clavos: coloca un clavo en un extremo, suelta la pinza, se gira, va al otro extremo de la pieza y fija el segundo clavo. Se colocan todas las piezas de una capa completa de la cercha.
3. dado que algunos cortes no se pueden realizar con la sierra estándar, al final del proceso de colocación el robot cambia el cabezal de pinza por un cabezal con sierra, para realizar cortes que necesiten una geometría específica por sí mismo.
4. Una vez todas las piezas colocadas y aserradas, el robot va a todas las uniones y coloca todos los clavos necesarios en cada unión a su posición exacta para asegurar las conexiones.
5. cuando termina el montaje de una capa, el robot realiza el control de calidad, coge una cámara fotográfica y fotografía cada conexión. Las fotografías se comparan con el modelo 3d para asegurar que la cantidad de clavos es exacta. Asimismo, se comprueba el espesor del elemento, y en si es diferente del modelo 3d, se adaptará el espesor del siguiente módulo. El control de calidad permite calibrar el

modelo de forma automática para que el elemento final se equilibre y corresponda con la dimensión deseada.

COSTE

Se desconoce el coste de la estructura construida, pero la inversión en el pórtico fue de 30 millones de francos suizos¹¹⁶ (CHF), y de cada cabezal unos 30.000 CHF¹¹⁷. Es importante para la industria amortizar la inversión de la máquina con sus proyectos.

ANÁLISIS

A día de hoy, esta máquina tiene un inmenso potencial para la fabricación personalizada, que está por ver en función de los proyectos y realizaciones en este tipo de industria a gran escala.

Con este pórtico robotizado, no sólo se realizan distintas operaciones en línea con una sola máquina, sino que la máquina participa en el proceso de forma inteligente: permite comprobar la calidad, corregir el diseño y generar de forma autónoma sus decisiones. Además, la programación única de una máquina desde un sencillo modelo 3d (*Rhino*).

Por otro lado, este proyecto es toda una innovación dado que no sólo se fabrican piezas individuales únicas, sino un sistema único, mediante la combinación de piezas mecanizadas individuales. Se combina la fabricación personalizada de componentes con el montaje personalizado de una estructura a gran escala; es decir que el sistema abarca el proceso completo de construcción personalizada. El edificio se estudiará en mayor detalle en el capítulo 6.5.1.

El cuadro de análisis se hará sobre la combinación del caso concreto del *Arch_Tec_Lab* en la ETH de Zúrich, único proyecto que se ha hecho con este pórtico robotizado en *Erne Holzbau*. En el caso del *ITA Dach*, es el sistema de fabricación del pórtico el que ha alimentado el diseño.

- **criterios a tener en cuenta para un proceso más eficiente:**

Hasta ahora, la construcción con pórticos robotizados se ha hecho integralmente en centros de investigación o industrias, lo cual facilita enormemente la integración de parámetros de fabricación, montaje e ingeniería en el diseño. El sistema está aún en fase experimental: la maquinaria existe y ofrece infinidad de posibilidades, a esperas de realizar proyectos que puedan aprovechar su potencial. En caso de trabajar con estos sistemas, los arquitectos disponen de una flexibilidad que va más allá de los procesos convencionales.

¹¹⁶ Precio equivalente a aproximadamente 28 millones de euros, consultado en junio del 2017.

¹¹⁷ Precio equivalente a 27.590 €, consultado en junio del 2017.

En lugar de preguntarse: ¿qué puedo hacer con esta máquina?;

La pregunta en este caso es: ¿qué quiero hacer con esta máquina?

CUADRO DE ANÁLISIS DE PROCESO: Montaje robotizado (Erne Holzbau)

POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN					
A.1.	posibilidades materiales	A.1.1	materiales posibles	Tablas de madera de pino de pequeño tamaño (max. 3.10m), tableros para módulos en madera	
		A.1.2	Acabados y texturas	texturas posibles por fresado cortes rectos posibles: bien con sierra circular, bien con sierra en cabezal de robot	
A.2.	posibilidades geométricas	A.2.1	tamaño de componentes	48m x 3m	
			tolerancias	movimientos de madera por diferencia de humedad (3%, tolerancia por diferencia en tamaños (1%)	
		A.2.4	curvatura	La curvatura se consigue por montaje con piezas rectas ; la curvatura doble se consigue por yuxtaposición de vigas de curvatura simple, que componen una superficie ondulante. las estructuras tridimensionales están en proceso de investigación	

POSIBILIDADES DE GENERALIZACIÓN					
B.1.	proceso de diseño a fabricación	B.1.1	comunicación	E. parámetros de fabricación El proceso de fabricación se diseña a partir del diseño el diseño incorpora desde el principio la lógica de ingeniería y fabricación	5.6.3 5.6.4
		B.1.2	proceso	Modelo 3d sencillo (Rhino) incluyendo detalles constructivos y simulación estructural.	
B.2.	proceso de fabricación	B.2.1	tipo de proceso	D. CNC: Más allá del CNC, el proceso robotizado tiene autonomía para la toma de decisiones sobre el proceso y puede combinar fabricación con montaje	
		B.2.2	velocidad de fabricación	El robot tarda 1/3 del tiempo que a mano (12 horas por cercha en vez de 36) La velocidad depende de los cambios de cabezal, de los movimientos, y de la operación en sí.	
		B.2.3	flexibilidad del sistema	D. sistemas flexibles: combina maquinado y manipulación automática del material Las máquinas participan en la toma de decisiones; por ejemplo eligen el camino entre operaciones	
		B.2.4	volumen de producción	D. Potencial para producción en masa	
B.3.	proceso de fabricación a montaje	B.3.1.	transporte	módulos pre-montados de gran tamaño, limitados por el tamaño de camión y peso en montaje	
		B.3.2.	montaje	Se montan módulos en fábrica para asegurar un montaje rápido en obra	

POTENCIAL PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
C.1	eficiencia económica	C.1.1.	factores influyentes en el coste	Fabricación: Tiempo de maquinado Cada tipo de operación nueva implica inversión en un cabezal hecho a medida Montaje: la técnica de montaje influye en el proceso y coste: el clavado automático agiliza el proceso, mientras el pegado no está probado y es más lento Personalización: La maquinaria está diseñada para fabricación personalizada, no debería influir en el coste	
		C.1.2.	precios de venta	Sin datos específicos; Se resuelve caso por caso. el precio engloba fabricación y montaje	
C.2	eficiencia material	C.2.1.	desperdicio de material	El montaje con piezas pequeñas minimiza el desperdicio y aprovecha material de menor calidad	
C.3	eficiencia de tiempo	C.3.1.	diseño a fabricación	Desde el principio se piensan detalles de conexiones y fabricación según la posibilidades del robot. Programación por especialistas	
		C.3.3.	fabricación a montaje	El montaje en obra es rápido porque se montan módulos de gran tamaño en taller	
C.4	potencial para person. en masa	C.4.1	tipo de personalización	C. cosmética y E. dimensional: Personalización de la geometría, del sistema de montaje y de los módulos resultantes; personalización de la fabricación.	
		C.4.2	eficiencia general	alto volumen de producción alto nivel de personalización. uso elevado de herramientas digitales	
		C.4.3	potencial	Alto: Se estima que este proceso tiene un altísimo potencial, tanto para la producción en masa como para la personalización de diseños basada en la combinación de procesos y materiales	

CRITERIOS PARA MEJORAR LA PERSONALIZACIÓN EN MASA					
D.1	criterios para el diseñador	D.1.1.	geometría	Por ahora se han probado estructuras por superposición de piezas, pero el sistema permite experimentar con variaciones geométricas	
		D.1.3.	materiales	Por ahora se ha utilizado madera, pero se podrían utilizar más materiales y combinarlos	
D.2	Criterios para el fabricante	D.2.1	comunicación	potencial para establecer un sistema de diseño colaborativo, con parámetros definidos pero dando libertad en el diseño	
		D.2.2	fabricación digital	Potencial para combinar distintas máquinas y operaciones, procurando la continuidad entre operaciones	

Tabla 4: Cuadro comparativo de análisis de procesos: Procesos de corte, substractivos, y formativos directos

				KLH	CAMPOLONGHI	ZAHNER	BLUMER-LEHMANN	CENTRALSTAAL	DUCRET-ORGES
A. POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN									
A.1.	posibilidades materiales	A.1.1.	materiales posibles	paneles de madera macia contralaminada de gran formato; alabeo y contracción mínimas, muy alta resistencia estática y rigidez	gran variedad de piedras: granitos, mármoles, ónixes, travertinos.	acero, acero inoxidable, acero galvanizado, cobre, zinc, titanio, aluminio, aleaciones metálicas	madera de pino y abeto; material muy flexible y fácil de maquinar, muy resistente en el sentido de la fibra.	acero, acero inoxidable, aluminio, acero corten, y cobre. Alta dureza, resistencia, y durabilidad de la fibra.	madera laminada: gran flexibilidad, grandes tamaños y altas prestaciones estructurales
		A.1.2.	acabados y texturas	bruto (calidad no visible); o lijado(calidad visible)	pulido, apomazado, cepillado, flameado, abujardado, arenado, arañado con sierra	oxidado, granallado, deposición química de vapor, aplicación de pátinas, coloración, etc.; perforado, granallado, punzonado, troquelado, doblado, etc.	flexibilidad total por fresado; el detalle es en función del diámetro de la fresa	chapa metálica pretratada: inox,óxido,y granallado. posibilidad de textura en caso de aluminio	flexibilidad por fresado de piezas planas y curvas A más detalle más lento y costoso es el proceso
		A.1.3.	prestaciones	flexibilidad de texturas por fresado, aunque encarece enormemente el producto	piedra translúcida (travertino), piedra impermeable (con resina); piedra antideslizante (flameado)			mayor resistencia cuanto más espesor la deformación de chapa puede favorecer la resistencia	
		A.1.4.	montaje			combinación de varios metales en un panel			
		A.1.5.	utilización de moldes						
A.2.	posibilidades geométricas	A.2.1.	tamaño de componentes	tamaño máximo de panel: 16.5m x 2x95m espesor máximo: 0,5m	Estándar: piezas de 60x40cm, cortadas en líneas automáticas Tamaño máximo: en función del bloque, habitualmente 1.60mx2.40m	ZIRA: tamaño máximo de aprox. 6mx3m, tamaños máximos limitados por transporte. ZEPPS: espesor máximo 35 cm	tamaño máximo: 27m de largo, 5.5m de ancho espesores: 1.35m de alto	Tamaño máximo: ancho de 4m mayor pieza realizada:12 x 3.5m. espesores: de 4mm hasta 8-10cm	limitado por transporte forjados hasta 14x2,5m; estructuras hasta 42m x 2.5m espesor: en función del número de tablas encoladas; espesor máx. 2,5m
		A.2.2.	cortes internos	flexibilidad de geometría y colocación; ángulos rectos con sierra, ángulos internos a mano	2-3cm, corte en telares multifeije Si tienen más de 3cm:corte con hilo de diamante	perforado y punzonado con varios diámetros y geometrías	no se pueden hacer ángulos exactos, debido a la geometría cilíndrica de la fresa		
		A.2.3.	tolerancias	aprox. +/- 2 mm para madera con humedad del 12%.			tolerancias de fabricación: 1/10mm		
		A.2.4.	curvatura	todos los paneles son bidimensionales	flexibilidad para curvatura simple o doble si se hace corte con hilo de diamante	el metal no se pliega en dos direcciones de forma natural, es necesario desarrollar un sistema específico para conseguirlo	La curvatura simple es más sencilla de realizar por laminado curvo, pero sólo es exacto al 90%. El laminado a doble curvatura es muy caro; para abaratar, se suelen fresar las vigas con curvatura simple a doble curvatura.	curvatura en función del espesor de chapa y del metal	simple: deformación por prensado de madera laminada; curvatura en función de longitud de viga doble: prensado a doble curvatura (excepcional); o por fresado de vigas de curvatura simple
B. POSIBILIDADES DE GENERALIZACIÓN									
B.1.	proceso de diseño a fabricación	B.1.1.	comunicación	D. parámetros de fabricación: comunicación de parámetros físicos por parte del fabricante	A. transferencia directa: si se desvía de la producción estándar, el arquitecto transmite lo que quiere al fabricante, y éste lo resuelve dentro de los límites posibles.	A. proceso interactivo: proceso colaborativo con los arquitectos: servicio de consultoría y asistencia al diseño.	D. proceso con intermediarios: Para edificios complejos, subcontratan la resolución geométrica y de preparación para la producción a consultores.	F. proceso interactivo: comunicación constante entre fabricante, arquitecto e ingenieros; software BIM propio (ahorro de tiempo del 20%)	A. transferencia directa los clientes suelen ser carpinteros, que conocen los detalles; si son arquitectos es necesario transmitir parámetros de fabricación y montaje
		B.1.2.	proceso	KLH dispone de un software propio	para piezas estándar: proceso rápido y eficiente; para piezas singulares: preparación y supervisión por un operario especializado	empleo de sistemas prediseñados por Zahner, definición del diseño con software BIM	Creación de un modelo paramétrico para realizar la optimización geométrica, integrar parámetros materiales, de fabricación y montaje, y convertir a archivos de fabricación.	software BIM para cálculos estructurales, análisis de envolvente, simulación de fabricación, y optimización del material. Exportación a diagramas 2D y código G de las prensas	Varía el espesor final, la longitud total del elemento y la curvatura; se imprimen plantillas para definir la curvatura
B.2.	proceso de fabricación	B.2.1.	tipo de proceso	A. manual: solamente para pequeños remates C. automático: encolado de tableros D. CNC: mecanizado de tableros	A. manual: algunos detalles a mano B. mecánico: acabados, corte de bloques en telares D. CNC: corte CNC, corte con hilo de diamante	A. manual: premontaje en fábrica y montaje en obra D. CNC: Corte por chorro de agua, fresado, punzonado, troquelado	D. CNC: Centros de maquinado CNC, máquina robotizada de 5 ejes y 8 carros de transporte	D. CNC: máquinas de corte CNC (por plasma), prensas de distinto tonelaje (hasta 6000 kN)	B. mecánico: prensado hidráulico con colocación manual D. CNC: Corte y fresado de madera
		B.2.2.	velocidad de fabricación	Encolado: 12min en encolar , 1h de prensar Mecanizado: en función de número de cortes, nivel de detalle en texturas, remates	Producción de piezas estándar: 1000 m2 al día Corte CNC: más lento, en función del detalle		1 pieza de 9 metros tarda 5/6 horas en la maquina	2-3 días para fabricar desde que el modelo 3D está definido, incluyendo comprobación de chapas	Curvado simple: 3-4 horas para encolado, en recto y en curvo Para dar curvatura doble, si se fresa la doble curvatura el proceso es mucho más lento y costoso
		B.2.3.	flexibilidad del sistema	E. líneas de manufactura flexible; máquinas multi tarea, gran flexibilidad geométrica (5 o 6 ejes)	B. Unidad autónoma: combinación de líneas de producción estándar y máquinas CNC con alta participación de operarios	Posiblemente, (D) sistemas de manufactura flexible en el maquinado CNC	C. celdas de manufactura: máquinas CNC multi-tarea individuales operadas por especialistas, flexibilidad geométrica muy alta: maquinaria de 5 o 6 ejes	B. unidad autónoma CNC: Maquinaria mono-tarea especializada CNC, alta participación de operarios y flexibilidad geométrica	D. sistemas flexibles: Celdas CNC, combinadas con celdas mecánicas
		B.2.4.	volumen de producción	D. producción en masa: 80.000 - 85.000m3/ año; máxima producción: 670.000 m3 en 2011	B. lote pequeño: para pedidos especiales D. producción en masa: para piezas estándares		C. lote mediano: gran volumen de fabricación de piezas singulares para unos pocos encargos	A. prototipos: 2-3 proyectos al año	C. lote pequeño: hay algunos encargos singulares, pero la mayoría de encargos son estándar
B.3.	proceso de fabricación a montaje	B.3.1.	transporte	el tamaño del camión limita el tamaño máximo del componente.	el transporte se hace en cajas de madera, cumpliendo criterios de resistencia y capacidad	Cada panel está numerado y listo para instalar	piezas numeradas, transporte de módulos premontados de gran tamaño	chapas identificadas para facilitar el montaje	Las piezas son pesadas pero resistentes; el transporte es complejo para estructuras de gran tamaño
		B.3.2.	montaje	el montaje es sistemático y sencillo, realizable por cualquier carpintero o montador especializado	en general se utilizan sistemas estándar para suelos o fachadas, que se colocan rápidamente	diseño de sistemas de montaje rápido; instalación por montadores no experimentados	premontaje de módulos de gran tamaño en taller, montaje rápido de módulos en obra	la prefabricación de módulos grandes simplifica el montaje (menos soldadura)	Es más sencillo cuanto mayor el grado de prefabricación
C. POTENCIAL PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA									
C.1.	eficiencia económica	C.1.1.	factores influyentes en el coste	tiempo de maquinado: corte y fresado acabado visto, y si requiere lijado fresado de texturas detalladas	Geometría: corte oblicuo + 40%, corte curvo +80-100% taladrado, muescas: +15-20% el fresado de textura es muy lento y costoso		complejidad: lo más caro son componentes pequeños y complejos fabricación: la pieza curvada más cara, la doblemente curvada hasta 8/10 veces más cara acabado: depende de las horas de maquinado	material: tipo de metal, costes del material montaje: el coste sube por las horas de soldaduras si el producto es estándar ni el precio ni los tiempos de producción bajan	Geometría: la doble curvatura se consigue bien por fresado, bien en fábrica muy especializada; Fabricación: el precio aumenta con el tiempo de mecanizado, la complejidad de las piezas, dedicación de ingenieros, tiempo de
		C.1.2.	precios de venta	el precio incluye un sistema constructivo comprobado. el coste total está equilibrado entre la producción en masa y un rango interesante de personalización	Las variaciones aumentan substancialmente el precio (+20,40,100% en función del tipo de variación)		son proyectos costosos, pero hay que tener en cuenta que es un servicio completo incluye un trabajo muy importante de consultoría	Hay que tener el cuenta el precio global (fabricación + montaje), precio medio = 1000 €/m²	La pieza curvada es más cara que la recta, la pieza doblemente curvada hasta 8/10 veces más cara
C.2.	eficiencia material	C.2.1.	desperdicio de material	el departamento técnico distribuye las piezas por paneles para maximizar el aprovechamiento, aunque cada panel debe ser de un solo proyecto	gran desperdicio por el corte en telar (1cm por la sierra), y por corte de bordes para piezas singulares: gran desperdicio, sobretodo en piezas tridimensionales		gran desperdicio por fresado, que se quema en su central eléctrica	la geometría se racionaliza en chapas de tamaño máximo para maximizar el aprovechamiento de chapa y optimizar la estructura	Hay desperdicio en la producción de tablas, en el corte de vigas curvas, en el fresado a doble curvatura
		C.2.2.	necesidad de moldes	no se necesitan moldes	no se necesitan moldes		no se necesitan moldes	no se necesitan moldes	no se necesitan moldes
C.3.	eficiencia de tiempo	C.3.1.	diseño a fabricación	definición de dibujos de fabricación: 1 semana; generación de códigos de fabricación en software propio: 10 días aproximadamente.	Dedicación especial por operarios especializados: preparan los dibujos, controlan y manipulan las máquinas.		el proceso de diseño es lento porque se desarrolla un modelo digital complejo que incorpora toda la información sobre fabricación y montaje en el diseño	optimización del diseño con software BIM, proceso colaborativo	el conocimiento de detalles constructivos facilita el proceso: si el cliente es un arquitecto, los desarrollan por completo; si las piezas son estándares, el tiempo de programación de las máquinas se reduce
		C.3.2.	fabricación				el proceso de fabricación por fresado es muy lento	maximizar tamaño de chapa para simplificar montaje; considerar aporte estructural de la envolvente (mayor espesor para reducir subestructura),	Se dibuja una plantilla para colocar la prensa, cuanto más sencilla la curvatura, mejor
		C.3.3.	fabricación a montaje	una vivienda unifamiliar se monta en 2 días (dos plantas/día), por 4 carpinteros, un conductor de camión y una grúa móvil	el sistema de montaje generalmente es estándar y se hace rápidamente		el montaje en obra es rápido porque se premontan módulos de gran tamaño en taller	el montaje es más rápido cuanto mayores son las chapas	El montaje en obra es rápido porque se premontan módulos de gran tamaño en taller
C.4.	potencial para personalización en masa	C.4.1.	tipo de personalización	C. cosmética: personalización de texturas E. dimensional: la personalización está limitada a tableros bidimensionales rectangulares para facilitar el montaje	C. cosmética: variedad de texturas disponibles, posibilidad de superponer texturas E. dimensional: gran flexibilidad geométrica en dos dimensiones (corte personalizado) y tres dimensiones (corte con hilo de diamante)		C. cosmética: posibilidad de tallado de superficie, inclusión de detalles de montaje E. dimensional: flexibilidad en tamaño y geometría	C. cosmética: Es difícil combinar textura y geometría, excepto para aluminio con prensa especial E. dimensional: Flexibilidad geométrica 2D y3D, límite geométrico en función de ductilidad	C. cosmética: aunque no es habitual, acabados personalizados mediante fresado, E. dimensional: Geometría personalizable
		C.4.2.	eficiencia general	-altos volúmenes de producción -alta personalización. -alto grado de automatización	-altos volúmenes de producción -grado de personalización medio. -alto grado de automatización		-bajo volumen de producción -alto nivel de personalización. -uso de herramientas digitales avanzadas	-bajo volumen de producción -alto nivel de personalización. -uso de herramientas digitales	-bajo volumen de producción -alto nivel de personalización. -uso de herramientas digitales para mecanizado
		C.4.3.	potencial	ALTO: uso intensivo de herramientas CNC, grandes volúmenes el proceso es muy eficiente dentro de los límites establecidos por KLH	MEDIO: potencial para evolucionar desde la fabricación en masa a la personalización en masa, optimizando la fabricación de piezas especiales		MEDIO: uso de tecnología avanzada pero volumen de producción; proceso de diseño complejo	MEDIO: bajo volumen de producción, pero procesos eficientes por fabricación digital	BAJO: Proceso costoso con bajo volumen de producción, potencial para automatización de prensado de vigas
D. CRITERIOS PARA MEJORAR LA PERSONALIZACIÓN EN MASA									
D.1.	decisiones por el diseñador	D.1.1.	decisiones sobre la geometría	- limitar el diseño a tableros bidimensionales con espesores estándar. - elegir el tipo de unión entre tableros según los distintos remates.	- minimizar el número de piezas		- incorporar en el diseño detalles de montaje y de interfaces entre sistemas del edificio - evitar vigas doblemente curvadas: procurar desarrollar el diseño con vigas planas o de curvatura sencilla	- libertad geométrica (2D-3D), curvatura en función de espesor de chapa - maximizar el tamaño de chapa para simplificar montaje	- evaluar necesidad real de curvatura doble, subdividiendo o simplificando el diseño - maximizar prefabricación para facilitar montaje
		D.1.2.	decisiones sobre los acabados	- elegir entre dos tipos de acabado - minimizar texturas especiales para reducir las operaciones de fresado	- personalización de acabados mediante superposición de acabados estándar - la textura por fresado encarece y ralentiza el proceso				
		D.1.3.	decisiones sobre los materiales	- maximizar aprovechamiento de tablero, - definir de la capacidad portante de los paneles: estructurales o de envolvente, para determinar el espesor de tablero.	- minimizar el desperdicio intentando aprovechar las piezas sobrantes en el diseño		- en el fresado de piezas estructurales, hay que cuidar de minimizar la rotura de fibras para no perder rigidez	- aprovechar la capacidad estructural de las chapas metálicas para optimizar el conjunto - mayor capacidad estructural cuanto mayor espesor de chapa, con la posibilidad de reducir la subestructura (estructuras monocasco)	- la curvatura depende de la longitud y espesor de viga
D.2.	decisiones por el fabricante	D.2.1.	comunicación		- potencial para el desarrollo de un proceso colaborativo		- comunicar y coordinar desde el inicio con otros fabricantes, compartir detalles y modelos geométricos	- potencial para incluir o informar al arquitecto en mayor medida	- comunicación de detalles constructivos al arquitecto para facilitar proceso de diseño a fabricación
		D.2.2.	fabricación manual						
		D.2.3.	fabricación digital				- elección del sistema de fabricación para cada pieza - elección de herramientas: utilización de fresa de diámetro adecuado para minimizar tiempo de maquinado - exploración de líneas de manufactura flexible	- exploración de líneas de manufactura flexible, combinando procesos de corte y prensado de chapas	- exploración de líneas de manufactura flexible - configuración automática de la prensa hidráulica - prensas CNC para vigas de doble curvatura

Tabla 5 : Cuadro comparativo de análisis de procesos: Procesos formativos indirectos, aditivos y de montaje robotizado

				CONTROL GLASS	POLY PRODUCTS	VARI	PREINCO	DINITECH	ERNE HOLZBAU
A	POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN								
A.1.	posibilidades materiales	A.1.1.	materiales posibles	vidrio producido por 6 fabricantes mundiales; duro, frágil y transparente difícil de moldear	Matriz: resina de poliéster: resistente a fuego y rayos UVA; duradero, ligero pero tóxico en la aplicación Reforzante: fibra de vidrio en rollos	Matriz: yeso natural, resistente al fuego, muy ligero, uso en lugares secos (interiores), no tóxico, anthongos Reforzante: fibra de vidrio en rollos, da ligereza y resistencia	Matriz: Microhormigón, ligero y resistente en exteriores Reforzante: Fibras de vidrio trituradas	Matriz: Arenas de varios tipos aglutinante: cloruro de magnesio con óxido de magnesio	Tablas de madera de pino de pequeño tamaño (max. 3.10m), tableros para módulos en madera
		A.1.2.	acabados y texturas	Acabados: Vidrios tintados, serigrafiados, control solar, bajo emisivos, impresos, fundidos, y anti reflectantes Texturas: Serigrafía y fresado excepcionalmente	Muy variable; Visto: Opaco, rugoso, translucido (según aditivos); Pintado: Pintura lisa, metálica Texturas: en función del molde y de los aditivos; alta personalización	Acabado visto : Yeso natural (blanco-blanco/gris) Coloreado: con pigmentos de colores o pintado Texturas: en función del molde (alto nivel de detalle)	Acabado: Cemento blanco o gris; variaciones: pigmentos, óxidos, variación del árido Texturas: en función del molde de goma Textura lisa o con chorro de arena	Acabado: Rugoso, rocoso , Pulido o arenado Textura de capas visibles de 5mm por el proceso, para eliminarlas hay que tratarlo	texturas posibles por fresado cortes rectos posibles: bien con sierra circular, bien con sierra en cabezal de robot
		A.1.3.	prestaciones	Control de cualidades ópticas, térmicas, y control solar el templado mejora la resistencia del vidrio mayor aislamiento en doble vidrio con cámara de aire	Variación de resistencia, ligereza, durabilidad en función del tipo de resina y de fibra de vidrio	variación de dureza en función de la fibra; la matriz es la misma.		Material resultante sólido y resistente como la roca; pero muy pesado	
		A.1.4.	montaje						
		A.1.5.	utilización de moldes	materiales: arena, cerámica, tubos metálicos reconfigurables o metal deformado	Desechables: poliestireno y madera Reutilizables: GRP, metal; reutilizables hasta 150 veces	Desechables: madera, yeso Reutilizables: poliéster, plástico , silicona para detalle más fino	Desechables: madera, yeso Reutilizables: poliéster, plástico, silicona		
A.2.	posibilidades geométricas	A.2.1.	tamaño de componentes	Curvado templado : hasta 4500x2440 (cricursa) curvado recocado: hasta 5,8x2,5m (cricursa) Espesor máximo: 10+ 10mm vidrio laminado / 3 a 19mm vidrio monolítico		Tamaño máximo realizado: 3m de long. x 3m de altura Espesores: 7-9 mm, peso entre 7 y 9 kg/m²	Tamaño máximo: 8m de longitud x 3m de altura en paneles "studframe", 4-5m de largo x 3m de altura en paneles sándwich Espesores: 1cm el GRC, 10cm por panel	4.3m (eje x),3.5m (eje y), aprox. 2m (eje z) división en piezas por el gran peso	48m x 3m
		A.2.2.	cortes internos						
		A.2.3.	tolerancias				Tolerancia de montaje: queda unaunta vista de 1cm	Inexactitud geométrica: capas visibles cada 5mm, porque las boquillas son anchas para colocar arena	movimientos de madera por diferencia de humedad (3%, tolerancia por diferencia en tamaños (1%)
		A.2.4.	curvatura	Curvado templado: curvatura simple, radio 1m a 2m curvado recocado: el máximo de curvatura son 180º curvatura doble, no se pueden hacer piezas cóncavas		Gran flexibilidad en curvatura, no hay ninguna ventaja en simplificar	En general son paneles planos, pero hay flexibilidad en el dibujo con huecos de tamaño suficiente	dibujo 2D: el dibujo se pixeliza Volumen 3D: libertad geométrica total	La curvatura se consigue por montaje con piezas rectas ; la curvatura doble se consigue por yuxtaposición de vigas de curvatura simple. las estructuras tridimensionales están en investigación
B	POSIBILIDADES DE GENERALIZACIÓN								
B.1.	proceso de diseño a fabricación	B.1.1.	comunicación	D. proceso 'de ida y vuelta': enfoque individualizado, proceso largo que encarece el producto final.	B. proceso 'de idas y vueltas': el fabricante aconseja tipo de resina y moldes, sugiere división de geometría	B. proceso 'de idas y vueltas': el fabricante procura adaptarse al diseño arquitectónico, racionalización con arquitecto	B. proceso 'de idas y vueltas', diseño según catálogos para las texturas con plantillas de goma	A. transferencia directa: El diseñador entrega el dibujo 3d al fabricante para la impresión	E. parámetros de fabricación El proceso de fabricación se diseña a partir del diseño el diseño incorpora desde el principio la lógica de ingeniería y fabricación
		B.1.2.	proceso	Apoyo técnico: trabajo de despiece de la geometría y preparación de archivos de fabricación	División según la geometría, la facilidad de moldeo y desmoldado, y el diseño de juntas vistas	Racionalización de geometría para reutilización de moldes con recorte de piezas a posteriori. subdivisión de geometría para facilitar desmoldado.	Subdivisión, procurando reutilizar los moldes	Subdivisión de la geometría 3D: éstos se secciona en dibujos 2D para cada capas de 5mm	Modelo 3d sencillo (Rhino) incluyendo detalles constructivos y simulación estructural.
B.2.	proceso de fabricación	B.2.1.	tipo de proceso	A. manual: manipulación y montaje de vidrios curvos B. automático: tratamiento de vidrios planos: canteado, montaje y manipulación D. CNC: corte de vidrio	A. manual: Fabricación manual de moldes de madera, aplicación manual del GRP sobre molde C. automático: Aspirado, moldeo con spray D. CNC: Fabricación CNC de moldes	A. manual: Fabricación manual de moldes de madera, aplicación manual sobre molde con esponja	A. manual: Fabricación manual de moldes de madera, aplicación manual del GRC sobre molde	D. CNC: Se coloca la capa de arena de 5mm; las boquillas se mueven en los ejes x e y para colocar el aglomerante y dibujar capa a capa, dejando tiempo de secado entre medias;	D. CNC: Más allá del CNC, el proceso robotizado tiene autonomía para la toma de decisiones sobre el proceso y puede combinar fabricación con montaje
		B.2.2.	velocidad de fabricación	vidrio curvado templado: 6min para calentamiento y enfriado en un horno muy largo con gran capacidad Curvado recocado: 6 a 8 horas en horno de menor tamaño	Moldes: fabricación en más de 3 semanas) GRP: se aplica capa tras capa con un rodillo; se tarda hasta un día en hacer una pieza. Moldeo por aspirado: una hora, pero necesita mayor preparación	Fabricación manual de moldes de silicona, GRP, madera aplicación manual de GRG sobre moldes, muy lento; realizado por mano de obra cualificada.	Moldes: se externalizan moldes de madera si son complejos GRC: 1000m2 / día; un panel se hace en dos días; 10 personas fabrican unos 100m2 de paneles en un día.	La capa de 5mm se imprime en 10 minutos. se imprimen 200 mm/ día, (40 capas en 8 horas), y 1 metro / semana Fabricación, transporte y montaje de una escultura en un mes; montaje a mano	El robot tarda 1/3 del tiempo que a mano (12 horas por cercha en vez de 36) La velocidad depende de los cambios de cabezal, de los movimientos, y de la operación en sí.
		B.2.3.	flexibilidad del sistema	C. celdas de manufactura: maquinaria específica para cada proceso; bajo grado de automatización	A. taller de fabricación: Proceso manual, alta participación de operarios	A. taller de fabricación: Proceso manual, alta participación de operarios	A. taller de fabricación: Proceso manual, alta participación de operarios	B. maquinaria autónoma CNC: Una sola maquina con alta participación de operario	D. sistemas flexibles: combina maquinado y manipulación automática del material Las máquinas participan en la toma de decisiones; por ejemplo eligen el camino entre operaciones
		B.2.4.	volumen de producción	A. prototipos: vidrio templado recocado B. lote pequeño: vidrio curvado templado	A. prototipos: barcos; B. lote pequeño: mobiliario	A. prototipos; B. lotes pequeños : puertas RF	C. lotes medianos: en función de los pedidos; en la fábrica robotizada es posible producir 1000m2 / día	A. prototipos: Fabrican uno o dos proyectos al año	D. Potencial para producción en masa
B.3.	proceso de fabricación a montaje	B.3.1.	transporte	diseño y fabricación de cajas especiales	Fácil (son piezas ligeras y resistentes)	Fácil (son piezas ligeras y resistentes)	Fácil (son piezas ligeras y resistentes)	división en piezas para limitar su peso y tamaño; lo ideal sería transportar la máquina a la obra	módulos premontados de gran tamaño, limitados por el tamaño de camión y peso en montaje
		B.3.2.	montaje	ventosas especiales para vidrios singulares; montaje con sujeciones de fabricación especial	proceso manual detallado: tratado, lijado, sellado y acabado con laca o pintura	Estándar, igual a placas de yeso, acabado a mano. Por su ligereza, la estructura portante es mínima Acabado: proceso manual detallado: corte con sierra metálica, sellado de juntas con yeso,	Piezas autoportantes, se montan directamente en fachada (panel sándwich), o con estructura metálica	Piezas montadas unas sobre otras con armaduras, unidas con poliuretano	Se montan módulos en fábrica para asegurar un montaje rápido en obra
C	POTENCIAL PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA								
C.1.	eficiencia económica	C.1.1.	factores influyentes en el coste	Fabricación: la fabricación con moldes es costosa en general; lo ideal es utilizar moldes reutilizables para curvatura sencilla con tubos de hierro personalización: si hay doble curvatura aumenta	Material: El material de base es caro, varía en función del tipo de resina utilizada y del molde Fabricación: Gran coste de mano de obra; varía en función de cantidad de tests y experimentación.	Material: El material de base es caro, viene de las dos únicas minas cerradas en el mundo. Fabricación: artesanal, coste de mano de obra. Personalización: aumenta si la geometría es compleja, con moldes distintos	Material: Según cantidad de material y si es muy específico (autolimpiable, fotocatalítico...). Personalización: el coste aumenta si hay moldes distintos, si se usan moldes de goma (+10€/m2), si la manipulación es complicada (con	Material: la exploración de material y el aglomerante pueden encarecer el producto Fabricación: El proceso se resuelve caso a caso, según el material y el proceso, de forma artesanal	Tiempo de maquinado; Cada tipo de operación nueva implica inversión en un cabezal Montaje: la técnica de montaje influye en el coste Personalización: La maquinaria está diseñada
		C.1.2.	precios de venta	el vidrio curvado cuesta unos 300 €/m2, unas 10 veces más que un vidrio plano estándar	El GRP es caro de por sí (200-2000 €/m2)	se asume que es un producto caro por ser especial El coste disminuye si el molde es estándar (10 €/ml en comisas);	El panel de GRC es más caro que el hormigón (20€ más por panel), pero el precio de la obra terminada es más o menos igual por la facilidad de montaje	Sin datos: Se trata de obras de arte, objetos y esculturas, no de fabricación en masa	Sin datos específicos; Se resuelve caso por caso. el precio engloba fabricación y montaje
C.2.	eficiencia material	C.2.1.	desperdicio de material	Hay mucho desperdicio por no aprovechar el tamaño de hoja;	conviene hacer la pieza más grande para recortar los bordes, pero al ser un proceso manual se controla el desperdicio.	al ser un proceso manual se controla el desperdicio.	al ser un proceso manual se controla el desperdicio.		El montaje con piezas pequeñas minimiza el desperdicio y aprovecha material de menor calidad
		C.2.2.	necesidad de moldes	el curvado recocado con moldes a medida es ineficiente; lo ideal es utilizar moldes reconfigurables	Molde individual: Si se quiere abaratar en el molde Molde reutilizable: Si se fabrican muchas piezas con el mismo molde, aunque son mucho más caros	Molde individual de silicona, se despegas del objeto Molde reutilizable: madera o GRP. Vari guarda contenedores con moldes existentes.	Conviene reutilizar los moldes de madera La fabricación en mesa es por moldes reconfigurables, moviendo los costeros para variar el tamaño	no se necesitan moldes	no se necesitan moldes
C.3.	eficiencia de tiempo	C.3.1.	diseño a fabricación	potencial para reducir el tiempo de consultoría si arquitecto incorpora información de fabricación	Proceso sencillo a no ser que se personalice el material			Es necesario encontrar el aglomerante para cada tipo de material, controlar el proceso químico y los tiempos de solidificación.	Desde el principio se piensan detalles de conexiones y fabricación según la posibilidades del robot. Programación por especialistas
		C.3.2.	fabricación		La personalización del material y realización de tests alargan mucho el proceso	Fabricación lenta; evaluar si la producción es en fábrica o in situ según los plazos necesarios		La impresión debe hacerse en una sola vez. El tiempo de endurecimiento depende del tipo de arena y aglomerante, de la disipación del calor generado; El aspirado y limpieza de máquina alargan el proceso	
		C.3.3.	fabricación a montaje	El montaje en obra es más rápido si se utilizan piezas estándar, y ventosas estándar para transporte		Maximizar tamaño de piezas para facilitar montaje	El montaje es rápido y sencillo, más cuanto mayores las piezas		El montaje en obra es rápido porque se montan módulos de gran tamaño en taller
C.4.	potencial para personalización en masa	C.4.1.	tipo de personalización	C. cosmética: Flexibilidad en acabados y prestaciones E. dimensional: Flexibilidad en tamaños y geometrías	C. cosmética: por personalización del material E. dimensional: por personalización del molde	C. cosmética: Se aprovechan las propiedades del material para explorar nuevos productos: puertas RF, piezas antichoque en hospitales; E. dimensional: Por personalización del molde: gran flexibilidad	C. cosmética: Gran variación de acabados pero conviene repetir el material E. dimensional: Gran variación de acabados pero conviene repetir el molde, o bien recortar piezas a posteriori	E. dimensional: Personalización geométrica total	C. cosmética y E. dimensional: Personalización de la geometría, del sistema de montaje y de los módulos resultantes; personalización de la fabricación.
		C.4.2.	eficiencia general	- bajo volumen de producción - alto nivel de personalización. - baja digitalización del proceso	- muy bajo volumen de producción - alto nivel de personalización. - muy baja digitalización del proceso	- muy bajo volumen de producción - alto nivel de personalización. - ninguna digitalización del proceso	- volumen medio de producción - nivel medio de personalización. - baja digitalización del proceso	- volumen muy bajo de producción - nivel alto de personalización. - alta digitalización del proceso	- alto volumen de producción - alto nivel de personalización. - uso elevado de herramientas digitales
		C.4.3.	potencial	MEDIO: Costes muy elevados, Fabricación de moldes a medida en el vidrio curvado recocado	BAJO: Necesidad de fabricación de moldes, proceso de fabricación manual	BAJO: Necesidad de fabricación de moldes, proceso de fabricación totalmente manual	MEDIO: potencial para volver a explorar la fabricación automatizada; para aumentar la flexibilidad de moldes	ALTO: potencial para la exploración de materiales eficientes, aumento de volumen de producción con maquinaria móvil de mayor tamaño	ALTO: Se estima que este proceso tiene un altísimo potencial, tanto para la producción en masa como para la personalización de diseños basada en la combinación de procesos y materiales
D	CRITERIOS PARA MEJORAR LA PERSONALIZACIÓN EN MASA								
D.1.	decisiones por el diseñador	D.1.1.	decisiones sobre la geometría	- Curvado recocado: racionalización de la geometría para repetir la utilización de moldes y abaratar - Curvado templado: racionalización de la geometría con curvatura sencilla	- División de geometría utilizando moldes existentes; desmoldado de la geometría: ¿puede desmoldar la pieza?	- Estandarización o combinaciones geométricas con el mismo molde - Si hay agujeros: permitir el paso de la pistola - Al ser de aplicación manual, tiene que caber el pincel y la mano para aplicar capa a capa el producto en el molde	- Procurar reutilizar el mismo molde; - Si hay agujeros: permitir el paso de la pistola - uniformizar tamaños de agujeros - Integrar las juntas vistas de 1cm en el diseño - Maximizar tamaño de piezas para facilitar montaje	- Geometría libre, sin necesidad de alta precisión	- Por ahora se han probado estructuras por superposición de piezas, pero el sistema permite experimentar con variaciones geométricas
		D.1.2.	decisiones sobre los acabados	- Evaluar características fundamentales para abaratar: es fundamental que el vidrio deformado sea el cerramiento de tipo cimait?	- Minimizar cantidad de tests: utilización de producto existente, utilización de plantillas estándar de goma				
		D.1.3.	decisiones sobre los materiales	- Aprovechamiento de hoja para reducir desperdicio - Evaluar características fundamentales para abaratar: es fundamental que el vidrio deformado tenga calidad visual óptima?	- Minimizar cantidad de tests: utilización de producto existente, utilización de plantillas estándar de goma		- uniformizar material para grandes pedidos	- Utilización de material más ligero - Para fabricación en masa: material de secado rápido pero resistente, como el hormigón	- Por ahora se ha utilizado madera, pero se podrían utilizar más materiales y combinarlos
D.2.	decisiones por el fabricante	D.2.1.	comunicación	- Comunicar y coordinar desde el inicio con otros fabricantes, compartir detalles y modelo geométrico	- Comunicar entre diseñador, fabricante y fabricante de moldes lo antes posible, para optimizar y reutilizar moldes			- mejora del proceso: Importar archivos 3d sin alterarlos	- potencial para establecer un sistema de diseño colaborativo, con parámetros definidos pero dando libertad en el diseño
		D.2.2.	fabricación manual		- Grandes geometrías: considerar el molde como encofrado perdido; Maximizar el molde teniendo en cuenta el desmoldado	- La fabricación de componentes en GRG es artesanal, no existe automatización hoy en día			
		D.2.3.	fabricación digital	- Fabricación digital de moldes metálicos (por estampado) - Exploración de moldes reconfigurables para vidrio templado y recocado, programables mediante CNC	- Fabricación CNC de moldes de poliestireno o madera; explorar la automatización para piezas singulares	- Se podría automatizar la fabricación de moldes si son de madera, pero interesa invertir en la maquinaria a partir de cierto volumen.	- volver a explorar la automatización con robots, pero con mayor flexibilidad de producción	- Maquinaria: aumentar tamaño de máquina - Máquina móvil - Impresión in situ de piezas - Posibilidad de autoregulación de la máquina: detección y corrección de problemas, ajuste de velocidad, de grosor de capa, de nivel de detalle, etc.	- Potencial para combinar distintas máquinas y operaciones, procurando la continuidad entre operaciones

Tabla 6: Tabla comparativa resumen de procesos;: potencial para personalización en masa

	POSIBILIDADES DE PERSONALIZACIÓN														
	CORTE			SUBSTRATIVO		FORMADO			FORMATIVO			ADITIVO		ROBOTIZADO	
	CORTE		METAL	FRESADO	FORMADO		TERMIFORMADO	FORMATIVO		ADITIVO					
	MADERA	PIEDRA	METAL	MADERA	METAL	MADERA	VIDRIO	GRP	GRP	GRG	GRP	IMPRESIÓN 3D			
	KUH	CAMPOLONGHI	ZÄHNER	BLUMER-LEHMANN	CENTRALSTAAL	DUCKET-ORIGES	CONTROL GLASS	POLY PRODUCTS	VARI	PREINCO	DINTECH	ERNE HOLZBAU			
A	A.1	A.1.1.	materiales posibles												
		A.1.2.	acabados y texturas												
		A.1.3.	prestaciones												
		A.1.4.	montaje												
		A.1.5.	utilización de moldes												
	A.2	A.2.1.	tamaño de componentes												
		A.2.2.	cortes internos												
		A.2.3.	tolerancias												
		A.2.4.	curvatura												
		B	B.1	B.1.1.	comunicación										
B.1.2.	proceso														
B.2.1.	tipo de proceso														
B.2.2.	velocidad de fabricación														
B.2.3.	flexibilidad del sistema														
B.3	B.2.4.		volumen de producción												
	B.3.1.		transporte												
	B.3.2.		montaje												
	C		C.1	C.1.1.	factores influyentes en el coste										
				C.1.2.	precios de venta										
C.2.1.		desperdicio de material													
C.2.2.		necesidad de moldes													
C.3.1.		diseño a fabricación													
C.3		C.3.2.	fabricación												
		C.3.3.	fabricación a montaje												
		C.4.1.	tipo de personalización												
		C.4.2.	eficiencia general												
		C.4.3.	potencial

valoración positiva, alto potencial
 valoración neutra, potencial medio
 valoración negativa, bajo potencial o imposibilidad

5.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 5

Con el análisis comparativo de los procesos, se extraen las siguientes conclusiones:

5.7.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PROCESOS

Procesos que tienen menor potencial para la personalización en masa:

- **Procesos realizados de forma manual**, sobre todo los procesos de moldeo: en estos procesos es difícil automatizar o digitalizar la producción, por lo que la realización es lenta y el coste aumenta por el coste de la mano de obra. A día de hoy, estos procesos siguen siendo artesanales y los productos se consideran singulares.
- **Procesos que utilizan maquinaria de gran tamaño** para realizar una sola tarea: por ejemplo, para el prensado de manera laminada curva se utilizan prensas hidráulicas de gran tamaño. Esta maquinaria demanda una gran inversión, tiene poca flexibilidad y se utiliza para fabricar un producto singular con bajos volúmenes de producción.

Procesos que tienen mayor potencial para la personalización en masa:

- **Procesos enfocados a la fabricación en masa**, pero suficientemente flexibles para permitir la personalización de productos: los centros de mecanizado de paneles contralaminados de KLH permiten la producción en masa de productos individualizados. Además, el proceso digital continuo entre el diseño y la fabricación favorece la eficiencia del proceso.
- **Sistemas personalizados definidos por fabricantes** dentro de los límites de eficiencia: IMAGEWALL™ y CLOUDWALL®, diseñados por *Zahner*, son sistemas de fachadas personalizables en metal que se montan con un sistema de fácil instalación, para los que el fabricante da una garantía de calidad.

A. Observaciones generales

- **Ineficiencia en los procesos indirectos**, que necesitan moldes: la fabricación de moldes hace que los procesos sean más lentos, más costosos y se desperdicie más material. La investigación sobre moldes reconfigurables y moldes flexibles resulta fundamental para optimizar este tipo de fabricación.
- **La personalización de componentes no sólo afecta a su fabricación**, sino a su embalaje, transporte y montaje – un producto personalizado que se puede montar con un sistema estándar resulta eficiente, mientras que un producto que demanda fabricación y montaje personalizado resulta poco eficiente. Por ello, es fundamental que los arquitectos entiendan las implicaciones de un diseño singular, y sean capaces de resolverlas.

B. Observaciones sobre el proceso

- **Observaciones sobre el proceso de diseño a fabricación personalizada**

En la preparación para la fabricación, uno de los principales retos es el proceso de conversión de las geometrías al lenguaje de fabricación, que cambian para cada pieza y a menudo para cada máquina. Para agilizar el proceso, es fundamental conectar el diseño con la fabricación digital en un proceso continuo, asegurando la uniformidad de lenguajes de programación.

- **Proceso colaborativo entre arquitectos y fabricantes**

El fabricante debe dar una garantía de calidad a su producto, y por ello a menudo decide redibujar el proyecto desde cero. Para evitar duplicar procesos, es necesario incluir al fabricante lo antes posible en el diseño y realizarlo de forma colaborativa.

- **Transferencia de conocimiento de fabricación**

Para que los arquitectos puedan decidir qué proceso utilizar y optimicen el diseño para su fabricación, es necesario dinamizar la transferencia de información desde las fábricas a los diseñadores. Hay gran potencial para una plataforma de conocimiento compartido, manejable en un entorno BIM.

- **Observaciones sobre la fabricación**

Para potenciar la personalización en masa, el proceso de fabricación debe ser rápido, fluido y eficiente. Idealmente, los procesos entre máquinas distintas deberían estar ligados de forma automática, y aumentar la digitalización en algunos procesos, como la fabricación de moldes, que en muchas fábricas se sigue haciendo de forma manual.

- **Observaciones sobre el montaje**

Es frecuente que los fabricantes se responsabilicen de su producto hasta la fase de montaje. En estos casos, optan por prefabricar módulos de gran tamaño en taller, y transportarlos a obra. El montaje de módulos en lugar de piezas individuales es más rápido y sencillo; la complejidad del proyecto se traslada al taller, y la fabricación se hace en paralelo a la fase de obra, resultando en un proceso más rápido y eficiente, con mayor control de la calidad por el fabricante.

- **Observaciones sobre el proceso global**

Con la diversidad de productos se multiplica la necesidad de supervisión, control de calidad, y realización de las pruebas, ensayos y comprobaciones necesarias para conseguir la aprobación u homologación de un producto.

La distribución de responsabilidades en el proceso de construcción obliga a definir fronteras claras entre las competencias de unos y otros; tanto es así, que para asegurar una fabricación impecable muchos fabricantes deciden repetir de cero el modelo de diseño proporcionado por el arquitecto. Los modelos digitales compartidos y la aspiración a conseguir un proceso digital continuo demandan la reconsideración de las relaciones contractuales entre las partes y la distribución de responsabilidades. En este contexto, surge una nueva figura, la del coordinador, experto en geometría y fabricación, que puede absorber parte de la responsabilidad, gestionar el modelo compartido y coordinar a distintos fabricantes (Kolarevic, 2005).

5.8 OBSERVACIONES

Durante las visitas a las fábricas, han sido muchas las experiencias, conversaciones, y lecciones aprendidas, no sólo en relación a las técnicas de fabricación, sino en relación a la filosofía, las ambiciones y las limitaciones de cada una de las empresas. Detrás de cada industria, hay personalidades cuya ambición y visión han servido para ampliar horizontes, no sólo para su empresa sino en algunos casos, para la industria de la prefabricación arquitectónica en general.

La primera lección aprendida ha sido el enorme enriquecimiento que supone para un arquitecto el visitar e impregnarse del entorno de fabricación; los fabricantes están acostumbrados a una relación distante o incluso invisible con los diseñadores, y en muchas de ellas han sido pocos los arquitectos que han visitado las fábricas. En la mayoría de los casos el recibimiento ha sido extraordinariamente positivo y generoso, y en muchos casos por el más alto responsable de la fábrica, aunque ésta tuviera cientos de empleados. Los fabricantes han demostrado estar deseosos de compartir su experiencia e ideas para estrechar la colaboración con los arquitectos.

En efecto, se observa un cierto abismo entre el estudio del arquitecto y el taller de fabricación, lo cual se traduce en falta de comunicación y de conocimiento sobre las posibilidades y la resolución de problemas; como se ha mencionado en el capítulo 1.3, esto se traduce a menudo en aumento de plazos de realización y costes para el proyecto.

En segundo lugar, a través de este análisis y visitas, ha sido posible extraer algunas observaciones sobre el entorno de la fabricación personalizada y de la fabricación digital en la arquitectura, que se exponen a continuación en una serie de apartados temáticos.

Las fábricas visitadas se pueden clasificar en varias familias:

- Industrias con larga historia de fabricación: en estas industrias los métodos tradicionales de fabricación han evolucionado para dar respuesta a la demanda de productos singulares, mediante la introducción de herramientas digitales. Entre estas se encuentran *Campolonghi*, *KLH* y *Control Glass*. Algunas de ellas han invertido en herramientas de última tecnología de manera experimental, aunque siguen basando el grueso de su producción en productos estándar, por ejemplo *Erne Holzbau*.
- Industrias que han apostado por las nuevas tecnologías como base de su fabricación, y poco a poco han orientado su investigación y sus productos a este tipo de proyectos: por ejemplo, *Blumer-Lehmann*, y *Onlywood*.
- Industrias que han mantenido sus métodos de fabricación artesanales, aunque dan respuesta a proyectos singulares con productos competitivos; por ejemplo, *Vari*, o *Preinco*. En algunos casos, la inversión en maquinaria es demasiado grande para una empresa de tamaño familiar; en otros, como *Preinco*, el momento económico no era el adecuado para realizar esta inversión.
- Industrias especializadas en otros sectores que han abierto su mercado al sector de la construcción, como por ejemplo *Centralstaal*.
- Finalmente, la categoría de industrias "jóvenes", que basan su mercado no en el producto, sino en la utilización de cierta tecnología para la creación de una variedad de productos. Es el caso de *CNC dynamix*, fabricante de piezas en metal, resina o plásticos para varios sectores, como el aeronáutico. En esta categoría se incluyen los grupos de investigación universitarios y corporativos, que tratan de ampliar los límites de ciertos métodos de producción, como la impresión 3D o la fabricación robotizada.

En estos casos, el enfoque es distinto del proceso tradicional: en vez de, ¿cómo puedo fabricar este producto?, la pregunta es: ¿qué puedo fabricar con este proceso?

Para que estas empresas tengan éxito en sus proyectos, se necesita la confluencia de varios factores: una mentalidad abierta y flexible, una inversión suficiente, encargos de calidad, y el desarrollo en el momento oportuno. Si existe una gran inversión en la máquina más sofisticada, pero no existen buenos encargos con proyectos singulares, no se utiliza la máquina con todo su potencial y resulta una inversión inútil.

Para la mayoría de las industrias, la fabricación singular supone una aventura, una apuesta no sin riesgo que implica una gran inversión y a menudo la dedicación de toda una vida.

En estos casos, son interesantes las historias del desarrollo de proyectos compartidos entre diseñadores y fabricantes que han creído en sus proyectos, y vice-versa. En cualquier caso, la primera lección es el reconocimiento de la autoría del fabricante en el proyecto, sin cuyos esfuerzos e inversión muchos proyectos no serían posibles.

5.8.2 FILOSOFÍAS DE FABRICACIÓN

Cada fábrica tiene su propia filosofía en cuanto a los servicios ofrecidos, en función de su historia y experiencia: desde la fabricación de piezas de pequeño tamaño para suministrar a obra (como en *Campolonghi*), a la fabricación de sistemas completos prefabricados listos para montar, incluso el montaje y acabado en obra (como en *Centralstaal* o *Zahner*).

Los servicios ofrecidos no sólo dependen del producto y del material utilizado, sino también de la relación de la industria con sus clientes, ya sean éstos un constructor, un montador, un arquitecto, o el usuario final. Por ejemplo, en prefabricación en madera, es habitual que la industria fabrique sistemas prefabricados lo más completos posibles para asegurar un montaje rápido y sencillo en obra por carpinteros.

En las visitas a las fábricas, se han observado las siguientes filosofías de fabricación¹¹⁸:

- **Fabricación de elementos complejos con montaje sencillo**

Las piezas fabricadas incorporan todo tipo de detalles de ingeniería, construcción y montaje. El trabajo de diseño y preparación de fabricación es largo e intenso, mientras que el montaje es rápido y sencillo, como un mecano. El ejemplo más evidente es la fabricación de componentes en madera por *Blumer-Lehmann*, donde la geometría de cada viga contiene toda la información necesaria para controlar el montaje, a pesar de la complejidad del conjunto. Tanto es así, que en *Blumer-Lehmann* llaman a su centro de maquinado CNC la "máquina de información". Este sistema les permite tener el máximo control sobre el resultado.

- **Elementos sencillos con montaje complejo**

La filosofía contraria al caso anterior es la utilización de piezas sencillas y estándares, y montarlas con un proceso de montaje complejo. El caso más

fig. 5-176
Fabricación compleja con montaje sencillo: fresado de vigas de doble curvatura en *Blumer-Lehmann*

fig. 5-177
Montaje complejo: montaje robotizado en *Erne Holzbau*

fig. 5-178
Fabricación compleja con montaje complejo: vidrios de doble curvatura por curvado recocado en *Cricursa*.

¹¹⁸Esta clasificación y descripción surgió en la conversación con Katharina Lehmann, presidenta de la fábrica *Blumer-Lehmann*, durante la visita a su fábrica realizada el 02/05/2013.

extremo es el montaje robotizado, mediante el cual se fabrican proyectos complejos con robots, a partir de piezas sencillas de pequeño tamaño.

- Aparte de estos dos ejemplos de fabricación en madera, en otros materiales resulta a veces inevitable hablar de fabricación compleja con montaje complejo. Por ejemplo, en el caso del vidrio, tanto la fabricación como el montaje resultan complejos si se trata de geometrías singulares, debido a la dificultad de trabajo con este material.

La distribución de responsabilidades también influye en la calidad del proceso. En algunos casos, las industrias son responsables del producto terminado en obra, y en otros la responsabilidad del montaje corresponde a empresas especializadas. Es muy positivo cuando la industria se ocupa del proceso de principio a fin, dado que, como responsables del producto final, vigilan que las fases ajenas a la fabricación sean lo más eficientes posibles, tratando de incorporar detalles de montaje o transporte en la fabricación del elemento.

Esto demuestra, una vez más, que la consideración del proceso global y la coordinación entre todos los participantes es crucial, y más en el caso de diseños singulares.

5.8.3 FILOSOFÍAS DE MAQUINARIA

fig. 5-179
Industria de fabricación en
madera con células de fabricación.

fig. 5-180
Células de fabricación CNC en
industria de fabricación en
madera.

Para considerar la personalización en masa, es necesario un equilibrio entre eficiencia y flexibilidad. Para ello, es fundamental, además de la elección de la máquina, el diseño del proceso.

En las visitas realizadas se han observado los siguientes modelos de sistemas de fabricación y maquinaria:

- **Células de fabricación CNC**

Es la práctica más habitual, que consiste en una o varias máquinas CNC flexibles capaces de procesar componentes con gran detalle. La personalización se basa en la capacidad de la máquina, y su flexibilidad geométrica. Las máquinas en general no trabajan en línea, y se necesita tiempo para desplazar y colocar los componentes en cada máquina. Los lenguajes de programación, que suelen variar según la máquina y el fabricante, dificultan la configuración de estas máquinas para que trabajen de forma continua.

Esta organización es típica en industrias enfocadas en la personalización más que en el volumen, que es el caso de la mayoría de fábricas visitadas. El precio de los componentes depende en gran medida del tiempo de maquinado y del tiempo de programación.

- **Línea de procesos**

En industrias con grandes volúmenes de producción, es importante que los procesos se realicen no de forma individual sino en línea. Este caso es típico en industrias enfocadas a la producción en masa, pero todavía es excepcional en la fabricación personalizada. Parte de la complejidad consiste en la programación de las distintas máquinas, y la coordinación entre máquinas, adaptándose a los tiempos y particularidades de cada componente.

- **Máquinas flexibles multi-tarea**

Excepcionalmente, algunos fabricantes están apostando por un tercer modelo, que consiste en pórticos flexibles de fabricación. Diseñadas y fabricadas de forma personalizada, éstas son capaces de combinar operaciones estándares, operaciones CNC, y otras operaciones como coger, desplazar, o colocar elementos.

Este es el caso de las fábricas *Erne Holzbau* y *Onlywood*, que han invertido en plataformas robotizadas para flexibilizar su producción. En ambos casos, los pórticos tienen una superficie de producción de gran tamaño, acoplada a un robot-grúa al que se acoplan distintos cabezales diseñados y fabricados en función de las operaciones necesarias.

En estos casos, no sólo se personaliza el producto, sino que también se diseñan los procesos que la máquina es capaz de realizar; por lo que las posibilidades se multiplican. Además, en este caso la programación se puede hacer por un solo especialista, cubriendo un solo proceso continuo para todas las operaciones.

En el primer y tercer caso, las máquinas se adaptan al producto, en el segundo caso, el producto se adapta a la máquina.

Por último, resulta interesante la exploración sobre la movilidad de las máquinas. Tradicionalmente, la prefabricación se ha desarrollado en la industria y los productos se han transportado a obra; sin embargo, hay una serie de iniciativas que apuestan por maquinaria móvil, transportable a obra que fabrique in situ.

En el caso de la impresión 3d con hormigón a gran tamaño, la máquina se puede transportar a obra, y con ella se han fabricado una serie de viviendas in situ. En la ETH de Zúrich, una de las líneas de exploración consiste en la movilidad de los robots para ampliar su zona de movimiento: desde los robots sobre ruedas, utilizados para montar muros de ladrillo, hasta los robots voladores, pasando por los robots móviles con raíles que estarán colgados de las cerchas en el techo del pabellón Arch_Tec_Lab en el campus de la ETH de Zúrich. Con estos proyectos nace un concepto híbrido, el de la fabricación digital en obra

fig. 5-181
Línea de procesos en la fábrica
Toyota Housing.

fig. 5-182
Pórtico robotizado flexible
Lissmac.

fig. 5-183 y fig. 5-184:
Dibujos del funcionamiento de un
pórtico robotizado flexible
Lissmac para fabricación de
viviendas.

En la fabricación personalizada, una fase importante es la trayectoria desde el diseño del proyecto a la fabricación de los componentes, y la fluidez de comunicación del fabricante con el diseñador. Este proceso se puede clasificar en los siguientes modelos:

- **Diseño tradicional**

En este caso, primero se desarrolla el diseño, luego se realizan los cálculos, simulaciones y los detalles de construcción, después se fabrica y finalmente se construye. En paralelo al diseño, se reflexiona sobre los materiales y su fabricación. Una vez decidido el producto, se busca un fabricante capaz de fabricarlo, y éste da un apoyo técnico. El arquitecto modifica el diseño incorporando los parámetros del fabricante, o exploran juntos las posibilidades para un producto personalizado. La personalización se resuelve de forma individual para cada proyecto.

En este modelo, es posible que los errores o incompatibilidades del diseño se descubran tarde y resulten en incrementos de precio o plazos.

- **Diseño para personalización**

El diseño se alimenta desde fases tempranas con parámetros geométricos, materiales y estructurales, además de factores de fabricación y de construcción. El objetivo es que el diseño sea integral, asumiendo la complejidad de su singularidad desde un principio, resolviendo los problemas paso a paso, y resultando en un objeto posible de fabricar, posible de construir, y resistente. En estos casos, a menudo participan en el proceso consultores especializados en geometría y fabricación, trabajando de forma coordinada con el arquitecto, el fabricante y el constructor. La utilización de diseño paramétrico facilita la integración de los distintos parámetros y la resolución temprana de problemas.

En este caso, aunque la personalización también se resuelve caso a caso, se pueden reutilizar los modelos paramétricos para producir variantes o diseños múltiples.

- **Diseño desde personalización en masa**

En un tercer modelo, las propias industrias proponen plataformas de diseño, enfocadas a un producto personalizado. A partir de un producto particular, la industria establece unos parámetros de flexibilidad (por ejemplo, definiendo límites mínimo y máximo de tamaño o de deformación), con los que el diseñador puede jugar para crear su propio diseño. En los sistemas *IMAGEWALL™* y *CLOUDWALL®*: propuestos por *Zahner*, el diseño se crea de forma interactiva a través de una plataforma online, a través de la cual se

puede diseñar a partir de una imagen, elegir el material y evaluar el coste final del proyecto. La industria también pone a disposición del diseñador catálogos detallados para el montaje.

Estos sistemas conjugan la personalización del diseño con la idea de fabricación en masa, dado que aquél se basa en un proceso de fabricación eficiente, y en un sistema probado, patentado y fácil de montar. Por otro lado, la libertad propuesta en el diseño personalizado se limita a los parámetros dados por el fabricante.

- **Diseño y fabricación ligados**

En universidades y centros de investigación, exploran posibilidades de fabricación a pequeña escala. En estos casos, la proximidad o coincidencia entre diseñador y fabricante facilita enormemente el proceso, y el diseño puede ser el resultado del propio proceso de fabricación. El diseño es iterativo y se retroalimenta de los errores en el proceso.

Para favorecer el proceso de diseño a fabricación, es fundamental incorporar la información sobre fabricación cuanto antes en el proceso. Para ello, es necesaria la conversación y comunicación estrechas entre diseñador y fabricante, y los fabricantes deben comunicar de forma sencilla y abierta los parámetros y limitaciones de sus sistemas de fabricación.

6 BASES PARA PROTOCOLO DE CONEXIÓN ENTRE DISEÑO E INDUSTRIA

“La tecnología es importante, pero los ordenadores no pueden hacer nada sin la asistencia del cerebro humano.”¹¹⁹

- 6.1 **PROBLEMÁTICA**
 - 6.1.1 ESTRATEGIAS
- 6.2 **DEFINICIÓN DEL PROTOCOLO**
 - 6.2.1 DEFINICIÓN
 - 6.2.2 OBJETIVOS
 - 6.2.3 ESQUEMA DEL PROTOCOLO
- 6.3 **METODOLOGÍA Y DEFINICIÓN DE ELEMENTOS DEL PROTOCOLO**
 - 6.3.1 DISEÑO
 - 6.3.2 A. LÓGICA DEL DISEÑO
 - 6.3.3 B. LÓGICA DE FABRICACIÓN
 - 6.3.4 C. LÓGICA DE CONSTRUCCIÓN
- 6.4 **ESTUDIO DE CASOS**
 - 6.4.1 CASO 1: BMW PAVILION
 - 6.4.2 CASO 2: CLUB DE GOLF YEOJU
 - 6.4.3 CASO 3: OOSTCAMPUS
 - 6.4.4 CASO 4: PORSCHE PAVILION
- 6.5 **EL MONTAJE ROBOTIZADO**
 - 6.5.1 CASO 5: ITA DACH

¹¹⁹ “Technology is important, but computers cannot do anything without the assistance of the human brain,” (Herzog, 2010)

6.1 PROBLEMÁTICA

En el capítulo 5, se han descrito y analizado los principales procesos de fabricación utilizados por la industria del prefabricado arquitectónico en la producción de piezas singulares. El objetivo de este análisis es realizar un estado del arte sobre la personalización en masa a día de hoy, evaluando el potencial y las limitaciones que existen en cada proceso.

Sin embargo, en la fabricación personalizada en la arquitectura, la fase de fabricación es tan sólo una parte del proceso completo. Las demás fases, desde la concepción y dibujo del edificio, hasta su montaje y acabado final, forman parte de un proceso global que debe tenerse en cuenta desde el diseño inicial del edificio.

Este proceso global consta de las siguientes fases:

fig. 6-1:
Esquema del proceso de diseño a construcción.

Cuando se habla de personalización generalizada en la arquitectura, es fundamental considerar los dos siguientes aspectos:

- **PROCESO:** para que la personalización pueda generalizarse en la industria del prefabricado arquitectónico, se debe considerar el proceso global de construcción del edificio, incluyendo la concepción y el desarrollo del diseño, la problemática de la fabricación y del montaje, y la conexión de todas y cada una de las piezas del edificio. Es frecuente que en el precio de fabricación de componentes singulares repercutan las fases posteriores a su fabricación, como la dificultad en el montaje. Por tanto, es necesario que el diseño incorpore la información de todas estas fases, y que sea optimizado para que la construcción sea factible y el proceso eficiente. Finalmente, el diseño se "congela" en un dibujo que se transmite a los fabricantes.
- **OBJETO:** El edificio, a diferencia de los bienes de consumo, no es un objeto aislado, sino la composición de distintos componentes, fabricados en distintos materiales y a distintos tamaños. Para acercarse a la personalización en masa, es necesario contemplar el edificio como la composición de varios sistemas, teniendo en cuenta la interacción, la conexión y la correspondencia de todas las piezas que deben fabricarse, ensamblarse y trabajar en conjunto.

Si estos aspectos no se contemplan en el diseño, típicamente ocurren los siguientes casos:

- que el diseño deba ser revisado e incluso repetido por completo por técnicos o ingenieros;
- que se entre en un largo proceso de "idas y vueltas" con los distintos fabricantes, en el que se debe variar o afinar el diseño de forma iterativa en base a las limitaciones comunicadas por los fabricantes;
- que existan conflictos en la fabricación y el montaje.

Todas estas situaciones dificultan, encarecen y ralentizan la construcción.

En la práctica, los arquitectos suelen ser responsables del proyecto, por lo que deben tener una visión global del diseño y del proceso, estar un paso por delante en cada fase previendo problemas que puedan surgir, e incluir información estructural y constructiva en el diseño. Este es un enorme reto para los arquitectos, quienes tradicionalmente han sido culpados de las deficiencias en el proceso.

Los problemas son los mismos que con la construcción tradicional: la falta de conocimiento sobre la ejecución de una obra lleva a la resolución de los problemas demasiado tarde y de forma costosa. La diferencia es que, en el caso de la arquitectura prefabricada, los errores detectados tarde suponen un aumento de tiempo y dinero mucho más significativos.

Se suele hacer responsables a los arquitectos de la deficiencia de este proceso asistemático. Los "típicos lapsus" de los arquitectos incluyen: la especificación de materiales inapropiados, la falta de conocimiento sobre técnicas básicas de construcción, y la falta de entendimiento sobre la posibilidad de construcción (Fox, Marsh, & Cockerham, 2001).

El *Centro de artes escénicas Kilden* (Ala Architects; Kristiansand, Noruega; 2012) es un ejemplo de proyecto singular de geometría compleja que tuvo que ser rediseñado para simplificar la fabricación y construcción. La faceta predominante del edificio consiste en una pared ondulante de madera, que separa el atrio de entrada de los espacios para actuaciones. Para soportar esta pared, la idea original consistía en una estructura curvada de tubos de acero con juntas complejas. Se fabricaron 3 prototipos siguiendo este modelo, sin conseguir convencer al cliente.

Este primer proyecto duró 3 años, hasta que contactaron con el fabricante de estructuras de madera *Blumer-Lehmann*. Según este fabricante, en 2 semanas éste hizo una evaluación de todo el proyecto y propuso cambiar el concepto del edificio a una estructura de madera. El diseño se rehízo y se redibujó digitalmente, utilizando una superficie maestra como base. El trabajo de preparación y fabricación de proyecto se realizó en un año y medio.

La estructura final del *Centro de artes escénicas Kilden* consta de grandes módulos prefabricados en madera soportados por una estructura de vigas laminadas. Estas vigas integran detalles constructivos para la conexión con otros sistemas (conexión entre fachada de vidrio y cubierta), así como detalles para el posicionamiento exacto de las tablas de madera de la pared ondulante. Con este sistema, se consigue montar rápidamente una geometría compleja fabricada con muy alta calidad y un gran nivel de detalle.

Este edificio también es un ejemplo de integración de detalles constructivos en el diseño del edificio, en este caso para el posicionamiento de las tablas de madera de la pared, ya que el arquitecto quería dejar unas juntas de 10mm entre las tablas individuales de madera. Para ello, se decidió fresar un rehundido en las vigas laminadas que marcara la colocación exacta de las tablas, forzando la junta de 10mm .

fig. 6-2:
Proceso de diseño a fabricación:
Diseño (CAD) optimizado con criterios de ingeniería (CAE) y de fabricación (CAM)

fig. 6-3:
Dibujo de los módulos prefabricados con detalles de fabricación

fig. 6-4:
Dibujos para fabricación de cada pieza, numerada, con sus detalles de fabricación.

fig. 6-5:
Dibujos para fabricación de cada pieza, numerada, con sus detalles de fabricación.

En la arquitectura singular, a menudo el trabajo más complicado no está en la fabricación, sino en el entendimiento de todos los elementos que forman un diseño complejo, y la incorporación de toda esta complejidad en la fase de diseño. Para evitar un proceso de diseño reiterativo, el proceso completo, desde el diseño hasta la construcción, debe ser coherente y cuidadoso, persiguiendo la eficiencia en todos los detalles, incluso el aprovechamiento de materiales, la fabricación, el ensamblaje, el transporte, etc. En definitiva, es importante el sentido común y la visión de todo el conjunto.

"El diseño no debe ser anterior ni ajeno al conocimiento de los detalles de la producción. La industria contemporánea pone a nuestro alcance prácticamente cualquier formalización, y parece especialmente apropiado el análisis y reflexión sobre estos medios, para introducir las oportunas mejoras en el diseño para optimizar el proceso de fabricación. Más allá de qué queremos hacer, debemos preguntarnos cómo queremos producirlo." (Borrego, 2010).

El siguiente esquema ilustra la problemática en este tipo de proceso:

fig. 6-6:
Problemática en la conexión entre diseño y fabricación

Para que se pueda fabricar, el diseño del edificio debe incorporar conocimiento sobre los procesos de fabricación que se utilicen, y además se verá influenciado por parámetros de transporte, montaje y construcción.

Mientras el anterior capítulo se centra en la fase de la fabricación, esta parte de la tesis contempla el proceso completo de materialización del edificio. Uno de los objetivos de la tesis es proponer una metodología que facilite la interacción entre arquitectos y fabricantes; para ello, se plantea un protocolo de conexión entre diseño e industria, que guíe a los arquitectos en el diseño para facilitar la fabricación personalizada de componentes.

En el libro "*Distributed Intelligence In Design*" (Kocatürk & Medjdoub, 2011), se mencionan distintas estrategias que procuran facilitar esta conexión:

- **DfM** (*diseño para manufactura*): este método, que fue desarrollado en el campo del diseño industrial, pretende optimizar el diseño del producto para mejorar su fabricación, incorporando conocimiento sobre la fabricación en las fases de diseño (Fox, Marsh, & Cockerham, 2001). Según este método, es necesario que los diseñadores estructuren la información del diseño adecuadamente, integren conocimiento sobre la producción, seleccionen materiales, procesos y componentes adecuados, y evalúen soluciones alternativas para su diseño (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002). Los resultados de su implementación son el acortamiento del ciclo de diseño y producción y la reducción de los costes de manufactura (Fox, et al., 2001).

Algunos investigadores han intentado adaptar el método DfM al campo de la prefabricación arquitectónica. La primera conclusión es la necesidad de conocimiento sobre el montaje in situ de las piezas prefabricadas (Gibb, 1999). En lugar de una serie de reglas algorítmicas invariables, el método DfM proporciona un marco para resolver el problema del diseño, y el diseñador debe seguir una serie de pasos empíricos, aunque no siempre válidos, para avanzar en la resolución del diseño (Lyon, 2006).

Según Lyon, este marco, que llama "heurística del diseño"¹²⁰, se debe complementar con aspectos cuantificables extraídos de la producción, que llama "métrica del diseño"¹²¹. Este autor basa su investigación en la posibilidad de trabajar a base de prueba y error debido a la proximidad entre el diseñador y el sistema productivo, dado que realiza su investigación en el ámbito universitario. Esta proximidad entre diseño y fabricación permite la consideración de criterios detallados sobre un sistema de fabricación en particular, que por otro lado son datos muy técnicos y difíciles de entender para quien no tiene esa estrecha relación con la maquinaria.

- Otra aproximación al problema es la utilización de **sistemas BIM** en la arquitectura. En este caso, los distintos participantes en el proyecto comparten un modelo único, el cual contiene toda la información manejada en obra, lo cual evita incoherencias y modificaciones unilaterales.

Se ha criticado el BIM por la poca flexibilidad que impone en la fase de diseño (Kocatürk et al., 2011): dado que la fuerza del BIM está en

¹²⁰Traducción del término inglés *Design Heuristics*

¹²¹Traducción del término inglés *Design metrics*.

la exactitud y definición detallada del diseño, los arquitectos están obligados a definir un proyecto único y difícilmente variable, reduciendo la libertad en el diseño.

- Una tercera aproximación es el **diseño paramétrico**, cada vez más utilizado por estudiantes y estudios de arquitectura para definir los proyectos arquitectónicos, que se controlan mediante parámetros relacionados por ecuaciones matemáticas. A diferencia del BIM, el diseño paramétrico permite una enorme flexibilidad en el diseño, al definirse no un único diseño fijo, sino infinitas instancias de un mismo diseño. Toda la información del diseño, desde su definición geométrica a los detalles de conexión o los criterios de fabricación, puede definirse mediante parámetros, y el diseño puede variar en cualquier momento en función de éstos, por ejemplo al cambiar el método de producción o el material empleados. Mediante este método, se puede optimizar el diseño y posponer decisiones hasta fases avanzadas.

Mientras que el BIM propone una aproximación sistemática al diseño a través de modelos digitales integrales, el diseño paramétrico se desarrolla caso a caso y demanda un trabajo extraordinario en la fase del diseño, además de un conocimiento detallado por parte del arquitecto sobre los distintos criterios variables del proyecto. Algunas consultorías expertas en geometría y fabricación, como *Designtoproduction*, basan su trabajo en modelos paramétricos complejos que integran información sobre geometría, fabricación y montaje.

Como menciona Kocatürk (2011)"(...) Estas herramientas demandan una inversión mucho mayor en fases iniciales, donde es necesario construir un esquema por el que se relacionan las partes del modelo. Requieren que el diseñador considere la lógica del diseño de antemano, y que la especifique de forma rigurosa. Con ello, obligan a una gran claridad en el diseño"¹²². (Kocatürk et al., 2011).

122“(...)While this deferral and production are practically useful, it is precisely the wrong way to consider the real advantage of the tools, which lies in the fact that they actually require a far larger investment in time up front in constructing the schema by which the parts of the model are related. They require the designer to consider the logic of the design in advance, and to specify this rigorously. By doing so, they enforce clarity in the design”.Traducción de la autora. Kocatürk et al., 2011.)

En estas posibles estrategias de conexión del diseño con la fabricación se identifican los siguientes problemas posibles:

- **demasiado detalle:** los datos o criterios de fabricación que se deben incorporar en el diseño son demasiado técnicos, haciendo difícil su entendimiento y utilización de forma generalizada;
- **conocimiento individual:** para generar un diseño consciente y preparado, éste se basa a menudo en el conocimiento y experiencia de uno o varios individuos; bien diseñadores, que aprenden a base de ensayo y error sobre un proceso particular; bien fabricantes;
- **falta de normalización:** en el proceso de conexión del diseño con la fabricación, el enfoque es a menudo en un sólo proceso de fabricación, y la resolución de proyectos se hace caso a caso, haciendo que su aplicación sea difícil para otros proyectos.

En base a estos problemas, se identifican las siguientes necesidades para favorecer la personalización en masa:

- **nivel de detalle comprensible:** para favorecer el diseño informado, es necesario utilizar datos comprensibles por los arquitectos y aplicables a múltiples proyectos;
- **conocimiento colectivo:** es necesario recoger el conocimiento individual y especializado en una base de datos colectiva, que pueda ser consultada por cualquier arquitecto;
- **sistematización del proceso:** enfoque abierto a distintos materiales, a distintos procesos de fabricación, y aplicación a múltiples proyectos.

Esta tesis contempla la personalización generalizada no sólo como la capacidad de fabricación de piezas singulares, sino con una visión mucho más amplia; con el entendimiento de todas las implicaciones de la singularidad del componente, y al alcance de cualquier arquitecto.

Existen algunos casos donde se ha logrado la conexión fluida entre el diseño y la fabricación digital de proyectos singulares: por un lado, en el ámbito académico, donde diseñador y productor coinciden; y por otro, por algunas consultorías o estudios de arquitectura expertos en geometría y fabricación, como *Gehry Technologies*, quienes han desarrollado sus propios sistemas para resolver edificios singulares. En estos dos casos, se alcanza un alto nivel de producción personalizada, siendo situaciones excepcionales alejadas de la personalización en masa.

6.2 DEFINICIÓN DEL PROTOCOLO

6.2.1 DEFINICIÓN

- “4. m. Secuencia detallada de un proceso de actuación científica, técnica, médica, etc.”.
- “5. m. Inform. Conjunto de reglas que se establecen en el proceso de comunicación entre dos sistemas.”(RAE, 2017).

En este caso, el protocolo se refiere a un conjunto de procedimientos destinados a estandarizar el proceso de conexión entre diseño e industria.

En el punto anterior, se ha identificado como uno de los principales problemas en las estrategias existentes la falta de normalización en el proceso de conexión del diseño con la fabricación. La propuesta de base de protocolo de conexión entre diseño y fabricación procura estandarizar este proceso. Se ha denominado "base para protocolo" porque la intención no es hacer un listado exhaustivo de estrategias ni entrar en detalles técnicos, sino más bien proponer un marco metodológico que se pueda completar y detallar con el tiempo.

6.2.2 OBJETIVOS

En esta tesis se pretende establecer la base para protocolo de conexión entre diseño e industria, con el objetivo de facilitar la personalización generalizada en la arquitectura.

Para ello, se definirán una secuencia de procedimientos y criterios a tener en cuenta en el proceso desde el diseño del edificio por el arquitecto, hasta la transmisión de éste a la industria para su fabricación. Esta secuencia de procedimientos se alimenta de ejemplos, de los estudios de casos analizados, y de los criterios seguidos en esos casos.

Para facilitar la fabricación personalizada y su construcción, el diseño arquitectónico debe sufrir una cierta optimización y racionalización en base al conocimiento del proceso de fabricación, transporte y montaje; por lo que el protocolo debe contemplar el proceso global.

El objetivo del protocolo es por tanto la definición de los procedimientos en el proceso de diseño a fabricación industrial, para facilitar la conexión entre

diseño y fabricación personalizada, y así favorecer la personalización generalizada.

6.2.3 ESQUEMA DEL PROTOCOLO

En el siguiente esquema, se muestra el proceso desde el diseño a la construcción de un edificio singular prefabricado industrialmente.

fig. 6-7:
Esquema de protocolo de conexión entre diseño y fabricación

En este proceso, el protocolo de conexión se concentra en la fase desde el inicio del diseño a la fabricación: en esta fase, el diseño se optimiza para incorporar las lógicas de diseño, fabricación y construcción del edificio en un modelo geométrico. Una vez finalizado, este modelo se congela y es transmitido al fabricante.

El protocolo recoge los aspectos que se deben considerar, como mínimo en el proceso de diseño, que deben estar incorporados en el dibujo que se mande al fabricante. Se compone de una secuencia de etapas, ilustradas en el siguiente esquema:

fig. 6-8:
Esquema del protocolo de conexión: secuencia de etapas

6.3 METODOLOGÍA Y DEFINICIÓN DE ELEMENTOS DEL PROTOCOLO

Este apartado describe la metodología que se ha seguido para definir el protocolo de conexión entre diseño e industria.

El protocolo se compone de una secuencia de etapas en el proceso desde el diseño a fabricación, tal como están establecidas en el esquema anterior, y de una serie de pasos a considerar en cada etapa. Para ilustrar el protocolo, en el capítulo 6.4. se analizarán una serie de estudios de casos siguiendo esta metodología. Al igual que en capítulo 5, el análisis de cada estudio de caso se concluirá con una tabla que recopila los principales datos del protocolo.

Los elementos incluidos en el protocolo se basan en soluciones típicas en la resolución de envoltentes en edificios complejos. La información recabada resulta de la combinación de una consulta documental (consulta de artículos, libros, ponencias, etc.), del análisis de estudios de casos, con el aprendizaje recibido en las visitas y la estancia internacional realizada.

A continuación, se describen las etapas y los parámetros que definen el protocolo propuesto.

En primer lugar, se identifican los principales parámetros influyentes en el diseño, que guiarán el proceso hasta la finalización del edificio.

1. CONCEPTO DEL EDIFICIO

1. CONCEPTO
1.1. CONCEPTO
1.2. FUNCIÓN
1.3. GEOMETRÍA
1.4. MATERIAL Y ACABADOS
1.5. TAMAÑO
2. COMPORTAMIENTO
2.1. ENERGÉTICO
2.2. ESTRUCTURAL
2.3. CONFORT

- **1.1. Concepto y aspecto:** se decide qué aspecto se busca en la envolvente del edificio. El concepto del diseño va a guiar el desarrollo del proyecto y su materialización.
- **1.2. Función:** se identifica la función que va a desempeñar la envolvente del edificio.
- **1.3. Geometría:** se identifican las principales características geométricas: geometría plana o curva; tipo de curvatura (simple o doble); y carácter de la geometría compleja.
- **1.4. Material y acabados:** el material principal de la envolvente es un factor determinante para elegir el método de fabricación y el fabricante; puede ser un material opaco o transparente, liso o con texturas, etc.
- **1.5. Tamaño:** el tamaño total determina la necesidad de subdivisión de la envolvente en módulos o piezas, para que sea posible su fabricación y transporte desde la fábrica a obra.

2. COMPORTAMIENTO DE LA ENVOLVENTE

Se seleccionan los criterios de eficiencia que deban guiar el diseño del edificio:

- **2.1. Energético:** compacidad geométrica, intercambio de energía con el exterior, consumo energético, iluminación natural y diseño de instalaciones.
- **2.2. Estructural:** función estructural de la envolvente, características de la estructura, estabilidad, resistencia y rigidez.
- **2.3. Confort:** acústico, lumínico, higrotérmico, etc.

En el análisis de los estudios de casos que se presentan a continuación, se darán detalles sobre el proceso de diseño a fabricación (1.3.) con los siguientes datos:

- **1.3.1. El software utilizado en el diseño**
- **1.3.2. El proceso de optimización y análisis del diseño**
- **1.3.3. La exportación para la fabricación**
- **1.3.4. El análisis previo a la fabricación.**

En un segundo lugar, se aplican los distintos filtros al diseño: la lógica del diseño, la lógica de fabricación, y la lógica de construcción.

6.3.2 A. LÓGICA DEL DISEÑO

A.1. OPTIMIZACIÓN Y RACIONALIZACIÓN GEOMÉTRICA

Para asegurar la posibilidad de fabricación personalizada y su construcción, es conveniente un ejercicio de optimización de la geometría durante la fase de diseño. Esta optimización es necesaria, en primer lugar, para que la geometría compleja sea realizable; y en segundo lugar, para simplificar la producción, el transporte y montaje, y optimizar los costes y plazos.

En este análisis, la optimización y racionalización geométrica del diseño afectan a:

- la envolvente
- la estructura y subestructura que soportan a la envolvente

El tipo de envolvente y de su estructura influyen en las posibilidades o limitaciones para la fabricación y la construcción, así como en la racionalización. A continuación se enumeran algunos factores que guían la optimización del diseño, así como ejemplos de racionalización aplicada a geometrías complejas, tanto en el caso de la envolvente como de la estructura que la soporta.

Algunos factores para la optimización geométrica son:

- **factores económicos:** aunque la prefabricación personalizada sea posible, ésta puede encarecer el proyecto. En este caso, puede ser necesario minimizar la variedad de componentes, procurando reutilizar moldes, códigos de fabricación e incluso utilizando embalajes estándar para facilitar el transporte; todo ello con el objetivo de economizar y reducir los plazos.
- **factores estructurales:** la geometría se optimiza para garantizar una mayor capacidad resistente, ahorro de material, y sencillez en la ejecución de la estructura.
- **factores de montaje y transporte:** la producción en fábrica implica que la forma original sea manejable durante el transporte y el montaje, por lo que generalmente es necesario subdividirla en componentes más pequeños. En algunos casos, se montan en fábrica módulos de gran tamaño, lo cual permite agilizar enormemente su ensamblaje en obra.

A continuación se describen los tipos de optimización y racionalización geométrica aplicados en primer lugar a la envolvente, y en segundo lugar a la estructura que la soporta.

A. LOGICA DEL DISEÑO

A.1. OPTIMIZACIÓN

A.1.1. CLASIFICACIÓN

A.1.2. RACIONALIZACIÓN

A.1.3. SUBDIVISIÓN

A.2. INGENIERÍA

A.2.1. MATERIALES

A.2.2. DETALLES CONSTRUCTIVOS

A.2.2. CONEXIONES

fig. 6-9:
Ejemplo de fachada sencilla:
Pabellón BMW (Bernhard Franken;
Múnich, Alemania; 1999)

fig. 6-10 y fig. 6-11 :
Fachada de doble piel: Hospital
Universitario Rey Juan Carlos
(Rafael de la Hoz; Madrid; 2012);

fig. 6-12:
Fachada con función estructural:
Abu Dhabi Bridge Pavilion
(Asymptote Architects; Abu Dhabi,
UAE; 2009)

En primer lugar, se aplica la lógica del diseño a la envolvente del edificio; se identifica el tipo de envolvente, así como las operaciones de optimización, racionalización geométrica y subdivisión.

A.1.1. Clasificación de envolventes

La identificación de la función de la envolvente y de sus cualidades fundamentales facilita la elección del proceso de fabricación. Según la función que cumplen, existen los siguientes tipos de envolventes:

- **(A) fachada sencilla:** es una fachada formada por una sola capa, que cumple a la vez funciones de ventilación, aislamiento térmico, resistencia al viento y hermeticidad. Por ejemplo, en el *pabellón BMW* realizado por Bernard Franken Architekten en Múnich en, 1999, la envolvente consiste en una capa sencilla de plexiglás (PMMA o vidrio acrílico) que en un principio debía ser autoportante. Al ser un pabellón temporal, no era necesario garantizar ventilación ni aislamiento térmico, lo cual simplificó el diseño y la fabricación con una sola capa de vidrio acrílico termoformado, sellado con adhesivo (fig 6.16).
- **(B) fachada de doble piel:** en este caso, la envolvente exterior no debe cumplir funciones climáticas, por lo que su fabricación puede ser menos compleja. Por ejemplo, en la fachada del *Hospital rey Juan Carlos*, realizado por el estudio de Rafael de la Hoz en 2012, la envolvente exterior consta de componentes de vidrio curvado recocido, que no proporcionan ventilación ni aislamiento térmico al edificio. Al no ser abribles ni haber doble acristalamiento, simplificó y abarató mucho su fabricación (fig 6.12). En estos casos, la subestructura de la fachada puede encontrarse entre las capas exterior e interior de la fachada.
- **(C) fachada con función estructural:** las envolventes monocasco, por ejemplo, integran las funciones de envolvente y estructura. La estructura consiste en la combinación de una envolvente de gran espesor con una subestructura formada por costillas rigidizadoras (Kolarevic, 2005). Es en el caso del puente del Abu Dhabi Bridge Pavilion, (Asymptote Architects; Abu Dhabi, UAE; 2009. Estas fachadas pueden ser metálicas, de composites, de espumas, etc.

A.1.2. Racionalización de envolventes

Las geometrías complejas pueden sufrir algún tipo de racionalización para simplificarse y dividirse en elementos fáciles de fabricar, transportar y montar. A raíz de esta racionalización, Schodek (2004) clasifica las superficies complejas en los siguientes tipos (Schodek, et al., 2004):

- **Geometrías suaves continuas(A):** son objetos continuos fieles a la geometría original. Los tamaños y materiales dependen de los métodos de producción empleados, aunque típicamente se producen por moldeo, deformación, o impresión 3d. Si se producen en fábrica, las superficies continuas deberán dividirse en módulos que se puedan transportar y montar. También se pueden realizar in situ piezas de mayor tamaño, como en el caso de la parada de bus en Hoofddorp(NIO-architecten; Hoofddorp, Holanda; 2003). Este edificio, de tamaño total 51 X 10 X 5 m, se dividió en varios módulos, que se fresaron por CNC en taller y transportaron a obra. Una vez montados, técnicos dePoly Productsaplicaron poliéster reforzado con fibra de vidrio (GRP) sobre los moldes in situ.
- **Superficies divididas en piezas (B,C,D,E):** la superficie original sufre una racionalización geométrica, mediante la cual deforma y se subdivide a geometrías que son más fáciles de fabricar; se generan por ejemplo, tiras deformadas (1.1) de madera, metal o plásticos flexibles, o bien componentes planos o deformados (1.2). En el segundo caso (1.1 y 1.2), las típicas operaciones de racionalización geométrica por división de envoltentes son las siguientes:
 - **(B) Teselación poligonal y triangulación:** la superficie tridimensional se descompone en piezas planas más sencillas de fabricar. Las superficies con doble curvatura se descomponen típicamente en triángulos, como en la cubierta del *British Museum* (Foster and partner; Londres, Reino Unido; 2000).
 - **(C) Superficies regladas y desarrollables:** se generan por la interpolación lineal entre dos curvas, y las líneas de interpolación son líneas de estructura. El resultado es la división de la superficie en elementos planos, como las superficies metálicas del *Water Pavilion* (NOX architects; Vrouwenpolder, Holanda; 1998)(Kolarevic, 2005), o en elementos curvos, como las piezas de vidrio curvado en frío en la cubierta del Museo *Victoria and Albert* (MUMA Architects; Londres, Reino Unido; 2009).
 - **(E) Contorneado**¹²³: la superficie se secciona a intervalos regulares por planos generalmente paralelos. El seccionado produce líneas coplanares que pueden utilizarse para definir la estructura, como en el caso de la estaciones del *funicular Nordway* (Zaha Hadid Architects; Hungerburg, Austria; 2007).
 - **(F) Regularización de curvatura:** la curvatura de una superficie compleja se regulariza para simplificar el diseño y la fabricación. En el edificio *Oostkampus* (Carlos Arroyo; Oostkamp, Bélgica; 2011), la regularización de curvatura permitió la reutilización de

fig. 6-13:
Tipos de superficies en envoltentes (Schodek, et al., 2004).

fig. 6-14:
Geometría suave continua: parada de bus en Hoofddorp (NIO-architecten; Hoofddorp, Holanda; 2003)

fig. 6-15:
Ejemplo de racionalización por triangulación: British Museumcourt(Foster and partner; Londres, Reino Unido; 2000)

fig. 6-16:
Ejemplo de racionalización por superficie reglada: WaterPavilion (NOX architects; Vrouwenpolder, Holanda; 1998)

fig. 6-17:
Ejemplo de racionalización por contorneado: Estación funicular Nordway (ZahaHadidArchitects; Hungerburg, Austria; 2007)

¹²³Traducción del término inglés *contouring*.

moldes. Este ejemplo se analizará en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

ESTRUCTURA Y SUBESTRUCTURA

A.1.1. Clasificación de sistema estructural

La optimización de una envolvente está ligada a su comportamiento estructural y su relación con la estructura que la soporta. En función de la relación entre envolvente y estructura, se distinguen distintos tipos de sistemas estructurales (Schodek, et al., 2004):

fig. 6-18:
Tipos de sistemas estructurales en
función de su relación con la
envolvente (Schodek, et al., 2004)

fig. 6-19:
Racionalización de la estructura
por contorneado: Pabellón BMW
(Bernhard Franken; Múnich,
Alemania; 1999)

- **A. Envolvente estructural autoportante:** la envolvente tiene gran capacidad resistente debido a su espesor y rigidez, por lo que no necesita una subestructura.
- **B. Estructura paralela a la envolvente.** la envolvente se soporta por una subestructura, ambas con geometrías paralelas. Esta situación se da típicamente en las estructuras monocasco, donde la estructura consiste en costillas rigidizadoras paralelas a una envolvente rígida.
- **C. Estructura primaria independiente:** la envolvente se apoya en dos sistemas: una estructura secundaria paralela a la geometría de la envolvente, soportada por una estructura primaria cuya geometría es independiente.
- **D. Envolvente rígida:** está sujeta por puntos de fijación a la estructura, lo cual evita la necesidad de subestructura.

A.1.2. Racionalización del sistema estructural

Al igual que la envolvente, es posible que el sistema estructural sufra algún tipo de racionalización, variable en función de su relación con la envolvente. En los casos B y C (estructura o subestructura paralelas a la geometría de la envolvente), la racionalización geométrica del sistema estructural se hace a la par que la de la envolvente. Por ejemplo, en el *pabellón BMW*, la estructura es paralela a la envolvente (caso B) y su geometría es el resultado de la racionalización de ésta por contorneado. La envolvente se secciona por planos paralelos, y las costillas estructurales resultan de la extrusión de las líneas de sección.

En el caso D, no es necesaria racionalización dado que la estructura es independiente a la envolvente.

A.1.3. Subdivisión

Para facilitar el transporte desde fábrica y el montaje en obra, la envolvente se suele subdividir en piezas de menor tamaño. Esta subdivisión se puede hacer bien en componentes individuales de pequeño o mediano tamaño, a raíz de la racionalización de la envolvente (como en los ejemplos

mencionados en el punto A.1.2: teselación, triangulación, superficies regladas y desarrollables, y contorneado); bien en módulos de gran tamaño.

En el segundo caso, el sistema de fachada compuesto por envoltente y subestructura se subdivide en módulos que se montan en fábrica. Este "pre-montaje" facilita enormemente la construcción; la conexión de elementos más pequeños, más complicada, se hace en fábrica de forma controlada, mientras que los módulos de gran tamaño se ensamblan rápidamente en obra.

En función de la clasificación de los sistemas estructurales anteriormente mencionados, la subdivisión del sistema de fachada se puede realizar de las siguientes formas:

- **A: Envoltente estructural autoportante:** en caso de fabricarse en taller, la envoltente se divide en componentes de menor tamaño que son transportados a obra. La parada de bus en Hoofddorp (NIO-architecten; Hoofddorp, Holanda; 2003) consiste en una envoltente formada por módulos de poliestireno recubiertos en su totalidad por GRP, que por su peso ligero y la resistencia superficial añadida por el GRP no necesitan subestructura.
- **B: Estructura paralela a la envoltente:** en las estructuras monocasco, la envoltente y la estructura funcionan en conjunto. Los módulos pre-montados contienen porciones de envoltente y costillas estructurales, y una vez montados en obra la conexión entre módulos debe garantizar la resistencia estructural del conjunto, como en el caso del *Abu Dhabi Bridge Pavilion* (Asymptote Architects; Abu Dhabi, UAE; 2009)
- **C: Estructura primaria independiente:** la envoltente y su subestructura se ensamblan en módulos prefabricados, y éstos se montan en obra sobre una estructura primaria: es el caso del *Centro de artes escénicas Kilden* (Ala Architects; Kristiansand, Noruega; 2012).
- **D: Envoltente rígida:** al ser rígida, la envoltente no necesita subestructura. En el edificio *Oostkampus*, la envoltente consiste en componentes rígidos de GRG que están sujetos a la estructura con elementos de fijación estándares.

fig. 6-20:
Módulos para envoltente autoportante en la parada de bus en Hoofddorp (NIO-architecten; Hoofddorp, Holanda; 2003)

fig. 6-21:
Módulos para estructura monocasco del *Abu Dhabi Bridge Pavilion* (Asymptote Architects; Abu Dhabi, UAE; 2009)

fig. 6-22:
Módulos para envoltente y subestructura, del Centro de artes escénicas Kilden (Ala Architects; Kristiansand, Noruega; 2012)

fig. 6-23:
Módulos para envoltente rígida sin subestructura en *Oostkampus* (Carlos Arroyo; Oostkamp, Bélgica; 2011)

A.2. INGENIERÍA

Para asegurar la fabricación y montaje de componentes prefabricados es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos técnicos:

A.2.1. Ingeniería de materiales

Es necesaria considerar el comportamiento del material escogido. Por ejemplo, en el caso de la madera se deben prever juntas de dilatación por la humedad y respetar la continuidad de fibras en el fresado de vigas para garantizar su capacidad estructural.

A.2.2. Detalles constructivos

Incluye el diseño de todos los detalles que deben preverse para la construcción y montaje del edificio. Estos incluyen, por ejemplo, la integración de detalles de montaje en la fabricación de componentes, como el fresado de ranuras en las vigas de madera del Centro de artes escénicas *Kilden*, mencionados en el capítulo 6.1. En el *British Museum Court* (Foster and partner; Londres, Reino Unido; 2000), las piezas triangulares de vidrio de la cubierta apoyan sobre una estructura metálica formada por perfiles rectos que se unen por conectores en forma de estrella. Para lograr la geometría irregular de la cubierta triangulada, cada conector tiene un diseño especial que se fresó por CNC.

A.2.3. Conexiones entre elementos

Un edificio se compone de distintos sistemas que deben funcionar en conjunto: fachada, cubierta, forjados, cimentaciones, etc.).

Como parte del diseño, deben resolverse las uniones entre los sistemas del edificio a distintos niveles: unión entre piezas, unión entre módulos prefabricados, y unión o interfaz entre sistemas. En el *Club de golf Yeogu* (Shigeru Ban Architects; Corea del Sur; 2010), las conexiones se integraron en el diseño a todos los niveles, y se resolvieron en la fase de fabricación para facilitar el montaje final del edificio. Este edificio se desarrollará en el capítulo 6.4.2.

fig. 6-24:
Unión entre vigas de madera en
el Club de golf Yeogu (
ShigeruBanArchitects; Corea del
Sur; 2010)

fig. 6-25:
Unión entre módulos
prefabricados en el Club de golf
Yeogu (ShigeruBanArchitects;
Corea del Sur; 2010)

fig. 6-26
Unión entre sistemas (estructura y
fachada, estructura y cubierta):
Club de golf Yeogu (
ShigeruBanArchitects; Corea del
Sur; 2010)

Como se ha visto a lo largo de la tesis, para facilitar la fabricación personalizada es fundamental la incorporación de los criterios de fabricación en el diseño. En el capítulo 5 se han analizado distintas familias de procesos de fabricación personalizada, listado sus posibilidades y limitaciones, así como los criterios que pueden influir en la realización de un proyecto. En líneas generales, los criterios de fabricación se pueden ordenar en las siguientes categorías:

B.1. OPERACIONES DE PRE-PROCESADO

- **Ensamblaje de elementos:** para comenzar el trabajo de fabricación, a menudo deben realizarse ciertas operaciones de preparación y procesado del material. Por ejemplo, antes del mecanizado de vigas de madera, se realiza el laminado de tablas de madera para conseguir piezas de tamaño suficiente.
- **Maquinado previo:** antes de fabricar a menudo es necesario el mecanizado, taladrado o corte de elementos; por ejemplo, antes de la deformación de chapas metálicas por prensado se cortan las chapas grandes al tamaño justo.
- **Deformación de elementos:** para procesar vigas curvas es necesaria la deformación previa por laminado en curvo de tablas de madera; en este caso, hay que considerar que este proceso es muy costoso y puede encarecer el proyecto.
- **Planificación de moldes:** en los procesos de moldeo, antes de fabricar el componente final es necesario fabricar los moldes, estudiar si pueden ser moldes reutilizables, realizar pruebas para conseguir el acabado necesario, etc. La utilización de moldes no repetitivos encarece el proceso y aumenta el desperdicio de material.

B.2. OPERACIONES DE PROCESADO

Entre las operaciones de procesado, hay que tener en cuenta:

- **B.2.1. Parámetros materiales:** en función de la máquina y del proceso utilizado, se evalúa la posibilidad de fabricar en distintos materiales, acabados y texturas, así como el nivel de detalle posible.
- **B.2.2. Parámetros geométricos:** se deben tener en cuenta los límites dimensionales y geométricos de la máquina, así como las curvaturas admisibles.
- **B.2.3. Parámetros económicos:** En cada proceso hay factores que encarecen el producto final, en función del material utilizado, del tiempo de procesado, de la mano de obra necesaria, de la utilización de maquinaria singular, etc. Por ejemplo, debido a lo singular del proceso y a las pocas fábricas que lo realizan, el

B. LÓGICA DE FABRICACIÓN

B.1. OPERACIONES DE PRE-PROCESADO

B.2. OPERACIONES DE PROCESADO

B.2.1. PARÁMETROS MATERIALES

B.2.2. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

B.2.3. PARÁMETROS ECONÓMICOS

B.3. OPERACIONES DE POST-PROCESADO

curvado a doble curvatura de vigas laminadas encarece mucho los proyectos. Para evitar este incremento, muchas veces se consigue la doble curvatura mediante el fresado de piezas de curvatura sencilla, cuidando de no alterar la resistencia estructural de la pieza; se siguió este método en el *Club de Golf Yeosu* en Corea.

- **B.2.4. Parámetros del proceso:** la realización de un determinado proceso y la utilización de una determinada maquinaria tienen implicaciones en la geometría y el diseño del proyecto. Por ejemplo, el diseño debe tener en cuenta que en el fresado de vigas de madera la tolerancia de la máquina puede ser hasta de 1/10 mm.

B.3. OPERACIONES DE POST-PROCESADO

Tras la fabricación del componente, a menudo éste se remata en taller por una serie de operaciones, como por ejemplo el corte o taladrado en piezas para fijación en obra o unión con otros componentes.

6.3.4 C. LÓGICA DE CONSTRUCCIÓN

Una vez fabricadas las piezas en taller, éstas se transportan a la obra para montarse. En la fase de diseño es necesario integrar reflexiones sobre el transporte desde la fábrica a la obra, así como sobre su posterior montaje.

C.1. Transporte y logística

Los siguientes puntos resumen algunos criterios sobre la fase del transporte de fábrica a obra:

- **C.1.1. Logística**

Se deben considerar la planificación del transporte desde la fábrica a obra, teniendo en cuenta el recorrido, el tipo de vehículos, e incluso la preparación de piezas para el transporte. Por ejemplo, las piezas de vidrio deformado se transportan en cajas de madera fabricadas a medida, que pueden encarecer el producto.

Por otro lado, la distancia a obra desde la fábrica elegida puede influir en los plazos y costes de fabricación. También es importante que el fabricante prevea qué vehículos son necesarios (contenedor, barco, camión, etc.), y las rutas utilizadas. A menudo el vehículo utilizado para el transporte define el tamaño máximo de los componentes prefabricados. Una pieza transportable por camión habitualmente tiene aproximadamente un máximo de 13m x 3 m x 2.5 m.

- **C.1.2. Condiciones de transporte**

En el transporte de las piezas, se pueden alterar o dañar las piezas debido a las condiciones climáticas o los movimientos durante el transporte. Si hay cambios fuertes de temperatura entre un lugar y otro, puede ser necesario prever la dilatación de componentes, como ocurrió en el *Abu Dhabi Bridge Pavilion* (Asymptote Architects; Abu Dhabi, UAE; 2009). En el transporte de los módulos prefabricados de acero, éstos dilataron 6cm en el transporte desde Holanda, donde hacía 0°C a Abu Dhabi, donde hacía 40°C¹²⁴. Además, las vibraciones causadas por el transporte en camión obligan a asegurar la estabilidad de los módulos tridimensionales de forma similar al diseño antisísmico.

C. LOGICA DE CONSTRUCCIÓN
C.1. TRANSPORTE Y LOGÍSTICA
C.1.1. LOGÍSTICA
C.1.2. CONDICIONES
C.2. MONTAJE
C.2.1. DISEÑO DE UNIONES
C.2.2. TOLERANCIAS
C.2.3. PREVISIÓN DE MONTAJE

fig. 6-27:
Transporte por barco de módulos premontados en Centralstaal para el *Abu Dhabi Bridge Pavilion* (Asymptote Architects; Abu Dhabi, UAE; 2009).

¹²⁴ Datos recabados durante la entrevista a Wybren Terpstra, jefe de ventas de la empresa *Centralstaal*, fabricante del proyecto, Groningen, Holanda, el 20/12/2012

C.2. MONTAJE Y CONSTRUCCIÓN

Los detalles de montaje de piezas en obra pueden referirse a:

- **C.2.1. Diseño de uniones**

Se diseñan las piezas de unión, las piezas de soporte y los adaptadores necesarios para el montaje de la geometría final. Por ejemplo, en las estaciones del *funicular Nordway* (Zaha Hadid Architects; Hungerburg, Austria; 2007), se diseñaron y fabricaron por CNC más de 2,500 piezas individuales de polietileno para absorber las tolerancias necesarias en la conexión entre envoltorio y estructura (Designtoproduction, s.f.) (designtoproduction).

- **C.2.2. Tolerancias de montaje**

El montaje del edificio es mucho menos exacto que la fabricación CNC, por lo que se deben prever tolerancias para asegurar un buen montaje. Por ejemplo, estructura en el *Club de golf Yeosu*, se dejó una junta de 2mm entre los módulos de la estructura para permitir los movimientos de la madera por los cambios de humedad.

- **C.2.3. Previsión del proceso de montaje**

En algunos casos, es necesario diseñar elementos exclusivamente para asegurar la fase de montaje, como por ejemplo estructuras temporales para el montaje de una estructura de gran tamaño, o el diseño de encofrados especiales. En la construcción de los forjados de hormigón con curvatura bidireccional del *Rolex Learning Center* (Sanaa; Lausanne, Suiza; 2008), se diseñaron paramétricamente 1,458 módulos tridimensionales en madera como encofrado de los forjados (Designtoproduction, s.f.) (designtoproduction).

Una vez incorporados estos filtros en el diseño, se procede a:

[CONGELACIÓN DEL DISEÑO]

[PROCESO DE DISEÑO A FABRICACIÓN - TRANSFERENCIA DE ARCHIVOS]

fig. 6-28 y fig. 6-29:
Módulos de encofrado en el *Rolex Learning Center* (Sanaa; Lausanne, Suiza; 2008)

fig. 6-30, fig. 6-31 y fig. 6-32:
Conectores de polietileno en la *estación funicular en Hungerburg* (Zaha Hadid Architects; Hungerburg, Austria; 2007)

Como ilustración de este proceso completo, a continuación se presentan dos esquemas que ilustran el proceso de diseño a fabricación *del Centro de artes escénicas Kilden* (Ala Architects; Kristiansand, Noruega; 2012):

fig. 6-33:
Pasos seguidos desde el dibujo terminado hasta la fabricación y montaje del proyecto por distintos fabricantes.

6.4 ESTUDIO DE CASOS

En los apartados precedentes, se ha descrito la metodología que define el protocolo de conexión entre diseño e industria; se han determinado la secuencia de etapas que lo componen el protocolo, y para cada etapa se han definido una serie de criterios a considerar, ilustrados por ejemplos, que deberán alimentar el diseño final.

En el siguiente apartado, este protocolo se ilustrará mediante una serie de proyectos en los que se han materializado diseños con geometría compleja.

Para cada caso, se describirá el proyecto y la trayectoria seguida desde el diseño a la fabricación.

Siguiendo el esquema del protocolo, se describirán los criterios adoptados en el proyecto en cada etapa. En paralelo al análisis de los casos, se observará qué implicaciones han tenido las decisiones de diseño en el proceso, así como las soluciones encontradas. La información recabada se presenta en forma de tabla para ilustrar el protocolo.

Por último, se analizarán las implicaciones económicas, temporales y materiales de cada diseño y las posibilidades de optimización del proceso.

Para el análisis de los proyectos, se aplica la metodología descrita en el apartado anterior, que ilustra los pasos para el protocolo de conexión entre diseño y fabricación:

1. DISEÑO

- concepto: aspecto, función, geometría, material, tamaño, acabados
- comportamiento: energético, estructural
- software de diseño

A. LÓGICA DEL DISEÑO

- optimización: clasificación, racionalización y despiece
- ingeniería: materiales, detalles constructivos y conexiones

B. LÓGICA DE FABRICACIÓN

- pre-procesado
- procesado: parámetros materiales, parámetros geométricos, parámetros económicos, parámetros de proceso
- post-procesado

C. LÓGICA DE CONSTRUCCIÓN

- transporte y logística : logística, condiciones
- montaje y construcción : diseño de uniones, tolerancias, previsión de montaje

2. CONGELACIÓN DEL DISEÑO - DIBUJO

- método de exportación, software de diseño, de optimización y de análisis

3. ENVÍO A FABRICACIÓN

6.4.1 CASO 1: BMW PAVILION

DATOS

- **Fecha de construcción:** 1999
- **Lugar:** Frankfurt. Es un pabellón temporal que fue desmontado.
- Fue reconstruido como café en la Presentación of BMW en Múnich (Capone, 2011).
- **Cliente:** Grupo BMW, Múnich, Alemania
- **Autores**
 - Arquitectos: Bernhard Franken Architekten y ABB Architekten
 - Ingeniería: Bollinger-Grohmann

DESCRIPCIÓN

- **Función del edificio:** pabellón BMW para la exposición de automóviles IAA 99 en Frankfurt, Alemania).
- **Tamaño:** longitud máxima 24 m; ancho máximo 16 m; altura máxima 8 m (Bollinger Grohmann, s.f.)
- **Superficie total:** 260 m²(Franken Architekten, s.f.).

DISEÑO

El pabellón BMW se diseñó para presentarlos vehículos alimentados por hidrógeno y energía solar.

El diseño tenía como objetivo reproducir el aspecto suave y curvilíneo de los vehículos fabricados por BMW, con una geometría continua y sin juntas. El concepto de la geometría se origina en la interacción de dos gotas de agua (Kolarevic, 2005), dando lugar a una envolvente asimétrica transparente de doble curvatura.

Este pabellón es una referencia en el ámbito de la fabricación digital, por ser uno de los primeros ejemplos de edificios con geometrías complejas fabricadas con técnicas CNC, además de por las técnicas y materiales utilizados.

fig. 6-34:
Concepto del diseño: unión de dos gotas de agua.

fig. 6-35, fig. 6-36 y fig. 6-37:
Pabellón BMW en la feria de automóviles de Frankfurt

PROTOCOLO DE CONEXIÓN : Pabellón BMW

1. DISEÑO					Implicaciones
1.1	CONCEPTO	1.1.1	Concepto y aspecto	Conexión de dos gotas de agua Aspecto transparente y liso	Material deformable y transparente: vidrio o vidrio acrílico
		1.1.2	Función	Envolvente auto portante	Material rígido
		1.1.3	Geometría	Envolvente asimétrica transparente de doble curvatura	Geometría compleja
		1.1.4	Material y acabados	Vidrio acrílico (polimetilmetacrilato o plexiglás) de 8mm de espesor	El vidrio acrílico se deforma por termoformado sobre moldes; Es necesario fabricar moldes Material resistente
		1.1.5	Tamaño	Superficie aproximada 260 m ² Longitud máxima 24 m Ancho máximo 16 m Altura máxima 8 m	Necesidad de subdivisión de la geometría para la fabricación, el transporte y el montaje
1.2	COMPORTAMIENTO	1.2.2	Estructural	Concepto original: envolvente auto portante mediante piezas encoladas entre sí	Material moldeable y con resistencia estructural (plexiglás en lugar de vidrio)
1.3	DISEÑO A FABRICACIÓN	1.3.1	Software de diseño	Para el diseño se utilizó Maya; Se realizó una simulación de gotas para optimizar la geometría	Se desarrolló un software para la optimización geométrica (Alias Wavefront)
		1.3.3	Exportación	Desde CATIA se exportaron archivos de cada panel con los datos de fresado	Conexión directa entre dibujo y fabricación

A. LÓGICA DEL DISEÑO					Implicaciones en el proceso
A.1	OPTIMIZACIÓN Y RACIONALIZACIÓN	A.1.1	Clasificación (envolvente)	Fachada sencilla. Diseño original: envolvente auto portante; Diseño final: sin función estructural	Finalmente, fue necesario un material ligero sin función portante
			Clasificación (estructura)	Estructura paralela a envolvente Estructura ligera	Capacidad portante limitada pero ligera y fácil de trabajar
		A.1.2	Racionalización (envolvente)	Superficie dividida en piezas por contorneado (seccionado bidireccional) con planos ortogonales entre sí	La estructura es una retícula bidireccional de piezas planas
			Racionalización (estructura)	Por contorneado: estructura linear ortogonal, resultante del seccionado ortogonal de la envolvente	Estructura plana, se monta como un mecano
		A.1.3	Subdivisión (envolvente)	305 piezas de dimensión media 1 - 1,7 m ² y un espesor de 10 mm., todas distintas entre sí	Tamaños estándar hasta 2mx3m
A.2	INGENIERÍA	A.2.1	Materiales	Se determinó el espesor y el tipo de vidrio acrílico en función de su carga estructural	Realización de un análisis de elementos finitos para la simulación estructural

B. LÓGICA DE FABRICACIÓN					Implicaciones en el proceso
B.1	PRE-PROCESADO		Pre-procesado (envolvente)	Fresado CNC de moldes de espuma de poliuretano, calentado de moldes	Gasto material elevado, pero el material es económico largo tiempo de procesado
B.2	PROCESADO	B.2.1	Parámetros materiales (envolvente)	Calentamiento de láminas sobre moldes en hornos TºC de deformación del plexiglás: 160 a 175 ºC ; punto de ebullición: 200ºC	Los tamaños de láminas de plexiglás están limitados por el tamaño de hornos
			Parámetros materiales (estructura)	Perfiles de sección 230 X 24 mm formados por tres capas de aluminio de 8 mm.	El corte CNC de aluminio es fácil y rápido
		B.2.2	Parámetros geométricos (envolvente)	El plexiglás admite gran deformación geométrica	Deformación del plexiglás por calentamiento en hornos
		B.2.4	Parámetros de proceso (envolvente)	Las láminas se calientan a 150-160ºC sobre los moldes de espuma de poliuretano Se controla la duración y temperatura para evitar ruptura del material y minimizar la deformación (en espesor y tamaño) y la pérdida de resistencia	El tiempo de calentamiento depende del espesor del material
			Parámetros de proceso (estructura)	Corte en máquina CNC de 3 ejes en 7 fábricas distintas	Para la realización en menos de 6 semanas, es fundamental la previsión y coordinación logística
B.3	POST- PROCESADO		Post-procesado (envolvente)	Recorte de bordes de los paneles de plexiglás Los moldes se fresan para ser reutilizados para otra pieza	
			Post-procesado (estructura)	Recorte de agujeros en las piezas para facilitar el montaje manual con escuadras y tornillos.	Es posible realizar un montaje manual sencillo.

C. LÓGICA DE LA CONSTRUCCIÓN					Implicaciones en el proceso
C.1	TRANSPORTE Y LOGÍSTICA	C.1.1	Logística	Para cumplir los plazos, se seleccionaron 7 fábricas distintas para fabricar la estructura	Coordinación de plazos y distancias
C.2	MONTAJE Y CONSTRUCCIÓN	C.2.1	Diseño de uniones	Uniones con escuadras	El montaje es sencillo
		C.2.3	Previsión del montaje	Montaje manual, como un mecano. Cada pórtico está compuesto por tres unidades atornilladas entre sí Las piezas de vidrio acrílico se fijan a la estructura con conectores atornillados a la parte superior de los perfiles	Necesidad de numerar las piezas

ANÁLISIS

Diseño

El diseño del pabellón persigue una superficie a la vez transparente y continua, sin juntas ni elementos de soporte. La solución inicial era una envolvente auto portante de piezas de vidrio acrílico unidas por adhesivo. Sin embargo, la resistencia del adhesivo no fue suficiente y hubo que añadir una subestructura metálica.

La continuidad de la superficie y la ausencia de juntas es un desafío constante en el diseño de superficies complejas, difícil de alcanzar con prefabricados debido a las limitaciones de tamaños por el transporte y la fabricación. Para este proyecto, esta continuidad sería posible si se fabrica el objeto por moldeo in situ sobre un molde de gran tamaño, por ejemplo, con poliéster con fibra de vidrio; sin embargo en este caso, este material es compatible con la transparencia buscada. Por otro lado, las juntas son necesarias para asegurar la dilatación del conjunto.

Aumento de eficiencia

El fresado de moldes se considera un proceso ineficiente por la lentitud del proceso y por la gran cantidad de desperdicio. En este proyecto se ha procurado minimizar el desperdicio mediante la reutilización de moldes, al fresar los moldes de poliuretano una vez utilizados.

Se proponen las siguientes medidas de mejora para aumentar la eficiencia del proceso:

- la reutilización de moldes sin fresado adicional hubiera supuesto una reducción de tiempo y de desperdicio significativos, pero también impuesto la uniformización de curvaturas;
- la posibilidad de moldes reconfigurables sería óptima para reducir los plazos y el desperdicio; sería necesario evaluar la utilización de moldes reconfigurables en los hornos a altas temperaturas utilizados para la deformación de vidrio acrílico.

ILUSTRACIÓN DEL PROCESO

1. OPTIMIZACIÓN Y RACIONALIZACIÓN GEOMÉTRICA

fig. 6-38:
Optimización de la geometría.

fig. 6-39:
Racionalización de la geometría por contorneado.

2. FABRICACIÓN

fig. 6-40:
Corte CNC de las costillas de aluminio.

fig. 6-41:
Fresado de moldes de poliuretano.

fig. 6-42:
Láminas de PMMA deformadas sobre los moldes de poliuretano.

3. MONTAJE

fig. 6-43 y fig. 6-44:
Montaje manual de la estructura de aluminio.

fig. 6-45:
Montaje de la estructura.

fig. 6-46 y fig. 6-47:
Montaje de la envoltura.

ESQUEMA DEL PROTOCOLO DE CONEXIÓN

6.4.2 CASO 2: CLUB DE GOLF YEOJU

HAESLEY NINE BRIDGES GOLF CLUB HOUSE

DATOS

- **Fecha de construcción:** 2010
- **Lugar:** Yeosu-gun, Gyeonggi-do, Corea del sur
- **Cliente:** CJ Group(Archdaily)
- **Autores**
 - Arquitectos: Shigeru Ban Architects con KeyongSik Yoon (*KACI International, Inc.*), arquitecto local.
 - Ingeniería: *SJB Kempter Fitze, Creation Holz*.
 - Modelado paramétrico: *Designtoproduction*.
 - Consultoría: *CreationHolz*.
- **Fabricante de la estructura de madera:** *Blumer-Lehmann*

DESCRIPCIÓN

- Función del edificio: edificio social del club de golf Yeosu.
- Tamaño de cubierta: 36 x 72 metros¹²⁵
- División de la cubierta en 32 módulos
- realización de 150.000 operaciones de maquinado (7800 horas) para 4.500 piezas de madera laminada de abeto (*Freeform Timber*)
- transporte de 3500 piezas más equipo de 35 especialistas
- Superficie total: 3200 m², con una planta bajo rasante y tres sobre rasante.

DISEÑO

Diseño original: el diseño original, realizado por *Arup*, estaba basado en una gran viga viendeel en cubierta, ejecutada con uniones por pernos de fijación verticales. La empresa local coreana anunció que no era capaz de fabricarlo allí y se buscaron otros métodos de fabricación.

En ese momento, se organizó un concurso para fabricantes europeos, que ganó la empresa suiza *Blumer-Lehmann* junto con la ingeniería *CreationHolz*, quienes propusieron una estructura de madera fresada por CNC. Para la producción, se fabricó una nueva máquina de fresado CNC.

fig. 6-48:
Concepto original del proyecto:
Jook Bu In, almohada tradicional
de bambú con trama hexagonal.

fig. 6-49 y fig. 6-50:
Imágenes del club de golf.

¹²⁵El tamaño del edificio estaba limitado por el reglamento coreano, el cual no permite edificios de madera mayores a 6000 m².

PROTOCOLO DE CONEXIÓN : Club de golf Yeosu

1.	DISEÑO				Implicaciones en el diseño
1.1	CONCEPTO	1.1.1	Concepto y aspecto	"Jook Bu In", almohada tradicional coreana de bambú	Diseño con trama hexagonal
		1.1.2	Función	Estructura de entramado de vigas de madera sobre pilares con forma arborescente	Vigas curvas interconectadas, Continuidad de elementos estructurales
		1.1.3	Geometría	Vigas de madera de curvatura sencilla o doble	Fabricación por deformación o mecanizado de madera
		1.1.4	Material y acabados	Madera laminada de abeto	Material fácil de trabajar
		1.1.5	Tamaño	Total: 36m x 72m cada módulo: 9mx 9m	División de la estructura en módulos transportables
1.2	COMPORTAMIENTO	1.2.2	Estructural	Forjado reticular con patrón hexagonal de vigas curvas de madera, soportada por columnas de triple altura	Importancia de realizar la simulación estructural del proyecto y el diseño detallado de las juntas
		1.2.3	Confort	Iluminación y ventilación naturales: 21 lucernarios de 3m de diámetro, lamas eléctricas y ventanas correderas de vidrio	Integración de los lucernarios en la geometría de la cubierta
1.3	DISEÑO FABRICACIÓN	1.3.1	Software de diseño	<i>Rhino</i> y <i>grasshopper</i> diseño paramétrico CAD 3D con detalles paramétricos: 15.000 juntas paramétricas	Rapidez de diseño, integración de criterios estructurales y de montaje
		1.3.2	Optimización	Utilización del software iCapp	Reconstrucción de superficie
		1.3.3	Exportación	A código M desde el programa	Las piezas están identificadas
		1.3.4	Análisis de fabricación	Un plugin para <i>Rhino</i> verifica el proceso para cada pieza	Verificación de la fabricación y de la ausencia de conflictos

A. LÓGICA DEL DISEÑO					Implicaciones en el proceso
A.1	OPTIMIZACIÓN RACIONALIZACIÓN	A.1.1	Clasificación (envolvente)	Cubierta plana ligera apoyada sobre el forjado; Fachada sencilla de muro cortina de vidrio	Es necesario resolver las interfaces entre la estructura con geometría compleja y la envolvente regular.
			Clasificación (estructura)	Estructura compleja visible hacia el interior	No está a la intemperie
		A.1.2	Racionalización (estructura)	Encuentros planos entre la envolvente y la estructura	Las interfaces son líneas rectas (encuentros con la fachada, etc.)
		A.1.3	Subdivisión (estructura)	500 componentes individuales distintos pero similares	Se parte del diseño de una pieza-tipo a partir de la cual se hacen modificaciones Diseño paramétrico de variantes
A.2	INGENIERÍA	A.2.1	Materiales	Asegurar la resistencia de la madera en dirección de la fibra	Control de corte de la fibra en el fresado CNC
		A.2.3	Conexiones	Garantizar la continuidad entre los pilares y el forjado	Es necesario diseñar cada unión

B. LÓGICA DE FABRICACIÓN					Implicaciones en el proceso
B.1	PRE- PROCESADO			Laminado de vigas rectas y curvas	Si es fundamental tener exactitud geométrica, hay que rectificar por fresado el laminado curvo que sólo es exacto al 90%.
B.2	PROCESADO	B.2.1	Parámetros materiales	Las vigas de doble curvatura soportan mucho estrés, por lo que las fibras deben ser continuas.	Hay que garantizar que el fresado de vigas no altera la resistencia de la madera
		B.2.2	Parámetros geométricos	La pieza máxima que se puede mecanizar tiene 12m de largo	Para conseguir piezas de gran tamaño se realiza el laminado previo de tablas de madera
		B.2.3	Parámetros económicos	El laminado de vigas de curvatura doble es hasta 8/10 más caro que el laminado recto	Se evita el laminado de doble curvatura, fresando la doble curvatura a partir de piezas rectas o de curvatura sencilla cuando es posible
		B.2.4	Parámetros de proceso	Fresado de vigas para conseguir su geometría exacta	El proceso de fresado es lento: las piezas de 9m tardan 5/6 horas en la máquina
				Tolerancias de fabricación: 1/10mm	Hay que preparar un modelo de gran precisión para la fabricación
B.3	POST- PROCESADO			Fresado de ranuras para introducir placas metálicas, taladrado para introducir los tornillos	Incorporar los detalles de montaje en las vigas

C. LÓGICA DE LA CONSTRUCCIÓN					Implicaciones en el proceso
C.1	TRANSPORTE Y LOGÍSTICA	C.1.1	Logística	Distancias: 10.000 km entre Suiza y Corea Se trasladan un equipo de 35 especialistas y 3500 piezas	Coordinación de fechas y transporte
		C.1.2	Condiciones	Traslado de módulos de 9mx9m	
C.2	MONTAJE Y CONSTRUCCIÓN	C.2.1	Diseño de uniones	Uniones entre piezas: juntas fresadas embebidas	Incorporar las juntas fresadas entre cada pieza en el diseño
				Uniones entre módulos: placas metálicas introducidas en ranuras en las cabezas de vigas	Prever la tolerancia en las ranuras para introducir las placas metálicas
				Unión con la cubierta: el forjado se soporta en vigas metálicas, que apoyan en superficies planas del forjado	Se incorporan superficies planas en la estructura para conectar la estructura con los otros sistemas (fachada y cubierta)
		C.2.2	Tolerancias	2mm de tolerancia entre módulos	La precisión en la fabricación es fundamental para garantizar la tolerancia de montaje.

ANÁLISIS

Plazos del proyecto:

- Planificación y fabricación de nueva máquina: 6 meses.
- Análisis del diseño: 2 meses para resolver el proceso de fabricación. Sólo en la resolución de uniones y de interfaces se tarda 3 o 4 veces más que en tiempo de ingeniería.
- Comienzo de la obra: 1 año después del encargo.
- Fabricación:
 - plazo total: 3 meses con doble turno, 7800 horas de maquinado, día y noche;
 - tiempo de elaboración de cada pieza: desde 30 min a 4 horas, dependiendo de la geometría;
 - pre-montaje de módulos: 1 mes.
- Montaje en obra: es muy rápido. Un equipo de especialistas se trasladó desde Suiza a Corea para realizar un montaje muy preciso con tolerancias reducidas.
- Duración total: 7 meses para la planificación y la ejecución; comienzo en junio 2009, inauguración del edificio en abril 2012.

Los plazos de fabricación se agilizaron por los siguientes factores:

- se fabricó expresamente una nueva máquina de fresado CNC más rápida; la otra novedad de esta nueva máquina es que puede fresar mientras gira;
- se integró un proceso de diseño y verificación iterativo, mediante diseño paramétrico;
- *Designtoproduction*, la consultoría geométrica que colaboró con el fabricante en el proyecto, diseñó un plugin para Rhino que realiza una verificación de fabricación más rápida: este proceso pasó de tardar 45 minutos a 3 minutos.

Se fabricó un prototipo para conseguir el encargo, que demostraba la propuesta estructural y de fabricación, y que evitó perder más tiempo del necesario en el desarrollo del diseño.

Factores influyentes en coste:

- materia bruta: vigas curvas y de doble curvatura. El laminado curvo es más caro que el recto, y el laminado con doble curvatura es hasta 8/10 veces más caro. Para abaratar, donde es posible se procura partir de vigas rectas o de curvatura sencilla, y fresar la doble curvatura;
- tiempo de maquinado: el precio varía en función de la máquina utilizada y del tiempo de maquinado. Se procura combinar la utilización de máquinas sencillas para realizar las operaciones

sencillas con máquinas más sofisticadas cuando son necesarias. Las operaciones de fresado suelen ser muy lentas, por lo que el proceso se encarece;

- desperdicio del material: las operaciones de fresado se realizan sobre material de buena calidad (vigas laminadas de gran tamaño) y suponen un desperdicio y gasto elevados.

CONCLUSIÓN

Este proyecto es un ejemplo de una determinada filosofía de fabricación en madera, donde se concentra un enorme esfuerzo en la fabricación y en el detalle de los componentes, con el objetivo de facilitar el trabajo en obra. En este caso, fue necesario, además de fabricar una máquina especial, trasladar a obra a especialistas en montaje. Todo ello simplificó el proceso y redujo los plazos.

Por otro lado, en este proyecto el diseño de la geometría compleja se realizó con un modelo paramétrico que integraba la simulación estructural, la resolución de detalles constructivos, y la incorporación de factores económicos, de fabricación, de transporte y de montaje. El modelo paramétrico contenía todos los detalles geométricos y de fabricación, como las geometrías de corte y maquinado, los detalles de las uniones y la numeración de cada pieza.

Este sistema de trabajo exige un conocimiento profundo de parámetros geométricos y de fabricación, y en este caso, la colaboración con una consultoría experta en este campo, *Designtoproduction*.

ILUSTRACIÓN DEL PROCESO

1. OPTIMIZACIÓN Y RACIONALIZACIÓN GEOMÉTRICA

fig. 6-51:
Racionalización geométrica: división de forjado en 32 módulos.

fig. 6-52:
Racionalización geométrica: previsión de interfaces, apoyo de las vigas metálicas sobre líneas planas de la estructura de madera.

2. PREPARACIÓN DEL MODELO PARA FABRICACIÓN

fig. 6-53:
Estudio sobre modelo paramétrico de las juntas entre piezas.

fig. 6-54:
Conexión entre componentes.

3. FABRICACIÓN Y PRE-MONTAJE

fig. 6-55:
Materia bruta: vigas laminadas curvas.

fig. 6-56:
Mecanizado CNC de vigas.

fig. 6-57:
Vigas mecanizadas y numeradas

fig. 6-58:
Viga mecanizada

Fig. 6-59
Realización de ensayos mecánicos.;

4. MONTAJE

fig.6-60 y fig.6-61:
Montaje de módulos en taller.

fig.6-62 y fig.6-63:
Montaje de módulos en obra.

ILUSTRACIÓN DEL PROTOCOLO DE CONEXIÓN

DATOS

- **Fecha de construcción:** 2011-2012
- **Lugar:** Oostkamp, Belgica
- **Cliente:** Ayuntamiento de Oostkamp
- **Autores**
 - Arquitectos: Carlos Arroyo Arquitectos, Madrid, España
 - Arquitecto local: *ELD partnership Antwerp*, Belgium
- **Fabricante:** *Vari*

DESCRIPCIÓN

- **Función del edificio:** ayuntamiento de Oostkamp
- Tamaño total del edificio: 11,000 m2
- Superficie en falso techo: 3700 m2 de GRP

DISEÑO

Concepto: se reutilizó un edificio industrial, la fábrica de Coca-Cola, cuyo interior se transformó completamente mediante un falso techo simulando un "paisaje luminoso de nubes blancas" (Carlos Arroyo Arquitectos, s.f.).

Geometría: la geometría resulta de la intersección de secciones de esferas.

Material: GRG (yeso reforzado con fibra de vidrio). Originalmente, se pensó en fabricar en hormigón, según el sistema *Beton ballon*, basado en la proyección de hormigón sobre elementos neumáticos como encofrados hinchables.

Acabados: color blanco, acabado liso.

COMPORTAMIENTO

Energético: la envolvente funciona como una "cebolla térmica", formada por varias capas de aislamiento según las necesidades de cada zona. El falso techo integra iluminación natural y artificial, aislamiento acústico, e incluso generación eléctrica a partir de corrientes de aire exterior.

Estructural: se reutiliza el edificio existente con su estructura. El falso techo ligero se soporta en la estructura del edificio con tirantes y perfiles, sin necesidad de subestructura.

fig.6-64:
Imágenes del edificio, exterior e interior

fig.6-65:
Sección del edificio

fig.6-66:
Idea original: proyección de hormigón sobre encofrados inflables, método "Betonballon"

PROTOCOLO DE CONEXIÓN : Oostcampus

1.	DISEÑO				Implicaciones en el diseño
1.1	CONCEPTO	1.1.1	Concepto y aspecto	Paisaje luminoso de nubes blancas	Geometría irregular, color blanco, acabado liso
		1.1.2	Función	Falso techo en interiores, sin función estructural.	Envolvente ligera, protegida de la intemperie
		1.1.3	Geometría	Intersección de secciones de esferas	Curvatura regular
		1.1.4	Material y acabados	GRG: yeso reforzado con fibra de vidrio Espesores finos de 7 a 9 mm, peso entre 7 y 9 kg/m ² Acabado: pintura blanca	Material sólo para interiores, muy resistente y ligero La pintura permite el tapado de imperfecciones
		1.1.5	Tamaño	3500 m ² de GRG	División de la superficie en piezas para prefabricación
1.2	COMPORTAMIENTO	1.2.1	Energético	"cebolla térmica", Se añaden capas según las necesidades de cada zona	Por ejemplo, se añade lana de roca para aislamiento térmico, o aislamiento acústico
1.3	DISEÑO FABRICACIÓN	1.3.1	Software de diseño	Autocad Cada esfera se define en función de su radio y altura para determinar la geometría, la fabricación y montaje. Se trabaja en dibujo 2D (Autocad), maqueta e imágenes 3D	Ausencia de diseño paramétrico
		1.3.3	Exportación	Los datos se exportan a tablas Excel indicando la geometría de las piezas: sección superior, media e inferior	Sistema manual, necesidad de simplificar el diseño para facilitar el montaje

A. LÓGICA DEL DISEÑO					Implicaciones en el proceso
A.1	OPTIMIZACIÓN RACIONALIZACIÓN	A.1.1	Clasificación	Envolvente interior sencilla	Cumple una función estética y climática
		A.1.2	Racionalización	1. Regularización de curvatura a esferas con 3 radios distintos (3, 4.5, 6.4m)	Sólo hay que fabricar 3 tipos de moldes La complejidad geométrica está en la colocación e intersección de piezas regulares
				2. División de la superficie en piezas por seccionado con planos paralelos	Se consiguen piezas similares, con la posibilidad de reutilizar los moldes
		A.1.3	Subdivisión	Las esferas se dividen en piezas iguales de máx. 3x3m	Piezas ligeras, facilidad de montaje
A.2	INGENIERÍA	A.2.1	Materiales	GRG- resistente al fuego, antihongos, resistente a golpes	No es necesario recubrirlo ni protegerlo
		A.2.2	Detalles constructivos	Montaje de GRG: igual que el de la escayola, con elementos estándar de montaje	No son necesarios detalles constructivos especiales para el montaje

B. LÓGICA DE FABRICACIÓN					Implicaciones en el proceso
B.1	PRE- PROCESADO			Tallado en taller de moldes de madera	Los moldes se podrían fabricar por CNC, pero sería más costoso
B.2	PROCESADO	B.2.1	Parámetros materiales	Material aplicado capa a capa a mano sobre moldes	Proceso lento y artesanal
		B.2.2	Parámetros geométricos	Geometrías variables en función del molde Hay que tener en cuenta la posibilidad de desmoldado	El GRG tiene sentido para geometrías singulares
		B.2.3	Parámetros económicos	El material es costoso	Al aplicarlo a mano, es más fácil controlar la cantidad de material utilizado
				La subcontratación de la fabricación CNC de moldes es costosa	Lo ideal sería tener máquinas CNC en fábrica
B.2	PROCESADO	B.2.4	Parámetros de proceso	Aplicación manual de GRG sobre molde, endurecimiento y desmoldado	Es un proceso largo
		POST- PROCESADO			Se realiza el corte a mano de las piezas para conseguir su geometría final con herramientas convencionales: sierra, cuchilla diamantada, o cuchilla metálica
B.3	POST- PROCESADO			El proceso de corte y colocación pieza sin herramientas digitales es lento y complicado, hay que ajustar pieza a pieza	

C. LÓGICA DE LA CONSTRUCCIÓN					Implicaciones en el proceso
C.1	TRANSPORTE Y LOGÍSTICA	C.1.1	Logística	Prefabricación en taller in situ, montaje in situ	no hay limitaciones por transporte
		C.1.2	Condiciones	Traslado de piezas máx. 3x3m	Facilidad de montaje
C.2	MONTAJE Y CONSTRUCCIÓN	C.2.1	Uniones	Sellado de agujeros y juntas con la misma mezcla de yeso utilizada en producción; Vendado y pintura como en un falso techo convencional	Trabajo manual, más inexacto y lento
		C.2.2	Tolerancias	Máxima deformación de material: ± 0.3 mm. para una longitud y altura máximas de 3 metros Deformación en bordes de $\pm 0,2$ mm Deformación en superficie lisa: ± 0.2 mm. en 1m de longitud	Deformación reducida
		C.2.3	Previsión del montaje	Fijación con subestructura de perfiles metálicos de las piezas de GRG a puntos de sujeción en las juntas entre piezas y en puntos intermedios	Facilidad de montaje, sistema estándar económico de montaje

ANÁLISIS

Costes: aunque en este proyecto la información sobre el precio es confidencial, en el caso de GRG la materia prima es un factor determinante que encarece el producto.

Aumento de eficiencia:

- **aplicación de GRG:** en este caso, el GRG se ha aplicado manualmente sobre moldes repetitivos para abaratar, tras lo cual se recortaron las piezas para conseguir la geometría final. El proceso sería más eficiente y exacta si la aplicación del GRG y el corte de piezas a su forma final se hicieran de forma automática.
- **moldes reconfigurables:** para evitar la utilización de moldes repetitivos y generar geometrías personalizadas de forma económica, sería importante evaluar la utilización de moldes reconfigurables para la aplicación de GRG. En el caso del sistema "Betonballon", que se consideró al inicio del proyecto, se utilizan globos como moldes hinchables para la proyección de hormigón en formas esféricas.

CONCLUSIÓN

A diferencia de los ejemplos anteriores, éste es un proyecto singular con geometría compleja basado en la fabricación artesanal, donde el diseño se adapta al método de fabricación, y no a la inversa. Para asegurar una fabricación eficiente y económica, se regularizó la geometría a esferas de 3 radios, y se utilizaron sólo tres moldes para fabricar todas las piezas. En cambio, durante la construcción se tuvieron que recortar manualmente cada una de las piezas a su geometría final y montarlas a su posición exacta, lo cual demandó un montaje complejo y cuidadoso.

La fabricación es artesanal, el montaje es manual (igual al montaje de placas de yeso), y la tecnología utilizada en el proceso global es sencilla (en el diseño y la fabricación se utilizaron planos 2D Autocad, maquetas y tablas de Excel). La prefabricación se basa en piezas sencillas, que no incorporan detalles de colocación. Los remates y acabados se realizan de forma manual por especialista, a diferencia de la fabricación CNC, donde la exactitud en la fabricación facilitar el montaje. Es, por tanto, un proceso híbrido de prefabricación de piezas con un gran nivel de adaptación durante el montaje en obra.

El interés de este proceso está sobre todo en el material utilizado, el GRG, con el que se consiguen piezas con gran rigidez y espesores muy finos. Este producto sería más interesante si se combinara este material con un proceso eficiente de producción y montaje automatizados, y con una mayor flexibilidad geométrica en el diseño.

ILUSTRACIÓN DEL PROCESO

1. OPTIMIZACIÓN Y RACIONALIZACIÓN GEOMÉTRICA

fig.6-67:
Planta en Autocad.

fig.6-68:
Prototipo de una pieza mostrando la
intersección de los volúmenes de las esferas.

2. PREPARACIÓN DEL MODELO PARA FABRICACIÓN

fig.6-69:
Plano 2D con el dibujo de las esferas de 3 radios distintos.

2. opwaartse druk: bubbel ondersteund op 4 hoekpunten – krik op +22mm – 23/08/2011 10h30						
puntnr.	X [m]	Y [m]	Z [m]	Dx [m]	Dy [m]	Dz [m]
1 (top bol)	13,386	84,799	6,388	0,000	-0,002	0,001
2 (top bol)	14,038	85,202	6,390	0,000	0,000	0,002
3 (top bol)	12,941	85,281	6,389	0,000	-0,001	0,000
4 (coupe A hoog)	11,914	86,541	6,118	0,001	-0,002	-0,002
5 (coupe A midden)	10,584	88,460	4,861	0,000	0,000	-0,001
6 (coupe A laag)	9,488	89,202	3,346	0,000	0,000	0,000
7 (coupe B hoog)	16,201	84,961	5,761	0,000	0,000	0,000
8 (coupe B midden)	17,738	85,256	4,792	0,001	-0,001	0,000
9 (coupe B laag)	18,838	85,246	3,502	0,000	-0,001	-0,001
10 (punt op doka-balk)	13,400	84,625	5,043	-0,005	-0,005	-0,003

fig.6-70:
Tabla de Excel mostrando cada esfera según su diámetro y posición.

3. FABRICACIÓN Y PRE-MONTAJE

fig.6-71:
Aplicación manual de GRG sobre moldes de madera en un taller cercano a la obra.

4. MONTAJE

fig.6-72 y fig. 6-73:
Montaje de piezas en obra.

ILUSTRACIÓN DEL PROTOCOLO DE CONEXIÓN

6.4.4 CASO 4: PORSCHE PAVILION

DATOS

- **Fecha de construcción:** 2012
- **Lugar:** Wolfsburg, Alemania
- **Cliente:** Porsche AG & Autostadt GmbH
- **Autores:**
 - arquitectos: HennArchitekten
 - ingeniería: Schlaich Bergermann und Partner
- **Fabricante de la envolvente metálica:** Centralstaal

DESCRIPCIÓN

- **Función del edificio:** pabellón de exposiciones
- **Superficie total:** 1400 m², 400 m² de superficie de exposición
- **Tamaño de cubierta:** voladizo de 26m

DISEÑO

Concepto: el edificio es una escultura de gran dimensión con forma orgánica, inspirada en el movimiento dinámico de un coche.

Concepto original: en origen se previó una estructura metálica tridimensional que implicaba muchas horas de montaje en obra y resultó muy complicada.

Material y acabados: piel continua de acero inoxidable mate.

COMPORTAMIENTO

Estructural: se trata de una estructura monocasco donde la envolvente trabaja en conjunto con una subestructura para dotar de rigidez al conjunto. Se maximiza el tamaño de las piezas de la envolvente y su espesor para aumentar su rigidez. La estructura monocasco permite el voladizo de 26 metros.

fig.6-74, fig. 6-75 y fig. 6-76:
Imágenes del exterior del edificio

fig.6-77:
Dibujos 3d del edificio

PROTOCOLO DE CONEXIÓN : Pabellón Porsche

1.	DISEÑO				Implicaciones en el diseño
1.1	CONCEPTO	1.1.1	Concepto y aspecto	Geometría inspirada en el movimiento dinámico de un coche; Piel suave continua	Geometría curva Continuidad visual entre piezas
		1.1.2	Función	Estructura monocasco	
		1.1.3	Geometría	Escultura de forma orgánica	Geometría compleja
		1.1.4	Material	Acero inoxidable mate	Material visto, sin pintura
		1.1.5	Tamaño	Estructura con voladizo de 26m	Subdivisión en módulos
1.2	COMPORTAMIENTO	1.2.2	Estructural	Estructura monocasco: la envolvente y la estructura funcionan en conjunto	chapa de espesor y tamaño importantes, se minimiza la subestructura
1.3	DISEÑO FABRICACIÓN	1.3.1	Software de diseño	Rhino 3d Análisis estructural: Ansys	
		1.3.2	Optimización del diseño	Nupas Cadmatic: análisis de la envolvente, información sobre el material, calculo de tamaños de chapa, etc.	Software propio, modelo compartido, facilidad para importar/exportar datos
		1.3.3	Exportación	Tablas excel: información de las chapas (peso, tamaño, torsión, material...)	Exportación desde un solo modelo digital a varias células de fabricación
				Dibujos CAD 2D	plantillas para producción, planos para montaje
		1.3.	Análisis de fabricación	previsión de estiramiento de chapa por deformación	Se corta la chapa al tamaño justo antes de deformarla

A. LÓGICA DEL DISEÑO					Implicaciones en el proceso
A.1	OPTIMIZACIÓN RACIONALIZACIÓN	A.1.1	Clasificación (envolvente)	Envolvente con función estructural	Chapas espesas, estructura aligerada
			Clasificación (estructura)	Estructura monocasco, subestructura paralela a envolvente	Permite mayor resistencia estructural y muy grandes luces.
		A.1.2	Racionalización (envolvente)	División de superficie por seccionado	Se divide a envolvente en módulos transportables
			Racionalización (estructura)	Retícula de costillas paralelas a la envolvente	Cortes individuales de estructura
		A.1.3	Subdivisión	La estructura se divide en unos 40 módulos pre-montados; Los módulos centrales están formados por unas 9 chapas deformadas de tamaño aproximado 4x1.5m,soldadas a la subestructura	A mayor tamaño y espesor de chapa, mayor resistencia propia y menor necesidad de puntos de sujeción
A.2	INGENIERÍA	A.2.1	Materiales	Chapas de espesor mayor a 4mm para evitar el estiramiento por deformación	Corte por plasma de chapa metálica de gran espesor Deformación de chapas de gran espesor por prensado

B. LÓGICA DE FABRICACIÓN					Implicaciones en el proceso
B.1	PRE- PROCESADO			Corte por plasma de chapas de acero inoxidable; Corte de perfiles de subestructura;	El corte por plasma permite el corte rápido de chapas de espesores importantes
				Biselado en bordes de chapas para prever las uniones por soldadura	Al biselar los bordes la soldadura queda enrasada
B.2	PROCESADO	B.2.1	Parámetros materiales	Deformación en frío para evitar distorsión del material	Deformación en prensas de gran tamaño
		B.2.2	Parámetros geométricos	Las prensas tienen un ancho de 4m	El máximo tamaño de chapa admisible es de 12x3.5m
		B.2.3	Parámetros económicos	Interesa reducir el tiempo de soldadura	Se maximizan los tamaños de chapa para reducir la soldadura
		B.2.4	Parámetros de proceso	Prensado de chapa: la fabricación se hace chapa a chapa, sin moldes y de forma individual	No es necesaria la repetición geométrica
				Las chapas se cortan con la geometría exacta para el montaje, y no se ajustan después	Es necesario prever la deformación por prensado en el diseño inicial
B.3	POST- PROCESADO			El material viene en acabado mate de fábrica Tras el montaje, se sueldan y se da un granallado en las conexiones	Hacen falta montadores especializados para disimular las juntas

C. LÓGICA DE LA CONSTRUCCIÓN					Implicaciones en el proceso
C.1	TRANSPORTE Y LOGÍSTICA	C.1.1	Logística	Distancia de fábrica a obra = 350 km Transporte en camión	Previsión de tamaños máximos admisibles en el camión
C.1	MONTAJE Y CONSTRUCCIÓN	C.2.1	Diseño de uniones	Unión de módulos in situ por soldadura, se da un acabado a las juntas	Hacen falta montadores especializados para disimular las juntas
		C.2.3	Previsión del montaje	Módulos pre-montados en taller de tamaño aprox. 6x3m La estructura de los módulos se suelda en fábrica, y la chapa se suelda a la subestructura en fábrica	La mayor parte de soldadura se hace en taller, de forma controlada
				Los módulos se transportan a obra y se sueldan entre sí	Previsión del transporte desde taller y del montaje por grúas en obra

ANÁLISIS

Plazos del proyecto

En este proyecto, se partió de un primer concepto que no funcionó. Con el diseño definitivo, el fabricante, *Centralstaal*, siguió las siguientes fases desde el diseño al montaje:

- Consultoría y apoyo técnico en la fase del diseño.
- Importación del diseño a software propio (*Nupas Cadmatic*).
- Preparación del modelo en el software propio: se integran todos los detalles en el modelo (cálculos estructurales, análisis de la envolvente 3D, importación de los tamaños de chapa existentes en los proveedores, especificaciones de material, simulación del estiramiento durante la producción, proyección en 2D para la producción, etc.); tras lo cual se congela el modelo. Es la fase más lenta y compleja.
- Fabricación de un prototipo: esta fase varía el cliente, hasta que éste valida el concepto.
- Fabricación: desde que el modelo está congelado esta fase puede durar unos 2-3 días.
- Pre-montaje y montaje: son fases lentas debido a la realización de soldaduras por un equipo especializado en fábrica y en obra.

COSTES

La estructura metálica costó unos 8 millones de euros para el edificio completo, montado y acabado (aprox. 2200 €/m^2)¹²⁶. Un factor importante que influye en el coste es la realización de soldaduras por especialistas.

CONCLUSIÓN

Tanto el concepto como el desarrollo de este proyecto se basan fundamentalmente en el carácter estructural de la estructura monocasco. En estos casos, conviene que las chapas de la envolvente tengan un espesor importante para optimizar su aporte estructural y poder reducir la subestructura. Se maximiza el tamaño de chapas para optimizar la estructura y minimizar las soldaduras, que encarecen de forma importante el proceso. Estos factores influyen en el despiece y la fabricación de los componentes.

En este caso, las estructuras monocasco tienen beneficios evidentes comparados con estructuras tradicionales, dado que son estructuras relativamente esbeltas y además, el tiempo de montaje se acorta por la prefabricación modular. Según Wybren Terpstra, director creativo y jefe de ventas en *Centralstaal*, siguiendo este método de fabricación el precio de la envolvente no difiere mucho del de una estructura de hormigón armado.

¹²⁶ Información recabada en la visita a la fábrica de *Centralstaal*.

ILUSTRACIÓN DEL PROCESO

1. OPTIMIZACIÓN Y RACIONALIZACIÓN GEOMÉTRICA

fig.6-78:
Dibujo de concepto del edificio: forma dinámica inspirada en el movimiento de un coche.

fig.6-79:
Racionalización: subdivisión en piezas de menor tamaño.

fig.6-80:
Optimización: análisis estructural.

fig.6-81 y fig. 6-82:
Modelo 3d en Nupac Cadmatic, con detalle de elementos estructurales.

2. PREPARACIÓN DEL MODELO PARA FABRICACIÓN

fig.6-83:
Dibujos de construcción con la subdivisión de la envolvente.

fig.6-84:
Dibujos de fabricación: estructura.

3. FABRICACIÓN

3.1. Estructura

fig.6-85 y fig. 6-86:
Corte de las costillas estructurales por arco de plasma.

fig.6-87:
Montaje de la estructura en taller.

32. Envoltente

fig.6-88:
Deformación de chapa de la envoltente.

fig.6-89:
Deformación de chapa de la envoltente.

fig.6-90:
Soldadura de las chapas deformadas sobre la estructura en taller.

4. PRE-MONTAJE Y MONTAJE

fig.6-91:
Soldadura de las chapas deformadas sobre la estructura en taller.

fig.6-92:
Montaje de la estructura en taller.

fig.6-93, fig.6-94 Y fig.6-95:
Montaje de la estructura en obra.

ILUSTRACIÓN DEL PROTOCOLO DE CONEXIÓN

6.5 EL MONTAJE ROBOTIZADO

ESTUDIO DE CASO PARTICULAR

El montaje robotizado en la arquitectura es el tema principal de la investigación que se lleva a cabo en el *Laboratorio de Fabricación Robotizada*, dirigido por los profesores Gramazio y Kohler, de la ETH de Zúrich.

En los primeros proyectos desarrollados por este laboratorio, unos brazos robotizados colocaban ladrillos unos sobre otros de forma milimétrica, formando paredes ondulantes¹²⁷ y fachadas prefabricadas en edificios¹²⁸. Esta última investigación derivó en un proyecto de colaboración con la industria *Keller Systeme AG*, que proponía entre sus servicios el montaje robotizado de fachadas de ladrillo en edificios. Algunos otros proyectos de este laboratorio de investigación se explican en el capítulo 5.6.1.

En paralelo, este laboratorio de la ETH de Zúrich comenzó a fabricar estructuras y pabellones con pequeñas piezas de madera. A diferencia de la fabricación CNC tradicional en madera descrita en el capítulo 0, la filosofía de estos proyectos se basa en los siguientes principios:

- se utilizan pequeñas piezas de madera con poca sección, en lugar de grandes piezas costosas de madera de alta calidad para conseguir un óptimo aprovechamiento del material bruto;
- se utilizan piezas de madera cortas, que resultan más económicas;
- se evita la necesidad de curvado, laminado, y fresado de madera, que son procesos lentos y costosos.

Las primeras construcciones realizadas con esta técnica en madera (*“the Sequential Wall”* 2008 (Gramazio & Kohler), *“the Sequential Structure”* 2010) se basaron en la superposición de piezas encoladas y clavadas. Sin embargo, el apilamiento de estos elementos por sus superficies planas limita la libertad geométrica en tres dimensiones. Para realizar estructuras tridimensionales en madera con montaje robotizado, fue necesario investigar otros tipos de conexión.

En 2012, la ETH de Zúrich comienza un proyecto de investigación sobre el montaje robotizado de estructuras tridimensionales de madera en colaboración con la *Berner Fachhochschule* (BFH), llamado: *Additive Robotic*

fig. 6-96:
The Programmed Wall (Gramazio
Kohler Research, ETH Zurich;
2006)

fig. 6-97:
The Sequential Wall 2 (Gramazio
Kohler Research, ETH Zurich; 2008)

fig. 6-98y fig. 6-99:
The Stacked Pavilion (Gramazio
Kohler Research, ETH Zurich;
2009)

¹²⁷ Algunos de los proyectos realizados mediante esta técnica se llamaban *“Structural oscillations”*, realizado en 2008, y *“Pike Loop”*, realizado en 2009.

¹²⁸ Con esta técnica se construyeron las fachadas de los proyectos para la bodega *Gantenbein*(2005), *Flex Brick* (2010), y la sede de la industria *Keller Systeme AG*(2012).

fig. 6-100
Complex Timber Structures
(Gramazio Kohler Research, ETH
Zurich; 2013-actual); prototipo 1.

fig. 6-101
Complex Timber Structures 2
(Gramazio Kohler Research, ETH
Zurich; 2013-actual); prototipo 2.

fig. 6-102y fig. 6-103
Complex Timber Structures
(Gramazio Kohler Research, ETH
Zurich; 2013-actual); prototipo 3.

*Fabrication of Complex Timber Structures, Zürich, NRP 66 Research Project 2012-2017.*¹²⁹

En este proyecto se exploran los siguientes aspectos:

- la realización de estructuras tridimensionales;
- la realización de conexiones tradicionales en madera por un robot;
- la conexión entre piezas de madera mediante distintos métodos: encolado, clavado, conexión con varillas roscadas o con chapas metálicas, etc.;
- las limitaciones del robot en operaciones de montaje (limitación geométrica por el alcance del robot, previsión de tolerancias por la inexactitud en el montaje, la posibilidad de colisiones, etc.).
- la posibilidad de combinar el robot con otras máquinas (sierra, centros de maquinado CNC) en una misma línea de trabajo.

Se realizaron varios prototipos con distintas geometrías (figuras 6.90 a 6.93), y se realizaron ensayos mecánicos y de uniones entre piezas de madera en la BFH. Los primeros prototipos se basan en el sistema *Zollinger*, una estructura auto portante inventada por F. Zollinger en 1906. En este tipo de estructura, el tipo de conexiones con nudos excéntricos facilita la realización por un robot, dado que la geometría excéntrica del nudo evita posibles colisiones y facilita la manipulación de las piezas por el robot.

La investigación en este proyecto se centra en gran parte en las conexiones entre piezas: se buscan conexiones eficientes, resistentes y factibles por el robot, que a su vez ofrezcan la mayor libertad geométrica posible. Además, se realizan pruebas mecánicas para comprobar la resistencia de las conexiones. Finalmente, se evalúan las limitaciones del robot, como la falta de sensibilidad para evitar colisiones (por ejemplo la capacidad de no cortarse a sí mismo), o la capacidad de aprendizaje para rectificar de una operación a la siguiente. Para incorporar un proceso de aprendizaje propio y la capacidad de reacción y rectificación por el robot, es necesario añadir más pasos al proceso, como por ejemplo el control de calidad con fotografías o sensores 3d.

Por otro lado, las grandes ventajas de la fabricación robotizada respecto de la fabricación humana son el posicionamiento complejo de las piezas en infinitas posiciones con exactitud, además de su rapidez y fuerza.

En el año 2010, comienza el desarrollo de un nuevo pabellón en el campus de la ETH de Zürich, el pabellón *Arch_Tec_Lab*. Este proyecto supone un enorme avance en la investigación sobre el montaje robotizado, dado que la

¹²⁹ La información recabada sobre este proyecto se basa en la estancia realizada en la Berner Fachhochschule en los años 2013 y 2014. Es un proyecto de investigación realizado por la ETH de Zürich (ETHZ) en colaboración con la Berner Fachhochschule (BFH), cuyo responsable es Matthias Kohler (ETHZ), en colaboración con Fabio Gramazio (ETHZ), Eduard Bachmann (BFH), Christophe Sigrist (BFH), Volker Helm (ETHZ), Michael Knauss (ETHZ), Thomas Kohlhammer (ETHZ), Stefan Sitzmann (BFH) y Peter Zock (BFH).

cubierta del pabellón, consistente en 168 cerchas de madera de gran tamaño, se fabrica con un pórtico robotizado. El proyecto es una referencia para la investigación académica sobre fabricación digital.

Tras un concurso de constructoras, se decide hacer la fabricación en la industria *Erne Holzbau*. Durante la visita a la fábrica de *Erne Holzbau* en Stein en abril del 2013, parte de esta estructura se encontraba en fabricación. Como se ha visto en el capítulo 5.6.2, el pórtico robotizado realiza distintas operaciones en línea e incorpora operaciones de control de calidad en el proceso. Además, el modelo 3d del diseño se corrige y retroalimenta a partir de los conflictos e inexactitudes durante la fabricación.

A continuación, se expone el estudio de caso del edificio *ITA Dach*, junto con el análisis del proceso que se llevó a cabo en el proyecto.

6.5.1 CASO 5: ITA DACH

DATOS

- **Fecha del proyecto:** 2010-2016
- **Fecha de la construcción:** Febrero 2015 - Octubre 2015
- **Lugar:** edificio HIB, campus de la ETH de Zúrich, Höggerberg, Zúrich, Suiza
- **Promotor:** ETH de Zúrich.
- **Autores:**
 - Diseño y coordinación: Arch-Tec-Lab AG, ETH de Zúrich.
 - Consultoría: Participación de distintas unidades de la ETH: unidad de Arquitectura, Física y Acústica, Tecnología y Procesos de la construcción, Fabricación robotizada, Diseño Paramétrico.
 - Ingeniería: unidades de Estructuras y Eficiencia energética la ETH de Zúrich.
- **Fabricante:** ERNE AG Holzbau.

fig.6-104:
ITA Dach: imagen del exterior.

DESCRIPCIÓN

- **Función del edificio:** edificio de 2 plantas consistente en un laboratorio de fabricación robotizada en la planta inferior, con robots colgados del techo; y oficinas y talleres en la planta superior. El edificio se construye sobre un parking existente.
- **Tamaño de cubierta:** 2.308 m². La estructura ligera de la cubierta se fabrica completamente por un pórtico robotizado.

fig.6-105y fig. 6-106:
ITA Dach: imágenes del interior.

DISEÑO

Concepto: estructura tridimensional de grandes dimensiones ensamblada por un pórtico robotizado, a partir de la superposición de piezas de pequeño tamaño clavadas entre sí.

Geometría: estructura ondulante formada por cerchas yuxtapuestas.

Material: listones de madera de pino de pequeño tamaño. Aprovechamiento máximo de la materia prima al utilizar piezas de dimensión reducida.

Elementos: 168 cerchas de madera; con 23 cerchas se fabrica un módulo, que se transporta desde la fábrica y se monta en obra.

Elementos totales: 48.624 listones de longitud máxima 3.10m; 65,000 nudos de conexión y 820.000 clavos.

fig.6-107:
Dibujos del concepto.

COMPORTAMIENTO

Instalaciones: las instalaciones están integradas en la estructura tridimensional de madera (sistema de extinción de incendios, iluminación natural y artificial).

Estructural: la estructura apoya sobre los 12 pilares dobles del parking subterráneo, por lo que debe ser lo más ligera posible. Se levantan pilares dobles sobre los pilares existentes, sobre los pilares dobles apoyan vigas metálicas, y sobre éstas apoyan cerchas de madera de luces de 15m.

En las estructuras tradicionales en madera, la estructura se realiza generalmente con pocos elementos de gran tamaño; en este caso, la intención es conseguir la máxima rigidez con muchas piezas de pequeño tamaño. Además, de esta forma se aprovecha al máximo el material y se reduce el desperdicio.

A pesar de que el concepto inicial eran conexiones encoladas, finalmente las uniones entre los listones se realizaron con clavos, porque el constructor daba garantías únicamente sobre este tipo de conexión; esto se debe a que la presión necesaria para la unión encolada es difícil de conseguir con el pórtico robotizado. Además, el clavado automático es un proceso que ya existe en la industria, mientras que el de encolado es aún experimental.

Para obtener el aval técnico necesario, hubo que validar el método de cálculo y el tipo de unión mediante un test de resistencia¹³⁰. Las primeras 15 cerchas se prefabricaron y comprobaron mecánicamente en la BFH antes de colocarse en obra, tras lo cual empezó la fabricación del resto de las cerchas.

Energético: en origen se preveía una cubierta verde, que se eliminó por suponer una carga excesiva. Sobre la estructura se coloca directamente la lámina de impermeabilización.

¹³⁰ Este test consiste en la realización de test mecánicos sobre conexiones realizadas con distintos ángulos, con clavos colocados a distintos ángulos, etc.

PROTOCOLO DE CONEXIÓN : ITA Dach

1.	DISEÑO				Implicaciones en el diseño	
1.1	CONCEPTO	1.1.1	Concepto y aspecto	Pabellón sobre estructura existente, cubierta ligera	Apoyo en pilares existentes, grandes luces	
		1.1.2	Función	Estructura de grandes luces	Se resuelve con cerchas	
		1.1.3	Geometría	Cerchas curvilíneas a partir de elementos rectos	Se utilizan elementos cortos para conseguir el efecto curvo	
		1.1.4	Material y acabados	listones de madera de pino de longitud máxima 3m		
		1.1.5	Tamaño	80m x 28m (2.308 m2)	Subdivisión de la estructura en módulos para el transporte	
1.2	COMPORTAMIENTO	1.2.1	Energético	Instalaciones integradas en la estructura: protección contra incendios, iluminación, etc.	Se diseña un espacio intersticial en la estructura que contiene las instalaciones	
		1.2.2	Estructural	La estructura apoya sobre 12 pilares existentes, colocados cada 15 metros. Concepto estructural: estructura de gran tamaño a partir de piezas pequeñas	La estructura se resuelve con cerchas de grandes luces (15m), Se presta especial atención a la conexión entre las piezas.	
1.3	DISEÑO FABRICACIÓN	A	1.3.1	Software de diseño	Diseño paramétrico con Rhino	Adaptación a las condiciones particulares: tubos de extracción, lucernarios, instalaciones, etc.
			1.3.2	Análisis del diseño	Se define automáticamente el número de clavos por conexión, que luego se simula estructuralmente.	Si el resultado del análisis es negativo se cambia el modelo (proceso iterativo)
			1.3.4	Análisis de fabricación	Es una estructura única	Es necesaria la realización de test mecánicos

A. LÓGICA DEL DISEÑO					Implicaciones en el proceso	
A.1	OPTIMIZACIÓN RACIONALIZACIÓN	Y	A.1.1	Clasificación (estructura)	Estructura paralela a la envolvente	
			A.1.2	Racionalización (estructura)	Cerchas ondulantes compuestas por elementos cortos	El diseño se basa en las cerchas tradicionales con diagonales, pero con elementos cortos
			A.1.3	Subdivisión (estructura)	División de la estructura en 168 cerchas de 15m de largo x 115cm de alto, compuestas de 23 capas cada una	Es necesario diseñar las conexiones una a una para lograr una estructura rígida.
A.2	INGENIERÍA		A.2.1	Materiales	3% dilatación por humedad de la madera.	Deben preverse tolerancias por la dilatación de la madera
			A.2.3	Conexiones	Superposición de capas que funcionan en un conjunto como estructura ligera	Es necesario asegurar un tipo de conexión que asegure rigidez.
					Uniones clavadas en lugar de encoladas	Proceso existente en la industria y probado

B. LÓGICA DE FABRICACIÓN					Implicaciones en el proceso
B.1	PRE- PROCESADO			Corte de los listones con una sierra. Si hay ángulos complejos, el corte lo hace el robot después de la colocación	Se incluye una sierra en la línea de fabricación
				Se colocan los componentes en su posición, colocando 2 clavos en los extremos	Colocación por el robot a su posición exacta
B.2	PROCESADO	B.2.1	Parámetros materiales	Deformación en frío para evitar distorsión del material	Deformación en prensas de gran tamaño
		B.2.2	Parámetros geométricos	Se utilizan piezas de tamaño manejable por un robot, se diseñan geometrías que el robot puede posicionar	Piezas cortas y ligeras (longitud máxima de 3.10 metros)
		B.2.4	Parámetros de proceso	Se realiza el cambio de cabezal entre operaciones de distintos tipo. Los remates y cortes especiales se hacen con una sierra acoplada al robot	Se diseñan cabezales especiales en función de las operaciones que se deban realizar : un cabezal con una sierra
				Montaje de piezas: colocación de todos los clavos	Se diseña un cabezal de clavado
B.3	POST- PROCESADO			Control de calidad: se filma el resultado con una cámara, se compara el resultado con el modelo 3d	A partir de la comparación, se calibración de forma automática el modelo 3d para continuar con un diseño ajustado

C. LÓGICA DE LA CONSTRUCCIÓN					Implicaciones en el proceso	
C.1	TRANSPORTE LOGÍSTICA	Y	C.1.1	Logística	60 km, transporte en camión	Comprobación de límite de tamaños admisibles por el camión para definir el tamaño de módulos pre-montados
			C.2.2	Montaje de módulos	Montaje de los módulos en obra	Montaje por grúas
C.2	MONTAJE CONSTRUCCIÓN	Y	C.2.2	Tolerancias	Tolerancia de 15-20mm entre piezas para prever movimientos en la madera por cambios de humedad	

ANÁLISIS

El edificio es extraordinariamente innovador en muchos campos, tanto por el proceso como por el concepto:

- **Proceso de diseño colaborativo**

Se trata de un ejemplo de colaboración muy positiva entre expertos de distintas disciplinas de la ETH de Zúrich. Además, los diseñadores del proyecto estaban estrechamente conectados con el proceso de producción, y disponían de una amplia experiencia gracias a su investigación sobre montaje robotizado. Por estos dos factores, el diseño se facilita enormemente, y esto no hace sino confirmar la necesidad de consciencia por parte del diseñador del proceso de fabricación del edificio.

- **Estructura**

Se propone un concepto alternativo a las estructuras tradicionales de grandes luces en madera. En lugar de piezas de madera noble de gran tamaño, se utilizan piezas cortas de madera común, lo cual permite utilizar un material más económico y aprovechar mejor el material.

- **Proceso**

Se desafía la lógica tradicional de construcción. Tradicionalmente, primero se diseña, luego se calcula, se fabrica, y finalmente se construye; sin existir posibilidad de reacción desde las fases últimas a la fase de diseño. En este caso, el diseño está directamente alimentado por los criterios y detalles de la fabricación, como por ejemplo:

- parámetros de fabricación: se tienen en cuenta los tamaños de componentes que son manejables por un robot;
- parámetros estructurales, como cuánta superficie debe solaparse en las piezas para garantizar una conexión rígida;
- parámetros de transporte, como la división de la cubierta en módulos de tamaño transportable en camión;
- parámetros de montaje, como la tolerancia necesaria para asegurar la dilatación de la madera;
- parámetros de construcción, como la variación de la geometría para dejar espacio para instalaciones, lucernarios y condiciones particulares en obra.

El diseño global, que tiene en cuenta todos estos parámetros, se realiza de forma paramétrica.

- **Maquinaria:**

Como se ha explicado en el capítulo 5.6.2., la utilización del pórtico robotizado permite combinar distintas operaciones con una sola máquina, y la máquina participa en el proceso de forma inteligente. El proceso de fabricación se retroalimenta, es decir que las desviaciones ocurridas en la fabricación y montaje se rectifican de forma dinámica durante el proceso productivo.

En el pórtico robotizado, es posible incorporar cabezales diseñados y fabricados para un proceso en particular, con un coste relativamente económico. Esto significa que tanto el diseño arquitectónico como su fabricación se pueden personalizar, ya que en función del diseño se puede diseñar y fabricar un cabezal a su medida. Con este sistema, la reflexión supera el ámbito del diseño arquitectónico y abarca el diseño de la producción.

- **Personalización en masa**

Con esta máquina, no sólo se fabrican piezas únicas, sino que éstas también se montan; es decir, se combina la fabricación personalizada de componentes con el montaje personalizado a gran escala. La personalización en masa abarca tanto la fabricación como la construcción personalizada.

Por otro lado, es importante tener en cuenta el potencial y las limitaciones en la fabricación con robots: los robots pueden colocar piezas de forma extremadamente precisa, pero manejan piezas de tamaños y pesos limitados. El diseño del *ITA Dach* se basa de forma casi literal en el potencial y las limitaciones del robot; a medida que la maquinaria progresa, será posible realizar un abanico enorme de diseños.

En opinión de la autora, éste es el proyecto que representa de forma más "literal" la personalización en masa, dado que combina la personalización en masa en la fabricación de piezas con la personalización en masa en los procesos productivos.

Dado que el *ITA Dach* es el primer edificio realizado con este sistema, el potencial del montaje robotizado a gran escala se demostrará en un futuro.

ILUSTRACIÓN DEL PROCESO

1. OPTIMIZACIÓN Y RACIONALIZACIÓN GEOMÉTRICA

fig.6-108:
Diseño de la estructura.

fig.6-109:
Optimización de la estructura: diseño de uniones clavadas.

2. PREPARACIÓN DEL MODELO PARA FABRICACIÓN

fig.6-110
Esquema del proceso de fabricación por el pórtico robotizado.

fig.6-111
Fabricación en el pórtico robotizado.

3. FABRICACIÓN

fig.6-112
Fabricación: corte de tabla con sierra.

fig.6-113
Fabricación: colocación de tabla en su posición.

fig.6-114
Fabricación: cabezal de clavado.

fig.6-115
Fabricación: clavado de las uniones entre tablas.

4. MONTAJE

fig.6-116:
Desplazamiento de la cercha terminada.

fig.6-117:
Realización de ensayos estructurales de las cerchas en la BFH.

fig.6-118:
Transporte desde la fábrica a obra.

fig.6-119:
Montaje de las cerchas en obra

fig.6-120:
Montaje de las cerchas en obra

fig.6-121:
Montaje de las cerchas en obra

ILUSTRACIÓN DEL PROTOCOLO DE CONEXIÓN

7 CONCLUSIONES Y DESARROLLO FUTURO

A lo largo de esta tesis se ha mostrado el estado de arte sobre la personalización en masa en la arquitectura, alimentado por la realización de visitas a industrias de fabricación personalizada.

En este recorrido, se ha explorado la influencia de la singularidad del diseño en el proceso productivo, y determinado el potencial y limitaciones para la personalización generalizada de cada proceso de prefabricación, buscando vías de mejora para favorecerla.

Se establecen una serie de conclusiones organizadas en varios temas:

1. DEFINICIÓN DE LA PERSONALIZACIÓN EN MASA EN LA ARQUITECTURA

Como se ha visto en el capítulo 3.1. , la *personalización generalizada* o *personalización en masa* la industria se basa en la combinación de una producción eficiente de grandes volúmenes con una personalización que responda a las necesidades de cada cliente (Vilana Arto, 2006).

Aplicada al campo de la arquitectura, la *personalización generalizada* se puede definir como **“la capacidad de la industria del prefabricado arquitectónico en producir componentes personalizados para edificios con la misma eficiencia que componentes estandarizados, teniendo en cuenta las implicaciones de la personalización en el proceso constructivo completo del edificio”**.

Esta definición, al contrario de aplicarse de forma aislada a la fabricación de un componente individual, considera la interacción de éste con el resto de componentes del edificio, fabricados con distintas técnicas y por distintos fabricantes; y al contrario de aislar el proceso productivo, considera que éste se ve afectado por el proceso constructivo global del edificio, desde el diseño hasta el montaje.

Esto se debe a que, en el coste del componente prefabricado singular, y por ende del edificio singular, repercuten todas las fases del proceso constructivo: desde su diseño por consultores especializados, hasta su montaje con sistemas singulares. Es más, para reducir costes y tener mayor control en la construcción, muchos fabricantes, más que proporcionar componentes individuales, proporcionan servicios integrales de fabricación y construcción, sistemas constructivos completos y módulos pre-montados en taller que transportan y montan en obra.

Si bien es cierto que para algunas máquinas de fabricación CNC es igual de fácil producir elementos singulares que repetitivos, el proceso que rodea la fabricación (programación y preparación de la máquina, traslado de componentes, diseño y fabricación de sistemas de montaje singulares, diseño y fabricación de moldes, etc.) se complica cuanto más complejo es el diseño. En la mayoría de casos, teniendo en cuenta este proceso global, no es posible producir componentes personalizados con la misma eficiencia que componentes estandarizados.

Basada en esta definición, a día de hoy la personalización en masa no es un concepto generalizado en la arquitectura.

Como se ha visto en las visitas realizadas a las industrias, la mayoría de procesos ofrecen buenas posibilidades de personalización, pero éstas a menudo no van acompañadas por la producción de grandes volúmenes. Por otro lado, en las industrias enfocadas a la producción en masa, la singularidad en el diseño complica, alarga y encarece cada paso del proceso productivo.

Por otro lado, existen algunos procesos de fabricación y algunas industrias que se acercan a este concepto:

- En *Centralstaal*, fabricante de barcos y de edificios singulares con chapas metálicas, la fabricación personalizada es la base del proceso de fabricación. La deformación de chapa por estampación no diferencia entre componentes iguales o distintos, y cada proyecto se desarrolla caso a caso con un modelo BIM compartido entre los arquitectos, ingenieros y fabricantes. Sin embargo, la producción de *Centralstaal* se enfoca en proyectos singulares e icónicos, distantes de la arquitectura común en metal.
- En el ámbito académico, algunos grupos de investigación experimentan con el diseño y fabricación CNC; en estos casos, la proximidad o coincidencia entre el diseñador y el fabricante facilita la continuidad del proceso digital y la integración del conocimiento de fabricación en el diseño.
Un caso particularmente interesante es el proyecto *Ita Dach*, desarrollado por la Unidad de Diseño Robotizado de la ETH de Zúrich, por ser la primera realización de un edificio por montaje robotizado. La fabricación con pórtico robotizado de gran tamaño permite no sólo la personalización de componentes, sino también la personalización de los medios de producción: los cabezales de la máquina se diseñan para cada proceso, lo cual extiende la reflexión desde el diseño arquitectónico al diseño de procesos.
- De las industrias analizadas, las que más se acercan a la personalización en masa son fabricantes como *Zahner*, productor de envolventes metálicas, o *KLH*, productor de paneles contralaminados en madera. Ambos fabricantes han desarrollado sistemas de fachada que combinan la posibilidad de personalización del diseño con la producción en masa.
En estos dos casos, la personalización de paneles resulta eficiente para grandes volúmenes porque está acotada por el fabricante hasta límites manejables. Además, éstos se montan fácilmente en obra bien con sistemas estándar bien con sistemas personalizables homologados, que aseguran un montaje sencillo y fiable sin necesidad de realizar pruebas adicionales.
En otras palabras, para aunar singularidad y volumen de producción es necesario cierto grado de estandarización.

2. OPORTUNIDADES Y RETOS PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA

La fabricación digital personalizada en la arquitectura es un campo en constante evolución.

En este momento, se ha encontrado que las siguientes líneas tienen potencial para la personalización generalizada en la arquitectura:

- la flexibilización de procesos por las industrias de prefabricado;
- la colaboración entre los arquitectos y los fabricantes para el diseño de sistemas de fabricación flexibles y eficientes.
- la colaboración entre la industria y el ámbito universitario, así como el aumento de escala en la exploración universitaria sobre procesos digitales;

Se han identificado los siguientes retos para la personalización en masa:

- **En la fase del diseño:**
 - Transferencia de suficiente información sobre fabricación desde las industrias a los arquitectos.
 - Incorporación del fabricante en las fases tempranas del proyecto y desarrollo colaborativo de proyectos de forma colaborativa.
 - Integración de los parámetros de fabricación en el diseño, y de los criterios sobre montaje.
- **En la fase de la fabricación y construcción:**
 - Conexión entre el diseño y la fabricación digital, teniendo en cuenta la conversión de las geometrías a los lenguajes de fabricación.
 - Digitalización y flexibilización de los procesos de fabricación, y conexión automática entre maquinaria.
 - Necesidad de supervisión, control de calidad, y realización de pruebas, ensayos y comprobaciones para conseguir la aprobación u homologación de productos personalizados.
 - Distribución de responsabilidades en el proceso de construcción basado en modelos digitales compartidos.

Para resolver estos problemas, a menudo es el fabricante quien toma las riendas del proceso, desarrollando su propio software colaborativo o controlando el modelo digital. Las nuevas técnicas digitales de diseño y fabricación en la arquitectura dan al arquitecto la oportunidad de acercarse de nuevo a la producción, y también le presentan el desafío de tomar el control de los nuevos procesos de construcción.

3. CRITERIOS PARA LA PERSONALIZACIÓN EN MASA

Se identifican los siguientes criterios para facilitar la fabricación personalizada en la arquitectura:

- **Una comunicación eficiente entre diseñador y fabricante** y un proceso de diseño colaborativo: el fabricante debe comunicar claramente los parámetros o criterios que el diseñador deba incluir en el diseño, y los límites dentro de los cuales éste debe moverse para asegurar una fabricación eficiente.
- **Un proceso digital completo**, basado en herramientas digitales utilizadas en el diseño, la fabricación y la comunicación. La automatización de los sistemas de producción es clave para que éstos puedan ser programados para la producción individual, para que las distintas máquinas se puedan comunicar y para que éstas se retroalimenten de sus propios errores.
- **El diseño para fabricación**: en la prefabricación arquitectónica, el diseño se congela en un modelo final que se envía a fabricación, lo cual no permite rectificaciones o cambios en fases posteriores. El diseño arquitectónico debe incorporar detalles que aseguren la fabricación, el transporte y el montaje en obra sin errores, por lo que la complejidad de las fases posteriores se traslada a la fase de diseño.
- **El conocimiento global del proceso**: para asegurar el diseño integral, es necesario que el arquitecto sea consciente de las implicaciones de las decisiones de diseño en todo el proceso del proyecto. Para ello, es fundamental formar a los arquitectos sobre los métodos contemporáneos de construcción e industrialización.

Para cada proceso de fabricación, es posible identificar criterios particulares que faciliten la personalización del producto de forma eficiente: en las visitas realizadas, se han podido extraer criterios que pueden agilizar enormemente el proceso si son incorporados a tiempo en el diseño. Por otro lado, aunque es sencillo identificar conceptos de cada proceso, resulta complicado extraer parámetros cuantificables, y a menudo son los criterios sencillos y el sentido común (como el aprovechamiento adecuado del material) los que marcan una diferencia en la eficiencia del proceso.

La prefabricación de componentes singulares todavía es, a día de hoy, un concepto novedoso tanto para muchos arquitectos como para muchos fabricantes. Hasta ahora los proyectos, y a menudo también los componentes singulares, se resuelven caso a caso, mediante la consideración de datos técnicos y detallados sobre la fabricación.

Durante el desarrollo de la tesis, se han visitado una serie de industrias de fabricación personalizada, con el objetivo de entender la conexión real entre el ámbito de la fabricación y el de los arquitectos. A diferencia de los procesos académicos, donde el diseñador y el fabricante son la misma persona, en el ámbito de la edificación el arquitecto se encuentra distanciado y a menudo desinformado de los procesos de fabricación.

Durante el trabajo de investigación, la exploración de esta “tierra de nadie” a la que los arquitectos no solemos aventurarnos, ha traído consigo el mayor descubrimiento de la tesis: el enorme enriquecimiento que supone para un arquitecto el visitar las fábricas e impregnarse del entorno de fabricación. Además, los fabricantes han demostrado estar deseosos de compartir su experiencia e ideas para estrechar la colaboración con los arquitectos.

Para alcanzar la personalización en masa, la producción personalizada debe alcanzar grandes volúmenes y estar al alcance de cada arquitecto. Aunque deba armarse con conocimiento y criterios de fabricación contemporánea, cada arquitecto difícilmente puede ser un experto en producción, ni para uno y menos para todos los métodos de producción; el reto está en encontrar un término medio en el detalle de conocimiento del arquitecto y la implicación de éste en el proceso de diseño a fabricación.

En este proceso:

- siguen siendo necesaria la conversación y comunicación estrechas entre diseñador y fabricante, verdadero experto en su proceso y producto;
- es necesario que el proceso de conexión de diseño con fabricación sea sistematizado, aplicable a múltiples proyectos y con un nivel de detalle comprensible.

Por tanto, **se identifica la necesidad para los arquitectos de profundizar su conocimiento sobre la industrialización contemporánea en la arquitectura, basado en la transferencia de conocimiento desde las industrias.**

En esta tesis, se ha definido una base para protocolo de conexión entre diseño e industria, consistente en una secuencia de etapas que guían el proceso de diseño para la fabricación personalizada.

Para sistematizar la conexión entre el diseño y la fabricación, se identifica el potencial para una plataforma de conexión entre diseño e industria, consistente en una interfaz dinámica donde los fabricantes puedan comunicar sus parámetros y criterios, y donde diseñador y fabricante puedan alimentarse mutuamente en el proceso de fabricación personalizada. Esta interfaz podría situarse en un entorno BIM.

8 BIBLIOGRAFÍA

8.1 LIBROS Y PUBLICACIONES

(1): libro referenciado

(2): libro consultado

(Aicher et al, 2011)	Lattke, F. & Aicher, F. 2011. The tectonics of timber architecture in the digital age. Building with Timber Paths into the Future. Prestel Verlag, Munich, Alemania, pp. 56-63.	(2)
(Anderson, 2008)	Anderson, D. M., 2008. Build-to-order and mass customization: the ultimate supply chain management and lean manufacturing strategy for low-cost on-demand production without forecasts or inventory. Cambria, Calif.: CIM Press.	(1)
(Banham 1980)	Banham, Reyner. 1980, ©1960. Theory and Design in the First Machine Age. Cambridge, Mass.: MIT Press.	(2)
(Beorkrem, 2013)	Beorkrem, Christopher. 2013. Material Strategies in Digital Fabrication. New York: Routledge, Taylor & Francis Group.	(2)
(Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002)	Boothroyd, Geoffrey, Dewhurst, Peter y Knight, Winston A. 2002. Product Design for Manufacture and Assembly. New York : Marcel Dekker.	(1)
(Borrego, 2010)	Borrego, Ignacio. 2010. Optimizar la producción: material y herramienta. En A.A. Ribot (Ed). CoLaboratorio 10/11. (pp. 8-10)Madrid : Mairela Libros.	(1)
(Brell-Çokcan y Braumann, 2011)	Brell-Çokcan, Sigrid y Braumann, Johannes. 2011. Computer Numeric Controlled Manufacturing for Freeform Surfaces in Architecture. En A.A. Kuhlmann, Dörte. 2011. Emotion in Architecture. (pp. 20-25) Viena: Luftschacht.	
(Corser 2010)	Corser, Robert. 2010. Fabricating Architecture: Selected Readings in Digital Design and Manufacturing. New York, N.Y.: Princeton Architectural Press.	(2)
(Dunn 2012)	Dunn, N. ,2012. Digital fabrication in architecture. London: Laurence King.	(1)
(Estevez, 2003)	Estevez, A. 2003. Genetic Architectures =: Arquitecturas Genéticas. Santa Fe, N.M.: SITES Books.	(1)
(Ford Motor Company. 1915)	Ford Motor Company. 1915. Ford factory facts. publication place: University of Michigan Library.	(2)
(Foster and Sudjic, 2001)	Foster, Norman, and Deyan Sudjic. 2001. Norman Foster and the British Museum. Munich: Prestel.	(2)

(Frampton 2002)	Frampton, Kenneth. 2002. Labour, Work and Architecture: Collected Essays On Architecture and Design. London I: Phaidon Press.	(2)
(Franken, 2009)	Franken, Bernhard. 2009. Real as Data. Architecture in the digital age. Design and Manufacturing. New York, London : Taylor& Francis, 2009, págs. 122-138.	(1)
(García del Valle, 2015)	García del Valle, M., 2015. Diseño para fabricación digital. Definición unívoca entre forma y fabricación en arquitectura. (Tesis doctoral) Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.	(2)
(García-Setién, 2015)	García-Setién, D., 2015. Transarquitectura: Imaginación, invención e individuación del objeto técnico arquitectónico. Transferencia tecnológica desde la industria del transporte al proyecto arquitectónico. (Tesis doctoral) Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.	(2)
(Gershenfeld, 2007)	Gershenfeld, Neil A. 2007, ©2005. Fab: The Coming Revolution On Your Desktop--from Personal Computers to Personal Fabrication. New York: Basic Books	(1)
(Gibb, 1999)	Gibb, Alistair G F. 1999. Off-Site Fabrication: Prefabrication, Pre-Assembly and Modularisation. New York: J. Wiley	(1)
(Gilmore y Pine, 1997)	Gilmore, James H. y Pine, B. Joseph II. 1997. The four faces of mass customization. Harvard Business Review, Vol 75 (pp.91-101)	(1)
(González Bravo, 2015)	González Bravo, R., 2015. Aplicaciones Industriales para la construcción de estructuras laminares metálicas. (Tesis doctoral) Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.	(2)
(Graham, 2012)	Graham, P.C. 2012, The Parametric Façade; Optimization in Architecture through a Synthesis of Design, Analysis and Fabrication., University of Waterloo.	(2)
(Groover, 2007)	Groover, Mikell P. 2007. Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas. 3a ed. México, DF: McGraw -Hill.	(1)
(Hernando, 2013)	Hernando, S., 2013. Transferencia e integración de metodología industrial innovadora en la producción de viviendas. (Tesis doctoral) Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.	(2)
(Hopkinson, Hague, y Dickens, 2006)	Hopkinson, N, R J M. Hague, and P M. Dickens. 2006. Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age. Chichester, England: John Wiley.	(2)
(Larson, 2013)	Larson, Kent. 2013. From mass customisation of goods and services to mass customised cities: a global imperative. En A.A. Piroozfar y Piller. Mass customisation and personalisation in architecture and construction (pp. XVII a XXI.). London, New York : Routledge.	(1)
(Iwamoto, 2009)	Iwamoto, Lisa. 2009. Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques. Architecture Briefs. New York: Princeton Architectural Press.	(1)
(Kalpakjian y Schmid 2014)	Kalpakjian, Serope, and Steven R. Schmid. 2014. Manufacturing Engineering and Technology. seventh ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson.	(1)

(Kieran y Timberlake, 2004)	Kieran, S., & Timberlake, J. 2004. Refabricating architecture: how manufacturing methodologies are poised to transform building construction. New York: McGraw-Hill.	(1)
(Kolarevic 2005)	Kolarevic, Branko, ed. 2005. Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing. New York: Taylor & Francis.	(1)
(Kolarevic y Klinger 2008)	Kolarevic, Branko, and Kevin R. Klinger, eds. 2008. Manufacturing Material Effects: Rethinking Design and Making in Architecture. New York: Routledge.	(1)
(Le Corbusier, 1995)	Le Corbusier. 1995. Vers Une Architecture. Champs (Flammarion (Firm)). Paris: Flammarion.	(2)
(Lyon, 2007)	Lyon, E. 2007. Component based design and digital manufacturing: a design for manufacturing model for curved surfaces fabrication using three axis computer numerical controlled router. (Tesis doctoral) Georgia Institute of Technology.	(1)
(Mies van der Rohe, 1953)	Ludwig Mies van der Rohe: A Speech to the IIT (1959)', in Philip Johnson, Mies van der Rohe, New York: Museum of Modern Art, 1953	(1)
(Mitchell 1977)	Mitchell, William J. 1977. Computer-Aided Architectural Design. New York: Petrocelli/Charter.	(2)
(Mitchell, 2001)	Mitchell, William J. 2001. Roll over Euclid: How Frank Gehry Designs and Builds. [ed.] Architect Frank Gehry. Gehry, F.O. . (pp. 352-363.) New York : Guggenheim Museum Publications,	
(Muñoz 2008)	Muñoz, Francesc. 2008. Urbanización: Paisajes Comunes, Lugares Globales. Gg Mixta. Barcelona: Gustavo Gili.	(1)
(Naboni y Paoletti 2015)	Naboni, Roberto, and Ingrid Paoletti. 2015. Advanced Customization in Architectural Design and Construction. Springerbriefs in Applied Sciences and Technology. Polimi Springerbriefs. Cham: Springer Milan, Italy :.	(1)
(Paoletti 2010)	Paoletti, Ingrid. 2010. Construire le forme complesse. Innovaione, industrializzazione e trasferimento per il progetto di architettura. s.l. : Maggioli Editore, Tecnologia e Progetto, 2010.	(1)
(Piller and Tseng, 2010)	Piller, Frank T., and Mitchell M. Tseng, eds. ©2010. Handbook of Research in Mass Customization and Personalization. New Jersey: World Scientific.	(2)
(Pine, 1993)	Pine, B Joseph. 1993. Mass Customization: The New Frontier in Business Competition. Boston, Mass.: Harvard Business School Press.	(1)
(Piroozfar y Piller 2013)	Piroozfar, P. A. E., & Piller, F. T. , eds.. 2013. Mass customisation and personalisation in architecture and construction. London: Routledge, Taylor & Francis Group.	(1)
(Prouvé y Lavalou, 2005)	Prouvé, Jean, and Armelle Lavalou. ©2005. Conversaciones Con Jean Prouvé. Barcelona: Editorial Gustavo Gili.	(2)

(Prouvé, 1971)	Prouvé, Jean. Jean Prouvé: une architecture par l'industrie. Zurich, Artemis. 1971	(2)
(Ribot, 2011)	Ribot, Almudena. DL 2011. Colaboratorio 2010. Madrid: Marea Libros.	(2)
(Scheurer, 2009)	Scheurer, Fabian. 2009. Size Matters: Digital Manufacturing in Architecture. Dimension. (pp.59-65) New York : Princeton Architectural Press.	(1)
(Schodek, 2005)	Schodek, Daniel L. 2005. Digital Design and Manufacturing: Cadcam Technologies in Architecture. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons.	(1)
(Taylor, 1903)	Taylor, F.W. Shop management (1903) Enna, 2008	(2)

8.2 ARTÍCULOS

(1): artículo referenciado

(2): artículo consultado

(Aigner & Brell-Cokcan, 2009)	Aigner, Anita y Brell-Cokcan, Sigrid. 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.	(1)
	Recuperado de http://www.robotsinarchitecture.org/wp-content/uploads/2011/09/surface_structures_and_robot_milling_brecoag.pdf .	
(Capone, 2011)	Capone, M. 2011. Architecture = Design? The increasingly strong link between 3D modeling and automated manufacturing. Simposio llevado a cabo en el IMProVe 2011 .Venecia, Italia.	(1)
(Casado Galván, 2009)	Casado Galván, I., 2009. La arquitectura de la industrialización. Contribuciones a las Ciencias Sociales. Econpapers.	(1)
	Recuperado de http://econpapers.repec.org/article/ervcoccss/y_3a2009_3ai_3a2009-12_3a4.htm	
(Casado Galván, 2009)	Casado Galván, I., diciembre 2009. La arquitectura de la industrialización. Contribuciones a las Ciencias Sociales.	(1)
(Chang, 2015)	Chang, Lian. 2015. The Software Behind Frank Gehry's Geometrically Complex Architecture. Priceonomics.	(1)
	Recuperado de https://priceonomics.com/the-software-behind-frank-gehrys-geometrically/ .	
(Colorado, 2014)	Colorado, Alexandra. 2014. El curvado de la madera y adhesivos empleados. Recuperado de http://www.barnizadoencoladomueble.com/el-curvado-de-la-madera-y-adhesivos-empleados/# .	(1)
(Helm et al., 2015)	Helm, Knauss, Kohlhammer, Sitzmann, Zock, Gramazio, Kohler, Bachmann, Sigrist. 2015. Additive Robotic Fabrication of Complex Timber Structures. 2015.	(1)
(Iovine, 2010)	V.Iovine, J., 2010. Fab Labs. Archpaper.	
	Recuperado de: http://archpaper.com/news/articles.asp?id=5045	
(Leonhard y Heimo, 2004).	Leonhard, Hirschberg Urs y Heimo, Schimek. Mass Customization in Architecture. Recuperado de https://online.tugraz.at/tug_online/fdb_detail.ansicht?cvfanr=F21333&cvorgnr=37&sprache=2 .	(1)

- (Lyon, 2006) Lyon, Eduardo. 2006. Component Based Design and Digital Manufacturing; A DfM Model for Curved Surfaces Fabrication using Three Axis CNC Router. Communicating Space(s) (24th eCAADe Conference Proceedings), 6-9 Septiembre del 2006. pp. 342-350. Evolos, Grecia. (1)
- (Pastor et al., 2005) Pastor, J.M., Balaguer, C., Rodriguez, F.J. & Diez, R. 2005, "Computer Aided Architectural Design Oriented to Robotized Facade Panels Manufacturing.", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 16, no. 3, pp. 216 - 227. (1)
- (Slessor, 2000) Slessor, Catherine, 2000. Digitizing Dusseldorf (Frank Gehry pushes the (building) envelope again with three towers in Germany). Architecture -New York and Washington- American institute of architects, Vol. 89(9), pp. 118-125. (1)
- (Tirnauer, 2010) Tirnauer, 2010. Architecture in the Age of Gehry. Vanity Fair. Recuperado de <http://www.vanityfair.com/culture/2010/08/architecture-survey-201008> (1)
- (Vilana Arto, 2006) Vilana Arto, J.R., 2006. Beneficios de la personalización en masa. [ed.] Escuela Politécnica Superior UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO. Revista Tecnología y desarrollo. Recuperado de <http://www.uax.es/publicacion/beneficios-de-la-personalizacion-en-masa.pdf> (1)
- Boothroyd, Geoffrey, Dewhurst, Peter y Knight, Winston A. 2002. Product Design for Manufacture and Assembly. New York : Marcel Dekker, 2002. (1)
- (Arroyo et al., 2011) Arroyo, P. y otros, 2011. California Prefab: Current Market Report. ArcCa, Architecture California, Vol 11.2, pp. 30-37. (2)
- (Bechtold, 2004) Bechtold, M. (2004): Digital Design and Fabrication of Surface Structures source Fabrication: Examining the Digital Practice of Architecture. Simposio llevado a cabo en la 23 conferencia anual de la Association for Computer Aided Design in Architecture. Cambridge (Ontario), pp. 88-99. (2)
- (Beson, 2010) Beson, R. 2010, Relational geometries: Custom Fabrication and Assembly of Digital Architecture, Informe para el Byera Hadley Traveling Scholarship. (2)
- (Fleischmann et al, 2012) Fleischmann, M. et al, 2012. Material Behaviour; embedding physical properties in computational design processes. Architectural Design, vol. 216, no. Material Computation, pp. 44-51 (2)
- (Fogliatto, da Silveira, Borenstein, 2012) Fogliatto, F.S., da Silveira, G.J.C. & Borenstein, D. 2012, The mass customization decade: An updated review of the literature, International Journal of Production Economics, vol. 138, no. 1, pp. 14-25. (2)
- (Kolarevic, 2005b) Kolarevic, B. 2005, Designing and Manufacturing Architecture in the Digital Age. Architectural Information Management (05 Design Process 3). Taylor & Francis US,. (2)
- (Niemeijer, 2011) Niemeijer, R.A. 2011, Constraint specification in architecture: A user-oriented approach for mass customization, Technische Universiteit Eindhoven. (2)
- (Boer, Oosterhuis, 2004) Boer, S. & prof. Oosterhuis, K., 2004. Architectural Parametric Design and Mass Customization. Simposio llevado a cabo en el ECPPM 2004, Septiembre 2004, Istanbul, Turquía. pp.649-656. (2)

(Ceccato, 2012)	Ceccato, C. 2012, Computing and Constructing continuous differentiation, Architectural Design, vol. 216, no. Material Computation, pp. 96-101.	(2)
(Guzik, 2009)	Guzik, Agata 2009, Digital fabrication inspired design: influence of fabrication parameters on a design process, Bartlett School of Graduate Studies.	(2)
		(2)
(Lyon, 2008)	Lyon. E. , 2008. CAD and CAM Systems Integration: A rule based system for NURBS surfaces fabrication using CNC Technologies. Actas de simposio eCAADe 2008 Antwerpen (Belgica), 17-20 Septiembre 2008,.	(2)
(Menges, 2006)	Menges, A. 2006, Manufacturing diversity, Architectural Design, vol. 180, pp. 70-77.	(2)
(Menges, 2008)	Menges, A. 2008, Manufacturing performance, Architectural Design, vol. 192.	(2)
(Menges, 2010)	Menges, A. 2010, Forma y Materializacion arquitectonica en la transicion del diseño asistido por ordenador al diseño computacional. Detail 2010 vol 06.	(2)
(Menges, 2012)	Menges, A. & Schwinn, T. 2012. Manufacturing Reciprocities. Architectural Design, vol. 216, pp. 119-125.	(2)
(Park y Holt, 2010)	Park, K. & Holt, N, 2010, Parametric Design Process of a Complex Building In Practice Using Programmed Code As Master Model. International journal of architectural computing, vol. 08, no. 03, pp. 359-376.	(2)
(Philippo, 2002)	Philippo. L. 2002, Mass Customization: Will the customer finally be in control? Vrije Universiteit, Amsterdam, Holanda.	(2)
(Ahmadi y Wurgajt, 1994)	Reza H. Ahmadi, Hernan Wurgajt 1994, Design for Set Manufacturability, Management of Design, , pp. pp 123-143.	(2)
(Rotheroe, 2000)	Rotheroe, K.C. 2000. Manufacturing Freeform Architecture. Architecture Week.Recuperado de http://www.architectureweek.com/2000/0927/tools_1-1.html .	(2)
(Sass, 2007)	Sass, L. 2007. Synthesis of design production with integrated digital fabrication. Automation in Construction, vol. 16, no. 3.	(2)
(Sass, 2008)	Sass, L. 2008. A physical design grammar: A production system for layered manufacturing machines. Automation in Construction, vol. 17, no. 6.	(2)
(Tamke, Thomsen y Riiber, 2008)	Tamke, M., Thomsen, M. R. & Riiber, J. 2008.. Complex geometries in Wood..Journal of the Faculty of Architecture, vol. 29, no. 1, pp. 107-118.	(2)
(Smithwick, 2009)	Daniel J. Smithwick 2009, Architectural Design 2.0: An Online Platform for the Mass Customization of Architectural Structures, Massachusetts institute of technology.	(2)

8.3 PÁGINAS WEB

(3ders, 2014)	3ders (2014). 3d printer and 3d printing news Recuperado de: http://www.3ders.org/articles/20140401-10-completely-3d-printed-houses-appears-in-shanghai-built-in-a-day.html	[Último acceso: 06 2017].
(Adapa, s.f.)	Adapa (s.f.). Adapa adaptive moulds. Recuperado de: http://adapa.dk/	[Último acceso: 06 2017].
(Anon., s.f.)	Anon.(s.f.). PRFV. Plástico reforzado con fibra de vidrio. Recuperado de: https://prfv.wordpress.com/	[Último acceso: 06 2017].
(Archdaily, 2014)	Archdaily (2014). Nine Bridges Country Club / Shigeru Ban Architects. Recuperado de: http://www.archdaily.com/490241/nine-bridges-country-club-shigeru-ban-architects	[Último acceso: 06 2017].
(Bollinger Grohmann, s.f.))	Bollinger Grohmann (s.f.), Bollinger Grohmann Projects. Recuperado de: http://www.bollinger-grohmann.com/en.projects.bmw-bubble.html	[Último acceso: 06 2017].
Blumer-Lehmann (s.f.)	Blumer-Lehmann (s.f.) Blumer-Lehmann. Recuperado de: http://www.blumer-lehmann.ch/	[Último acceso: 06 2017].
(BRS, s.f.)	BRS, (s.f.) Freeform Glass. Recuperado de: http://www.brs.nl/product.php?prod=3&pag=812025	[Último acceso: 06 2017].
(Campolonghi, 2014)	Campolonghi (2014) Campolonghi. Recuperado de: http://www.campolonghi.it/	[Último acceso: 06 2017].
(Carlos Arroyo Arquitectos, (s.f.))	Carlos Arroyo Arquitectos, (s.f.) Carlos Arroyo Proyectos. Recuperado de: http://www.carlosarroyo.net	[Último acceso: 06 2017].
(Centralstaal, s.f.)	Centralstaal (s.f.) CIG CENTRAALSTAAL. Recuperado de: http://www.centralindustrygroup.com/about/companies/cig-centraal-staal	[Último acceso: 06 2017].
(Control Glass, s.f.)	Control Glass (s.f.) Control Glass . Recuperado de: http://www.controlglass.com/	[Último acceso: 06 2017].
(Creation Holz, s.f.)	Creation Holz (s.f.) Creation Holz. R Recuperado de: http://www.creation-holz.ch/de/index.php	[Último acceso: 06 2017].
(Cricursa, 2009)	Cricursa (2009). Recuperado de: http://cricursa.com	[Último acceso: 06 2017].
(designtopproduction,s.f.)	designtopproduction, (s.f.) Recuperado de: www.designtopproduction.ch .	[Último acceso: 06 2017].

(D-shape, s.f.)	D-shape (s.f.) D-shape. Recuperado de: https://d-shape.com/	[Último acceso: 06 2017].
(Ducret-Orges, s.f.)	Ducret-Orges (s.f.) Ducret-Orges SA. Recuperado de: http://www.ducret-orges.ch/	[Último acceso: 06 2017].
(Erne Holzbau, s.f.)	Erne Holzbau (s.f.) Erne Holzbau. Recuperado de: http://www.erne.net/	[Último acceso: 06 2017].
(e-skylight, s.f.)	e-skylight, (s.f.) e-skylight. Recuperado de: http://www.e-skylight.com/	[Último acceso: 06 2017].
(fabfoundation, s.f.)	fabfoundation, (s.f.) fabfoundation. Recuperado de: http://www.fabfoundation.org/fab-labs/	[Último acceso: 06 2017].
(Fariña, 213)	Fariña, J., (2013) El blog de José Fariña. Urbanismo, territorio y paisaje. Recuperado de: https://elblogdefarina.blogspot.be/2013/08/urbanizacion-descontextualizada.html	[Último acceso: 06 2016].
(Franken Architekten, s.f.)	Franken Architekten, (s.f.) Recuperado de: http://www.franken-architekten.de .	[Último acceso: 06 2017].
(Freeform timber, s.f.)	Freeform Timber, (s.f.) Recuperado de: http://www.freeform-timber.com	[Último acceso: 06 2017].
(Gershenfeld, 2006)	Gershenfeld, N., 2006. TED talks. Unleash your creativity in a fablab. Recuperado de: https://www.ted.com/talks/neil_gershenfeld_on_fab_labs	[Último acceso: 2016].
(Gramazio Kohler, s.f.)	ETHZ, (s.f.). Gramazio Kohler Research. Recuperado de: http://www.gramaziokohler.arch.ethz.ch .	[Último acceso: 2016].
(Hess Timber, s.f.)	Hess Timber, (s.f.) Hess Timber Limitless. Recuperado de: http://www.hess-timber.com/en/scope/production/	[Último acceso: Febrero 2017].
(iMaterialise, s.f.)	I.Materialise, (s.f.) Recuperado de: https://i.materialise.com/	[Último acceso: 2017].
(KLH, 2016)	KLH (2016) KLH Massive Wood. Recuperado de: www.klh.at/es/	[Último acceso: 06 2017].
(MX3D, s.f.)	MX3D, (s.f.) Recuperado de: http://mx3d.com/projects/metal/	
(Piller, F., 2014)	Piller, F., (2014) . Mas Customization. Recuperado de: http://frankpiller.com/mass-customization/	[Último acceso: 2017].
(Poly Products, 2017)	Poly Products (2017) Poly Products. Recuperado de: http://www.polyproducts.nl/	[Último acceso: 06 2017].
(Praxair, 2013)	praxair, (2013) Procesos de corte. Recuperado de: http://www.praxair.com.bo/industries/welding-and-metal-fabrication/cutting-processes	[Último acceso: 06 2017].

(Preinco, s.f.)	Preinco (s.f.) Preinco. Recuperado de: http://www.preinco.com/	[Último acceso: 06 2017].
(RAE, 2017)	Protocolo. (n.d.) In Real Academia Española online. Recuperado de: http://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=protocolo	[Último acceso: 06 2017].
(ROB Technologies, s.f.)	ROB Technologies (s.f.) ROB Technologies AG. Recuperado de: http://rob-technologies.com/	[Último acceso: 06 2017].
(Shigeru Ban Architects, s.f.)	Shigeru Ban Architects, (s.f.) Haesley nine bridges golf club house - Korea, 2010. Recuperado de: http://www.shigerubanarchitects.com/works/2010_haesley-nine-bridges/index.html	[Último acceso: 03 2017].
(Tesko Laser, s.f.)	tesko laser, (s.f.) Tesko Laser division. Recuperado de: http://www.teskolaser.com/laser_cutting2.html	[Último acceso: 04 2017].
(Timber Code, s.f.)	Timber Code (s.f.) Timber Code Computation and Production. Recuperado de: http://www.timber-code.ch/timber-code/	[Último acceso: 06 2017].
(Vari, s.f.)	Vari (s.f.) Vari. Recuperado de: http://www.vari.be/	[Último acceso: 06 2017].
(Zahner, s.f.)	A. Zahner Company (s.f.) The Intersection of Art and Architecture. Recuperado de: http://www.azahner.com	[Último acceso: 06 2017].

9 TABLA DE ILUSTRACIONES

9.1 LISTADO DE FIGURAS

fig.2-1	Producción en masa: línea de montaje de Ford; fuente: www.auto10.com	21
fig.2-2	Fabricación en línea de viviendas en la fábrica de Misawa.; fuente: www.stedebouwarchitectuur.nl	21
fig.2-3	Imagen de la publicidad para la unidad prefabricada de Sekisui, 1971.; fuente: http://prefabricate.blogspot.com.es	22
fig.2-4	Imagen de la publicidad para la unidad prefabricada de Sekisui, 2016.; fuente: www.wsnews.co.kr	22
fig.2-5	Montaje de una vivienda prefabricada por Sekisui.; fuente: www.stedebouwarchitectuur.nl	22
fig.2-6	Ejemplo de vivienda prefabricada fabricada por Sekisui; fuente: fotografía propia, tomada en el viaje a Japón realizado en febrero del 2010	22
fig.2-7	Línea de fabricación automatizada de vehículos en la fábrica de Toyota. ; fuente: www.robots.com	25
fig.2-8	Planta de fabricación automatizada en la fábrica de Sekisui.; fuente: www.sekisuichemical.com	25
fig.2-9	Fabricación en línea de viviendas en Sekisui.; fuente: www.stedebouwarchitectuur.nl	25
fig.2-10	Máquinas de fabricación digital en un fablab; fuente: http://fablabtoledo.org/	29
fig.2-11	Fabricación de viviendas según el sistema Wikihouse: fabricación CNC por un productor local, montaje por el usuario.; fuente: https://wikihouse.cc/	29
fig.3-1	Configurador para personalizar las zapatillas Adidas online, modelo Gazelle; fuente: http://www.opel.es/	35
fig.3-2	Configurador online del modelo de coche Opel Adam; fuente: Tomado del sitio web de Opel, en 2013	35
fig.3-3	Configurador para personalizar las botellas de Coca-Cola.; fuente: https://buy.shareacoke.com/personalized-bottle/	35
fig.3-4	Sistema constructivo de la cubierta en la vivienda prefabricada de Sekisui.; fuente: Fotografía de la autora, tomada en el viaje a Japón realizado en febrero del 2010	39

fig.3-5	Sistema constructivo de la vivienda prefabricada de Sekisui, incluso cimentación prefabricada; fuente: Fotografía de la autora, tomada en el viaje a Japón realizado en febrero del 2010	39
fig.3-6	Showroom con catálogo de materiales en Panahome.; fuente: Fotografía de la autora, tomada en el viaje a Japón realizado en febrero del 2010	39
fig.3-7	Personalización de lucernarios mediante el configurador online de E-Skylight.; fuente: http://www.e-skylight.com/	40
fig.3-8	Fabricación de un lucernario personalizado en la empresa e-Skylight ; fuente: http://www.e-skylight.com/	40
fig.3-9	Diagrama del proceso de diseño y fabricación del proyecto Physical Design Co. ; fuente: http://www.shopbotblog.com/2009/06/physical-design/	40
fig.3-10	Imagen del proceso de fabricación en cadena en la industria Panahome; fuente: Fotografía de la autora, tomada en el viaje a Japón realizado en febrero del 2010	40
fig.3-11	Superficies generadas por NURBS para el proyecto iWeb de ONL ; fuente: (Dunn, 2012)	44
fig.3-12	pabellón iWeb (ONL , TU Delft, 2006); fuente: http://www.onl.eu/projects/iweb	44
fig.3-13	Imagen 3d para el diseño de l proyecto Blobwall (Greg Lynn FORM, Los Angeles, EEUU, 2008); fuente: Architectural Design Volume 79, Issue 2,; article: "Blobwall" 2006-2008, by Greg Lynn, pp 98)	44
fig.3-14	Diseño paramétrico para la instalación Vivisys (Future Cities Lab, Chicago, 2012); fuente: (Dunn, 2012)	40
fig.3-15	Pabellón del "Pez Dorado"(Gehry Partners, Barcelona, 1992); fuente: www.barcelonalowdown.com	45
fig.3-16	CATIA version 3, en 1988.; fuente: https://priceonomics.com	45
fig.3-17	Modelo digital con Digital Project para el estadio Nacional Olímpico en Beijing (Herzog + de Meuron; Pekín, China; 2006); fuente: https://priceonomics.com	45
fig.3-18	Optimización de un diseño arquitectónico por Gehry Technologies, para minimizar paneles con curvatura compleja. ; fuente: https://priceonomics.com	45
fig.3-19	Diseño y fabricación de barcos y edificios en Centralstaal.; fuente: www.centralindustrygroup.com	47
fig.3-20	Diseño y fabricación de barcos y edificios en Centralstaal.; fuente: www.centralindustrygroup.com	47
fig.3-21	Lord's Media Centre (Future Systems; ,Londres, Inglaterra; 1999), fabricado	47

	por Centralstaal; fuente: www.centralindustrygroup.com	
fig.3-22	Una de las primeras máquinas de fabricación CNC, años 50.; fuente: www.cmsna.com	47
fig.3-23	Maquinaria CNC con 2 ejes de movimiento.; fuente: http://www.helmancnc.com/	48
fig.3-24	Maquinaria CNC con 3 ejes de movimiento.; fuente: http://www.directindustry.com	48
fig.3-25	Maquinaria CNC con 7 ejes de movimiento.; fuente: www.slideshare.net (Amr Shaaban; 2016)	48
fig.4-1	Mapa de las visitas realizadas; fuente: elaboración propia	66
fig.5-1	Esquema de la metodología de análisis de los procesos de fabricación personalizada.; fuente: elaboración propia	75
fig.5-2	Corte por láser de madera; fuente: http://labcowelding.com	92
fig.5-3	Corte por láser de metal; fuente: http://iferronox.com	92
fig.5-4	Corte de metal por arco de plasma.; fuente: www.centralindustrygroup.com	92
fig.5-5	Corte de piedra por chorro de agua; fuente: http://chicagokitchengranite.com/	92
fig.5-6	CWall (Andrew Kudless Matsys Design; Universidad de Ohio State; 2006); fuente: http://matsysdesign.com	94
fig.5-7	Voussoir Cloud (Iwamoto Scott; SciArc, Los Angeles, EEUU; 2008); fuente: www.iwamotoscott.com	94
fig.5-8	Corte con robot en ICD/ITKE Stuttgart; fuente: http://icd.uni-stuttgart.de	94
fig.5-9	Pabellón ICD/ITKE Stuttgart 2010 (ICD/ITKE), Stuttgart, 2010); fuente: http://icd.uni-stuttgart.de	94
fig.5-10	Centro de mecanizado de madera a pequeña escala.; fuente: Fotografía del autor, tomada en la BFH.	95
fig.5-11	Tambor de almacenamiento de herramientas para corte y fresado.; fuente: Fotografía del autor, tomada en la BFH.	95
fig.5-12	Pantalla de control CNC en el centro de mecanizado.; fuente: Fotografía del autor, tomada en la BFH.	95
fig.5-13	Imagen aérea de la fábrica KLH.; fuente: www.klh.at	97
fig.5-14	Fotografía de la fábrica KLH.; fuente: Fotografía de la autora, tomada en la visita a KLH.	97
fig.5-15	Biblioteca en Vennesla (Helen & Hard; Vennesla, Noruega; 2011).; fuente:	97

http://www.helenhard.no/projects/vennesla_library

- fig.5-16 Biblioteca en Vennesla (Helen & Hard; Vennesla, Noruega; 2011).; fuente: <http://www.klh.at/es/references/projects/bibliothekvennesla/> 97
- fig.5-17 Bloque de viviendas en Judenburg (Mark Mach; Judenburg, Austria) ; fuente: http://www.tectonica-online.com/images/metadosier/zoom/bloque_viviendas_judenburg_austria_construido_muros_portantes_estructuras_madera_laminada_estructurales_paneles_23t04a4.jpg?0.5423163361847401 97
- fig.5-18 Líneas de encolado de paneles contralaminados en KLH.; fuente: www.klh.at 99
- fig.5-19 Líneas de mecanizado de paneles KLH.; fuente: www.klh.at 99
- fig.5-20 Paneles mecanizados.; fuente: www.klh.at 99
- fig.5-21 Montaje en obra de vivienda prefabricada.; fuente: www.klh.at 99
- fig.5-22 Corte de bloques de piedra en telares multiflejes; fuente: www.breton.it 105
- fig.5-23 Corte de bloque de piedra con hilo de diamante; fuente: www.alibaba.com 105
- fig.5-24 Corte de piedra con sierra a 45º; fuente: <http://chicagokitchengranite.com/> 105
- fig.5-25 Corte de piedra por chorro de agua a alta presión.; fuente: <http://chicagokitchengranite.com/> 105
- fig.5-26 Escultura en la Piazza Bad Kissingen(Pino Castagna; Marina di Massa, Italia; 2009; fuente: www.campolonghi.it/ 107
- fig.5-27 Basílica del Padre Pío (Renzo Piano; San Giovanni Rotondo, Italia; 2004); fuente: www.architetturadi Pietra.it/wp/?p=2900 107
- fig.5-28 Ópera (Snøhetta; Oslo, Noruega; 2008); fuente: www.campolonghi.it/ 107
- fig.5-29 Ópera (Snøhetta; Oslo, Noruega; 2008); fuente: www.campolonghi.it/ 107
- fig.-30 Fábrica Campolonghi: acopio de los bloques de piedra. 108
- fig.5-31 Fábrica Campolonghi: zona de acopio de tablas.; fuente: www.campolonghi.it/ 108
- fig.5-32 Fábrica Campolonghi: zona cubierta para el control de proyectos.; fuente: www.campolonghi.it/ 108
- fig.5-33 Bloques de piedra tras el corte en los telares multiflejes.; fuente: Fotografía de la autora, tomada durante la visita a Campolonghi 108
- fig.5-34 Corte de piedra con hilo de diamante.; fuente: Fotografía de la autora, tomada durante la visita a Campolonghi 108
- fig.5-35 Corte de piedra con hilo de diamante.; fuente: Fotografía de la autora, tomada durante la visita a Campolonghi 108

fig.5-36	Desplazamiento automático de tablas.; fuente: www.campolonghi.it/	109
fig.5-37	Corte de piedra a tamaños estándar en discos paralelos.; fuente: www.campolonghi.it/	109
fig.5-38	Cortadora de puente CNC con disco.; fuente: www.campolonghi.it/	109
fig.5-39	Cortadora de puente CNC con disco.; fuente: www.campolonghi.it/	109
fig.5-40	Corte de piedra por fresado CNC.; fuente: www.campolonghi.it/	109
fig.5-41	Imagen de la fábrica de Zahner en Kansas City.; fuente: www.azahner.com	117
fig.5-42	Museo de Young (Herzog & de Meuron; San Francisco , EEUU; 2005); fuente: www.azahner.com	117
fig.5-43	Universidad Cooper Union (Morphosis; Nueva York, EEUU; 2006); fuente: www.azahner.com	117
fig.5-8	Sistema de fachada Imagewall en el estadio Kauffman (Popolous Architects, Kansas City, EEUU; 2009); fuente: www.azahner.com	118
fig.5-45	Sistema de fachada Cloudwall en la fábrica de Zahner (Crawford Architects; Kansas City; EEUU); fuente: www.azahner.com	118
fig.5-46	Producción del sistema IMAGEWALL™, desde la aplicación de una fotografía hasta la instalación de los paneles de fachada en el Museo de Young; fuente: www.azahner.com	118
fig.5-47	Montaje del sistema de fachada Cloudwall en el Edificio Liverpool Interlomas (Rojkind Arquitectos; Huixquilucan, Mexico; 2011; fuente: www.azahner.com	119
fig.5-48	Montaje del sistema de fachada Cloudwall en el Edificio Liverpool Interlomas (Rojkind Arquitectos; Huixquilucan, Mexico; 2011; fuente: www.azahner.com	119
fig.5-49	Montaje del sistema de fachada Cloudwall en el Edificio Liverpool Interlomas (Rojkind Arquitectos; Huixquilucan, Mexico; 2011; fuente: www.azahner.com	119
fig.5-50	Operaciones de mecanizado: torneado, taladrado, fresado y brocheado; fuente: (Kalpakjian, 2014)	123
fig.5-51	Router CNC.; fuente: www.3dmakers.c	125
fig.5-52	Fresado CNC de volumen por mapas de contornos.; fuente: www.john-mars.com	125
fig.5-53	Fresado de moldes para la parad de autobus en en Hoofddorp (NIO-architecten; Hoofddorp, Holanda; 2003); fuente: http://ewww.vitruvius.com.br	125
fig.5-54	Fresadora de madera CNC.; fuente: Fotografía de la autora, tomada en la	129

	BFH.	
fig.5-55	Fresas de distintos diámetros.; fuente: Fotografía de la autora, tomada en la BFH.	129
fig.5-56	Fresado de madera.; fuente: www.blumer-lehmann.ch	129
fig.5-57	Ejemplo de construcción de edificios en madera por Blumer-Lehmann.; fuente: www.blumer-lehmann.ch	131
fig.5-58	Ejemplo de construcción modular por Blumer-Lehmann.; fuente: www.blumer-lehmann.ch	131
fig.5-59	Ejemplo de construcción de silos por Blumer-Lehmann.; fuente: www.blumer-lehmann.ch	131
fig.5-60	Fábrica Blumer-Lehmann en Gossau, Suiza.; fuente: www.blumer-lehmann.ch	131
fig.5-61	Personal de la fábrica de Blumer-Lehmann en Gossau, Suiza.; fuente: www.blumer-lehmann.ch	131
fig.5-62	Club de golf Yeogu (Shigeru Ban Architects; Corea del Sur; 2010); fuente: www.blumer-lehmann.ch	132
fig.5-63	Edificio Tamedia (Shigeru Ban Architects; Zúrich, Suiza; 2013); fuente: www.blumer-lehmann.ch	132
fig.5-64	Centro de artes escénicas Kilden (Ala Architects; Kristiansand, Noruega; 2012); fuente: http://espaciosdemadera.blogspot.com.es	132
fig.5-65	Proceso de diseño a fabricación: preparación de datos (Centro de artes escénicas Kilden).; fuente: www.designtoproduction.com	133
fig.5-66	Proceso de diseño a fabricación: preparación de datos (Centro de artes escénicas Kilden).; fuente: www.designtoproduction.com	133
fig.5-67	Proceso de fabricación: fresado en máquina CNC de 5 ejes (Centro de artes escénicas Kilden).; fuente: Blumer-Lehmann	133
fig.5-68	Proceso de fabricación: fresado en máquina CNC de 5 ejes (Centro de artes escénicas Kilden).; fuente: Blumer-Lehmann	133
fig.5-69	Montaje de módulos en taller (Centro de artes escénicas Kilden); fuente: Blumer-Lehmann	134
fig.5-70	Transporte de los módulos en barco (Centro de artes escénicas Kilden).; fuente: Blumer-Lehmann	134
fig.5-71	Montaje de módulos en obra (Centro de artes escénicas Kilden).; fuente: Blumer-Lehmann	134
fig.5-72	Montaje de módulos en obra (Centro de artes escénicas Kilden).; fuente: Blumer-Lehmann	134

fig.5-73	Proceso de estampación de chapa metálica en prensas. ; fuente: www.centralindustrygroup.com	143
fig.5-74	Proceso de estampación de chapa metálica en prensas. ; fuente: www.centralindustrygroup.com	143
fig.5-75	Lord's Media Centre (Future Systems; Londres, Reino Unido; 1999) ; fuente: www.architectsjournal.co.uk	143
fig.5-76	F-side (ONL-Kaas Oosterhuis; Amsterdam, Holanda; 2007); fuente: www.centralindustrygroup.com	145
fig.5-77	Abu Dhabi Bridge Pavilion (Asymptote Architects; Abu Dhabi, UAE; 2009); fuente: http://archinect.com	145
fig.5-78	Pabellón Porsche (Henn Architects; Wolfsburg, Alemania; 2012); fuente: Centralstaal	145
fig.5-79	Modelo digital en el software Nupac Cadmatic (Pabellón Porsche); fuente: Centralstaal	147
fig.5-80	Modelo digital en el software Nupac Cadmatic (Pabellón Porsche); fuente: Centralstaal	147
fig.5-81	Simulación estructural en el software Nupac Cadmatic (Pabellón Porsche); fuente: Centralstaal	147
fig.5-82	Simulación estructural en el software Nupac Cadmatic (Pabellón Porsche); fuente: Centralstaal	147
fig.5-83	Corte por plasma de chapa metálica; fuente: www.centralindustrygroup.com	148
fig.5-84	Estampación de chapa metálica en prensa.; fuente: www.centralindustrygroup.com	148
fig.5-85	Verificación de la curvatura con plantillas.; fuente: www.centralindustrygroup.com	148
fig.5-86	Montaje en taller de la estructura para la escultura Traiano (Anish Kapoor; Nápoles, Italia; 2014); fuente: www.centralindustrygroup.com	148
fig.5-87	Transporte de módulos para el Abu Dhabi Bridge Pavilion (Asymptote Architects; Abu Dhabi, UAE; 2009); fuente: www.centralindustrygroup.com	148
fig.5-88	Proceso de diseño a montaje en Centralstaal.; fuente: Centralstaal	148
fig.5-89	Curvado de madera con vapor para fabricación de objetos pequeños.; fuente: www.barnizadoencoladomueble.com	154
fig.5-90	Curvado de madera laminada por prensado en una dirección.; fuente: www.hess-timber.com/	154
fig.5-91	Vigas laminadas curvas en una dirección.; fuente: Blumer-Lehmann	154

fig.5-92	madera laminada curvada bidireccional; fuente: http://www.hess-timber.com	154
fig.5-93	Obras realizadas por Ducret-Orges; fuente: www.ducret-orges.ch	155
fig.5-94	Obras realizadas por Ducret-Orges; fuente: www.ducret-orges.ch	155
fig.5-95	Obras realizadas por Ducret-Orges; fuente: www.ducret-orges.ch	155
fig.5-96	Curvado de madera laminada encolada en prensas hidráulicas.; fuente: www.ducret-orges.ch	156
fig.5-97	Curvado de madera laminada encolada en prensas hidráulicas.; fuente: www.ducret-orges.ch	156
fig.5-98	Fresado CNC de madera laminada curva.; fuente: www.ducret-orges.ch	156
fig.5-99	Curvado en frío en la fábrica Freeform glass, Holanda; fuente: freeform glass	160
fig.5-100	Zuidpoort Canopy (Mick Eekhout; Delft, Holanda; 2006); fuente: www.octatube.nl	160
fig.5-101	Aparcamiento Westerlaan (Ector Hoogstad Architecten; Rotterdam, Holanda; 2008) ; fuente: www.octatube.nl	160
fig.5-102	Pabellón Floriade (Asymptote; Haarlemmermeer, Holanda; 2002); fuente: www.octatube.nl	160
fig.5-103	Fabricación de vidrio curvado templado.; fuente: www.glaston.net	167
fig.5-104	Fabricación de vidrio curvado templado.; fuente: www.glaston.net	167
fig.5-105	Fabricación de vidrio curvado templado.; fuente: www.glaston.net	167
fig.5-106	Fabricación de vidrio curvado templado.; fuente: www.glaston.net	167
fig.5-107	Molde de hierro para el termoformado del vidrio curvado recocido.; fuente: www.cricursa.com	167
fig.5-108	Gasolinera Repsol en Alberto Aguilera (, Madrid (2011); fuente: www.controlglass.com/	169
fig.5-109	Hospital Universitario Rey Juan Carlos (Rafael de la Hoz: Madrid; 2012); vidrios interiores fabricados por Control Glass.; fuente: www.controlglass.com/	169
fig.5-110	Hospital Universitario Rey Juan Carlos (Rafael de la Hoz: Madrid; 2012); fachada fabricada por Cricursa.; fuente: www.cricursa.com	169
fig.5-111	Geometrías del vidrio curvado templado.; fuente: www.controlglass.com/	170
fig.5-112	Geometrías del vidrio curvado recocido.; fuente: www.controlglass.com/	170
fig.5-113	Horno de vidrio curvado templado en Control Glass.; fuente: Fotografía de	171

	la autora, tomada en la visita a Control Glass.	
fig.5-114	Horno de vidrio curvado templado en Control Glass.; fuente: Fotografía de la autora, tomada en la visita a Control Glass.	171
fig.5-115	Horno de vidrio curvado recocido en Control Glass.; fuente: Fotografía de la autora, tomada en la visita a Control Glass.	171
fig.5-116	Preparación de molde para el termoformado del vidrio curvado recocido.; fuente: Fotografía de la autora, tomada en la visita a Control Glass.	171
fig.5-117	Centro de laminado de vidrio.; fuente: Fotografía de la autora, tomada en la visita a Control Glass.	171
fig.5-118	Imágenes del taller de Poly products.; fuente: Fotografía de la autora, tomada en la visita a Poly Products.	179
fig.5-119	Imágenes del taller de Poly products; fuente: Fotografía de la autora, tomada en la visita a Poly Products.	179
fig.5-120	Edificio "the Rock" (Erik van Egeraat; Amsterdam, Holanda; 2009) ; fuente: http://www.polyproducts.nl	179
fig.5-121	Edificio "the Rock" (Erik van Egeraat; Amsterdam, Holanda; 2009) ; fuente: http://www.polyproducts.nl	179
fig.5-122	Imágenes del taller de Vari.; fuente: Fotografía de la autora, tomada en la visita a Vari	183
fig.5-123	Imágenes del taller de Vari.; fuente: Fotografía de la autora, tomada en la visita a Vari	183
fig.5-124	Montaje del edificio Ooskampus (Carlos Arroyo; Oostkamp, Bélgica; 2011); fuente: Vari	183
fig.5-125	Montaje del edificio Ooskampus (Carlos Arroyo; Oostkamp, Bélgica; 2011); fuente: Vari	183
fig.5-126	Montaje del edificio Ooskampus (Carlos Arroyo; Oostkamp, Bélgica; 2011); fuente: Vari	183
fig.5-127	Imagen del taller de Preinco.; fuente: Fotografía de la autora, tomada en la visita a Preinco.	187
fig.5-128	Aplicación de GRC con spray; fuente: Fotografía de la autora, tomada en la visita a Preinco.	187
fig.5-129	Fachada en el Centro Andaluz de Arte Contemporáneo (Nieto y Sobejano; Córdoba, España; 2013); fuente: Fotografía de la autora.	187
fig.5-130	Aplicación automatizada de GRC en la fábrica robotizada (Pastor, et al., 2002); fuente: Pastor, et al., 2002	187
fig.5-131	Sistema Adapa (1); fuente: http://adapa.dk/	193

fig.5-132	Sistema Adapa (2); fuente: http://adapa.dk/	193
fig.5-133	Sistema Adapa (3); fuente: http://adapa.dk/	193
fig.5-134	Sistema Adapa (4); fuente: http://adapa.dk/	193
fig.5-135	Sistema de pistones para formar los moldes de cera para el proyecto Tailor Crete (Gramazio Kohler Research; 2009-2013).; fuente: http://gramaziokohler.arch.ethz.ch	194
fig.5-136	Vertido de la cera sobre la superficie reconfigurable (proyecto Tailor Crete).; fuente: http://gramaziokohler.arch.ethz.ch	194
fig.5-137	Formado de piezas de hormigón a partir de moldes de cera (proyecto Tailor Crete).; fuente: http://gramaziokohler.arch.ethz.ch	194
fig.5-138	Ilustración del proceso de fabricación con moldes de cera Tailorcrete, 2009-2013 (ETHZ, s.f.); fuente: http://gramaziokohler.arch.ethz.ch	194
fig.5-139	Materiales utilizados en la impresión 3D (iMaterialise, s.f.); fuente: https://i.materialise.com	200
fig.5-140	PBall, Impresión con cemento (Emerging Objects y Matsys Design; 2012).; fuente: www.emergingobjects.com	200
fig.5-141	Rubber Pouf: Impresión 3d con goma (Emerging Objects, 2016); fuente: www.emergingobjects.com	200
fig.5-142	Wood block: Impresión 3d con madera (Emerging Objects, s.f.); fuente: www.emergingobjects.com	200
fig.5-143	Impresión 3d con hormigón (Loughborough University, 2014); fuente: www.lboro.ac.uk	203
fig.5-144	Simulación de la impresión 3d de edificios (Behrokh Khoshnevis, USC, s.f.); fuente: http://contourcrafting.com/	203
fig.5-145	Simulación de la impresión 3d de edificios (Behrokh Khoshnevis, USC, s.f.); fuente: http://contourcrafting.com/	203
fig.5-146	Simulación de la impresión 3d de edificios (Behrokh Khoshnevis, USC, s.f.); fuente: http://contourcrafting.com/	203
fig.5-147	Impresión 3d de edificios con hormigón (Shanghai WinSun Decoration Design Engineering Co, ; 2016); fuente: www.3ders.org	203
fig.5-148	Impresión 3d de edificios con hormigón (Shanghai WinSun Decoration Design Engineering Co, ; 2016); fuente: www.3ders.org	203
fig.5-149	Impresora 3d fabricada por Dinitech.; fuente: www.dinitech.it/	205
fig.5-150	Casa Ferreri (Marci Fereri; trienal de Milán, Italia; 2010); fuente: http://d-shape.com	205

Fig.5-151	Radiolaria, (Andrea Mogante y Shiro Studio; 2010); fuente: www.dinitech.it/	205
Fig.5-152	Underwater MOMA (artistas varios; Porto Santo Stefano, Italia; 2011); fuente: http://d-shape.com	205
fig.5-153	Enrico Dini junto a una de sus esculturas.; fuente: Fotografía de la autora, tomada en la visita a Dinitech.	206
fig.5-154	Fotografía de la fábrica Dinitech en Pisa.; fuente: Fotografía de la autora, tomada en la visita a Dinitech.	206
fig.5-155	Primer robot industrial llamado Unimate, (Devol, 1954); fuente: https://www.roboticsbusinessreview.com	211
fig.5-156	Robots utilizados para el despaletizado de botellas.; fuente: https://www.youtube.com	211
fig.5-157	Robots utilizados para el clavado de paneles.; fuente: https://www.youtube.com	211
fig.5-158	Fresado de juntas por un robot (ICD_ITKE); fuente: http://icd.uni-stuttgart.de	213
fig.5-159	Pabellón ICD/ITKE Stuttgart (ICD/ ITKE, Stuttgart, 2011); fuente: http://icd.uni-stuttgart.de	213
fig.5-160	Tejido por robots para el Pabellón ICD/ITKE Stuttgart (ICD/ ITKE, Stuttgart, 2012); fuente: http://icd.uni-stuttgart.de	213
fig.5-161	The programmed wall (ETHZ; Zúrich, Suiza; 2006); fuente: http://gramaziokohler.arch.ethz.ch	213
fig.5-162	Robotic clay molding (ETHZ; Zúrich, Suiza; 2012); fuente: http://gramaziokohler.arch.ethz.ch	213
fig.5-163	Mesh mould (ETHZ; Zúrich, Suiza;); fuente: http://gramaziokohler.arch.ethz.ch	214
fig.5-164	Impresión 3d en el espacio, "MX3D Metal Printing" (Joris Laarman Lab con IAAC; Barcelona, España; 2013); fuente: http://mocoloco.com	214
fig.5-165	Montaje robotizado en la BFH, combinación de operaciones por robot y otra maquinaria. ; fuente: Fotografía de la autora, tomada en la BFH.	215
fig.5-166	Pórtico robotizado Wood Flex 32 de 6 ejes en Onlywood.; fuente: http://site.onlywood.ch	215
fig.5-167	Detalle del pórtico robotizado en ErneHolzbau.; fuente: http://rob-technologies.com	215
fig.5-168	Edificio en la fábrica de Erne Stein; fuente: http://www.erne.net	217
fig.5-169	Interior de la fábrica de Erne Stein con el pórtico robotizado.; fuente: http://www.erne.net	217

fig.5-170	Fachada del Südpark (Herzog & de Meuron; Basilea, Suiza; 2012), realizada por Erne.; fuente: http://www.erne.net	217
fig.5-171	Edificio de investigación Microcity (Bauart Architectes; Neuchâtel, Suiza); fuente: http://rob-technologies.com	217
fig.5-172	El robot coge la pieza y la coloca en posición para cortarla.; fuente: http://rob-technologies.com	218
fig.5-173	Se recorta la pieza con una sierra estática.; fuente: http://rob-technologies.com	218
fig.5-174	Se coloca la pieza en su posición sobre la cercha.; fuente: http://rob-technologies.com	218
fig.5-175	Clavado de las uniones por el robot.; fuente: http://rob-technologies.com	218
fig.5-176	Fabricación compleja: fresado de vigas de doble curvatura en Blumer-Lehmann; fuente: http://www.blumer-lehmann.ch2	235
fig.5-177	Montaje complejo: montaje robotizado en Erne Holzbau; fuente: http://www.erne.net	235
fig.5-178	Fabricación complejo con montaje complejo: vidrios de doble curvatura por curvado recocido en Cricursa; fuente: www.cricursa.com	235
fig.5-179	Industria de fabricación en madera con células de fabricación; fuente: www.woodworkingnetwork.com	236
fig.5-180	Células de fabricación CNC en industria de fabricación en madera.; fuente: www.woodworkingnetwork.com	236
fig.5-181	Línea de procesos en la fábrica Toyota Housing. ; fuente: www.contemporist.com	237
fig.5-182	Pórtico robotizado flexible Lissmac. ; fuente: www.lissmac.com	237
fig.5-183	Dibujos del funcionamiento de un pórtico robotizado flexible Lissmac para fabricación de viviendas.; fuente: https://www.lissmac.com	237
fig.5-184	Dibujos del funcionamiento de un pórtico robotizado flexible Lissmac para fabricación de viviendas.; fuente: https://www.lissmac.com	237
fig.6-1	Esquema del proceso de diseño a construcción.; fuente: elaboración propia	244
fig.6-2	Proceso de diseño a fabricación: Diseño (CAD) optimizado con criterios de ingeniería (CAE) y de fabricación (CAM); fuente: www.designtoproduction.com	247
fig.6-3	Dibujo de un módulos prefabricado con detalles de fabricación.; fuente: Blumer-Lehmann	247
fig.6-4	Dibujos para fabricación de cada pieza, numerada con los detalles de fabricación.; fuente: Blumer-Lehmann	247

fig.6-5	Vigas tras la fabricación CNC; fuente: Blumer-Lehmann	247
fig.6-6	Problemática en la conexión entre el diseño y la fabricación.; fuente: Blumer-Lehmann	248
fig.6-7	Esquema de protocolo de conexión entre diseño y fabricación; fuente: elaboración propia	253
fig.6-8	Esquema de protocolo de conexión: secuencia de etapas; fuente: elaboración propia	254
fig.6-9	Ejemplo de fachada sencilla: Pabellón BMW (Bernhard Franken; Múnich, Alemania; 1999); fuente: http://www.franken-architekten.de	258
fig.6-10	Fachada de doble piel: Hospital Universitario Rey Juan Carlos (Rafael de la Hoz: Madrid; 2012); ; fuente: http://www.archdaily.com.br/	258
fig.6-11	Fachada de doble piel: Hospital Universitario Rey Juan Carlos (Rafael de la Hoz: Madrid; 2012); ; fuente: http://www.archdaily.com.br/	258
fig.6-12	Fachada con función estructural: Abu Dhabi Bridge Pavilion (Asymptote Architects; Abu Dhabi, UAE; 2009; fuente: http://www.freeformstructures.com	258
fig.6-13	Tipos de superficies en envolventes (Schodek, et al., 2004); fuente: (Schodek, et al., 2004)	259
fig.6-14	Geometría suave continua: parada de bus en Hoofddorp (NIO-architecten; Hoofddorp, Holanda; 2003); fuente: http://www.polyproducts.nl	259
fig.6-15	Ejemplo de racionalización por triangulación: British Museum court(Foster and partner; Londres, Reino Unido; 2000); fuente: http://www.fosterandpartners.com/	259
fig.6-16	Ejemplo de racionalización por superficie reglada: Water Pavilion (NOX architects; Vrouwenpolder, Holanda;1998); fuente: blobism-architecture_water pavilion_nox_01	259
fig.6-17	Ejemplo de racionalización por contorneado: Estación funicular Nordway (Zaha Hadid Architects; Hungerburg, Austria; 2007); fuente: www.designtoproduction.com	259
fig.6-18	Tipos de sistemas estructurales en función de su relación con la envolvente (Schodek, et al., 2004); fuente: (Schodek, et al., 2004)	260
fig.6-19	Racionalización de la estructura por contorneado: Pabellón BMW (Bernhard Franken; Múnich, Alemania; 1999); fuente: http://ewww.vitruvius.com.br	260
fig.6-20	Módulos para envolvente autoportantef en el : Pabellón BMW (Bernhard Franken; Múnich, Alemania; 1999); fuente: http://ewww.vitruvius.com.br	261
fig.6-21	Módulos para estructura monocasco del Abu Dhabi Bridge Pavilion (Asymptote Architects; Abu Dhabi, UAE; 2009); fuente: Centralstaal	261

fig.6-22	Módulos para envolvente y subestructura, del Centro de artes escénicas Kilden (Ala Architects; Kristiansand, Noruega; 2012); fuente: Blumer-Lehmann	261
fig.6-23	Módulos para envolvente rígida sin subestructura en Oostkampus (Carlos Arroyo; Oostkamp, Bélgica; 2011); fuente: (Vari, s.f.)	261
fig.6-24	Unión entre vigas de madera en el Club de golf Yeogu (Shigeru Ban Architects; Corea del Sur; 2010); fuente: Blumer-Lehmann	262
fig.6-25	Unión entre módulos prefabricados: Club de golf Yeogu (Shigeru Ban Architects; Corea del Sur; 2010); fuente: Blumer-Lehmann	262
fig.6-26	Unión entre sistemas (estructura y fachada, estructura y cubierta): Club de golf Yeogu (Shigeru Ban Architects; Corea del Sur; 2010); fuente: Blumer-Lehmann	262
fig.6-27	Transporte por barco de módulos premontados en Centralstaal para el Abu Dhabi Bridge Pavilion (Asymptote Architects; Abu Dhabi, UAE; 2009).; fuente: Centralstaal	265
fig.6-28	Módulos de encofrado en el RolexLearning Center (Sanaa; Lausanne, Suiza; 2008); fuente: www.designtoproduction.com	266
fig.6-29	Módulos de encofrado en el RolexLearning Center (Sanaa; Lausanne, Suiza; 2008); fuente: www.designtoproduction.com	266
fig.6-30	Conectores de polietileno en la estación funicular en Hungerburg (Zaha Hadid Architects; Hungerburg, Austria; 2007); fuente: www.designtoproduction.com	266
fig.6-31	Conectores de polietileno en la estación funicular en Hungerburg (Zaha Hadid Architects; Hungerburg, Austria; 2007); fuente: www.designtoproduction.com	266
fig.6-32	Conectores de polietileno en la estación funicular en Hungerburg (Zaha Hadid Architects; Hungerburg, Austria; 2007); fuente: www.designtoproduction.com	266
fig.6-33	Pasos seguidos desde el dibujo terminado hasta la fabricación y montaje del proyecto por distintos fabricantes.; fuente: Blumer-Lehmann	267
fig.6-34	Concepto del diseño: unión de dos gotas de agua.; fuente: www.bollinger-grohmann.com	271
fig.6-35	Pabellón BMW en la feria de automóviles de Frankfurt.; fuente: www.franken-architekten.de	271
fig.6-36	Pabellón BMW en la feria de automóviles de Frankfurt.; fuente: www.bollinger-grohmann.com	271
fig.6-37	Pabellón BMW en la feria de automóviles de Frankfurt.; fuente: www.bollinger-grohmann.com	271

fig.6-38	Optimización de la geometría.; fuente: http://ewww.vitruvius.com.br	275
fig.6-39	Racionalización de la geometría por contorneado.; fuente: www.bollinger-grohmann.com	275
fig.6-40	Corte CNC de las costillas de aluminio.; fuente: http://ewww.vitruvius.com.br	275
fig.6-41	Fresado de moldes de poliuretano.; fuente: http://ewww.vitruvius.com.br	275
fig.6-42	Láminas de PMMA deformadas sobre los moldes de poliuretano.; fuente: http://ewww.vitruvius.com.br	275
fig.6-43	Montaje manual de la estructura de aluminio.; fuente: http://ewww.vitruvius.com.br	275
fig.6-44	Montaje manual de estructura de aluminio; fuente: http://ewww.vitruvius.com.br	275
fig.6-45	Montaje de la estructura. ; fuente: http://ewww.vitruvius.com.br	275
fig.6-46	Montaje de la envolvente. ; fuente: www.bollinger-grohmann.com	275
fig.6-47	Montaje de la envolvente. ; fuente: www.bollinger-grohmann.com	275
fig.6-48	Concepto original del proyecto: Jook Bu In, almohada tradicional de bambú con trama hexagonal.	277
fig.6-49	Imagen del club de golf.; fuente: http://www.freiform-holzbau.ch/	277
fig.6-50	Imagen del club de golf.; fuente: http://www.plataformaarquitectura.cl	277
fig.6-51	Racionalización geométrica: división de forjado en 32 módulos.; fuente: www.designtoproduction.com	282
fig.6-52	Racionalización geométrica: previsión de interfaces, apoyo de las vigas metálicas sobre líneas planas de la estructura de madera.; fuente: www.archdaily.com	282
fig.6-53	Estudio sobre modelo paramétrico de las juntas entre piezas.; fuente: www.designtoproduction.com	282
fig.6-54	Conexión entre componentes.; fuente: Blumer-Lehmann	282
fig.6-55	Materia bruta: vigas laminadas curvas.; fuente: Blumer-Lehmann	282
fig.6-56	Mecanizado CNC de vigas.; fuente: Blumer-Lehmann	282
fig.6-57	Vigas mecanizadas y numeradas; fuente: Blumer-Lehmann	282
fig.6-58	Vigas mecanizada; fuente: Blumer-Lehmann	282
fig.6-59	Realización de ensayos mecánicos.; fuente: Blumer-Lehmann	282
fig.6-60	Montaje de módulos en taller.; fuente: Blumer-Lehmann	283

fig.6-61	Montaje de módulos en taller.; fuente: Blumer-Lehmann	283
fig.6-62	Montaje de módulos en obra.; fuente: Blumer-Lehmann	283
fig.6-63	Montaje de módulos en obra.; fuente: Blumer-Lehmann	283
fig.6-64	Imágenes del exterior e interior de edificio Oostkampus.; fuente: www.archdaily.com	285
fig.6-65	Sección del edificio.; fuente: www.archdaily.com	285
fig.6-66	Esquema de la idea original para la fabricación de las cúpulas por proyección de hormigón sobre encofrados inflables, por el método Betonballon; fuente: www.carlosarroyo.net	285
fig.6-67	Planta en Autocad; fuente: www.carlosarroyo.net	289
fig.6-68	Prototipo de una pieza mostrando la intersección de los volúmenes de las esferas.; fuente: Vari	289
fig.6-69	Plano 2D con el dibujo de las esferas de 3 radios distintos	289
fig.6-70	Tabla de Excel mostrando cada esfera según su diámetro y posición.; fuente: Vari	289
fig.6-71	Aplicación manual de GRG sobre moldes de madera en un taller cercano a la obra.; fuente: Vari	290
fig.6-72	Montaje de piezas en obra.; fuente: Vari	290
Fig.6-73	Montaje de piezas en obra.; fuente: Vari	290
fig.6-74	Imágenes del exterior del edificio.; fuente: www.henn.com	293
fig.6-75	Imágenes del exterior del edificio.; fuente: www.archdaily.com	293
fig.6-76	Imágenes del exterior del edificio.; fuente: www.henn.com	293
fig.6-77	Dibujos 3d del edificio.; fuente: Centralstaal	293
fig.6-78	Dibujo de concepto del edificio: forma dinámica inspirada en el movimiento de un coche.; fuente: www.archdaily.com	297
fig.6-79	Racionalización: subdivisión en piezas de menor tamaño.; fuente: Centralstaal	297
fig.6-80	Optimización: análisis estructural.; fuente: Centralstaal	297
fig.6-81	Modelo 3d en Nupas Cadmatic, con detalle de elementos estructurales.; fuente: Centralstaal	297
fig.6-82	Modelo 3d en Nupas Cadmatic, con detalle de elementos estructurales.; fuente: Centralstaal	297
fig.6-83	Dibujos de construcción con la subdivisión de la envolvente.; fuente:	297

Centralstaal

fig.6-84	Dibujos de fabricación: estructura.; fuente: Centralstaal	297
fig.6-85	Corte de las costillas estructurales por arco de plasma.; fuente: Centralstaal	298
fig.6-86	Corte de las costillas estructurales por arco de plasma.; fuente: Centralstaal	298
fig.6-87	Montaje de la estructura en taller.; fuente: Centralstaal	298
fig.6-88	Deformación de chapa de la envolvente.; fuente: Centralstaal	298
fig.6-89	Verificación de la curvatura de la envolvente con plantillas.; fuente: Centralstaal	298
fig.6-90	Prototipo mostrando la unión de distintos componentes.; fuente: Centralstaal	298
fig.6-91	Soldadura de las chapas deformadas sobre la estructura en taller.; fuente: Centralstaal	298
fig.6-92	Montaje de los módulos en obra.; fuente: Centralstaal	298
fig.6-93	Montaje de los módulos en obra.; fuente: Centralstaal	298
fig.6-94	Montaje de los módulos en obra.; fuente: Centralstaal	298
fig.6-95	Montaje de los módulos en obra.; fuente: Centralstaal	298
fig.6-96	The Programmed Wall (Gramazio Kohler Research, ETH Zurich; 2006); fuente: http://gramaziokohler.arch.ethz.ch	301
fig.6-97	The Sequential Wall 2 (Gramazio Kohler Research, ETH Zurich; 2008); fuente: http://gramaziokohler.arch.ethz.ch	301
fig.6-98	The Stacked Pavilion (Gramazio Kohler Research, ETH Zurich; 2009); fuente: http://gramaziokohler.arch.ethz.ch	301
fig.6-99	The Stacked Pavilion (Gramazio Kohler Research, ETH Zurich; 2009); fuente: http://gramaziokohler.arch.ethz.ch	301
fig.6-100	Complex Timber Structures (Gramazio Kohler Research, ETH Zurich; 2013- actual); prototipo 1.; fuente: http://gramaziokohler.arch.ethz.ch	302
fig.6-101	Complex Timber Structures 2 (Gramazio Kohler Research, ETH Zurich; 2013- actual); prototipo 2.; fuente: http://gramaziokohler.arch.ethz.ch	302
fig.6-102	Complex Timber Structures (Gramazio Kohler Research, ETH Zurich; 2013- actual); prototipo 3.; fuente: http://gramaziokohler.arch.ethz.ch	302
fig.6-103	Complex Timber Structures (Gramazio Kohler Research, ETH Zurich; 2013- actual); prototipo 3.; fuente: http://gramaziokohler.arch.ethz.ch	302
fig.6-104	ITA Dach: imagen del exterior. ; fuente: www.ethz.ch	305

fig.6-105	ITA Dach: imágenes del interior. ; fuente: www.ethz.ch	305
fig.6-106	ITA Dach: imágenes del interior. ; fuente: www.ethz.ch	305
fig.6-107	Dibujos del concepto. ; fuente: rob-technologies.com	305
fig.6-108	Diseño de la estructura.; fuente: rob-technologies.com	312
fig.6-109	Optimización de la estructura: diseño de uniones clavadas.; fuente: rob-technologies.com	312
fig.6-110	Esquema del proceso de fabricación por el pórtico robotizado.; fuente: rob-technologies.com	312
fig.6-111	Fabricación en el pórtico robotizado.; fuente: www.srf.ch	312
fig.6-112	Fabricación: corte de tabla con sierra.; fuente: rob-technologies.com	312
fig.6-113	Fabricación: colocación de tabla en su posición.; fuente: rob-technologies.com	312
fig.6-114	Fabricación: cabezal de clavado.; fuente: rob-technologies.com	312
fig.6-115	Fabricación: clavado de las uniones entre tablas.; fuente: rob-technologies.com	312
fig.6-116	Desplazamiento de la cercha terminada.; fuente: rob-technologies.com	313
fig.6-117	Realización de ensayos estructurales de las cerchas.; fuente: www.ethz.ch	313
fig.6-118	Transporte desde la fábrica a obra.; fuente: rob-technologies.com	313
fig.6-119	Montaje de las cerchas en obra; fuente: rob-technologies.com	313
fig.6-120	Montaje de las cerchas en obra; fuente: rob-technologies.com	313
fig.6-121	Montaje de las cerchas en obra; fuente: http://www.erne.net	313

9.2 LISTADO DE TABLAS

Tabla 1	Visitas a fábricas según procesos de fabricación	68
Tabla 2	Clasificación de procesos de fabricación personalizada: procesos directos.	87
Tabla 3	Clasificación de procesos de fabricación personalizada: procesos indirectos.	88
Tabla 4	Cuadro comparativo de análisis de procesos: Procesos de corte, substractivos, y formativos directos	225
Tabla 5	Cuadro comparativo de análisis de procesos: Procesos formativos indirectos, aditivos y de montaje robotizado	226
Tabla 6	Tabla comparativa resumen de procesos;: potencial para personalización en masa	227