

CERÁMICA CELULAR

Paramétrica, performativa & free-form



JUANJO CASTELLÓN

ETH _ Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Arquitecto por la ETSAB y M.Arch. en Emergent Technologies & Design por la Architectural Association School of London.

Juanjo Castellón es arquitecto por la ETSAB y M.Arch. en Emergent Technologies & Design por la Architectural Association School of London. Actualmente trabaja como investigador en el D-ARCH del Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETHZ) donde está desarrollando su tesis doctoral.

Profesor Adjunto de Cultura Digital en el Barcelona Institute of Architecture (BIArch) ha trabajado como arquitecto en estudios de prestigio internacional como Abalos & Herreros en Madrid, FOA en Londres, SHoP Architects en New York y Herzog & de Meuron en Basilea.

Su labor investigadora se centra, principalmente, en la integración de herramientas digitales y procesos de diseño contemporáneos con sistemas y materiales tradicionales, y en particular, la cerámica.

ÍNDICE

1. Proyecto

1.1. Introducción | 002

1.2. Precedentes | 003

2. Proceso

2.1. Fase 01 | 005

2.2. Fase 02 | 012

3. Créditos

1.1. INTRODUCCIÓN

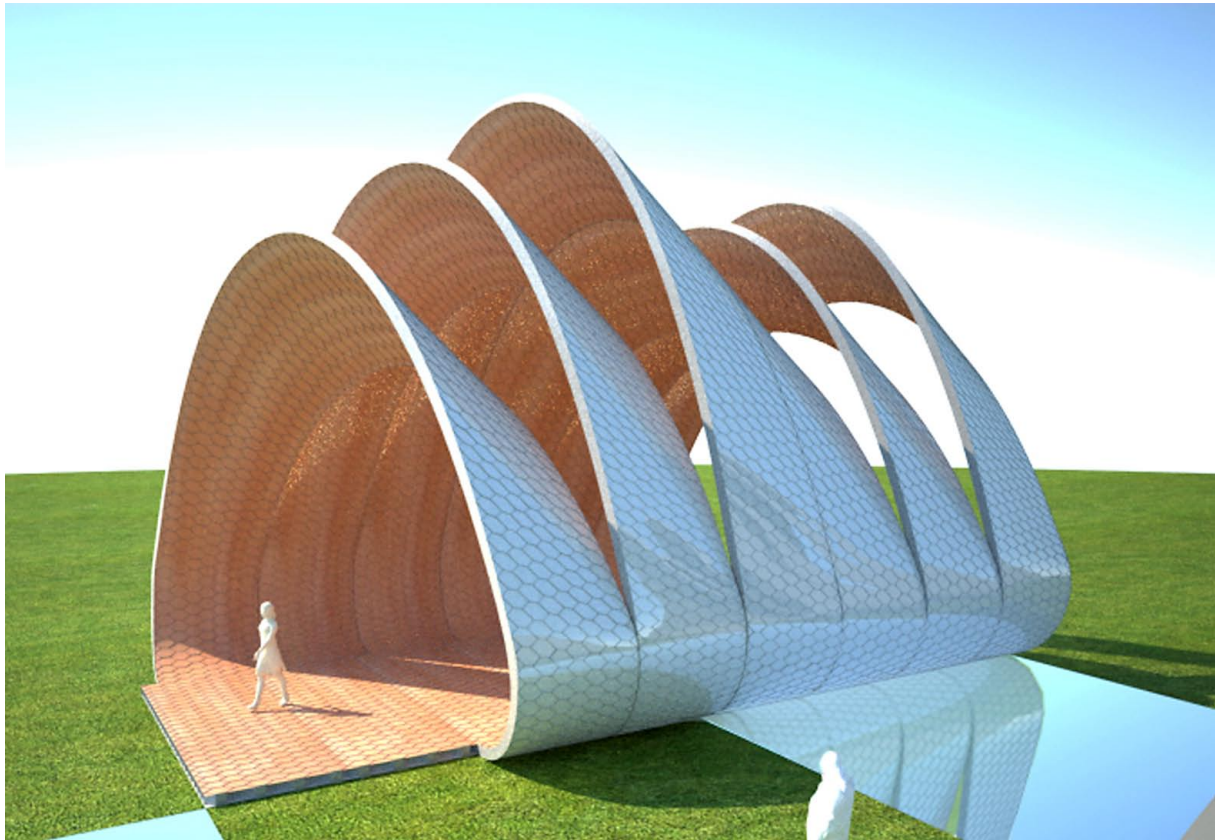


Fig. 1.00 | Cellular Reinforced Ceramics. Modelo Virtual.

El presente documento es fruto de la investigación que se se está llevando a cabo en el Departamento de Diseño estructural del D-ARCH en el Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETHZ). Dicha investigación, que se desarrolló en su primera fase en la Architectural Association School of Architecture (London), se encuentra, actualmente, en su segunda fase de desarrollo.

El objeto de la investigación se centra en el desarrollo de un sistema material y geométrico que permita la fabricación de superficies estructurales de doble curvatura mediante el ensamblaje de componentes cerámicos. Para ello se combinan las últimas tecnologías en diseño paramétrico con un sistema de fabricación basado en la tradición constructiva española.

La superación de la necesidad de una fabricación industrial standard y, a su vez, la confirmación de la necesidad de una arquitectura innovadora pero también responsable y consciente de factores sociales, medioambientales y económicos, abre una nueva etapa para arquitectos e industriales en la que resulta esencial la integración de nuevas tecnologías con técnicas y procesos heredados de la tradición constructiva.

1.2. PRECEDENTES

Guastavino, Dieste y la evolución de la construcción cohesiva



Fig. 1.01 | City Hall Station.1900. Nueva York. Rafael Guastavino.

El arquitecto valenciano Rafael Guastavino (1842-1908) desarrolló a finales del siglo XIX un sistema constructivo basado en la técnica tradicional de la bóveda catalana al que denominó construcción cohesiva¹. Guastavino diferenciaba dos tipologías estructurales fundamentales: construcción por gravedad y construcción cohesiva. Mientras la construcción mecánica, o por gravedad, se basa en la resistencia que opone cualquier sólido a la gravedad cuando interacciona con otro sólido por fricción, la construcción cohesiva usa como principio estructural la adhesión entre diferentes capas materiales (en este caso, mortero y cerámica).

Guastavino aplicó este sistema constructivo en los Estados Unidos en edificios tan importantes como la biblioteca de Boston, la Catedral de Saint John's Divine o la City Hall Station (fig.1.01) de Nueva York².

Su sistema para la construcción de bóvedas tuvo un enorme éxito y repercusión gracias a las enormes ventajas que proporcionaba su técnica cohesiva.

Por un lado, el uso de cerámica proporcionaba a las bóvedas excelentes propiedades ignífugas y, además de ser un material económico y estéticamente agradable, las bóvedas de Guastavino podían cubrir luces de hasta 30 metros sin necesidad de vigas y sin andamiaje, por lo que el sistema era rápido y, estructuralmente, muy eficiente.

Por otro lado, esta técnica tenía el inconveniente de que requería de mano de obra altamente cualificada y conocimientos especializados para su diseño y ejecución, por este motivo, y a pesar de la extraordinaria obra desarrollada por Guastavino, el sistema de construcción cohesiva cayó en desuso.

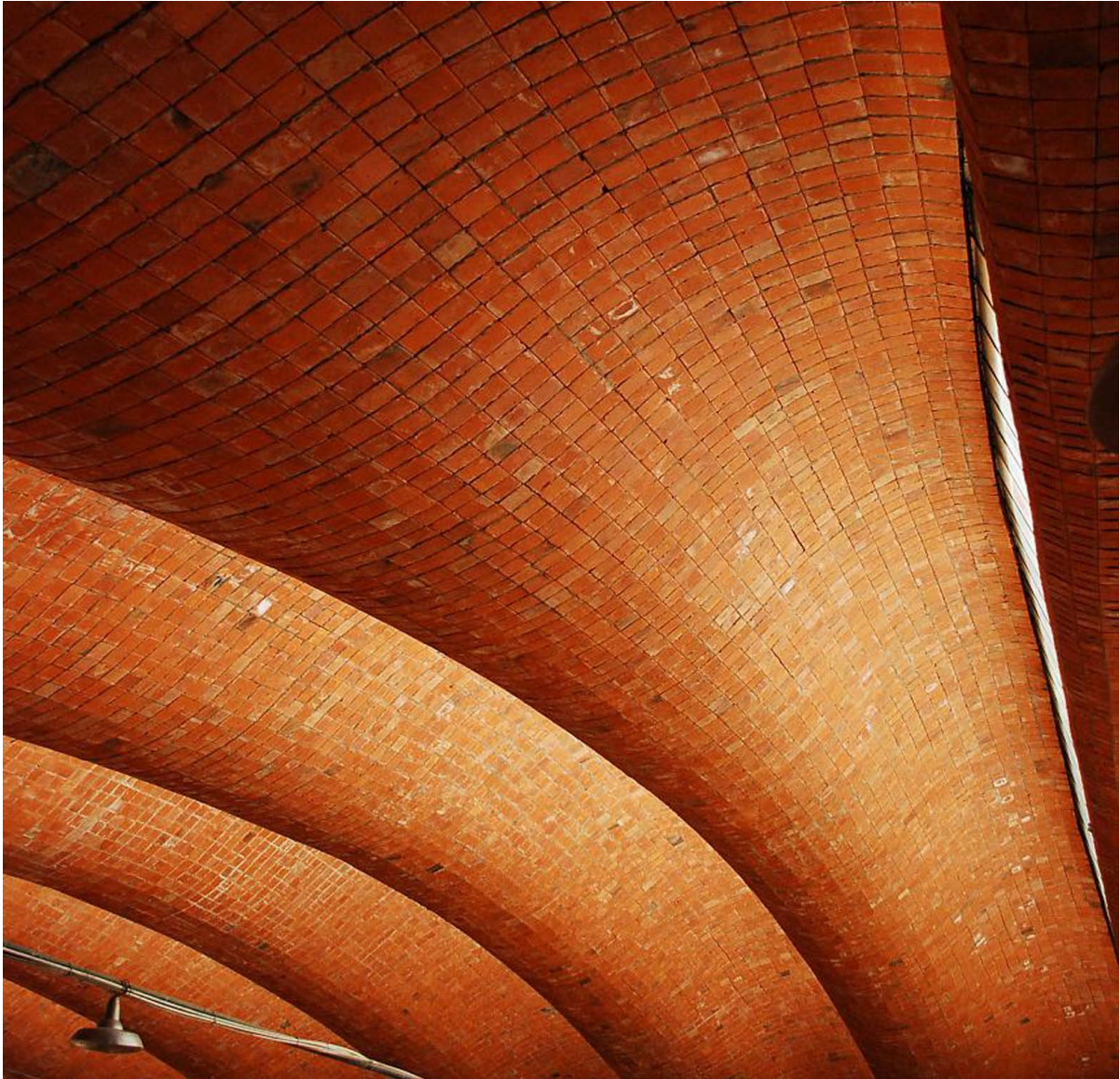


Fig. 1.02 | Edificio Durazno.1979. Montevideo. Eladio Dieste

Unos años más tarde, el ingeniero uruguayo Eladio Dieste (1917-2000) retomó el camino iniciado por Rafael Guastavino y lo evolucionó gracias a su descubrimiento de la cerámica reforzada³. Esta técnica híbrida desarrollada por Dieste combinaba la técnica tradicional del ladrillo con el uso del refuerzo de acero. Dicha combinación confería al sistema la ductilidad y las propiedades mecánicas del hormigón armado y compensaba a su vez el mal comportamiento a tracción de la obra de ladrillo. El conglomerado de ladrillo, cemento y acero es más heterogéneo que el hormigón armado y, de esta manera, los esfuerzos a tensión son absorbidos por el acero mientras que los esfuerzos a compresión son absorbidos por la cerámica y el mortero.

Dieste empleaba, en la construcción de sus bóvedas, ladrillos huecos dispuestos en una retícula cuadrada. De esta manera, la única manera de colocar los refuerzos metálicos era insertando las barras entre las juntas siguiendo las líneas isostáticas de la cuadrícula. Este proceso resultaba laborioso y requería de un tiempo de ejecución considerable. Por otro lado, su sistema era capaz de salvar luces de hasta 50 metros sin columnas y con un espesor estructural mínimo. A ello también contribuía el desarrollo geométrico de lo que Dieste denominó bóvedas Gausas (fig. 1.02).

Las bóvedas Gausas son finas superficies de doble curvatura que, gracias a su geometría, resultan extremadamente resistentes. Dicho de otra manera, la geometría de la bóveda mejora su comportamiento estructural y, de esta manera, mediante una simple y fina capa de cerámica reforzada, Dieste fue capaz de crear bóvedas que aunaban belleza formal y eficiencia estructural⁴.

El uso de la cerámica estructural resultó esencial en el éxito del sistema reduciendo la necesidad de un andamiaje continuo durante la construcción y permitiendo una alta estandarización y control durante la ejecución. Además el sistema estaba basado en la optimización en el uso de materiales y recursos locales y en la sabia combinación de eficiencia técnica con viabilidad económica⁵.

2.1. PROCESO FASE 01

Diseño Paramétrico y Fabricación Cohesiva

El objetivo de este proyecto es recuperar los principios desarrollados por Rafael Guastavino y Eladio Dieste y tratar de desarrollarlos y actualizarlos mediante el uso y aplicación de las tecnologías contemporáneas.

El sistema de cerámica armada demostró ser una técnica eficiente y efectiva en todos los aspectos y su desarrollo se detuvo básicamente por dos motivos: el primero es la falta de mano de obra cualificada para su ejecución y el segundo la necesidad de unos conocimientos geométricos y estructurales avanzados.

Por tanto, el principal objetivo del proyecto es resolver estos dos problemas fundamentales.

La hipótesis de partida es desarrollar un componente híbrido y paramétrico cuya geometría es generada utilizando las nuevas herramientas de software paramétrico (Grasshopper) y cuya materialización se obtiene mediante la combinación de cemento, cerámica y panel de nido de abeja de aluminio.

Los parámetros utilizados para la definición geométrica del panel son el ángulo de torsión, las dimensiones del panel (ancho, largo y espesor) y la curvatura de sus extremos (fig. 1.03). Mediante estas sencillas transformaciones podemos obtener infinitas configuraciones en función de la geometría que queremos construir (fig. 1.04).

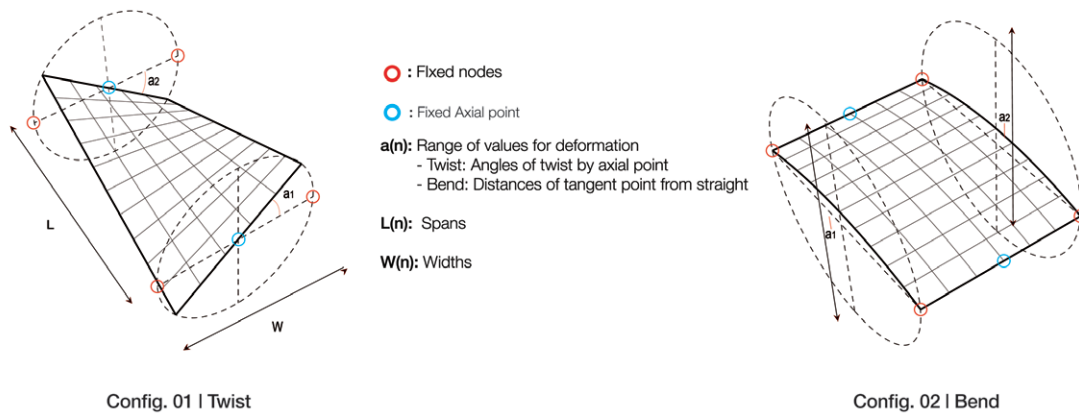


Fig. 1.03 | Lógicas Geométricas . Parámetros y Transformaciones

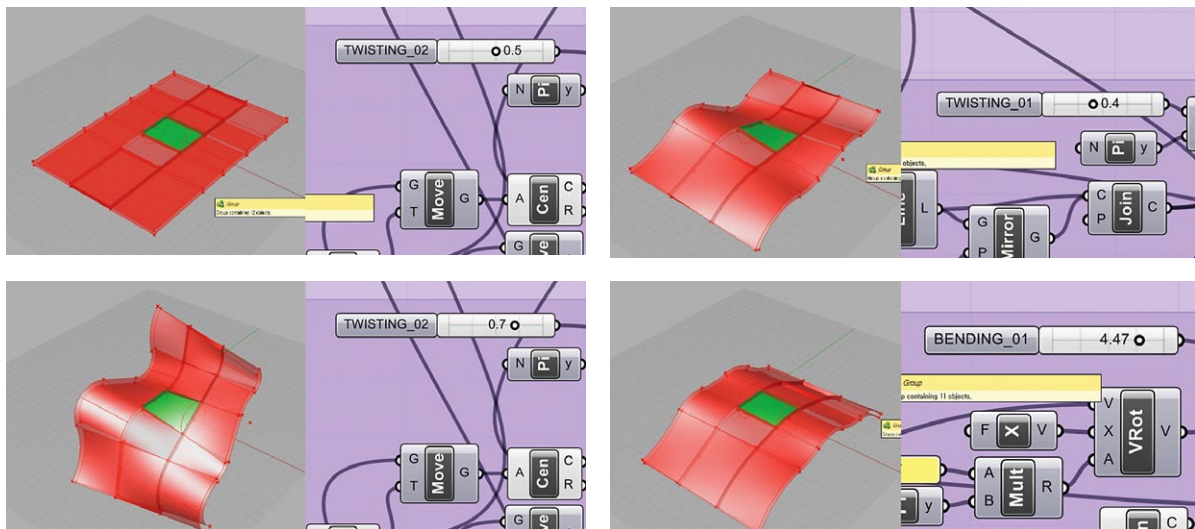


Fig. 1.04 | Configuraciones paramétricas generadas con Grasshopper



Fig. 3.03 | The sequence of flat panel composite (Honeycomb + Fine Art Cement)



Fig. 3.04 | The sequence of flat panel composite (Honeycomb + Glass Fibre Sheet + Fine Art Cement)

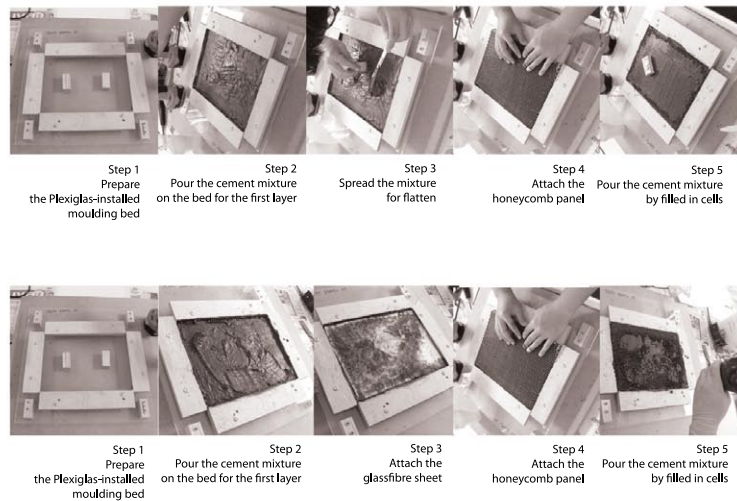


Fig. 1.05 | Test Material. Producción de Componente Plano

Además, la propia forma de la pieza incrementa su resistencia y su comportamiento estructural siguiendo los mismos principios que los aplicados en la construcción de las bóvedas gausas de Dieste.

Una vez definidos los aspectos geométricos, queda desarrollar la materialidad del nuevo panel. Se trata, en este caso, de interpretar el concepto de cerámica reforzada mediante el desarrollo de un material compuesto que combine las propiedades del hormigón y la cerámica con algún sistema de refuerzo metálico.

Es en este punto donde surge la idea de combinar las excelentes propiedades geométricas y estructurales del panel de nido de abeja de aluminio con las de la cerámica. A este sistema híbrido lo llamaremos Cerámica Celular Reforzada. En primer lugar se experimentó con piezas planas que combinaban cemento con paneles de nido de abeja (fig.1.05). Para ello contamos con la colaboración de Alucoat (empresa que fabrica paneles de nido de abeja) que nos suministró paneles formato A4 con un tamaño de celda de 6mm y un espesor de panel de 10 mm.

Por otro lado, también se pudo comprobar las posibilidades de incorporar transparencia o espacios de ventilación en estas piezas. Con este objeto, se experimentó con la pieza dejando un área del panel de nido de abeja sin material y posteriormente añadiendo resina de poliéster (fig. 1.06). El resultado es una pieza que puede incorporar aberturas y huecos mostrando a su vez las propiedades plásticas y reflexivas del panel de nido de abeja.

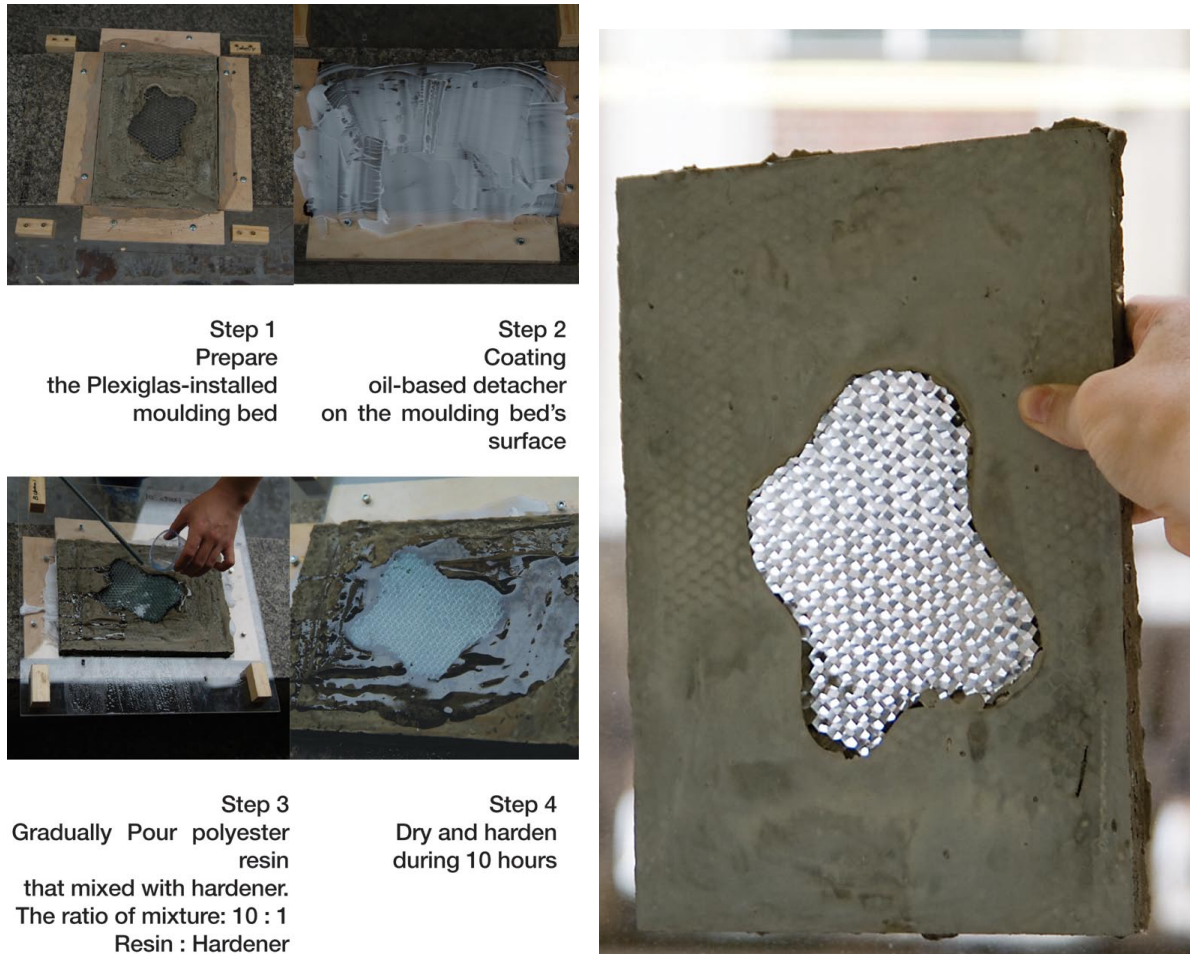


Fig. 1.06 | Test material. Transparencia producida mediante la aplicación de Resina de Polyester

Como resultado de este primer experimento se pudo comprobar cómo la combinación del panel de nido de abeja con el cemento genera una pieza resistente y con potencial para ser aplicada como elemento estructural y como cerramiento transparente u opaco.

El segundo experimento se centró en fabricar una pieza tridimensional acorde con los estudios geométricos desarrollados utilizando el software paramétrico.

Para ello, un sistema de molde fue diseñado de manera que se pudieran fabricar diferentes geometrías acordes con las configuraciones generadas por ordenador (Fig.1.07).

El sistema permite la fabricación de piezas de diferentes tamaños y geometrías gracias a unas guías que permiten tanto el ajuste del molde en altura como en anchura, así como el control de los ángulos de torsión y los radios de curvatura de las aristas perimetrales de la pieza. Asimismo, el sistema de molde está concebido mediante un sistema de 3 capas (fig.1.08).

La capa intermedia está formada por un panel de nido de abeja forrado de una fina superficie de látex. Esta capa permite dar el acabado de la pieza y, ade-

más, consigue gracias al panel de nido de abeja, por un lado soportar el peso del vertido de la mezcla de cemento, y por el otro controlar perfectamente la geometría de la superficie de acabado.

Las otras dos capas son las de fabricación de dos componentes simétricos.

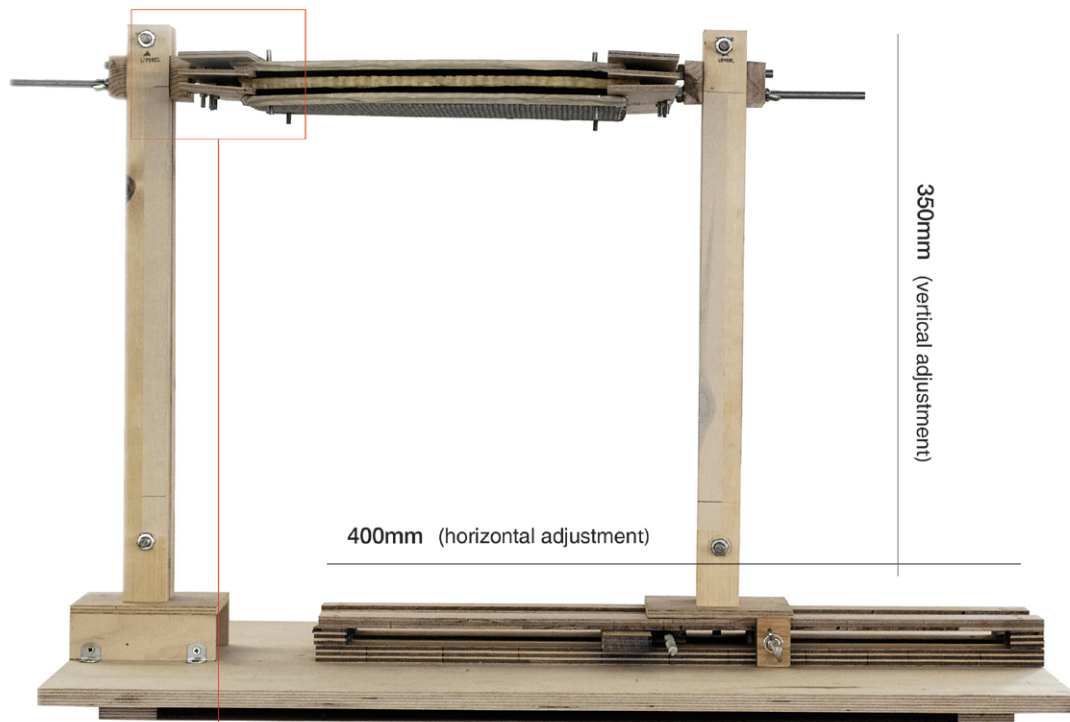


Fig. 1.07 | Prototipo de Sistema de molde paramétrico

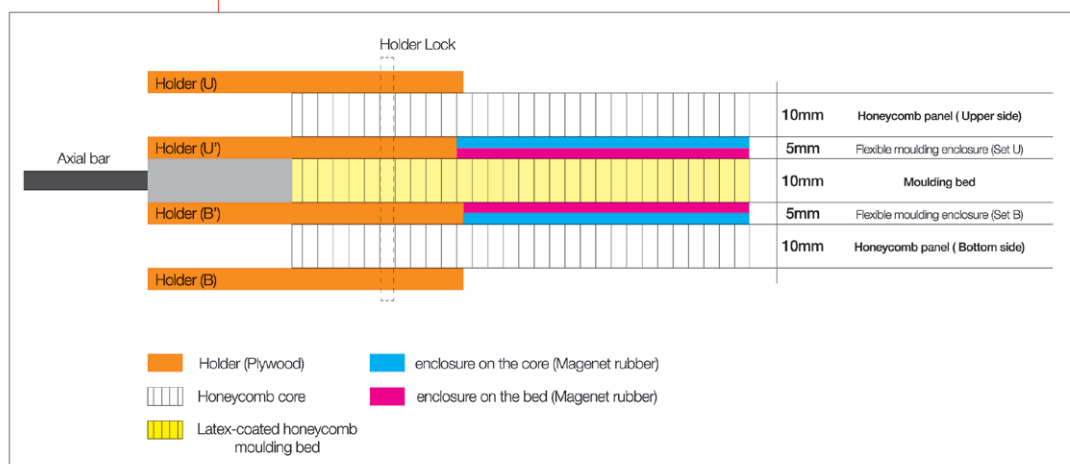


Fig. 1.08 | Sección detalle del sistema de molde paramétrico.

En primer lugar se aplica una primera capa de cemento y se ajusta el panel de nido de abeja a la geometría del molde. Dicha geometría viene determinada por las variables generadas digitalmente en el modelo paramétrico. Los datos son trasladados del computador al sistema de molde paramétrico permitiendo, de este modo, diferentes configuraciones para el panel, ya sea curvo (Fig. 1.09) o alabea-

do (Fig. 1.10). El siguiente paso es aplicar la capa de cemento con el espesor final del panel elegido.

Una vez finalizado el proceso de secado o fraguado del panel (según este sea de cemento o cerámico), se rota el molde 180° y se sigue el mismo proceso para la fabricación de la pieza simétrica definiendo así las dos caras del panel en el que la estructura de panel de abeja quedará embebida.

La pieza que resulta del proceso es un panel tridimensional de hormigón reforzado con panel de nido de abeja con notables propiedades geométricas y estructurales (fig. 1.11), lo cual permite pensar en la construcción de superficies complejas de doble curvatura mediante la adición y control de un número determinado de componentes paramétricos tridimensionales.

Los experimentos se realizaron con cemento rápido y con unos recursos técnicos limitados. El desarrollo y producción industrial del sistema es el objeto de la investigación que se está desarrollando en el Swiss Institute of Technology Zurich (ETHZ) .

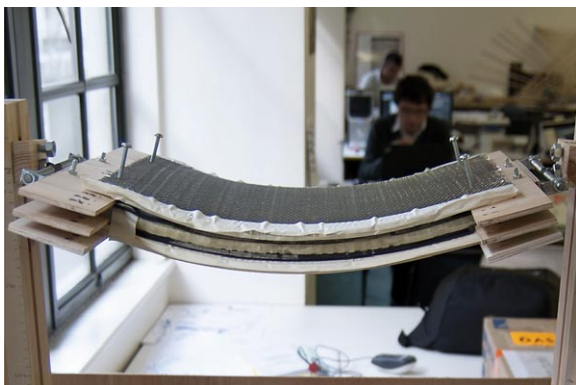


Fig. 1.09 | Molde preparado para pieza tridimensional curva

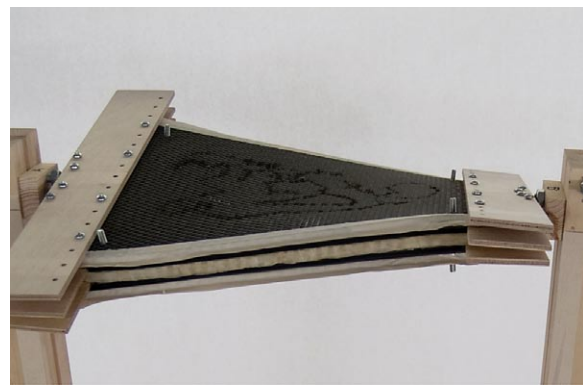


Fig. 1.10 | Molde preparado para pieza tridimensional alabeada

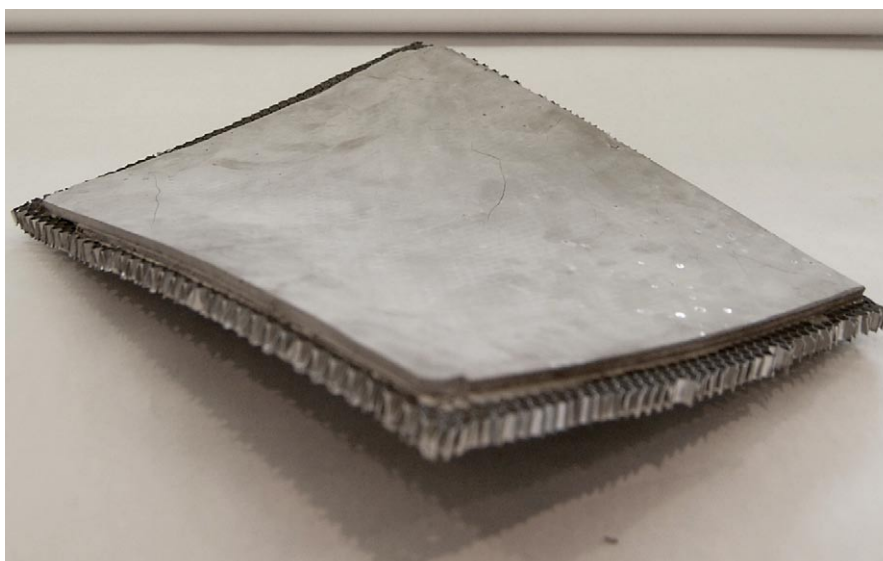


Fig. 1.11 | Panel tridimensional de hormigón celular reforzado

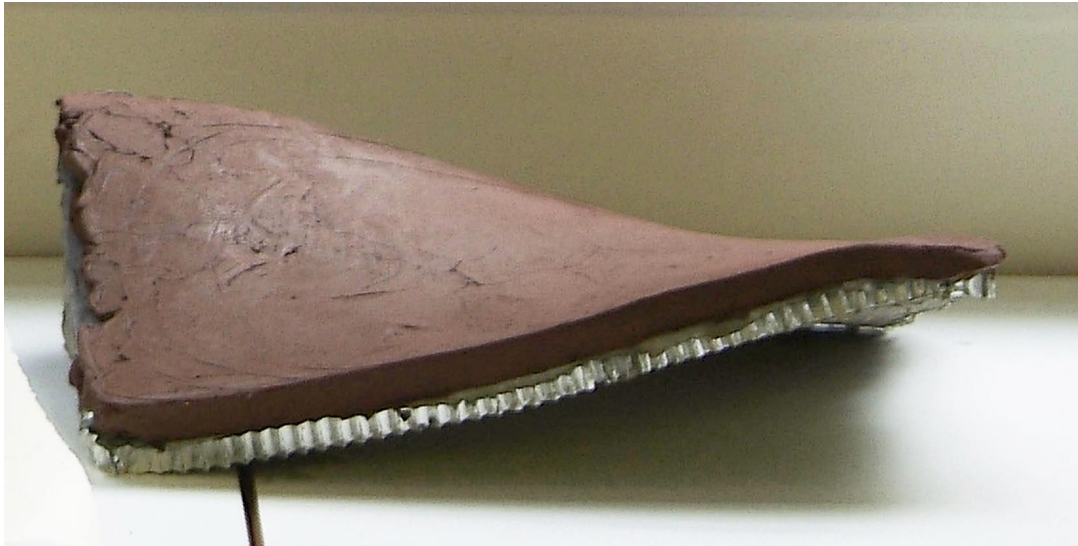


Fig. 1.12 | Modelo de panel de cerámica reforzada

Para la fabricación de piezas cerámicas, el molde paramétrico ajusta asimismo su geometría a los parámetros generados digitalmente y sobre él se aplica la capa de cerámica. Posteriormente se lleva la pieza al horno y, una vez seca, se fabrica el panel híbrido de cerámica, cemento y panel de nido de abeja (Fig. 1.12).

De este modo se obtiene una pieza que aúna los innumerables beneficios a nivel técnico, estético y económico de la cerámica con las propiedades estructurales y geométricas que aporta el panel de hormigón celular.

El sistema desarrollado nos permitiría fabricar secuencias de componentes tridimensionales de doble curvatura incorporando variación y libertad geométrica (Fig. 1.13). A su vez, el sistema abre nuevas posibilidades para la construcción de arquitecturas generadas mediante las herramientas de diseño paramétrico que se han desarrollado en los últimos años y explorar su potencial formal y espacial.

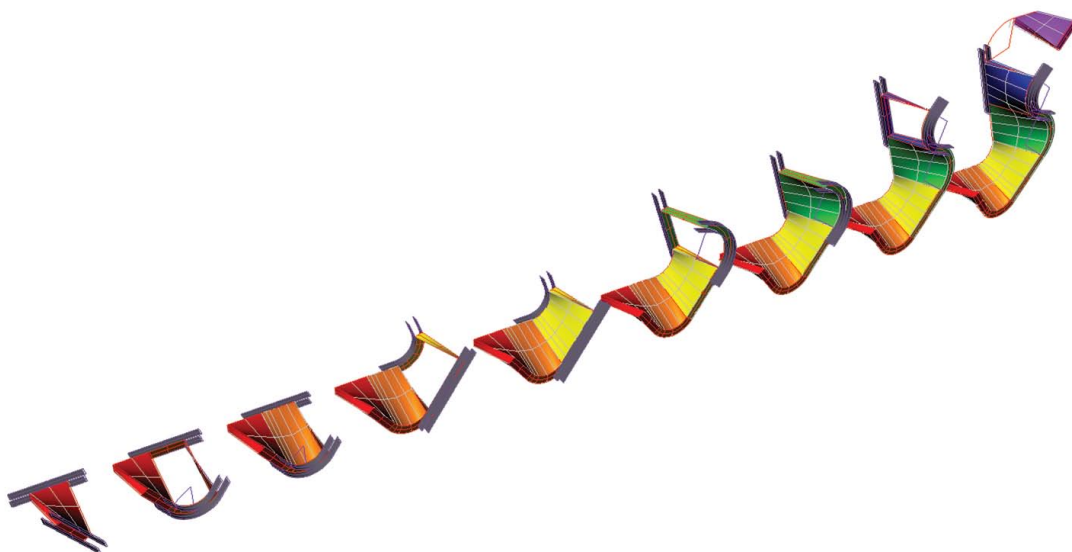


Fig. 1.13 | Secuencia de paneles generados paramétricamente

Assembly Logics | Parametric Rules

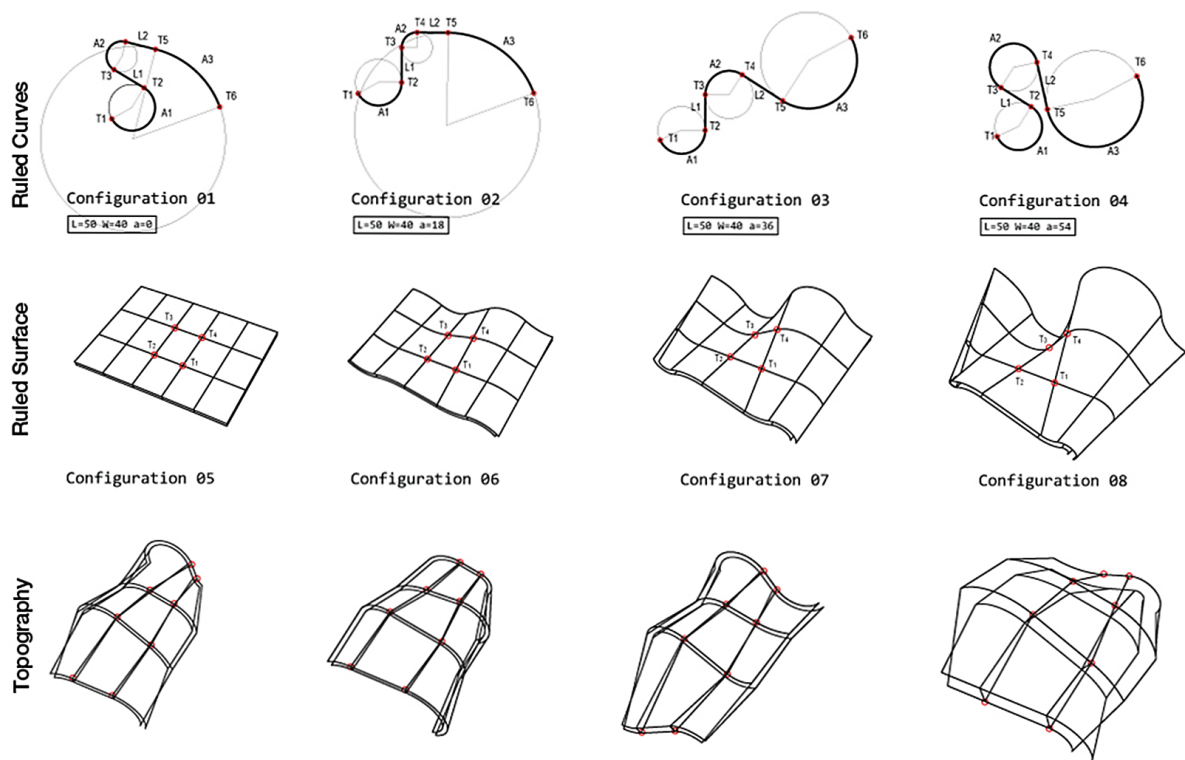


Fig. 1.15 | Lógicas de Ensamblaje. Principios Geométricos y generación de superficies

El objetivo principal es que este sistema funcione sin necesidad de añadir ningún tipo de estructura adicional y así explorar todas sus posibilidades arquitectónicas, estructurales y espaciales.

El siguiente paso en el desarrollo del sistema se centra en la construcción y ensamblaje de un número determinado de paneles tridimensionales de cerámica celular reforzada (Fig. 1.14). El sistema de ensamblaje utiliza principios geométricos para garantizar el control en la fabricación de los componentes y la continuidad entre las juntas generadas por los mismos. Por un lado se utilizan principios geométricos de tangencia y por el otro se prueban superficies regladas y superficies organizadas por capas a modo de topografía (Fig. 1.15).



Fig. 1.14 | Ensamblaje de 4 paneles según geometría generada digitalmente

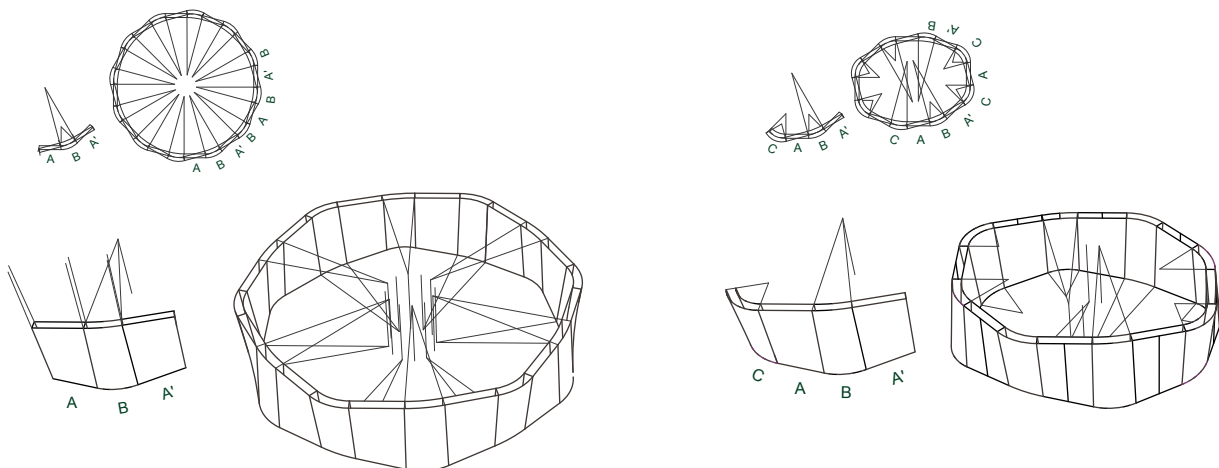


Fig. 1.16 | Lógicas aditivas para la configuración de superficies complejas

Se busca en el proyecto la capacidad de controlar la complejidad geométrica de las superficies generadas. De esta forma, y dependiendo de los requisitos económicos y de las necesidades específicas del proyecto, es posible la generación de superficies a partir de un número limitado de componentes (Fig. 1.16).

Siguiendo esta lógica es posible configurar, por ejemplo, diversos tipos de estructuras abovedadas (Fig. 1.17 - 1.18). Estas estructuras son generadas y controladas paramétricamente y, de esta manera, es posible comprobar su comportamiento estructural mediante simulaciones virtuales de carga. El último paso en el proceso de esta fase se centra en la construcción de un prototipo a escala real. En dicho prototipo se desarrollará la solución técnica de las uniones, así como, test materiales y estructurales del sistema.

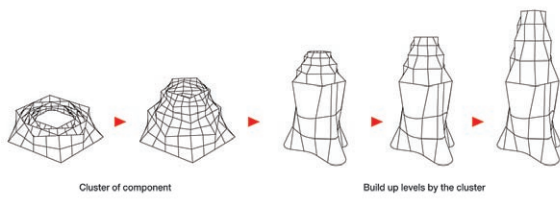


Fig. 1.17 | Generación Paramétrica de Cúpula

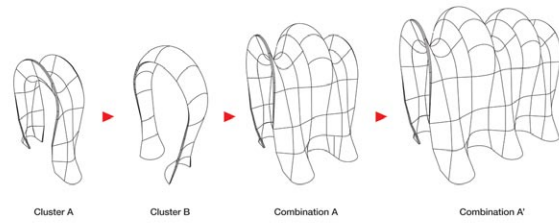
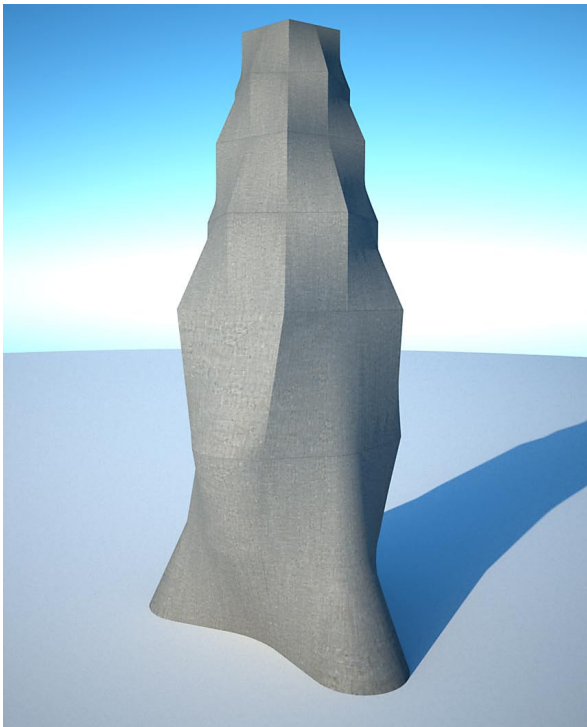


Fig. 1.18 | Generación Paramétrica de Estructura abovedada



2.2. PROCESO FASE 02

Cerámica Celular Reforzada

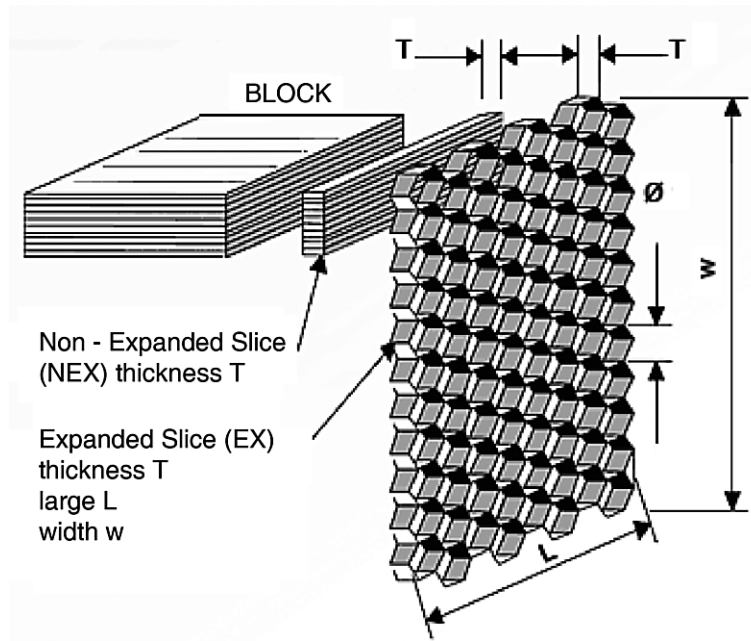


Fig. 1.19 | Muestra de Panel de Abeja NEX de Aluminio.

Una vez concluida la primera fase de la investigación, se inicia una segunda fase en la que el objetivo es trabajar con el sistema a una escala mayor. Todos los experimentos realizados en la primera fase estaban basados en el uso de paneles de abeja de aluminio expandido. Estos paneles fueron suministrados, por la empresa colaboradora Alucoat, en unas dimensiones de célula standard de 6 mm. y en un formato de 420 x 300 mm.

Sin embargo el proceso para la fabricación del panel de abeja de aluminio empieza con un bloque de aluminio del que se corta una rebanada no expandida (NEX). Esta malla, antes de ser expandida, es flexible y presenta un enorme potencial geométrico (Fig. 1.19 -1.20). Tomando como base el panel NEX, se inicia una nueva fase de la investigación en la que se explora la combinación de esta malla NEX con piezas cerámicas. Esta combinación engarza con el sistema de cerámica reforzada desarrollada por Eladio Dieste a finales de los años 70.

Mientras la malla es un material flexible que puede trabajar bien a tracción, las piezas cerámicas son componentes indeformables y con excelente comportamiento a compresión (Fig. 1.21). Se busca la combinación de estas lógicas geométricas y estructurales en la definición de un nuevo sistema material.



ALUNID - 3000 - Ø 1/4 - 56 - L1500 - W3000 - P - T10 - EX

Fig. 1.20 | Sistema de Fabricación del Panel de Abeja ALUCOID

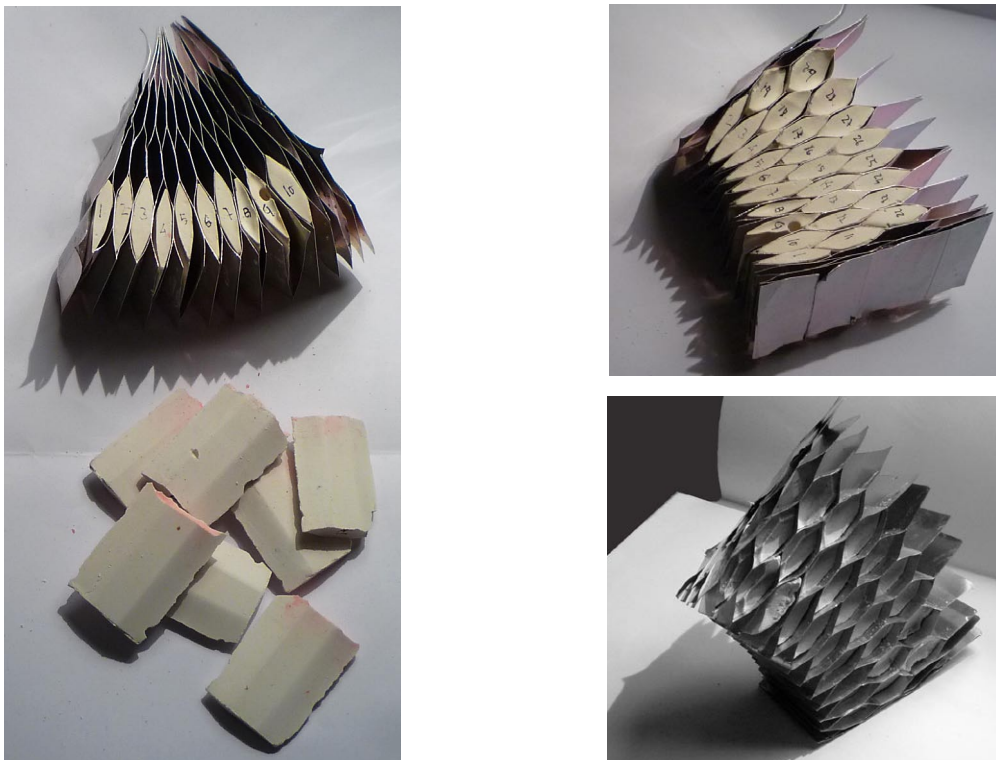
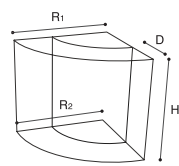


Fig. 1.21 | Cerámica Celular . Modelo de Sistema Material

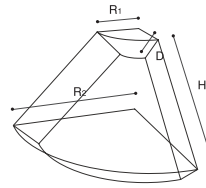
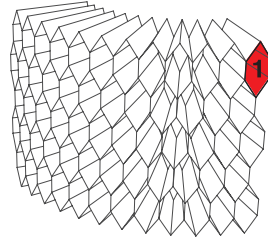


N : 1
Q : 36

N : Number of different Bricks
Q : Quantity of bricks

R₁ : Upper Radiaae
R₂ : Lower Radiaae
D : Panel Depth
H : Panel Heighth

R₁ = R₂



N : 5
Q : 36

N : Number of different Bricks
Q : Quantity of bricks

R₁ : Upper Radiaae
R₂ : Lower Radiaae
D : Panel Depth
H : Panel Heighth

R₁ ≠ R₂

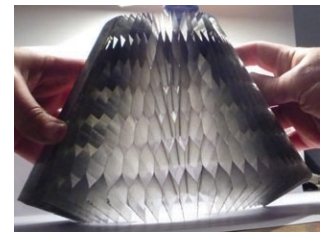
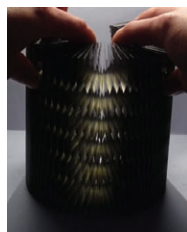
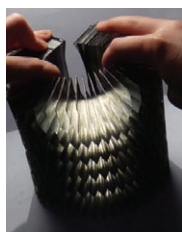
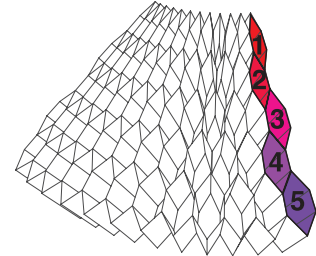


Fig. 1.22 | Sistema Geométrico. Superficies Cilíndricas

Fig. 1.23 | Sistema Geométrico. Superficies Cónicas

Una vez planteado el objeto de investigación para esta segunda fase, el primer paso en el proceso se centra en la exploración geométrica del sistema. Principalmente se explora cómo la geometría de los componentes cerámicos (a compresión) pueden definir la forma global de la malla NEX (a tensión).

En un primer caso se explora la definición del superficies cilíndricas mediante el uso de un único componente por radio de curvatura (Fig. 1.22). En segundo lugar se varía la geometría del componente para la generación de superficies cónicas (Fig. 1.23). Se observa cómo es posible generar superficies complejas mediante la fabricación de un número limitado de componentes cerámicos (Fig. 1.24). Se establece, por tanto, una dependencia entre el radio de curvatura de la superficie global y la geometría del componente cerámico.

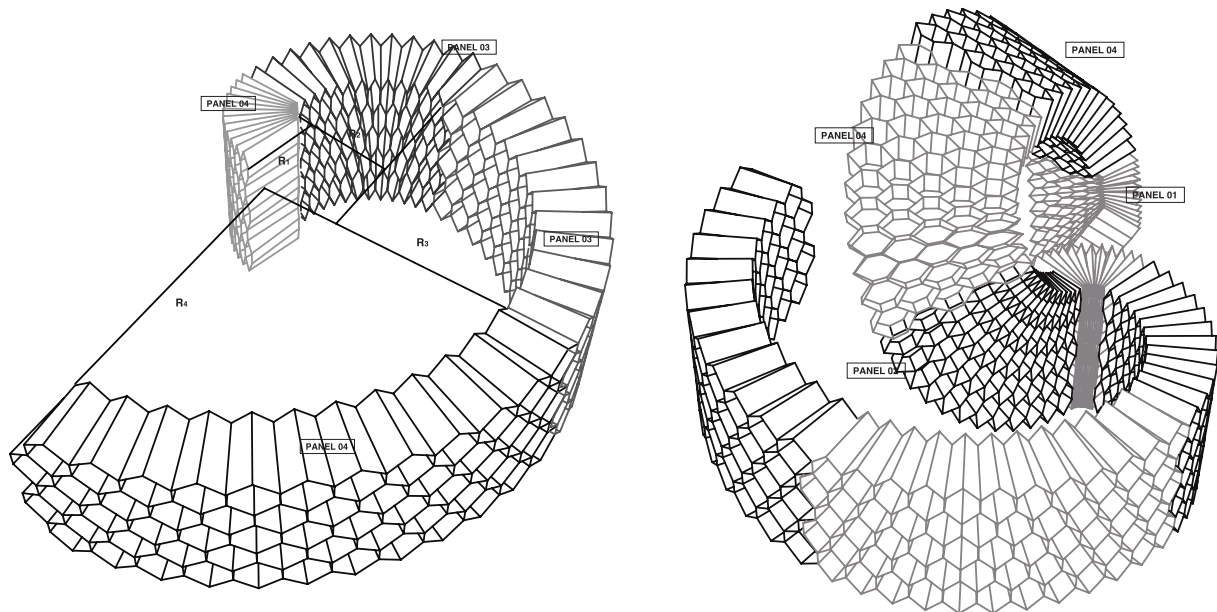


Fig. 1.24 | Sistema Geométrico. Combinación de superficies cilíndricas y cónicas



Fig. 1.25 | Test Material del Sistema. Malla NEX + Piezas Cerámicas

El siguiente paso en el proceso está enfocado en el estudio del componente cerámico desde el punto de vista performativo. Por un lado se estudia la materialidad del sistema y su potencial estético. La combinación de las piezas cerámicas con la malla NEX permite diferentes combinaciones cromáticas y diferentes grados de transparencia (Fig.1.25). Se busca, además, un sistema que se adapte a diferentes condicionantes ambientales y espaciales. Para ello se estudia el componente como elemento que varía según diferentes parámetros.

Por ejemplo, a nivel estructural, el sistema no tiene los mismos requerimientos en toda la superficie, por lo que, variando el componente cerámico, se pueden

generar gradientes de opacidad permitiendo diferentes grados de luz y transparencia (Fig.1.26).

Se desarrolla ,en consecuencia, un modelo digital, paramétrico y performativo que reacciona a diferentes factores estructurales, programáticos o ambientales.

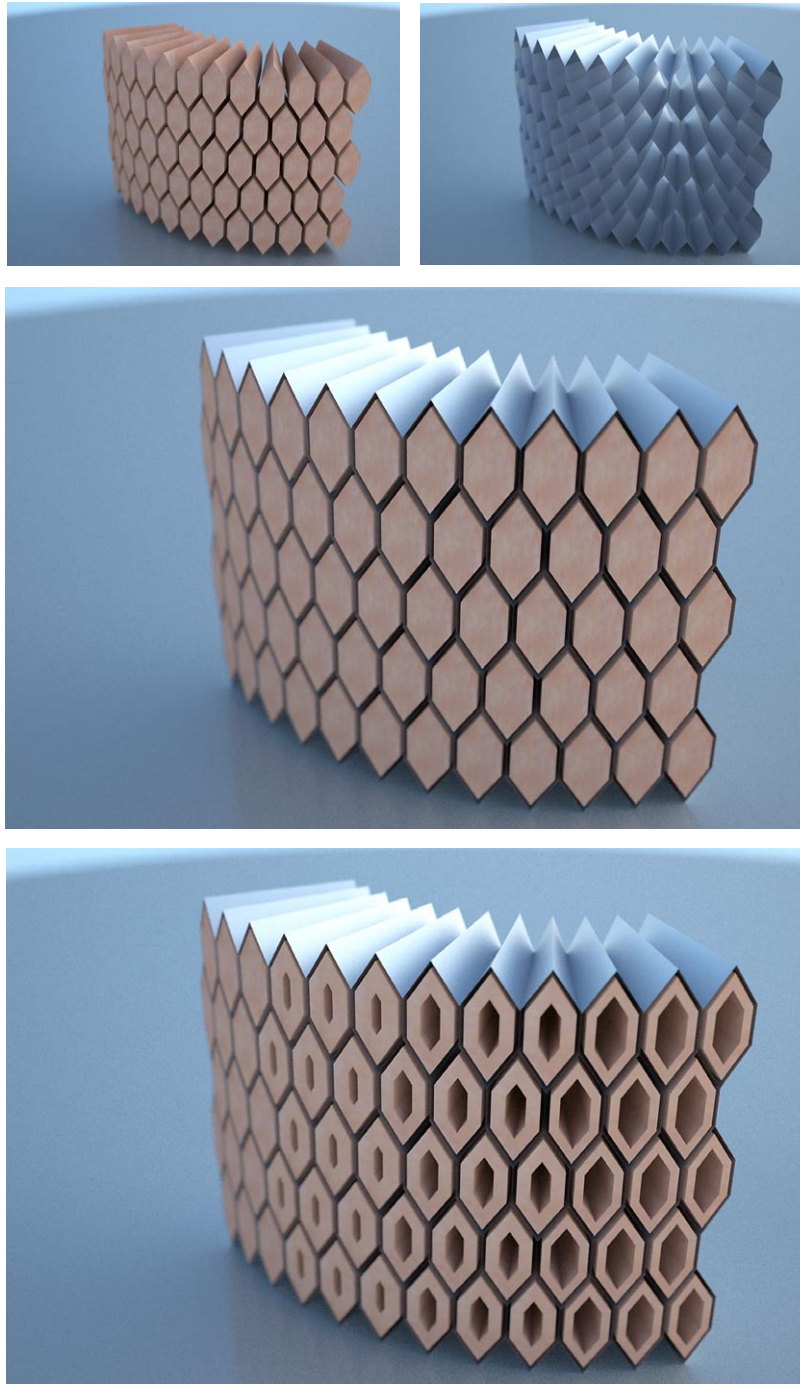


Fig. 1.26 | Modelo Paramétrico. Gradiente de transparencia según requerimientos estructurales o ambientales

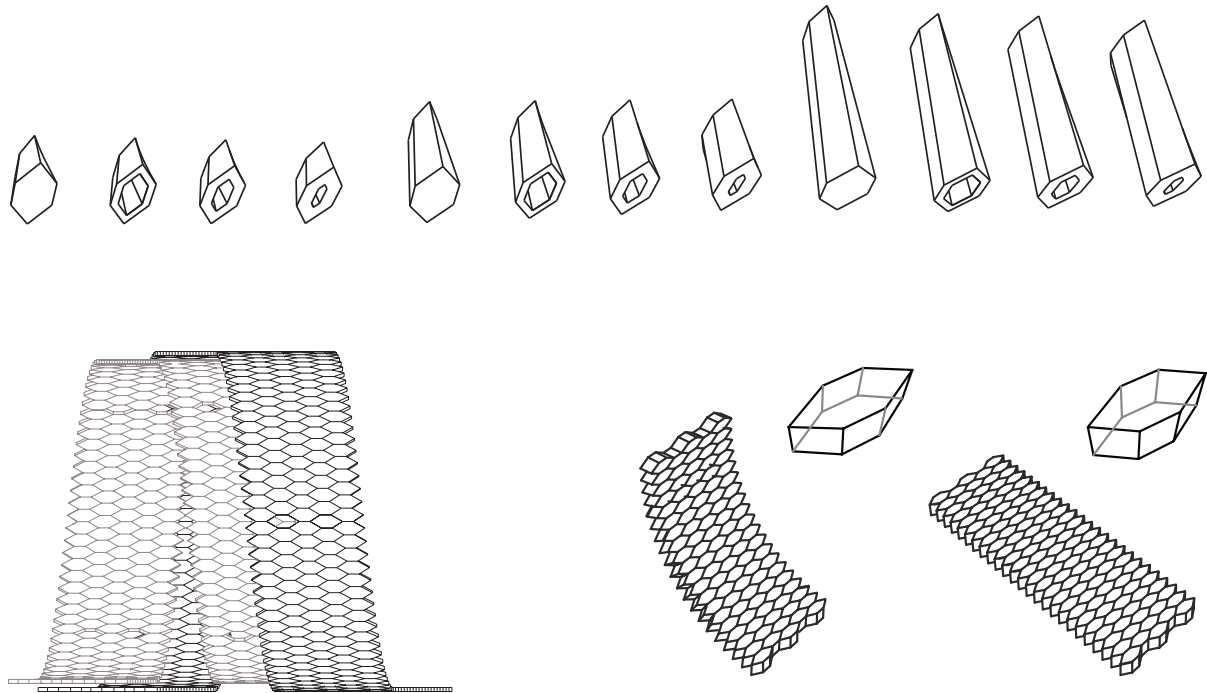


Fig. 1.27 | Construcción de bucles mediante superficies planas y de curvatura simple.

El proceso de investigación continúa con el estudio de las posibles aplicaciones arquitectónicas del sistema. Para ello, primero se estudia la adición de componentes cerámicos para la construcción de superficies planas y de curvatura simple (Fig. 1.27). La hipótesis es que con una única pieza para las áreas planas y otra para las curvas es posible generar bucles que organizan un espacio arquitectónico continuo. El modelo paramétrico evoluciona según estos principios (Fig. 1.28) y permite con tan sólo dos componentes cerámicos la configuración de un infinito número de bucles. Este sistema de bucles es la base del estudio arquitectónico (Fig.1.29).

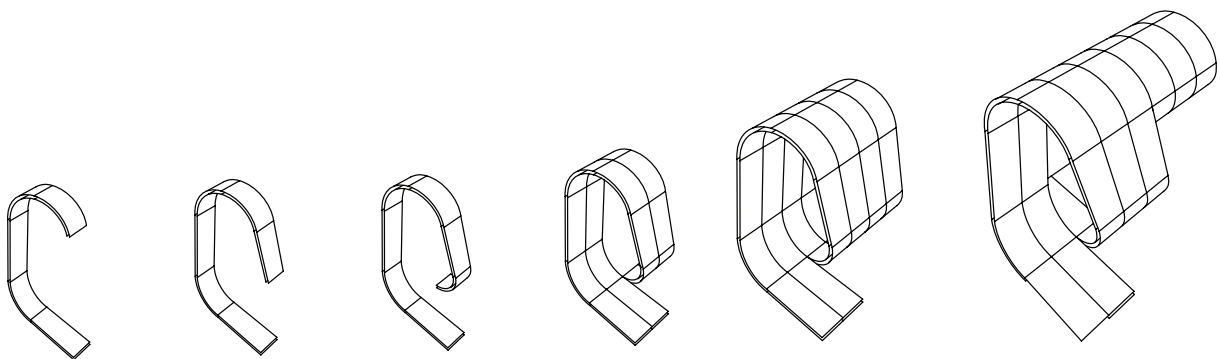


Fig. 1.28 | Ejemplo de evolución del sistema arquitectónico. Modelo Paramétrico.

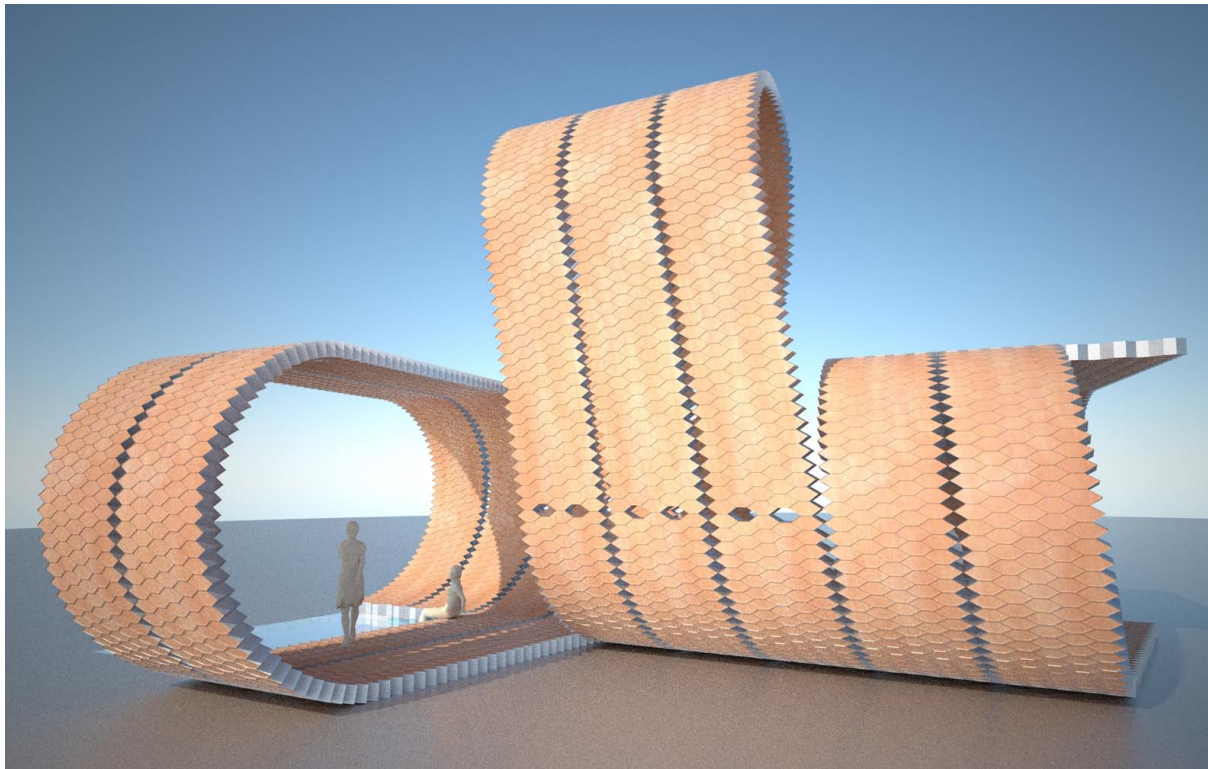


Fig. 1.29 | Posible configuración espacial. Modelo Digital.

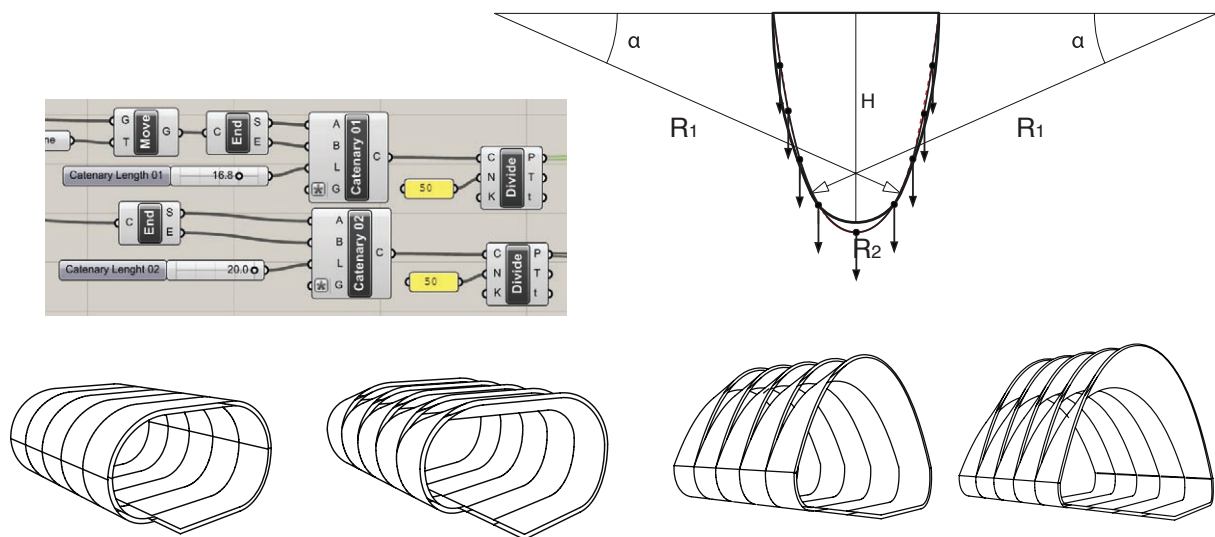


Fig. 1.30 | Modelo Paramétrico. Estudio de Bucles Catenarios

El sistema de bucles está basado en premisas geométricas, constructivas y espaciales, sin embargo, falta la incorporación de principios estructurales. Por esto, el modelo paramétrico es implementado por un principio estructural basado en curvas catenarias (Fig.1.30). Este sistema fue el utilizado por Eladio Dieste para la construcción eficiente de sus elegantes bóvedas gausas y, en este caso, modifican la geometría del bucle incorporando una mejora en su comportamiento estructural.

Como consecuencia, las superficies pasan a ser regladas y resulta necesaria una mayor variedad en la fabricación de los componentes cerámicos. Según los principios definidos previamente, sería necesaria una pieza por cada radio de curvatura diferente. En consecuencia, hay que reevaluar el sistema de fabricación y estudiar, en colaboración con industriales del sector, la posibilidad de producción de piezas con una extrusión no lineal. Este es uno de los aspectos que actualmente se encuentran en fase de desarrollo para el posterior estudio de superficies de doble curvatura.



Fig. 1.31 | Aplicación Arquitectónica. Pabellón de acceso a La Alhambra. Modelo Digital.

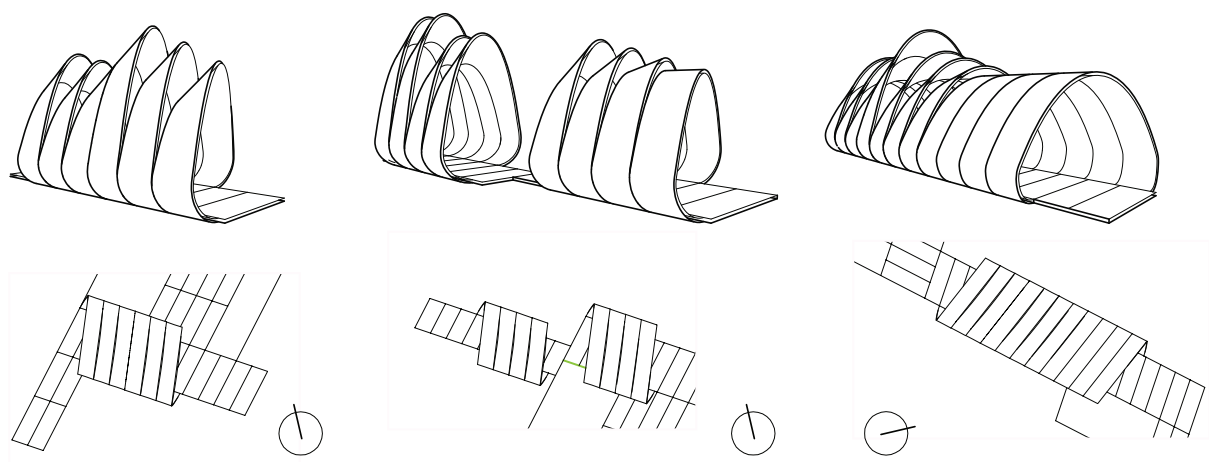


Fig. 1.32 | Modelo Paramétrico. Aplicación de Parámetros Ambientales y Programáticos.

El proyecto concluye con la aplicación del sistema en un contexto concreto y con un programa específico. Se trata de la construcción de un nuevo pabellón de acceso a La Alhambra de Granada (Fig.1.31 - 1.33). Como consecuencia, el modelo paramétrico debe reaccionar a parámetros ambientales y programáticos. El modelo reacciona a las diferentes orientaciones y se adapta a los requerimientos programáticos del proyecto (Fig. 1.32)

En resumen, esta técnica incorpora principios heredados de la tradición constructiva y los beneficios del uso de materiales plásticos y locales y abre un innovador camino en el desarrollo de nuevas aplicaciones estructurales en la construcción cohesiva de vanguardia.

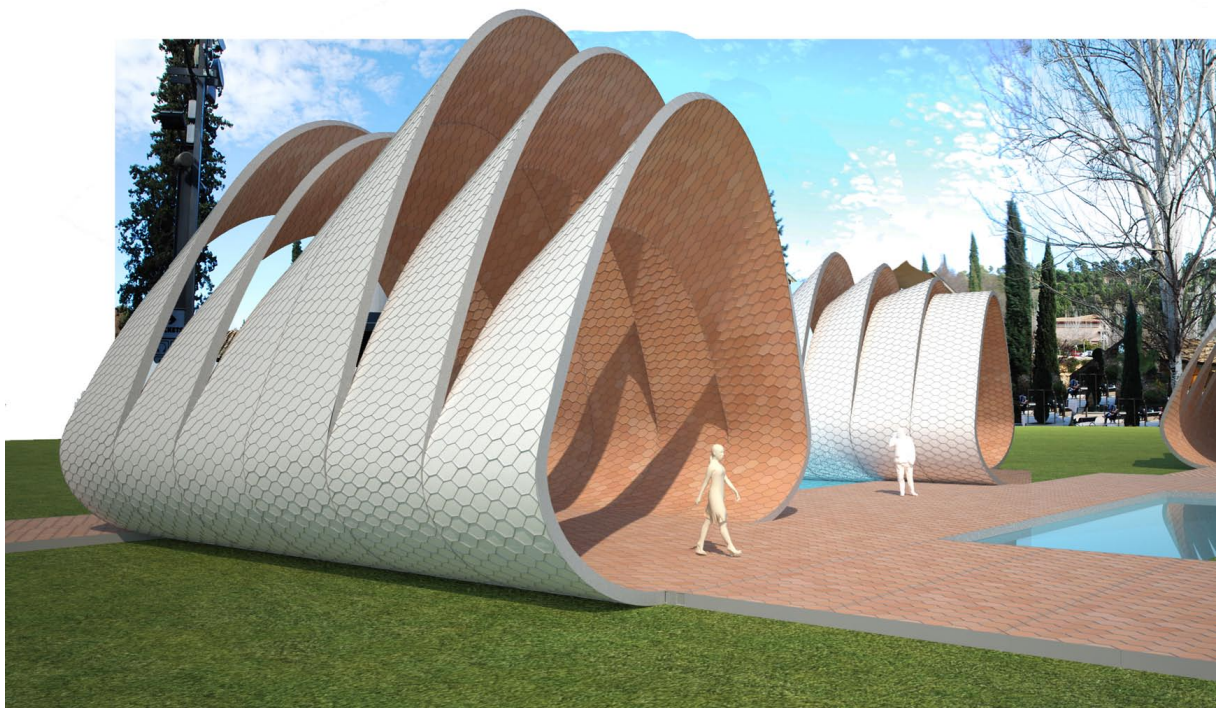


Fig. 1.33 | Aplicación Arquitectónica. Pabellón de acceso a La Alhambra. Modelo Digital.

-
- 1 Guastavino, Rafael. Essay on the theory and history of cohesive construction. Ticknor.1893
 - 2 Ochsendorf, John. The Guastavinos and tile vaults in North America. Informes de la Construcción. Vol 56. March-April 2005
 - 3 Anderson, S. Eladio Dieste, Innovation in Structural Art. Princeton Architectural Press. New York. 2004
 - 4 Shenk, Mark. On the shape of Cables, Arches, Vaults and ThinShells. 2009
 - 5 Theodossopoulos ,D. Sinha ,B.P. A study on the free-standing masonry vaults of Eladio Dieste. 2007
- * Todas las imágenes están realizadas por los autores del proyecto, excepto Fig.01 de Ryan Budhu y la Fig.02 de Juanitta (fuente Flickr)

3. CRÉDITOS

COLABORADORES FASE 01:

Baek Ki Kim

Silvia Ferdizz

ALUCOAT

CERAMICA CUMELLA

Jordi Serra

COLABORADORES FASE 02:

Silvia Ferdizz

Cristian G. Castellon

Laura Fuentes

ALUCOAT

Special Thanks to:

Dr. Toni Kotnik (ETH), Luis Caro (Alucoat), Toni Cumella, Ana Martínez (ASCER),
Vicente Sarrablo, Javier Mira & Mila Payà (ITC) y Jordi Serra.

Juanjo Castellon

© 2011