

MIATD 2009-2010 _ CUADERNO 1
FABRICACIÓN DE MODELOS PARA LA ARQUITECTURA

© Máster Universitario de Innovación en Arquitectura: Tecnología y Diseño.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Av. Reina Mercedes, 2. 41012 - SEVILLA

Coordinador de la publicación: Juan Carlos Gómez de Cózar

Editor literario: Roque Angulo Fornos

Diseño y maquetación: Roque Angulo Fornos

Impresión: Argüelles Servicios Gráficos Digitales, S.A.U.

I.S.B.N.: 978-84-

Índice

Introducción	5
Aportaciones	9
Mallas de barras para la arquitectura	11
Grasshopper. Primeros pasos	25
La seducción paramétrica	35
Modelos	49

INTRODUCCIÓN

Una de las premisas fundamentales del Master de Innovación en Arquitectura es la de asociarse a una línea editorial que permita divulgar los contenidos y los resultados del Máster.

En esta línea se está trabajando tanto en monografías, como en cuadernos dedicados a divulgar trabajos realizados.

Este primer cuaderno, dedicado a la fabricación digital de modelos, expone los resultados de un ejercicio desarrollado por los estudiantes de la promoción 2009/10.

Dentro del contenido instrumental del Máster, dedicar parte de la docencia al diseño a partir de parámetros, fue una premisa básica.

Con el ejercicio se pretendía poner de manifiesto que los procesos de diseño en arquitectura no pueden estar al margen de los materiales y de sus sistemas de fabricación y/o montaje.

Por otro lado, desde el principio quedó claro que se estaba fabricando un modelo y que las reglas (de todo tipo) que se aplican a la fabricación de un modelo no son totalmente extrapolables a la construcción de un objeto real a su escala real [1].

Sin embargo, existe cierto paralelismo cuando se exploran las posibilidades de un proceso de diseño a partir de las potencialidades (positivas o negativas) de los elementos que intervienen.

Básicamente, se trataba de obtener una geometría continua que paulatinamente progresara desde una base cuadrada hasta una terminación circular.

[1] Observamos, en los últimos tiempos, infinidad de publicaciones dedicadas a diseño paramétrico en donde sólo se fabrican maquetas que jamás podrían construirse a escala real.

La superficie definida debería tener en cuenta que a partir de su geometría se iba a definir un modelo fabricado en DM con cortadora láser.

No se propuso ningún uso determinado para el objeto, con idea de evitar prejuicios formales.

Como se verá, no todos los modelos han seguido el mismo proceso, ni han utilizado las mismas herramientas. Entendemos que esto enriquece el proceso. De forma curiosa, la mayoría han llegado a conclusiones similares.

El cuaderno comienza con tres artículos, con idea de centrar el tema tratado. La idea es que a partir de la lectura de éstos, cualquiera (con pocos conocimientos) pueda iniciarse en el manejo de los procesos que aquí se destacan.

Queremos agradecer a los estudiantes y profesores de la promoción 2009/10 el interés y el ímpetu mostrados para que este cuaderno sea posible.

Asimismo, queremos destacar el apoyo incondicional los responsables, maestros de taller y becarios del Fab-Lab de la ETS de Arquitectura de Sevilla para cualquier cuestión relacionada con el Máster.

Por último, agradecemos el apoyo de la ETS de Arquitectura de Sevilla.

Mallas de barras para la arquitectura

Juan Carlos Gómez de Cózar

Infiérese, en fin, de aquí, de una manera lógica, y sin dejarnos llevar por exaltadas visiones, que positivamente existe por descubrir un infinito número de estructuras torcidas y apropiadas, de cuya realización resurgiría, indudablemente, un nuevo mundo de formas de construcción, para el cual nuestra conocida arquitectura no significa más que un pobrísimo caso raquítrico y particular, análogamente al representado por la geometría euclidiana, que por muchos siglos ha constituido inconscientemente un simple corolario de la grandiosa ciencia de las formas proyectivas, arrancadas en el siglo pasado al inagotable arcano del sentimiento por la videncia prodigiosa de Poncelet y generalizadas en nuestros días por el asombroso genio de Staud . [1]

Llevo años trabajando con mallas.

Al principio me interesó mucho su aspecto formal. Sobre todo esa apariencia de *esqueleto ordenado* en donde el equilibrio entre vacío y sólido se manifiesta construido. Con el tiempo fui descubriendo que una malla para la arquitectura debe ser mucho más que un conjunto de barras unidas con una *apariencia curiosa*.

Si lo pensamos detenidamente, una malla tiene mucho que ver con una matriz, desde el punto de vista del orden y jerarquía que establece entre sus elementos (sobre todo si se tiene en cuenta que la malla debería establecer la modulación de estructuras, envolventes y cobertura). Un error bastante frecuente en la actualidad es entender la malla sólo como componente de la estructura sin establecer relaciones entre ésta y el resto de elementos (constructivos y de todo tipo) que acaban definiendo, realmente, al edificio.

Desde un punto de vista general una malla puede entenderse a partir de la discretización de una geometría continua. Si ésta es muy delgada la malla será de una sola capa y si tiene grosor la malla será de dos capas con barras



[Fig. 1] Piscina Municipal de Gines, Sevilla (J.C. Gómez de Cózar y Rafael García Diéguez, 2001)



[Fig. 2] Cubierta de edificio de oficinas en San José de la Rinconada, Sevilla (J.C. Gómez y S. Bermejo Oroz, 2007)

[1] Félix Cardellach. *Filosofía de las Estructuras*. Barcelona, 1910.

de conexión entre ambas. Una de las ventajas que presentan las mallas es que pueden adaptarse a geometrías discontinuas de todo tipo mediante la unión de trozos de mallas con barras sueltas o con otras mallas.

Desde un punto de vista geométrico, para su generación, una malla necesita un número determinado de nudos de los que es necesario conocer sus coordenadas (x, y, z) y un número de barras de las que es necesario conocer sus nudos de inicio y final.

Como es lógico, los nudos no deberían pertenecer a una nube dispersa. Si la malla es para la arquitectura, el lugar geométrico que liga a todos los nudos debería cumplir una serie de parámetros que justifiquen su elección [2]. Hay factores mecánicos y constructivos que no se pueden obviar.



[Fig. 3]



[Fig. 4]

[2] Las posibilidades actuales que presentan la parametrización y el control numérico han ampliado enormemente el campo de posibilidades, a efectos de acertar en la elección de la geometría correcta.

[Fig. 3] Cubierta resuelta con malla de una capa en el British Museum. Foster&Partners, 2003.

[Fig. 4] Torre con malla de dos capas en Gines (J.C. Gómez y R. García Diéguez, 2001).



[Fig. 5] Envolvente transparente adaptada a una malla compatible. Londres, 2010.

[Fig. 6] Torre Agbar, Barcelona. Envolvente construida capa a capa sobre una base continua de hormigón armado.



Desde el punto de vista mecánico, no todas las geometrías funcionan igual. En función de las acciones hay formas que se comportan mejor que otras. Cuando el peso propio es la acción fundamental es bastante fácil obtener la forma adecuada. Sin embargo, cuanto más ligeras son las mallas, el peso propio importa menos y las acciones de viento (en función de la exposición del edificio) adquieren mucha importancia. La decisión sobre si la malla debe tener una sola capa o dos, en situaciones como esta, cobra una gran importancia.

Desde el punto de vista constructivo la densidad de malla (número de barras por m²) tiene una influencia notable en el montaje (tamaño de las barras y número de nudos) y en la compatibilidad con la envolvente. Es triste observar casos en donde no se ha prestado atención a la compatibilidad de la malla con la envolvente y ha sido

necesario utilizar nuevas barras (secundarias) como interfase entre la estructura y la envolvente [3].

Al final, el diseño elegido debería posibilitar (y contener la información) la canalización de todas las redes que confluyen en el edificio (incluidos los espacios, las relaciones entre éstos y las circulaciones). Sólo así se estaría definiendo una malla para la arquitectura.

Lo que hace único a un edificio es su capacidad para adaptarse a un lugar concreto. Fabricar elementos no implica producir en serie. En la actualidad pueden fabricarse elementos singulares con el mismo esfuerzo que se emplea en fabricar elementos en serie. Ahí está la diferencia de nuestra época con las anteriores. Actualmente somos capaces de concebir un diseño que tenga en cuenta todos los condicionantes del lugar y que, además, pueda construirse de un modo rápido y eficaz como si se tratase de una construcción genérica.

Los problemas surgen cuando el diseño sólo está guiado por el gesto formal y es ajeno al resto de cuestiones que hay que introducir de un modo artificial, recargando, disimulando y encareciendo el conjunto en el mejor de los casos...

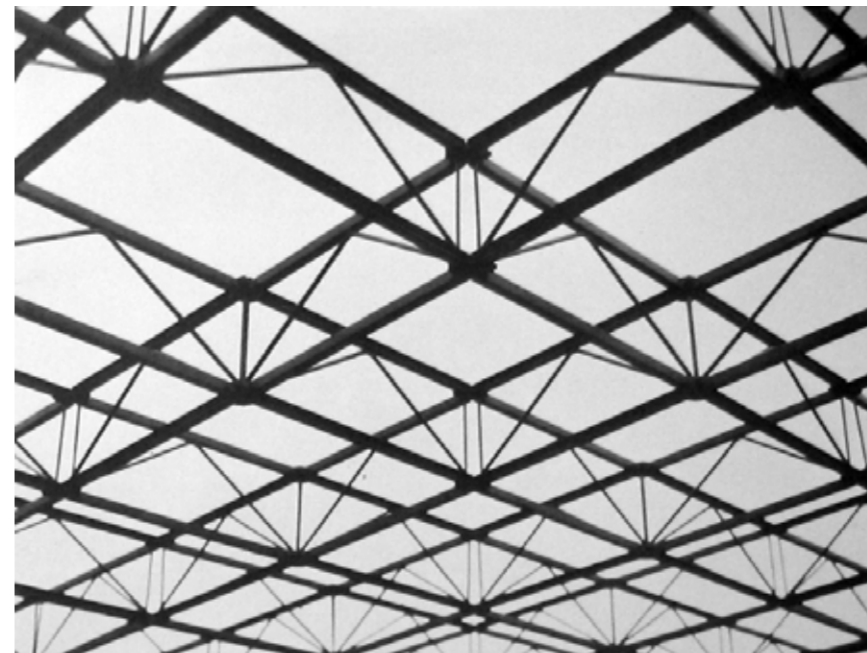
En los últimos quince años, desde el punto de vista instrumental, todo ha cambiado muchísimo. Las herramientas de control formal y las predictivas con su posibilidad de interconexión permiten una aproximación al objeto diseñado hasta ahora desconocida.

También los procesos de fabricación han cambiado. Aparentemente, parece que una malla se construye con mucha facilidad. Sin embargo, si ésta es muy densa, hay que unir un número enorme de barras (utilizando pernos o tornillería) a sus respectivos nudos y controlar estas uniones. Hace años Jean Prouvé [4] reconocía que el futuro no estaba en los pernos, en nudos con uniones atornilladas o con pasadores. En su momento propuso la posibilidad (y la necesidad) de construir con mallas de paneles con uniones machihembradas. El tamaño de los paneles debía ser tan grande como se pudiera en función de los medios disponibles.

Hay situaciones intermedias entre las mallas de muchas barras y la construcción íntegra por paneles. Nos referimos a la construcción por elementos continuos de escala suficiente que una vez ensamblados formalizan una malla

[3] *Casi toda la arquitectura que se construye en la actualidad parte de una estructura (malla o entramado) a la que a través de una subestructura se le adapta la envolvente.*

[4] *Conversaciones con Jean Prouvé. Armelle Lavalou (ed.). Editorial Gustavo Gili. Barcelona, 2005.*



[Fig. 7] *Escuela de Arquitectura de Nancy (Jean Prouvé, 1969-70). 3500 m2 resueltos con paneles de malla ensamblados entre sí y minimizando así el número de uniones a realizar en obra.*

minimizando enormemente el número de uniones complicadas a realizar [fig. 7].

Por lo tanto, el éxito de la construcción de este tipo de elementos depende de una subdivisión en partes orientada a su montaje. Visto así, además de un único lugar geométrico que ligue a todos los puntos de la malla será necesario añadir el que parte de los nudos de esa superficie pertenezcan, además, a un elemento geométrico (plano o curvo, de una o dos capas) conocido y controlable, de tamaño suficiente, que permita ensamblar la malla con facilidad.



[Fig. 8] Diferentes tipos de superficies generadas a partir de la utilización de curvas definitorias. Figuras superiores, modelos de bóvedas hispano-musulmanas según Torres Balbás (arcos entrecruzados). Figura inferior izquierda, bóveda casetonada en la Iglesia de San Miguel de Morón, Sevilla (traslación de arcos de directriz idéntica en la dirección corta), Biblioteca Nacional de París, H. Labrouste (bóvedas baidas de meridianos y paralelos)

Como ejemplo sencillo para ilustrar lo anterior, centrémonos en el caso de definir una superficie a partir de un conjunto de curvas que se han entrecruzado.

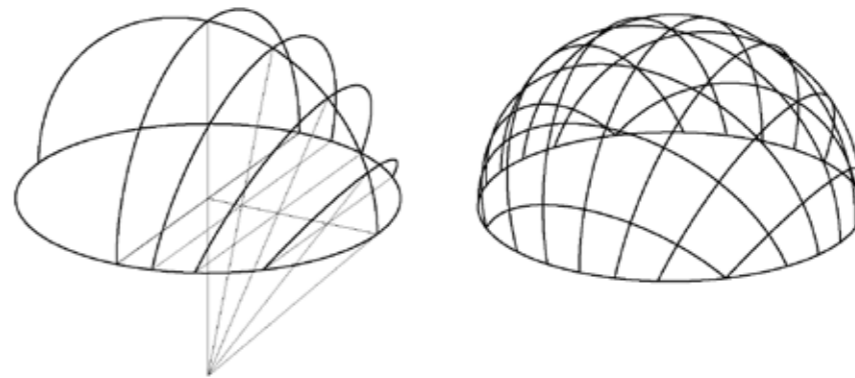
Existen varias formas (inmediatas) de imponer curvas definitorias: por planos verticales (ortogonales y con orientaciones diversas), por planos verticales y horizontales (ortogonales, por meridianos y paralelos), por planos de orientación libre, etc... A lo largo de la historia, se han utilizado procedimientos de todo tipo [fig. 8].

La elección de un proceso determinado no puede ser independiente del tipo de superficie que se va a definir. No es lo mismo una superficie de revolución, que de traslación o de forma libre.

La idea es que en cada punto de la superficie los planos utilizados sean perpendiculares. En el momento en que la inclinación de la superficie respecto de los planos es pequeña (alejada de la normal) el plano es casi tangente a la superficie y carece de sentido su utilización.

La utilización de meridianos y paralelos parte de dos familias ortogonales en donde una de ellas (los meridianos) tienen la ventaja de producirse a partir de un haz de planos coincidentes en una recta vertical que coincide con el eje de la superficie.

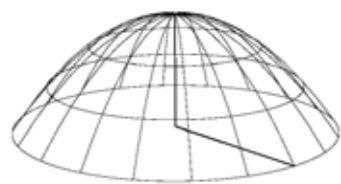
Si el eje del haz de planos es horizontal y cada plano, además, está pautado por una malla plana contenida en un plano horizontal dispuesto entre el haz y la superficie a definir, se obtienen familias de curvas por proyección. En función del tipo de malla proyectada el resultado será distinto. Esto último abre una serie de posibilidades enormes ya que las dos familias de curvas que genera la superficie se cortarán formando un ángulo cualquiera más o menos ortogonal a la superficie en función del tipo de malla y del foco de proyección [fig. 9].



[Fig. 9] Obtención de superficies a partir de la intersección con una familia de planos que pasan por una malla definida en un plano horizontal.



[Fig. 10] Auditorio Municipal, Gines (Sevilla). J.C. Gómez de Cózar y S. Bermejo Oroz. Malla compuesta por arcos continuos paralelos de curvatura idéntica y barras transversales de unión.



[Fig. 11] Paraboloides de revolución definido a partir de una malla de meridianos y paralelos.

Por último, no hay que olvidar que el proceso de fabricación debe ser tenido en cuenta. La posibilidad actual de fabricar barras curvadas de longitud considerable abre toda una serie de posibilidades evitando así uniones excesivas [fig. 10].

En esta publicación se introducen procedimientos de control formal basados en parametrizar las variables que intervienen. Con idea de ilustrar el proceso seguido y plantear alternativas de control de la forma, realizadas a medida con programas informáticos, se ha realizado una herramienta sencilla.

La idea es cubrir una superficie circular con una geometría continua que posibilite peraltes diversos y así poder controlar, para cada escala, el perfil más adecuado.

La geometría base elegida es el paraboloides de revolución. Como cualquier geometría de revolución se presta a ser discretizado por planos verticales y horizontales. En la herramienta desarrollada, hemos propuesto obtener una malla por proyección.

La expresión que define la altura de los puntos de un paraboloides de revolución, cuyo vértice dista (b) de la cota 0 es:

$$z = \frac{-b}{a^2}(x^2 + y^2) + b$$

Con idea de conseguir un reparto equilibrado de barras en la malla espacial, se va a buscar una malla plana para proyectar con condiciones definidas. Se va a partir de una parábola máxima resultado de la intersección con un plano vertical (Y=0) de ecuación:

$$z = \frac{-b}{a^2}(x^2 + b)$$

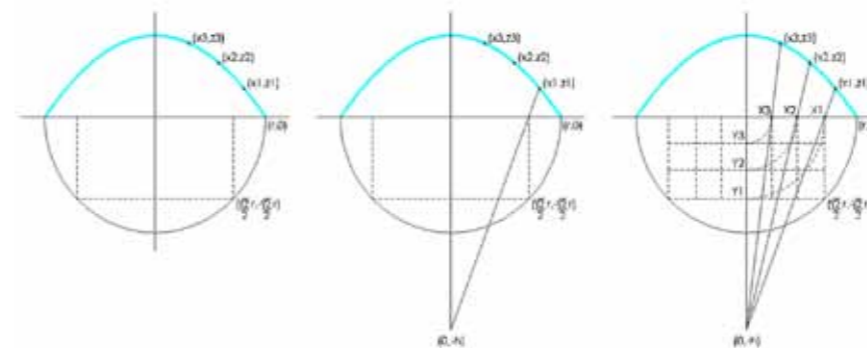
A partir de la frecuencia [5] elegida se divide la parábola seleccionada en un número de partes iguales [6].

La intersección con el plano Z=0 es una circunferencia de radio r. Si se le inscribe un cuadrado, cada lado medirá r/√2. Por lo tanto, las coordenadas del extremo de este cuadrado en su encuentro con el plano Y=0 son

(r√2/2, 0,0). Si se une el primer punto (x1,y1) con el punto (√2/2 r,0) y se prolonga hacia abajo, se obtiene el foco de proyección (0,-h).

$$h = r \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{z1}{(x1 - r \frac{\sqrt{2}}{2})}$$

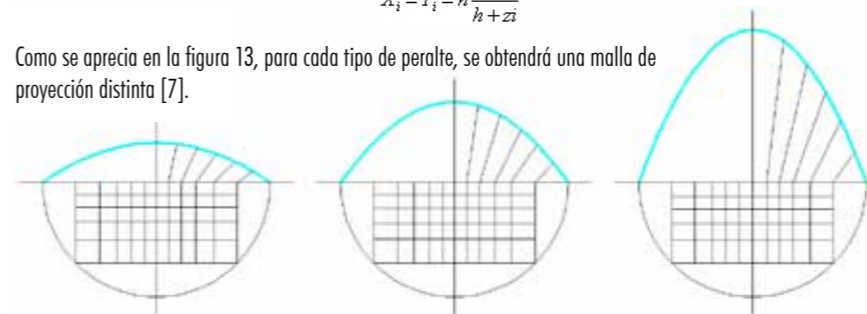
La posición del foco responde a la siguiente expresión:



Trazando desde el foco hasta el resto de puntos en la parábola se acaba de definir la malla plana compensada que servirá para obtener el resto de puntos en el espacio. Las coordenadas de los diferentes puntos de la malla, pueden obtenerse de forma numérica, a partir de las expresiones siguientes:

$$X_i = Y_i = h \frac{x_i}{h + z_i}$$

Como se aprecia en la figura 13, para cada tipo de peralte, se obtendrá una malla de proyección distinta [7].



[5] Número de partes en las que se divide cada uno de los cuadrantes que define a la malla.

[6] La longitud exacta de un tramo de parábola desde la horizontal hasta una apertura α, responde a la siguiente expresión:

$$L = \frac{a^2}{2b} \left(\frac{\text{sen} \alpha}{2 \cos^2 \alpha} + \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\alpha}{2} + \frac{\pi}{4} \right| \right)$$

[Fig. 12] Definición de la malla plana para proyectar desde un foco (h).

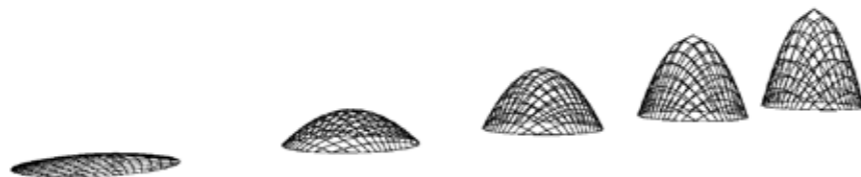
[7] Este aspecto es fundamental para conseguir una malla adecuada. La elección incorrecta de la malla de proyección provocará saltos de densidad en la malla definitiva.

[Fig. 13] Diferentes mallas de proyección para una misma planta con distintos peraltes.

Una vez definida la malla de proyección, se procede a proyectar desde el foco (h) la malla obtenida sobre la superficie parabólica. Para obtener las coordenadas numéricamente es necesario resolver el sistema de ecuaciones siguiente:

$$\begin{aligned}x &= \frac{X_i}{h}(z+h) \\y &= \frac{Y_i}{h}(z+h) \\z &= b - \frac{b}{a^2}(x^2 + y^2)\end{aligned}$$

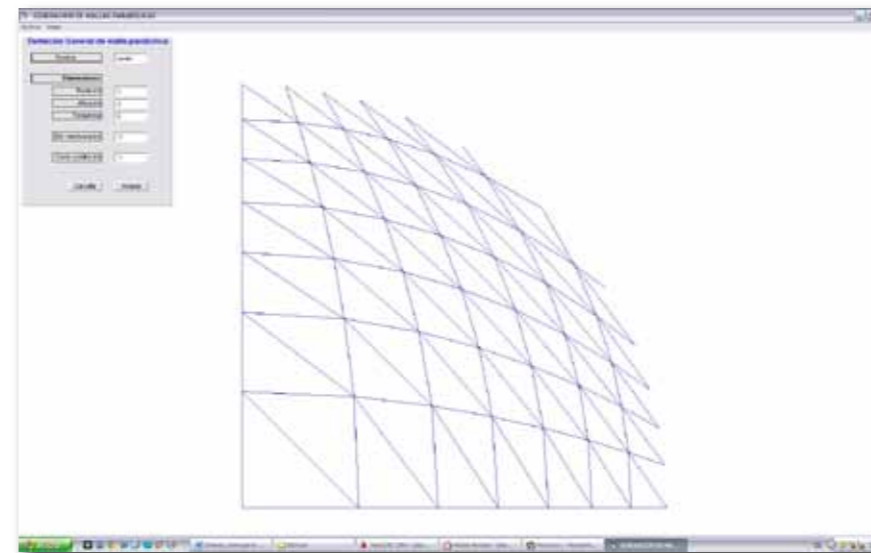
La solución en z del sistema ofrece dos valores (uno positivo y otro negativo). Tomando el valor positivo se obtiene la altura de todos los puntos en el paraboloide y de ahí, el resto de coordenadas.



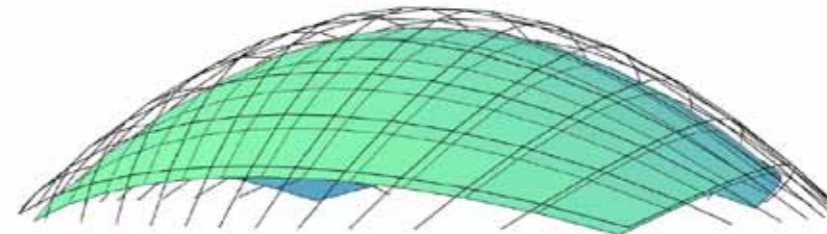
[Fig. 14] Mallas obtenidas a partir de la misma base con peraltes distintos.

A partir del proceso anterior y de las expresiones aportadas, es bastante fácil parametrizar el diseño de mallas parabólicas usando Visual-Basic© como lenguaje de programación.

Es más, pensando en las aplicaciones arquitectónicas de las mallas definidas, pueden añadirse con facilidad barras de rigidización de la malla principal e, incluso, un textil de cobertura colgado de la malla a la distancia que se requiera. Obteniendo así, un diseño básico, de forma automática, para empezar a trabajar.



[Fig. 15] Pantalla principal de la herramienta desarrollada.



[Fig. 16] Cubierta con membrana textil colgada definida de modo automático.

Ahora bien, si lo que se quiere construir es una maqueta de costillas recortadas con impresora láser, es bastante fácil reconducir el procedimiento anterior. Bastaría con definir el canto de las costillas y obtener éstas a partir de la proyección sobre dos paraboloides distanciados el canto definido. Por lo tanto, el único parámetro nuevo a tener en cuenta es el canto de las costillas.



Al final observamos que lo más importante del proceso es tener la capacidad e información suficientes para detectar el número de variables que intervienen (o se quiera introducir) en un problema. Aquellas que sean tangibles, pueden ser definidas a partir de un parámetro. Si somos capaces de establecer relaciones entre éstos estaremos parametrizando un diseño y, por lo tanto, tendremos más posibilidades de acertar con la solución.

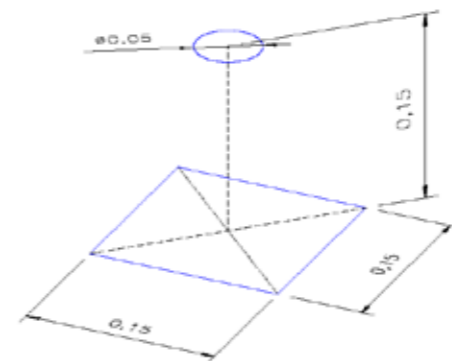
Este proceso, obviamente, es independiente de las herramientas (informáticas o no) utilizadas, aunque éstas facilitan enormemente el trabajo.

Entendemos que no tiene sentido hablar de una *arquitectura paramétrica* y si de procesos de diseño basados en relacionar parámetros entre sí con objeto de obtener la solución más correcta para cada problema concreto.

A continuación se incluye los resultados del ejercicio realizado por los estudiantes de la promoción 2009/10, cuyo enunciado se adjunta a continuación:

4.3 Modelización y control formal

Ejercicio 0



Se trata de definir una superficie continua a partir de los dos perímetros [cuadrado y circunferencia] dados. Una vez definida, sobre ésta se proyectará una malla en dos direcciones obtenida a partir de secciones por planos verticales y horizontales. Cada grupo de 3 estudiantes realizará un modelo de su solución en el Taller de Modelizado de la ETSA.

[Fig. 17] Modelo de costillas fabricado con el software propuesto.

[Fig. 18] Despiece para maqueta obtenido de forma automática.