

# Fabricación y diseño de estructuras parrilla

## *Manufacture and design of composite grids*

STEPHEN W. TSAI. Department of Aeronautics and Astronautics Stanford University, Stanford, California  
KEVIN K. S. LIU. Now with Applied Materials, Santa Clara, CA  
PHILIPPE M. MANNE. Now with ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands

Fecha de recepción: 5-V-97  
Fecha de aceptación: 30-VI-97

### RESUMEN

*Las estructuras parrilla se han usado durante décadas. Muchas de ellas han sido fabricadas con hormigón armado o con metales. Las estructuras parrilla de materiales compuestos presentan rigideces y resistencias superiores, con menor peso en relación a laminados tradicionales de materiales compuestos.*

*Para la fabricación de este tipo de estructuras, se utilizan procesos convencionales como son enrollamiento continuo, pultrusión y perfiles fabricados a partir de moldes hembra. Las estructuras parrilla presentan una gran rigidez y resistencia debido a los refuerzos (largueros y travesaños). Los modelos utilizados para estudiar la rigidez y los modos de rotura, se derivan de la teoría de placas laminadas. Las estructuras parrilla de materiales compuestos tienen un prometedor futuro, tanto solas como reforzadas con un núcleo, como constituyentes de una estructura sandwich.*

### SUMMARY

*Grid structures have been in use for decades. Many were made of reinforced concrete or metals. Grids made of composite materials offer high stiffness and strength at low mass that are competitive with traditional composite laminates.*

*Commonly available manufacturing processes such as filament winding, pultrusion and tubes made from female molds are used to produce composite grids. Cost effective grids can then be made in large sizes and quantities. Grids derive their global stiffness and strength from their ribs. They are fundamentally different from laminates which derive theirs from plies. The models for stiffness and failure modes can be viewed as simple extensions of laminated plate theory. It is hoped that grids will emerge as one of the common structural forms along with solid, stiffened and sandwich panels. Potential applications of composite grids are also mentioned.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de los materiales compuestos ha emergido como un válido instrumento de un gran número de industrias durante las tres últimas décadas. Este tipo de materiales es ligero y resistente a la corrosión y a la fatiga y puede fabricarse según una gran variedad de procesos. La mayoría de los éxitos de estos materiales se localiza en alta competición y satélites, donde la fibra de carbono es el material fundamental. En estas industrias, las prestaciones son el primer objetivo. Otros sectores son la aeronáutica y otras aplicaciones industriales, donde la corrosión es crítica.

## 1. INTRODUCTION

*Composite materials technology has emerged as the darling of many industries during the last 30 years. This class of materials is light, corrosion and fatigue resistant and can be manufactured in a variety of methods. Most successes can be found in sporting goods and satellites where graphite composites are the dominant materials. Here performance is the primary goal. Other notable achievements include components of aircraft, and many industrial applications where corrosion is critical.*

Los materiales compuestos tienen el potencial de aumentar significativamente el tamaño del mercado. Así como las fibras artificiales han sustituido a las naturales, vemos que los materiales compuestos son los materiales estructurales del futuro porque tienen materia prima ilimitada y requiere menor energía para el proceso de fabricación que los metales.

Existen inconvenientes en su crecimiento: la normativa, aspectos económicos y falta de mentalización tecnológica, son los principales.

Las estructuras parrilla son diferentes del panel sandwich y de la estructura reforzada unidireccional. Los mecanismos de transferencia de carga son distintos. Pueden fabricarse mediante enrollamiento continuo y pultrusión. Creemos que pueden alcanzarse, simultáneamente, altas prestaciones y bajo coste.

Los procesos de fabricación convencionales de materiales compuestos son tejeduría, braiding, pultrusión y laminación. Se requieren unas instalaciones y una maquinaria caras. Como resultado de ello, los costes de proceso suponen varias veces el coste de las materias primas. Nuestra aproximación es que el coste de proceso pueda reducirse al coste de las materias primas. De este modo, los materiales compuestos, podrán competir con los materiales tradicionales.

Las estructuras parrilla son como el esqueleto del cuerpo humano o el fuselaje de los antiguos aviones fabricados con madera y tejidos. Es la estructura primaria. Las pieles o los recubrimientos se utilizan para otros fines. Las estructuras parrilla están formadas por una red de refuerzos fabricados con materiales compuestos unidireccionales. Estos refuerzos tienen una rigidez y una resistencia varias veces superior a la de los metales. La clave es cómo explotar las propiedades unidireccionales. Cuando una estructura parrilla está compuesta por refuerzos de hormigón o acero, sus prestaciones están limitadas por la isotropía del material. Sólo cuando los refuerzos son anisótropos, el potencial de las estructuras parrilla es óptimo. A lo largo de este trabajo, mostraremos cómo explotar esta característica de los materiales compuestos y cómo, al mismo tiempo, obtendremos bajos costes de fabricación.

Las estructuras parrilla no son recientes, se han utilizado en la ingeniería civil durante muchos años. La industria aeronáutica utilizó estructuras parrilla metálicas durante la segunda guerra mundial. El bombardero británico Vickers Wellington fue una aplicación. La estructura parrilla era metálica y ofrecía una tolerancia al daño en

*Composite materials have the potential to significantly increase their market size. As man-made fibers have all but replaced natural ones, we see composites as the structural materials of the future because they have unlimited supply and require less energy to process than metallic materials.*

*There are many inhibitors to the growth of composites: they come from technological, economical and government regulatory sources.*

*It is granted that maturing of any technology takes time particularly if it involves public safety. Innovation and favorable government regulation, however, can hasten this process. Composite grids form the theme for this chapter. Grids are fundamentally different from stiffened and sandwich constructions.*

*The load transfer mechanisms are different. Grids can be made by the widely available filament winding and pultrusion. We believe that we can achieve both high performance and low cost. Current manufacturing processes of composite materials and structures are based on weaving, braiding, pultrusion and/or lamination. They require expensive facilities, and costly manufacturing equipment and processes. As a result, processing costs is many times the material cost. We intend to show that the cost of manufacturing composite grids can be reduced to the level of materials cost. Such composite structures can then compete against most traditional materials.*

*Grids are like the skeleton of a human body or the frame of old airplanes made of wood and cloth cover. The grid is the primary load-carrying member. Skins or covers are there for another function. Optimally grids are formed by a network of ribs made of unidirectional composites. These ribs are many times stronger and lighter than metallic materials. The key is to exploit the unidirectional properties. While concrete and metallic grids have been made, their performance is limited because the ribs are isotropic. Only when ribs are unidirectional can the true potential of grids be realized. We will show how to capitalize on this principle and combine it with low cost manufacturing.*

*Grid structures are not new; they have been used in civil engineering for many years. The aeronautical industry used metallic grids as early as in World War II. The British bomber Vickers Wellington was one of them. The grid was metallic and offered exceptional battle damage tolerance. This extra assurance made it the favorite among*

combate excepcional. Esta característica hizo que se considerará como el favorito entre la tripulación. En nuestros días, las cubiertas de los aviones de reacción y algunos cascos del International Space Station utilizan estructuras parrilla de aluminio. De acuerdo a nuestro concepto, estas aplicaciones no constituyen un uso efectivo de esta tipología. Por otra parte, los aviones Airbus A330 and A340 utilizan estructuras parrilla, reforzadas con pieles en los estabilizadores vertical y horizontal. Presuntamente, son efectivos en coste. Sin embargo, están fabricados manualmente. De aquí nuestro interés en utilizar procesos automatizables. Mediante este tipo de procesos, esperamos que puedan alcanzarse las excelentes prestaciones de esta tipología, con un coste asequible.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS PARRILLA

En este apartado, vamos a estudiar las características geométricas y de materiales de estas estructuras y mostraremos las ventajas de utilizar materiales compuestos en ellas.

### 2.1 Orientación de los refuerzos

Dado que las estructuras parrilla presentan propiedades dependientes de la dirección, adoptaremos términos análogos a los habitualmente manejados para materiales compuestos laminados. En la Figura 1, se definen las estructuras parrilla en función de la orientación de sus refuerzos: cuadradas, angulares e isogrid  $\pi/3$ , respectivamente. En esta figura, se supone que todos los refuerzos están en el mismo plano y tienen la misma altura. Esta restricción no es general y pueden construirse perfectamente estructuras parrilla con refuerzos en planos diferentes, como es el caso de láminas en un laminado. Todas las estructuras parrilla representadas en esta figura presentan idénticas intersecciones entre refuerzos o uniones. En particular, la parrilla  $\pi/3$  es isotrópica y, a menudo, denominada isogrid.

*the flight crew. Nowadays, jet engine covers and some hulls of the International Space Station feature integral grids machined from aluminum plates. Based on our understanding, these applications do not constitute a very effective use of grids. On the other hand, Airbus A330 and A340 have composite grid reinforced skins in their horizontal and vertical tails. Presumably they are cost effective. They are, however, hand-made. Hence our interest in developing new automatable manufacturing processes. It is hoped that with these processes, the outstanding performance of composite grids can be achieved at an affordable cost.*

## 2. GRID DESCRIPTION

*We wish to describe the geometric and material characteristics of grids and show why composite grids are unique.*

### 2.1 Rib orientation

*Since grids have directionally dependent properties, we chose to adopt terms analogous to those commonly used for laminated composite materials. In Figure 1, grids are described based on the orientations of their ribs: square, angle and  $\pi/3$  isogrids, respectively. In this figure all ribs are assumed to be in the same plane and have the same height. But that restriction is not always followed: for example, ribs may run in different planes, like plies in a laminate. All grids shown here have identical rib intersections or joints. In particular the  $\pi/3$  grid is isotropic and is often called isogrid.*

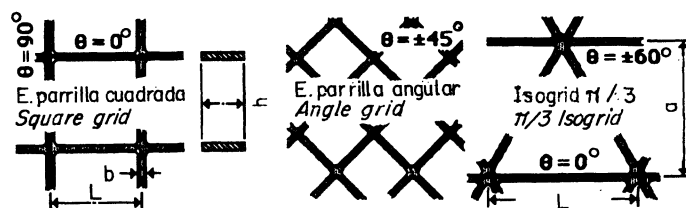


Fig. 1.- Definición de estructuras parrilla según la orientación del refuerzo, análoga a materiales compuestos laminados.

Fig. 1.- Designation of grids by rib orientation, analogous to laminated composites.

## 2.2 Construcción del refuerzo

Existen, al menos, dos formas de fabricar los refuerzos. No es un proceso adecuado, el partir de un bloque de material isotrópico y mecanizarlo para obtener una estructura parrilla. Como se representa en la Figura 2, partiendo de un laminado isotrópico, se mecaniza, para formar una isogrid. Al resultado, se le puede denominar "iso" isogrid, para indicar que el material de partida era isotrópico. Este tipo de estructura es caro y el material no está optimizado. Los refuerzos tienen la misma rigidez que el material de partida.

El proceso adecuado para fabricar los refuerzos es utilizar materiales direccionales como son los materiales compuestos. En lugar de mecanizar, las fibras unidireccionales se reorientan o reagrupan para formar refuerzos unidireccionales, tal y como se muestra en la parte derecha de la Figura 2. A esta estructura se le denomina "uni" isogrid. En este caso se aprovecha al máximo la rigidez unidireccional superior de los materiales compuestos.

Se mostrará, más adelante, que las estructuras "uni" isogrids son, prácticamente, tres veces más rígidas que "iso" isogrids, fabricadas a partir del mismo material compuesto. Por supuesto, ésta es la forma apropiada de fabricar estructuras parrilla de materiales compuestos. Por la misma razón, los metales no son adecuados para esta configuración. De hecho, existe una relación muy estrecha entre materiales compuestos laminados y parrillas fabricadas con estos materiales. La parrilla puede entenderse como un caso especial de laminado. Este concepto se utilizará para obtener su rigidez y resistencia.

## 2.2 Rib construction

There are at least two ways of making grids. The wrong way is to start with a slab of material and produce a grid by machining. As illustrated on the left in Figure 2, a quasi-isotropic laminate is taken as starting material and machined into an isogrid. We call the resulting grid an "iso" isogrid indicating that the starting material is isotropic. This class of grids is very costly and a very poor utilization of the material. The rib has the same stiffness as the starting material.

The right way is to use directional materials like composites. Instead of machining, unidirectional fibers are rearranged or regrouped to form unidirectional ribs as shown on the right of Figure 2. We call this class of grids "uni" isogrids. Here the superior stiffness of unidirectional composites is fully utilized.

We will show later that the "uni" isogrids are nearly 3 times stiffer than the "iso" isogrids made from the same composite materials. This is indeed the right way. For the same reason, metallic grids are not effective. In fact, there is a close relation between composite laminate and composite grids. Grids can be viewed simply as a special case of laminates. This will be used in deriving the stiffness and strength of grids.

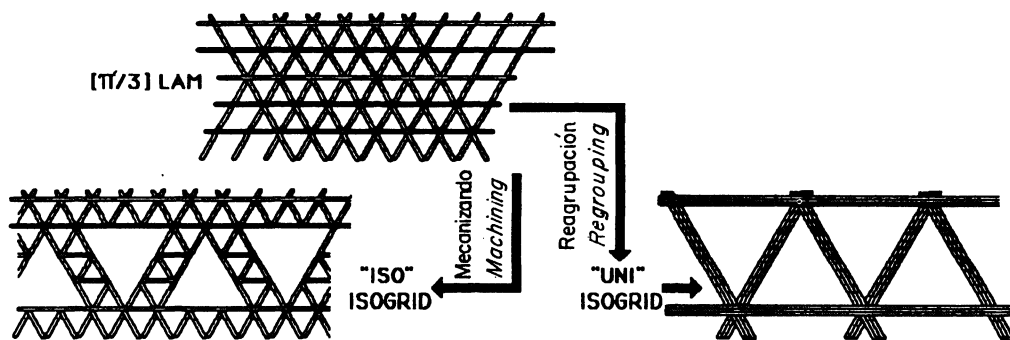


Fig. 2.- Dos formas de fabricar estructuras parrilla. Izquierda: modo erróneo, mecanizando un laminado quasi-isotrópico. Derecha: modo correcto, mediante refuerzos unidireccionales.

Fig. 2.- Two ways of making grids. The wrong way on the left: by machining a quasi-isotropic laminate. The right way on the right: by forming unidirectional ribs.

### 2.3 Parámetros geométricos de los refuerzos

Los principales parámetros geométricos de los refuerzos son la longitud  $L$ , anchura  $b$  y altura  $h$ . Un parámetro adimensional muy útil es  $f$ , o fracción superficial de refuerzo,  $f$  relaciona la longitud  $L$  y la anchura de los refuerzos  $b$ . En la Figura 3 se muestran dos parrillas con valores de  $f$  distintos. En la parrilla de la parte derecha, no existirá pandeo. El valor de  $f$  coincide con la fracción en volumen de refuerzo si el patrón es idéntico a lo largo de toda la estructura. La fracción en volumen de refuerzo tiene el mismo significado que la fracción en volumen de fibra en un laminado convencional. En el caso del laminado, esta fracción no es una variable principal de diseño, porque depende del fabricante del laminado. Por contra, en estructuras parrilla, este parámetro  $f$  es un valor fundamental de diseño y debe ser evaluado de forma óptima para conseguir las máximas prestaciones de la parrilla. Recomendamos el rango de valores especificados en la Figura 3: entre 23 y 39.

La altura  $h$  del refuerzo es también un parámetro crítico de diseño, sobretodo en aquellos casos, donde el requisito de cálculo sea la rigidez a flexión. Un ratio altura/anchura o  $h/b$  bajo, indicará que la parrilla es superficial. Por contra, un ratio altura/anchura o  $h/b$  alto, indicará que la parrilla es gruesa. A lo largo de este trabajo, supondremos que este ratio es superior a 1. En cuanto al pandeo, la única dirección en la que puede ocurrir es en la dirección del refuerzo. Está controlado por la relación longitud/anchura o  $L/b$ . Este modo debe compararse con la resistencia a compresión de la parrilla. El modo que determine una carga de rotura menor será el crítico.

La relación que define la fracción superficial  $f$  es una función de la configuración de la parrilla. En la Figura 4, se muestra la definición de  $f$  para una configuración iso- y dos cuadradas. Las tres parrillas tienen la misma anchura. La parrilla con la celda cuadrada menor (izquierda) tiene la misma fracción superficial  $f$  que la iso- mientras que la parrilla con la celda cuadrada mayor (derecha) tiene la misma relación  $L/b$  que la iso-. Para la

### 2.3 Rib geometric parameters

The principal geometric parameters of grids are the length  $L$ , width  $b$  and height  $h$  of the ribs. A useful dimensionless measure is the rib area fraction  $f$  within a unit cell. This fraction is related to the length and width of the ribs and their orientations in the grid. Two values of  $f$  are shown in Figure 3: for a sparse grid on the left and for a dense grid on the right. A dense grid can also be called a waffle plate, characterized by the fact its ribs that would not buckle. The value of  $f$  is the same as the rib volume fraction if the grid pattern remains constant along the grid height. The rib fraction is analogous to the fiber volume fraction of a composite material. But fiber fraction in composite plies is not a common design variable because such fraction is often predetermined by material suppliers. For grids, however, rib fraction is an important design variable and must be deliberately selected for a given design. We recommend  $f$ -values in the range shown in Figure 3: 23-39.

Rib height  $h$  is also a critical design parameter, in determining flexural rigidity in particular. A low height-to-width ratio or  $h/b$  is a shallow grid; a high ratio, a tall grid. We assume in the present work that this ratio is higher than one. Euler buckling of ribs occurs only in the lateral direction. It is then governed by the length-to-width ratio  $L/b$ . Such failure mode must be compared with failure by compressive strength. Whichever is lower will be the controlling failure mode.

The relation defining the area fraction  $f$  of a grid is a function of the grid configuration. In Figure 4, we show the definition of  $f$  for iso- and square grids. A visual presentation of an isogrid compared with square grids is featured. All grids have the same rib width. The smaller square grid on the left has the same area fraction  $f$ , whereas the larger square grid on the right has the same slenderness ratio  $L/b$  as the actual

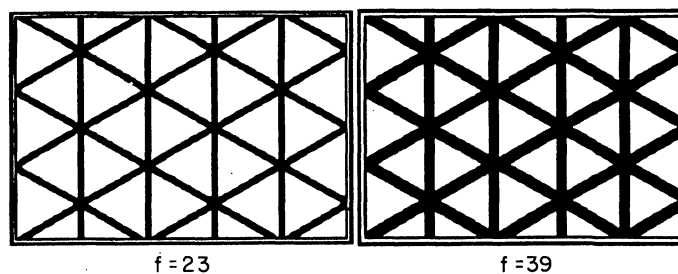


Fig. 3.- Fracciones en volumen de estructuras parrilla (poco y muy densa).

Fig. 3.- Rib volume fractions of sparse and dense grids.

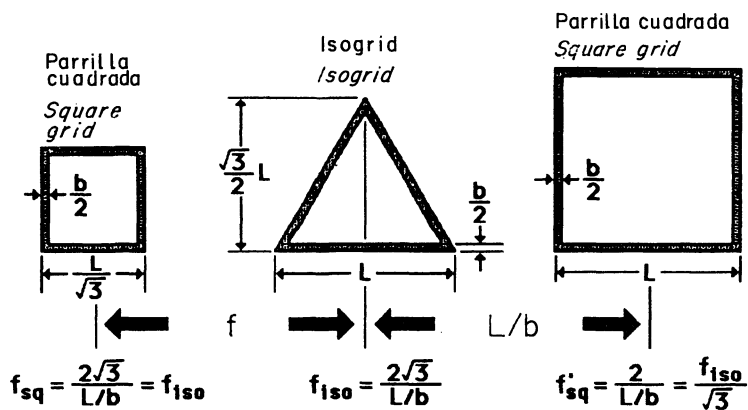


Fig. 4.- Definición de fracción superficial de iso- y parrilla cuadrada. Ratio de esbelted  $L/b$  relacionado con el pandeo de los refuerzos.

Fig. 4.- Definition of area fraction of iso- and square grids. Slenderness ratio  $L/b$  is related to Euler buckling of ribs.

parrilla cuadrada menor (izquierda), la longitud  $L$  se reduce tres veces. Para la parrilla cuadrada mayor (derecha), el ratio superficial  $f$  se reduce tres veces. Aunque los parámetros  $f$  y  $L/b$  están relacionados, cada uno sirve para un propósito distinto. El ratio superficial  $f$  puede ser tratado como una propiedad del material que gobierna las rigideces en-el-plano y a flexión de una manera consistente. La relación  $L/b$  es útil para controlar el pandeo. Nosotros preferimos utilizar la fracción superficial  $f$ , porque refleja el peso y la cantidad de material utilizado en la estructura parrilla.

Otro parámetro geométrico es el ratio altura/anchura o  $h/b$ . Las estructuras parrilla presentan características similares a las de laminados sólidos y paneles sandwich. Los refuerzos de una parrilla deben ser tan altos como sea posible, es decir, deben tomarse ratios altura/anchura elevados. Como ocurre con las placas, la rigidez a flexión es proporcional al cubo de la altura. Estructuras parrilla demasiado superficiales no son eficientes. Para paneles sandwich, la rigidez a flexión depende de la altura del núcleo y de los laminados de las pieles. Si a una estructura parrilla se le añaden una o dos pieles, su rigidez a flexión es como la de un panel sandwich.

### 3. PROCESOS DE FABRICACIÓN

Las estructuras parrilla de materiales compuestos han sido estudiadas en Rusia, Sudáfrica, Alemania, así como en los Estados Unidos, durante más de dos décadas. En US, James Koury de USAF, Phillips Laboratory, Larry Rehfield (ahora jubilado) of Georgia Institute of Technology (ahora en University of California, Davis) y McDonnell Douglas Astronautics Company [1] han sido pioneros en el uso de aluminio y, más tarde, materiales compuestos, principalmente en las estructuras cónicas de misiles. W. Brandt

isogrid. For the smaller square grid, the length  $L$  is reduced by 3; for the larger square grid, the area fraction  $f$  is reduced by 3. While there is a one-to-one relation between fraction  $f$  and  $L/b$ , each serves its own purpose in the design of composite grids. Area fraction  $f$  can be treated as a material property that governs both in-plane and flexural stiffnesses in a consistent manner. Slenderness ratio  $L/b$  is useful in its direct relation to Euler buckling of the ribs. We prefer the use of area fraction  $f$  because it reflects the weight and amount of material used in a grid.

Another geometric parameter of grids is their height or height-to-width ratio  $h/b$ . Grids have characteristics similar to these of solid and sandwich panels. The ribs of a grid should be as tall as possible; i.e., having a high height to width ratio. Like plates, flexural rigidity increases with the cube of the height. Short or shallow ribs are not effective. For sandwich panels, flexural rigidity depends on both the height of the core and the laminated face sheets. If a grid has one or two face sheets, its flexural rigidity is like that of a sandwich panel. The rigidity factors are more numerous than for a grid without facing.

### 3. MANUFACTURING PROCESSES

Composite grids have been explored in the USSR, South Africa, Germany as well as in the US for over 20 years. In the US, James Koury of the USAF Phillips Laboratory (now retired and living in Albuquerque, NM), Larry Rehfield of Georgia Institute of Technology (now with the University of California, Davis) and McDonnell Douglas Astronautics Company [1] have been pioneering the use of aluminum and later composite grids principally for the fairing and the interstage cone of missiles. W. Brandt Goldsworthy of

Goldsworthy de Rolling Hills; California fue pionero no sólo en refuerzos pultrusionados sino también fabricados mediante enrollamiento continuo. Fue el primero que propuso esta tipología en el Beechcraft Star Ship, en la década de los 70.

Recientemente, Burt Rutan de Scaled Composites en Mojave, California, construyó un fuselaje de un avión privado mediante estructuras parrilla de materiales compuestos. Las USAF continúan explorando nuevas posibilidades. McDonnell Douglas Handbook [1] ha sido actualizado con el uso de materiales compuestos por Chen y Tsai [2] y Huybrechts [3]. El modelo descrito en el presente trabajo se basa en el descrito en estas publicaciones.

Se ha escrito, en numerosas publicaciones técnicas, que el enrollamiento continuo sería el método óptimo, siempre que las fibras pudieran orientarse automáticamente en la dirección de los refuerzos.

### 3.1 Métodos de unión de refuerzos

Existen tres posibilidades (Figura 5)

#### 3.1.1 Uniones mediante ranura (slotted)

La Figura 5 muestra la unión mediante ranura, la más utilizada en carpintería. Los refuerzos son ranurados y, a continuación, ensamblados.

Las desventajas son:

- . Coste de mecanizado (ranurado)
- . Dificultad de ensamblar refuerzos múltiples
- . Concentración de tensiones en la proximidad de la ranura
- . Disminución de rigidez y resistencia por mal encajado de los refuerzos

*Rolling Hills, California pioneered not only pultruded but also filament wound grids. He first proposed this for the Beechcraft Star Ship in the 1970's.*

*Recently, Burt Rutan of Scaled Composites in Mojave, California, built the fuselage of a corporate jet out of composite grids. The USAF continues to explore composite grids with new applications. McDonnell Douglas Handbook [1] has been updated with the use of composite materials by Chen and Tsai [2] and by Huybrechts [3]. The modeling used in this work draws heavily from these earlier publications. The software developed by these authors are instrumental in the analysis and figures used throughout the current effort.*

*It has been recognized by many people that filament winding would be an optimal method for manufacturing grids if the composite tows can be guided by some soft tooling. Grids are assembled by carving out slots or grooves in a rubber tool.*

### 3.1. Assembly methods

*Three possible joints are shown in Figure 5.*

#### 3.1.1 Slotted joint grids

*The traditional slotted joint grids are shown on the left in Figure 5. and are most frequently used in carpentry. Slots are cut into ribs and assembled.*

*The disadvantages of this design include :*

- . Cost of machining slots
- . Difficult assembly of many ribs having multiple slots
- . Low rib strength introduced by machined slots and notches
- . Low grid stiffness and strength from imperfect fit at slotted joints

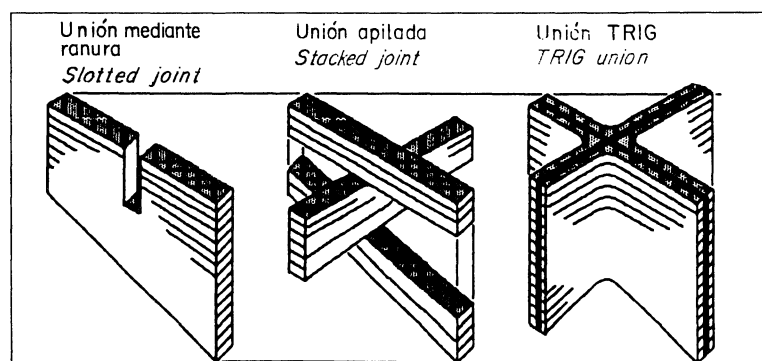


Fig. 5.- Tres tipos de uniones. No recomendamos la unión mediante ranura. Las uniones TRIG y apiladas pueden reproducirse más fácilmente y presentan mejores propiedades.

Fig. 5.- Three types of joints in a grid. We do not recommend the slotted joint. Stacked and TRIG joints can be reproduced more easily and have better properties.

Entendemos que Composite Optics Incorporated, de San Diego, California, utilizara Laminados [ $\pi/3$ ] como refuerzos con objeto de aumentar su resistencia. El uso de laminados para refuerzos, sin embargo, reduce la rigidez en un factor de tres, en comparación con refuerzos unidireccionales. Es, por lo tanto, nuestra opinión que uniones mediante ranuras debe continuar siendo una técnica popular para carpinteros.

### 3.1.2 Uniones mediante apilado (stacked)

Creemos que las uniones mediante apilado, Figura 5 (centro), puede ser tan eficiente como la unión mediante ranura, y más fácil de fabricar. Un ejemplo de este tipo de unión es la jaula de pájaros, de muchos siglos de antigüedad.

La construcción de una parrilla apilada se compone de refuerzos longitudinales y circunferenciales que van apilándose consecutivamente. Existen, al menos, dos variaciones. Los miembros longitudinales (longi's) son pultrusionados, fabricados mediante enrollamiento continuo o mediante molde hembra. Los miembros circunferenciales (circ's) pueden ser pieles aplicadas mediante enrollamiento continuo para formar una parrilla o una cáscara circunferencial o cónica.

Los miembros longitudinales pueden tomar formas helicoidales, por ejemplo, y servir de núcleo de sandwich entre las pieles exteriores e interiores realizadas mediante enrollamiento continuo. Aunque el enrollamiento continuo pueda ejecutarse siguiendo un modelo helicoidal, con objeto de aumentar la rigidez a cortante, no hay que olvidar que su coste aumenta respecto al enrollamiento circular. En la Figura 6 se puede apreciar un anillo cilíndrico reforzado.

*We understand that Composite Optics Incorporated of San Diego, California, used [ $\pi/3$ ] laminates as the rib in order to increase the rib strength. The use of laminates for ribs however degrades the grid stiffness by a factor of 3 from unidirectional ribs. It is therefore our opinion that slotted joint grids should remain as a popular technique for carpenters and cabinet makers.*

### 3.1.2 Stacked joint grids

*We believe that the stacked joint grids shown in the middle in Figure 5. can be as effective as slotted joint grids and can be simpler to manufacture. An example of stacked joint grid is the bird cage which must have been in existence for centuries.*

*To build a stacked grid, longitudinal and hoop or cross members are stacked. Members run on separate planes, similarly to the plies in laminate. There are at least two variations. The longitudinal members (longi's) are pultruded, filament wound or made in a female mold by blow molding. The cross members (circ's) can be skins applied by filament winding to form a circular or conical grid or shell.*

*The longitudinal tubes may be fan-shaped, for example, and serve the same purpose as a sandwich core between the inner and outer filament wound skins. Although winding can also have a helical pattern if an increase in shear rigidity is desired, such process increases the cost of manufacturing as compared with pure hoop winding. An example of a ring reinforced cylinder is shown in Figure 6.*

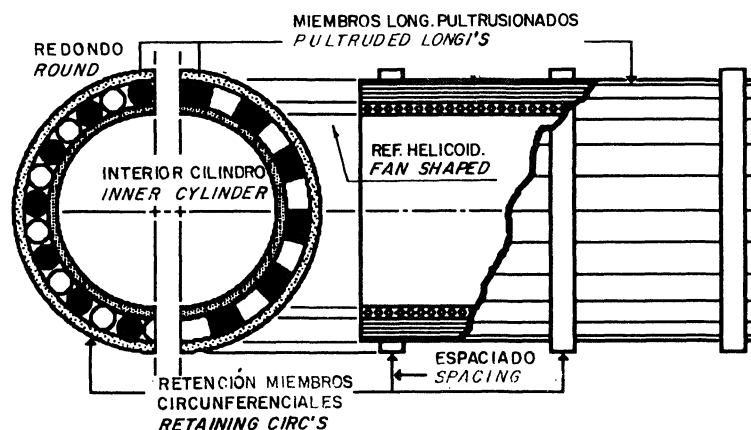


Fig. 6.- Una estructura parrilla con refuerzos helicoidales o redondos puede utilizarse como núcleo de sandwich entre pieles enrolladas exteriores e interiores.

*Fig. 6.- A stacked grid with round or fan-shaped longitudinal members sandwiched between inner and outer windings.*



Otros ejemplos de uniones mediante apilado son los refuerzos en cruz fabricados mediante infiltración por vacío. Por ejemplo, una serie de anillos con agujeros, que son atravesados por varillas, formando una estructura tipo “jaula de pájaro”. Este tipo de uniones está limitado a estructuras parrilla ortogonales. Por ejemplo, las estructuras iso-grid son difíciles de fabricar, porque los refuerzos deben apilarse en tres alturas.

### 3.1.3 Uniones entrelazadas

El componente inicial es, una vez más, una estructura tubular delgada, consiguiendo, así, una rigidez óptima. Estos tubos se cortan consiguiendo un contorno que coincide con la forma del mandril. Se posicionan a modo de utillaje sobre el mandril (Figura 7), llenándose los espacios en forma de V con refuerzos entrelazados como se muestra en dicha figura. En el proceso de entrelazamiento, se deposita suficiente resina para compactar la estructura parrilla. Este tipo de unión confiere a la estructura final una resistencia muy elevada. El utillaje forma parte de la estructura parrilla final consiguiendo, también una alta rigidez. La discontinuidad de los refuerzos genera una disminución mínima en la rigidez. Se pueden obtener reducciones de coste muy significativas cuando el entrelazado se lleva a cabo mediante el proceso de enrollamiento continuo, con un único ángulo de enrollamiento. Las velocidades de enrollamiento son elevadas debido a la forma en V del patrón helicoidal. Este detalle reduce los costes de ensamblaje.

## 3.2 Propiedades de las estructuras parrilla

Se ha demostrado que las estructuras parrilla son más eficientes cuando los refuerzos tienen más altura y son más delgados. Este proceso, denominado en inglés “Tooling Reinforced Interlaced Grid” o TRIG permite una alta definición geométrica para los refuerzos y elevada rigidez. Varios procesos de entrelazado y

*Other examples of stacked grid include cross members made by molding or vacuum infiltration. A multi-hole bar or ring through which longitudinal rods or tubes are threaded and bonded forms a bird cage like structure. There are many possible configurations for different applications. Stacked grids, however, are currently limited to orthogrids. Isogrids, for example, are difficult to make because ribs in three levels must be stacked and joined.*

### 3.1.3 Interlaced joint grids

*For the interlaced grid, the thin wall tubes, again, are the starting components. The filament wound tubes with all hoop plies provide maximum stiffness for the final grid. The tubes are sliced to a contour that fits a mandrel. They are then positioned as tooling on the mandrel. This is shown on the left in Figure 7. The V-shaped gaps between tooling are filled with interlacing tows, as shown on the right in Figure 7. The interlacing tows carry sufficient resin to bond the tooling and interlacing together to form a solid, continuous rib. The interlacing gives superior strength to the grid. The tooling becomes part of the finished grid and provides high stiffness to the grid. Although tooling contributes to the grid stiffness, it terminates at the rib joints. The discontinuity is small relative to the length of the rib. The effect on the grid stiffness is small. Significant cost savings can be obtained when the interlacing is filament wound with one helical winding angle. Having a V-shaped groove along a helical pattern would allow high-speed winding. That would further reduce the cost of assembly.*

## 3.2 Features of grids

*We have discovered theoretically that grids are more efficient if the ribs are tall and thin. This process, identified as the Tooling Reinforced Interlaced Grid or TRIG for short, yields a high geometric definition for the ribs and also high grid stiffness. Several current interlacing and fiber placement processes use rubber*

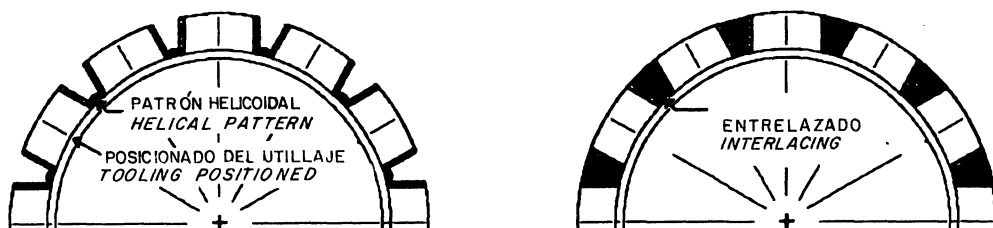


Fig. 7.- Un cilindro realizado mediante enrollamiento continuo a través del proceso TRIG. A la izquierda, el utillaje, compuesto por tubos contorneados, está posicionado. A la derecha, un entrelazado enrollado cubre los espacios en V.

Fig. 7.- A filament wound cylinder made by the TRIG process. Tooling from contoured tubes is positioned on the left. Wound interlacing fills the V-shaped grooves for grid strength on the right.

colocación de fibra utilizan caucho o espuma para guiado y utillaje. En estos dos casos, la definición y rigidez conseguidas son mucho menores que las obtenidas mediante el proceso TRIG.

Las ventajas de las estructuras parrilla de materiales compuestos se derivan de la fácil disponibilidad de varillas y perfiles y del ensamblaje realizado mediante enrollamiento continuo. Este proceso es uno de los más avanzados y están disponibles en numerosas industrias.

El curado se realiza a temperatura ambiente. No se requiere mecanización, ni bolsa de vacío ni autoclave. Mediante este proceso el coste de fabricación es muy similar al coste de materias primas, no es un múltiplo de éstas, como ocurre en la mayoría de los procesos actuales. El ensamblaje, mediante unión por adhesivo en el caso de parrillas apiladas, puede ser también muy competitivo en coste.

Aunque la rigidez de las estructuras parrilla de materiales compuestos es muy similar a la de laminados convencionales, su resistencia es mucho mayor. Esto es debido a que los refuerzos unidireccionales no sufren micro-agrietamiento de la matriz ni delaminación. En cambio, los refuerzos fallan por resistencia o pandeo. Cuando las estructuras tubulares se espuman, las propiedades acústicas y de amortiguamiento son más favorables, y mucho mayores que las estructuras metálicas. Presentan mayor resiliencia y no existen deformaciones permanentes en la descarga.

Aunque se hable de ventajas tales como elevada resistencia y bajo coste, también existen desventajas. Por ahora, sólo pueden fabricarse formas geométricas simples, imposición debida al proceso de enrollamiento continuo. Las estructuras circulares y cónicas son las más simples de fabricar. También pueden fabricarse estructuras esféricas mediante el proceso TRIG. Formas tales como doble curvatura o superficies cóncavas no son apropiadas para este proceso. No se recomiendan uniones mediante tornillo o remache, si no existe un reforzamiento local para evitar el fenómeno de concentración de tensiones. Finalmente, recomendamos la utilización de estructuras parrilla para cualquier nivel de carga. Las estructuras sandwich son apropiadas para elevadas cargas, dimensionando convenientemente las pieles que trabajan a tracción y a compresión.

#### **4. ESTRUCTURAS PARRILLA CON PIELES**

Las estructuras parrilla pueden tener una o dos pieles. Aunque pensamos que las estructuras parrilla son capaces, completamente, de soportar cargas en tensión plana y flexión, las pieles pueden, o bien, ayudar a

*or foam as guide and tooling. These processes do not produce the high definition and stiffness that the TRIG process does.*

*The advantages of composite grids are derived from the availability of mass producible rods and tubes, and from the final assembly by filament winding. This winding process is one of the most advanced and widely available processes.*

*Curing is done at room or elevated temperature. Debulking, bagging and autoclaving are not required. With this process the cost of making a grid can be close to the cost of materials, not many times the cost as usual. Assembly by adhesive bonding in the case of some stacked grids, can also be cost effective.*

*Although the stiffness of composite grids is nearly equal to that of laminates, the strength is many times higher. This is true because unidirectional ribs do not fail by micro cracking nor delamination. Instead, ribs fail by strength or buckling. Where foamed tubes are used, the grids will have superior damping and acoustic properties that cannot be matched by metallic structures. Composite grids are also more resilient. There is no permanent deformation upon unloading. Thus composite grids do not dent or crumple like sheet metals.*

*While the advantages of composite grids are high strength and low cost, there are also disadvantages. As of now, grids can only be made in simple geometric shapes. Such limitation is often imposed by filament winding. Circular and conical shells are the easiest. Spherical shells can be done using the TRIG process. But doubly curved or concave surfaces are not suitable for grids. Bolting is not recommended without local reinforcement. Finally we recommend that grids be designed to carry all the loads. Skins are present for functional reasons only. On the opposite, in sandwich panels the skins do carry the load.*

#### **4. GRIDS WITH SKINS**

*Grids can also have one or two skins. While we believe that grids are completely capable of carrying the applied external in-plane and flexural loads, skins can either share the load and/or perform functions*

soportar cargas de flexión/tensión plana, o bien, ejercer funciones tales como contener una presión interna o externa o evitar la penetración de un determinado objeto. La interacción entre las pieles y la estructura parrilla implica que su combinación no es tan sencilla como para la parrilla por separado. La combinación hace que la construcción de dos o más materiales distintos sea microscópicamente heterogénea. La interacción entre estos dos elementos debe examinarse en cada caso por separado. El pandeo de los refuerzos esta restringido por las pieles. El pandeo de las pieles es un nuevo modo de fallo, que ahora aparece como consecuencia de la combinación. Chen and Tsai [2] han descrito varios modos de fallo de pandeo.

Si tratamos la estructura parrilla y las pieles como dos materiales, la rigidez plana resultante sigue la regla de las mezclas. Dado que la densidad de la estructura parrilla es mucho menor que las pieles (sólidos), la rigidez, en términos de peso, es diferente a la rigidez, en términos de volumen.

Esta diferencia es análoga a la de las fracciones en volumen de un material compuesto, donde la fracción en volumen es distinta a la fracción en peso. Como resultado de esto, las prestaciones relativas de las estructuras parrilla, con o sin pieles, son distintas en términos de peso y de volumen. No hemos sido capaces de establecer reglas generales.

## 5. COEFICIENTES DE EXPANSIÓN TÉRMICA

Una característica única de las estructuras parrilla de fibra de carbono es su bajo coeficiente de expansión térmica (CTE). En la Figura 8 pueden verse cinco sistemas de materiales carbono/epoxi. La primera columna representa el CTE de los laminados cuasi-isótropos. Los valores son entre  $1,5 \cdot 10^{-6}$  y  $2 \cdot 10^{-6}$  para todos los laminados. La siguiente columna muestra el CTE para los mismos laminados, pero con el módulo de Young duplicado. El CTE disminuye en un factor de 2. La tercera columna muestra el CTE de una estructura isogrid fabricada con los mismos materiales compuestos unidireccionales. El valor no sólo es significativamente mas bajo, sino que es próximo a cero o incluso negativo. Un CTE negativo, solamente es posible para laminados sólo en una dirección. En isogrids, es negativo y es bidireccional en el plano de la parrilla. Esta característica, única de las estructuras parrilla, puede utilizarse de forma muy eficiente en satélites.

*like containing pressure or preventing penetration of an unwanted object. Interaction between skins and grids make their combination not as simple as grids by themselves. The combination makes the construction of two or more different material forms is no longer macroscopically homogeneous. The interaction of different material forms must be examined on a case by case basis. Buckling of ribs are constrained by the skins. Skin buckling is an added failure mode. Chen and Tsai [2] described various buckling failure modes.*

*If we treat the grid and skins as two materials, the resulting in-plane stiffness follows the rule of mixtures. Because the density of the grid is much lower than that of the solid skins, the stiffness on weight basis is different from that on volumetric basis. This difference is analogous to the fiber fractions of a composite where the weight fraction is higher than the volume fraction. As a result, the relative performances of grids with and without skins are different on weight and volume bases.*

*We have not been able to establish general rules. For simplicity, we examine only grids with two identical, symmetric skins. We purposely limit our illustration to an isotropic grid/skin construction with equal thicknesses; i.e., each quasi-isotropic skin is 1/4 and the isogrid is 1/2 of the total thickness. Failure envelopes limited to in-plane loading only and are shown in absolute or normalized stress resultant. Each representation conveys different information on the behavior of the grid/skins construction.*

## 5. COEFFICIENTS OF THERMAL EXPANSION

*One unique feature of composite grids with graphite fibers is their low coefficients of thermal expansion (CTE). Five common graphite/epoxy composites are shown in Figure 8. The first of three columns for each composite material represents the CTE of quasi-isotropic laminates. The value is between  $1.5 \cdot 10^{-6}$  and  $2 \cdot 10^{-6}$  for all the composites shown. The next column shows the CTE for the same laminate if the longitudinal Young's modulus is doubled. The CTE is decreased by a factor of 2 which is a direct result of having higher modulus fibers. The third column shows the CTE of an isogrid made of the same unidirectional composite. The value is not only significantly lower, it is near zero or even slightly negative. A negative CTE is possible for laminates in only one direction. For isogrids it is bidirectional in the plane of the grid. This unique feature of composite grids can be greatly utilized in structures for satellites.*

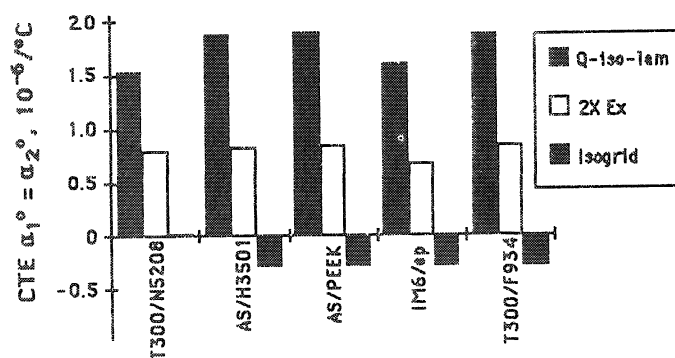


Fig. 8.- CTE de laminados isotropos e isogrids, incluyendo materiales compuestos ficticios con doble rigidez longitudinal para simular fibras de alto módulo.

Fig. 8.- CTE of CFRP quasi-isotropic laminates and isogrids, including fictitious composites having doubled longitudinal stiffness to simulate high modulus fibers.

Por otra parte, el CTE para isogrids de vidrio/epoxi es  $11.35 \times 10^{-6}$ , valor muy superior al obtenido para materiales compuestos carbono/epoxi. Este CTE es muy próximo al del acero ( $12 \times 10^{-6}$ ). Por lo tanto, desde el punto de vista de acoplamientos de CTE, una isogrid de vidrio/epoxi se acoplará perfectamente con pieles de acero. Para aluminio el CTE es mayor, alrededor de  $24 \times 10^{-6}$ . Por lo tanto el acoplamiento entre aluminio y vidrio/epoxi es menos severo que entre aluminio y carbono/epoxi.

## 6. CONCLUSIONES

Hemos tratado de ilustrar las propiedades únicas y los procesos de fabricación de las estructuras parrilla. Si finalmente pueden fabricarse en elevadas cantidades y volúmenes a bajo coste, estas estructuras encontraran mercados en muchos campos de aplicación. La mayoría de los procesos aquí descritos son automatizables. Las estructuras parrilla representan una alternativa viable a los laminados y sandwichs convencionales. Estas estructuras son tan simples como los laminados de materiales compuestos.

Nosotros somos optimistas a la hora de hablar de aplicaciones. Las estructuras parrilla de vidrio/epoxi pueden utilizarse como refuerzo de mortero y hormigón, recipientes a presión y tubería sometida a presión interna o externa, dispositivos de absorción de energía y anillos de máquinas rotativas. Las estructuras parrilla de carbono/epoxi pueden utilizarse para fuselajes de bajo coste, componentes de lanzamiento de cohetes y satélites, dado el amplio rango de coeficientes de expansión térmica. Su comportamiento dinámico ante fenómenos de acoplamiento y amortiguamiento es también excelente. Pueden fabricarse aplicaciones a medida en semanas en lugar de meses. Confiamos en aumentar nuestra experiencia en análisis y fabricación, de manera que la estructura parrilla pueda tener un reconocimiento especial.

On the other hand, the CTE for E-glass/epoxy isogrids is  $11.35$  which is much higher than that of graphite epoxy composites as shown above. This CTE is very close to that of steel ( $12 \times 10^{-6}$ ). Thus from the standpoint of matching CTE, a glass/epoxy isogrid will be perfect with steel face sheets. Aluminum is even higher at about  $24 \times 10^{-6}$ . But the CTE mismatch between GFRP and aluminum is less severe than that between CFRP and aluminum.

## 6. CONCLUSIONS

We have tried to illustrate the unique properties and manufacturing processes offered by composite grids. If they can be produced in large quantities and sizes at low cost, such products will find markets in many fields. Most of the processes described herein can be automated. Low cost and high volume production are entirely feasible. Grids may emerge as a viable alternative to the conventional laminated, stiffened and or sandwich constructions. We realize that composite grids are as simple as composite laminates.

We enthusiastically embrace grids for many applications. For glass epoxy grids, we see opportunities in the reinforcement systems of concrete structures and piling. We also envision vessels and piping for internal and external pressures, energy absorption devices and containment rings for rotating machinery. For graphite epoxy grids, we see low cost structures for fuselages, and several components of launch vehicles and satellites. Having a wide range of controllable coefficient of thermal expansion available, thermal matching of support structures is possible. Dynamic tuning and damping are also easily available with composite grids. Customized structures can be made in weeks instead of months or years. We hope to continue to gain design and manufacturing experience so composite grids can be recognized as something special.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a sus antiguos y actuales centros de trabajo por su apoyo en este trabajo. Se agradece también la financiación de este estudio por parte de las siguientes entidades: US Air Force Office of Scientific Research, National Science Foundation, US Army Corps of Engineers, National Renewable Energy Laboratory, Stanford Integrated Manufacturing Association, y Industrial Technology Research Institute of Hsinchu.

## ACKNOWLEDGEMENTS

*The authors wish to thank their former and current employers for the support of this work. Financial support from US Air Force Office of Scientific Research, National Science Foundation, US Army Corps of Engineers, National Renewable Energy Laboratory, Stanford Integrated Manufacturing Association, and Industrial Technology Research Institute of Hsinchu are gratefully acknowledged.*


## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ROBERT R. MEYER, MCDONNELL DOUGLAS ASTRONAUTICS COMPANY: Isogrid Design Handbook, NASA Contractor Report, CR-124075, Revision A, 1973.
- [2] HONG-JI CHEN AND STEPHEN W. TSAI: 'Analysis and Optimum Design of Composite Grid Structures', Journal of Composite Materials, 1996 30(4/6) 503—34.
- [3] STEVEN M. HUYBRECHTS: Analysis and Behavior of Grid Structures, PhD thesis, Stanford University, Department of Aeronautics and Astronautics, 1995.
- [4] STEPHEN W. TSAI: Theory of Composites Design, Think Composites, Palo Alto, CA, 1992.

\* \* \*

## publicación del IETCC/CSIC


### JORNADAS SOBRE CEMENTO ALUMINOSO



INSTITUTO DE CIENCIAS  
DE LA CONSTRUCCIÓN  
"EDUARDO TORROJA"  
en colaboración con el  
INSTITUTO ESPAÑOL DEL  
CEMENTO Y SUS APLICACIONES (IECA)

**JORNADAS SOBRE  
CEMENTO  
ALUMINOSO**

Madrid, 4 y 5 de junio, 1992



CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

El Instituto Eduardo Torroja publica íntegramente —en colaboración con el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA)— las "Jornadas sobre cemento aluminoso", celebradas en junio de 1992.

Se recogen las conferencias dictadas por destacados especialistas en la materia, así como las intervenciones suscitadas en los coloquios y en la interesante Mesa Redonda, tras la cual se clausuraron las Jornadas.

El tratamiento dado al tema del hormigón y cemento aluminoso por los intervinientes abarca tanto aspectos rigurosos científico-técnicos como de índole práctica, abordando temas de corrosión de armaduras, durabilidad, protección y reparación de los elementos constructivos con daños causados por diversas motivaciones ampliamente expuestas.

Este libro será, sin duda, una eficaz ayuda tanto para el científico o el técnico estudioso de esta materia, como para aquellos profesionales interesados en un tema de tanta importancia y actualidad como es el relacionado con los hormigones de cemento aluminoso.

Un volumen de 15,5 x 22,5 cm, 186 págs., con figuras de línea, gráficos, tablas, etc.