

# PROYECTO, FABRICACIÓN Y MONTAJE DE ESTEREO-ESTRUCTURAS

Autor: Prof. Ing. José Luis Volta Grau \*

Dirección: Valois Rivarola 828 esq. 9 de Setiembre

E-mail: [jvolta@rieder.net.py](mailto:jvolta@rieder.net.py)

Palabras claves: estéreo-estructura, estructura de acero, estructura modulada, análisis y diseño estructural, tipo estructural.

## RESUMEN

Las estereo-estructuras de acero se han utilizado escasamente en nuestro país, donde los techos de grandes luces se proyectan generalmente con las tradicionales vigas reticuladas de perfiles de acero laminados o plegados, o arcos de varillas que sostienen las correas de la cubierta.

Cuando la arquitectura requiere de techos planos de grandes dimensiones, con estructura metálica a la vista, las estereo-estructuras pueden ser una alternativa estética y técnicamente ventajosa.

En este trabajo se analiza un proyecto de este tipo de estructura, de dimensiones y características poco usuales, proyectado, fabricado y montado en Asunción por empresas paraguayas.

\* Profesor Titular de la Cátedra de 'Estructuras II' y 'Estructuras III' de la Carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.

## 1. El diseño típico

Este tipo de estructura se compone básicamente de barras de tubos de acero unidas entre sí mediante un dispositivo especial que permite formar un “nodo” real.

Se usa casi exclusivamente para soporte de cerramientos planos (metálicos, de plástico, de vidrio, etc.), con luces grandes.

Aunque las barras se despliegan en tres dimensiones, como las medidas en planta son mucho mayores que la dimensión vertical, el comportamiento estático puede compararse al de una estructura plana de “alma llena” solicitada por cargas normales al plano.

Concebida de esta forma, las “caras planas” superior e inferior de esta estructura se materializan con una “malla” de barras cruzadas en direcciones ortogonales. El “relleno sólido” (el “alma”) entre estos dos planos se materializa con las barras diagonales, las que unen entre sí los nodos de las mallas superior e inferior.

El comportamiento estático del conjunto de barras puede asimilarse por lo tanto al de una losa de Ho.Ao.: las barras inferior y superior reciben solicitaciones axiales provenientes del momento flector en cada sección vertical; las diagonales deben resistir el esfuerzo axial proveniente del esfuerzo cortante en la sección correspondiente.

Las características estáticas del “nodo” que unen las barras dependen del modelo de dispositivo usado.

En los modelos más sofisticados, el dispositivo permite que los ejes teóricos de las barras converjan en un punto; la unión puede ser roscada, soldada o encastrada. Existen numerosos modelos de dispositivos, de acero forjado en general.

En las construcciones más “rústicas” (o que no entran en la categoría de producto industrializado), no se utiliza un dispositivo especial; en este caso las barras suelen unirse entre sí directamente con soldadura, o con un bulón.

En este caso los ejes teóricos de las barras difícilmente convergen en un punto, lo que hace que las barras estén solicitadas también

por pequeños esfuerzos de flexión en sus extremos.

## 2. Techo del auditorio del Centro Familiar de Adoración (CFA)

La planta de techo del auditorio de esta obra se proyectó con este tipo de estructura (ver Fig. 1 y un detalle en las Fig. 2 y 3). Las columnas de apoyo son de hormigón armado, con separaciones de 7.50 m.

La particularidad del caso es que solamente se prevén apoyos en 3 lados; el lado que carece de apoyos está en el eje de simetría de una futura ampliación que duplicará el área cubierta actual.

La cubierta prevista es de chapas galvanizadas de doble lámina con membrana interna de lana de vidrio para la aislación térmica.

Se prevé además un conjunto de pasarelas al nivel del techo, para la operación de luces y sonido, así como un complejo cielo raso sobre el escenario, con pantallas de proyección, etc.

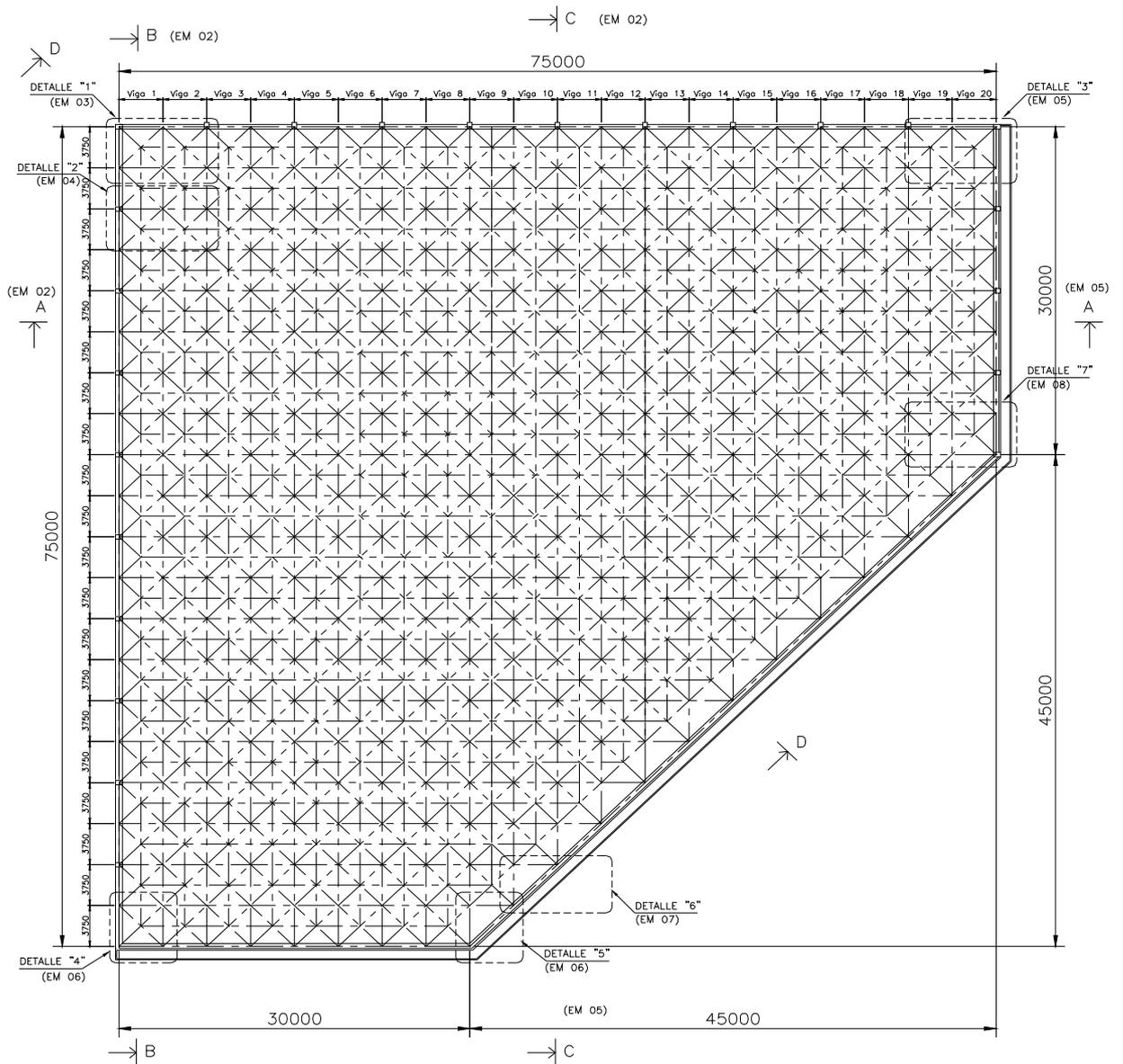
La estructura debe salvar una luz libre máxima de 75.0 m en cada dirección, las que se reducen a 30.0 m en los lados cortados por el chaflán. La pendiente del techo es de 1:12, con caída hacia la línea del chaflán.

La distancia entre las caras superior e inferior del entramado es de 5.0 m para la luz máxima, la cual se reduce a 3.75 m en la parte estrecha, con solamente 30.0 m de luz libre del vano (ver Fig. 4 y Fig. 5).

### 2.1 Datos del proyecto

Dadas las características poco usuales de la estructura se decidió que era necesario realizar un tipo específico de fabricación y montaje, ya que el modelo escapa a una versión estándar industrializada de módulos iguales, planta rectangular, etc.

Tampoco era posible realizar un montaje normal típico (armado completo “in situ” a pie de obra e izado con grúas en una sola operación).



PLANTA DE ESTRUCTURA  
ESC. 1:200

Fig. 1

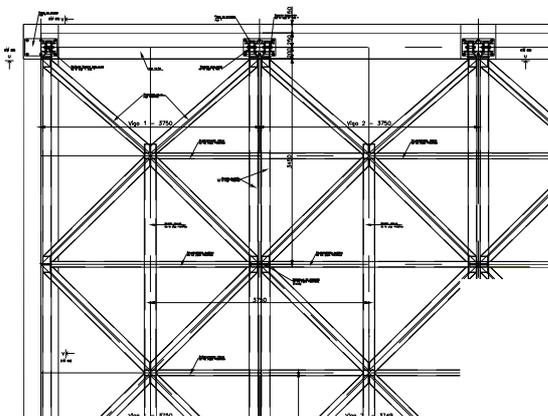


Fig. 2



Fig. 3

## 2.2 Diseño estructural

Como en el diseño típico, las barras del techo del auditorio del CFA son tubos de acero, aunque en este caso de sección cuadrada y no circular: el objetivo era facilitar la unión de los tubos entre sí mediante soldadura (lo que es más complicado si la sección es circular).

El tamaño de los tubos cuadrados varía desde 100 a 200 mm, y el espesor de pared desde 3.2 a 9.5 mm.

Las unión de las barras de los cordones con las diagonales se realizó directamente con soldadura a tope de tipo filete, para los tubos más finos, y con junta chaflanada para los tubos más gruesos.

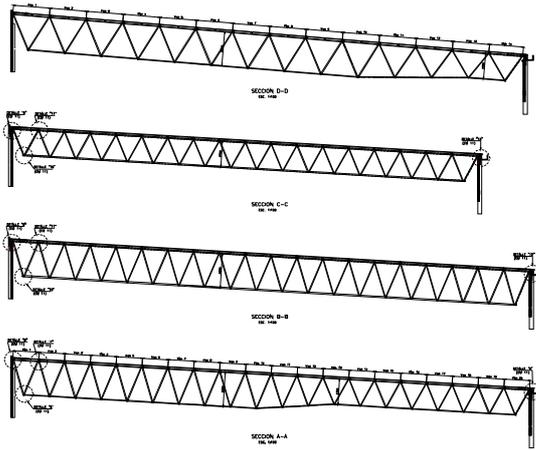


Fig. 4

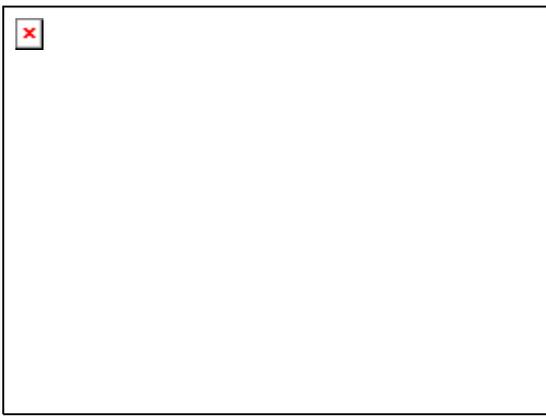


Fig. 5

Esto fue así por falta de espacio libre en primer lugar, ya que el auditorio debía construirse primero (una losa sobre la planta baja, y más arriba las graderías), luego por el elevado peso (unas 180 tn en total) y las grandes dimensiones en planta; apoyos a 25 m de altura, etc., lo que requeriría el uso simultáneo de varias grúas de gran capacidad y tamaño, con lanzas muy largas.

La solución fue fabricar 20 vigas reticuladas de sección triangular, de 3.75m de ancho (que es la dimensión del módulo de las mallas superior e inferior), que se montarían una a una sobre los lados que cuentan con apoyos, y se unirían sucesivamente entre sí mediante las barras con dirección ortogonal.

De este modo se formaría el entramado espacial, que avanzaría desde el lado menor hacia el lado mayor libre de apoyos.



Fig. 6

Por otra parte, para evitar (o al menos reducir) la aparición de tensiones por variación de temperatura se previó apoyos pendulares en un extremo de las vigas y apoyos fijos en el otro.

Esto permitirá la libre dilatación de la estructura entre apoyos y también la dilatación libre hacia el lado que no tiene apoyos.

## 2.3 Análisis estático

El análisis estático de la estructura se realizó con un modelo digital cuyos nudos se consideraron simplemente articulados.

El total de barras del modelo es de 2576, de las cuales 684 son cordones superiores, 604 son cordones inferiores y 1288 son diagonales.

La cantidad de nudos es de 685, y la cantidad de apoyos es de 49, con lo que el grado de libertad total de la estructura es de 2055, y el número de incógnitas cinemáticas es de 1908.

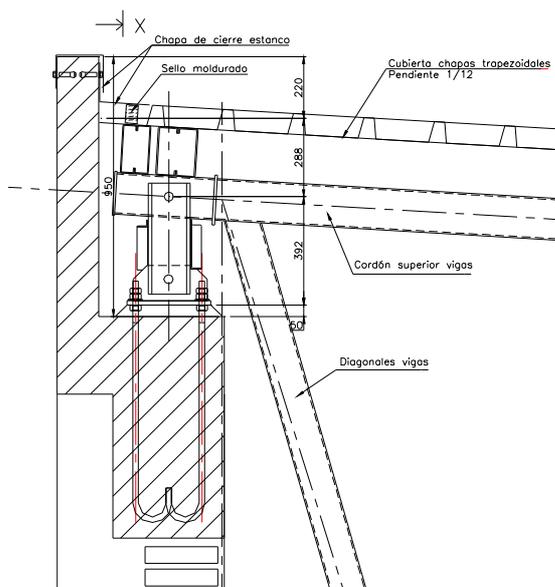


Fig. 7

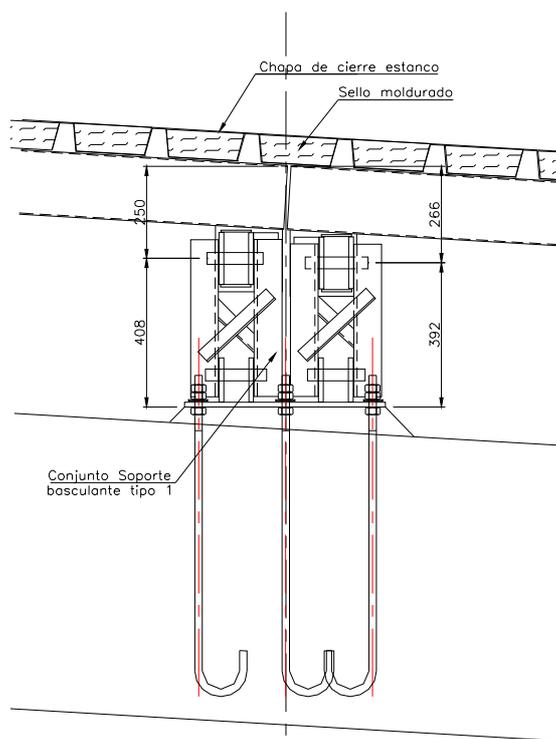


Fig. 8

En ambos extremos se anclaron placas con dispositivos especiales de apoyo, consistente en un soporte de perfiles U y una barra pasante de 38 mm de diámetro, para materializar un apoyo articulado (Ver Fig. 7, 8 y 9).



Fig. 9

Se consideraron 6 hipótesis de carga:

- peso propio;
- carga permanente de pasarelas, equipos de sonido y luces, ductos de aire acondicionado, cielo raso;
- acción de viento, exterior e interior;
- acción de carga por agua de lluvia (encharcamiento, debido a la pendiente muy pequeña de la cubierta);
- variación de temperatura;

Estas hipótesis se agruparon en 5 combinaciones de carga, considerando las acciones simultáneas más desfavorables.

El proceso iterativo de optimización de las secciones de las barras se facilitó mucho al

utilizar un programa que realiza el análisis estático y la verificación de la estabilidad de los elementos en un único proceso de cálculos.

La importancia de este proceso se aprecia al considerar la cantidad de barras a dimensionar, las variadas hipótesis y combinaciones de cargas, y la variación y la asimetría de las dimensiones de la estructura, etc.

También se debe considerar el peso económico de las estructuras de acero, donde un mayor gasto en optimización del proyecto (incluyendo cálculos más refinados y diseños más detallados) resulta en una reducción aún mayor del costo de la construcción y en una mayor seguridad de la misma.

#### 2.4 Fabricación y montaje

Dado el volumen de la obra y la reducida oferta de materiales de acero en el mercado local, la empresa adjudicataria debió importar los tubos.

Las características de los mismos son:

- material: acero al carbono, CSN COR-420
- procedencia: brasil
- Tensión de fluencia  $F_y = 300 \text{ Mpa}$
- Tensión de rotura  $F_u = 420 \text{ MPa}$
- Alargamiento de rotura = 20%

Para fabricar las vigas reticuladas de 3.75 m de ancho y 5.0 m de altura, en largos de 12.0 a 15.0 m, fue necesario fabricar una estructura que sirviese de "plantilla" para el armado preciso (con tolerancias de pocos milímetros), permitiendo también girar el conjunto para realizar las soldaduras de unión en la posición más favorable (Fig. 10).

El proceso de fabricación duró 10 meses, de Enero a Octubre de 2006.

Durante el mismo, se realizaron ensayos no destructivos de calidad de las uniones soldadas, básicamente con líquido penetrante, y con ultrasonido en las soldaduras de chapas más gruesas.

El proceso de montaje duró 6 Meses, pues no estuvo exento de numerosas dificultades y contratiempos.

Como indicamos antes, el montaje se realizó viga por viga, uniéndolas inmediatamente "in situ", en un proceso de avance desde un extremo al otro del techo.



Fig. 10



Fig. 11

El proceso requirió el uso de una sola grúa de 150 tn de capacidad con una lanza de 60.0 m, ubicada alternativamente en dos posiciones, a los costados de la obra.

Desde ahí se podía alcanzar hasta el centro del edificio (una distancia de unos 40 m en planta, desde cada posición), pudiendo

levantar unas 10 tn a esta distancia, que es el peso de las vigas más largas.



Fig. 12

No obstante, por la exagerada longitud de estas vigas se hizo difícil el izado completo de las mismas, debiendo hacerlo en dos mitades, que se empalmaron “en el aire”. La primera mitad levantada se sostenía de la parte ya montada, mientras la segunda se levantaba y sostenía con la grúa.

El mayor problema que enfrenta el montaje de una estructura metálica sobre columnas de hormigón armado es la diferente tolerancia dimensional de uno y otro tipo de estructura.

Mientras que en las estructuras metálicas los errores de fabricación suelen ser de unos pocos milímetros, incluso para grandes conjuntos, en las de hormigón armado no son raros los errores de varios centímetros, incluso decímetros.

En este caso específico el problema se agrava por las grandes dimensiones de los vanos y la gran altura de las columnas de apoyo, de tal modo que varias vigas debieron ser alargadas o acortadas en obra, hasta en varios centímetros para ajustarlas a la posición de las placas de apoyos ya insertas en la masa de hormigón.



Fig. 13

## 2.5 Comparación con otros tipos estructurales

Aunque no podemos hacer una comparación exacta con otros tipos más convencionales de estructuras de techo, por no contar con un proyecto alternativo para las mismas dimensiones que éste, es posible extrapolar a “grosso modo” sobre la experiencia de estructuras menores.

La alternativa más viable es la de vigas reticuladas independientes, utilizando tubos de dimensiones similares a los utilizados en este caso, soportando correas para apoyo de la cubierta (en una estereo-estructura la cubierta suele apoyar directamente sobre la estructura, sin necesidad de correas).

Un primer punto en contra de esta estereo-estructura es su mayor dificultad de montaje, ya que una parte importante de las uniones soldadas debe hacerse en obra, mientras que con una convencional esto no sería normalmente necesario. Sin embargo, en techos de menores dimensiones, no existiría esta diferencia.

Otro punto negativo es posiblemente su mayor peso y costo consecuente: unos 40 kg/m<sup>2</sup> contra menos de 30 kg/m<sup>2</sup>, que sería lo normal en un techo convencional de estas dimensiones.



Fig. 13

Posiblemente el punto más importante a favor de una estereo-estructura es su calidad estética y su impronta tecnológica, que confiere una dimensión particularmente impresionante al espacio que cubre, sobre todo cuando se trata de ambientes amplios, con una función pública importante o de simple actividad cultural, recreativa, comercial, etc.



Fig. 14

Es así que, contrariamente al caso de una estructura convencional, que normalmente no se deja a la vista, sino que se la oculta con cielo-raso, la estereo-estructura es siempre diseñada para ser vista y formar parte del espacio arquitectónico.



Fig. 15

## 2.6 Otros Datos

Obra: Estructura metálica para techo del Auditorio, Iglesia Centro Familiar de Adoración (CFA);

Cálculo y diseño: El autor de esta presentación (año 2001)

Fabricación: CIE S.A., año 2006  
Montaje: TIE SAECA., año 2007

