

AEROPUERTO INTERNACIONAL CARRASCO – GEOMETRÍA DEL SIGLO XXI.

**Ingeniero Mecánico, José Gómez
Cinter SRL
Santa Fe**

**Ingeniero Civil, Héctor M. Rufo
Cinter SRL
Santa Fe**

Resumen

La nueva Terminal del Aeropuerto Internacional Carrasco, Montevideo, Uruguay, ha sido diseñada por el arquitecto Rafael Viñoly (Nueva York). La misma posee una cubierta de doble curvatura de unos 40.000 m² de superficie en planta.

La longitud total es de 360 metros, sobrepasando los extremos del edificio propiamente dicho y descansando sobre el suelo. En la zona central la cubierta alcanza casi los 40m de altura sobre el nivel de pista y un ancho máximo de 130m con voladizos de hasta 25m. La estructura resistente se realiza en acero, con columnas de sección circular y vigas reticuladas, alcanzando unas 4.000 tn de estructura.

El proyecto de pliego de la estructura de acero, ha sido desarrollado en USA y se ha elaborado en base a estándares estadounidenses, en lo referente a estructuras de acero para obras civiles.

Debido a lo anterior ha sido necesario adaptar ciertos estándares a los habituales en Argentina, sin reducir la calidad final de la obra.

Se realizó un modelo tridimensional en elementos finitos para analizar el comportamiento con los cambios implementados y un modelo espacial para el detallamiento de la estructura de acero, de forma de reproducir la geometría tal cual fue concebida por los arquitectos.

ABSTRACT

The aim of this work is to show the development of the structural engineering, fabrication and erection of the steel structure of the new Terminal of Carrasco International Airport, Montevideo, República Oriental del Uruguay.

The building is wholly covered by a great curved roof, it will be 360m over total length of the building. The steel structure mainly made by circular hollow sections columns and truss beams.

The original steel structure project has been developed by Thornton & Tomasetti, based on the usual steel structure standards in the USA. In order to fabricate the structure in Argentina it has been necessary to adapt them to the argentinian ones, keeping to the original conception of the project.

Cinter made a F.E.M. 3D model to analyse the behavior of the changes introduced in the structure and another 3D model to detail the steel structure.

The fabrication and erection of the structure are principal points of this project that will be also developed in this presentation.

1. INTRODUCCIÓN

La nueva Terminal del Aeropuerto Internacional Carrasco, ubicada en Montevideo, República Oriental del Uruguay, es un proyecto realizado por Rafael Viñoly, prestigioso Arquitecto uruguayo.

La estructura para soportar la cubierta de doble curvatura es de acero y su concepción original fue desarrollada en Estados Unidos por Thornton & Tomasetti. El mismo se ha elaborado en base a estándares habituales para USA en lo que se refiere a estructuras de acero para obras civiles.

Dado que la ejecución de la estructura de acero se realiza en Argentina, ha sido necesario adaptar ciertos estándares a los habituales en este país, sin ir en desmedro de la calidad final de la obra. Es decir, se debe realizar un proyecto ejecutivo adaptado a las posibilidades de ejecución local, garantizando la provisión de los materiales, los plazos de entrega de los mismos, etc. Todo lo anterior manteniendo además la concepción original de la obra, es decir, respetando la arquitectura y geometría de la misma.

En el presente documento se describe, cuál ha sido el trabajo llevado a cabo para realizar las mencionadas adaptaciones del proyecto original al proyecto ejecutivo.

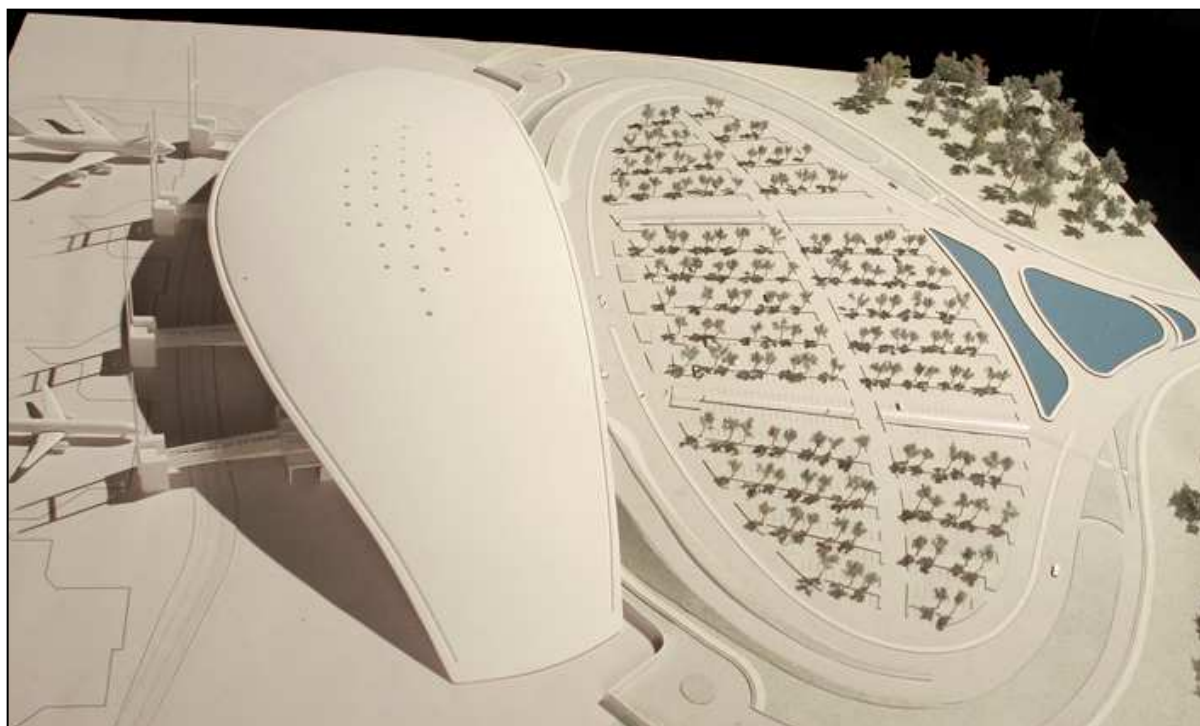


Fig. 1 – Maqueta general de la nueva Terminal

2. DESCRIPCION DEL PROYECTO

2.1- Datos generales de la obra

El proyecto pensado por Rafael Viñoly Arquitectos está orientado a brindar un mayor flujo de vuelos hacia la ciudad de Montevideo, con mejores servicios y mayor comodidad para los viajeros.

Su diseño vanguardista, inspirado en formas aeronáuticas, no reconoce antecedentes similares en la región. El edificio ocupará una superficie de aproximadamente 40.000 m² y estará dotado de siete puertas de embarque y 4 mangas telescópicas (Figura 2). Un gran techo de doble curvatura en forma de capelina, se extenderá 360 metros sobre toda la longitud del edificio, sobrepasando los extremos y descansando sobre el suelo.

La estructura de la cubierta está soportada por un sistema articulado de elementos estructurales que recorren el perímetro del edificio y a su vez sostienen la fachada vidriada de aproximadamente 8.000 m², la cual permite el uso de iluminación natural. Para lograr las geometrías planteadas por este proyecto, Cinter debió producir más de 32.000 elementos estructurales de acero diferentes, lo convierte a esta obra en un verdadero desafío tecnológico.

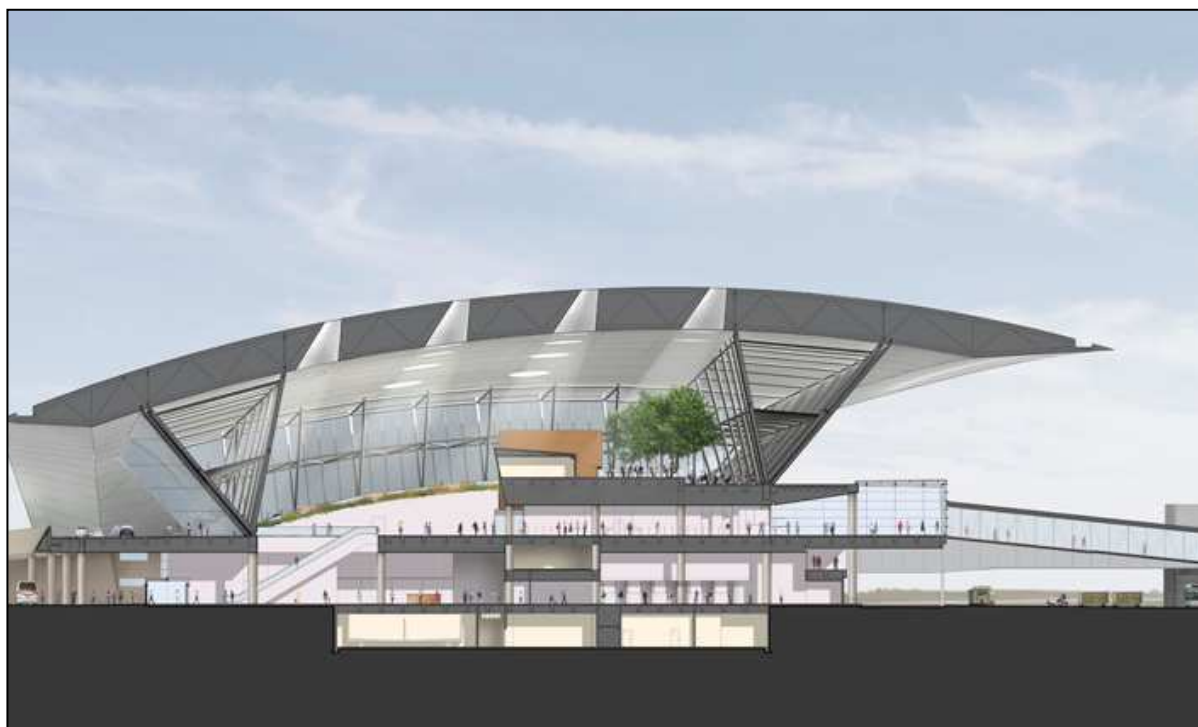


Fig. 2 – Vista en corte de la nueva terminal

2.2- Breve descripción del sistema estructural

La cubierta y el cerramiento lateral se soportan con una estructura de acero que posee dimensiones máximas de 130m de ancho y 360m de longitud. Esta estructura apoya sobre una estructura inferior de hormigón armado de dos niveles principales, nivel +8.00 y +14.00.

Se describirá el funcionamiento de la estructura mediante la definición de 3 sistemas estructurales resistentes; sistema resistente a cargas gravitatorias, sistema resistente frente a cargas horizontales N-S y sistema resistente ante acciones horizontales E-O (figura 3).

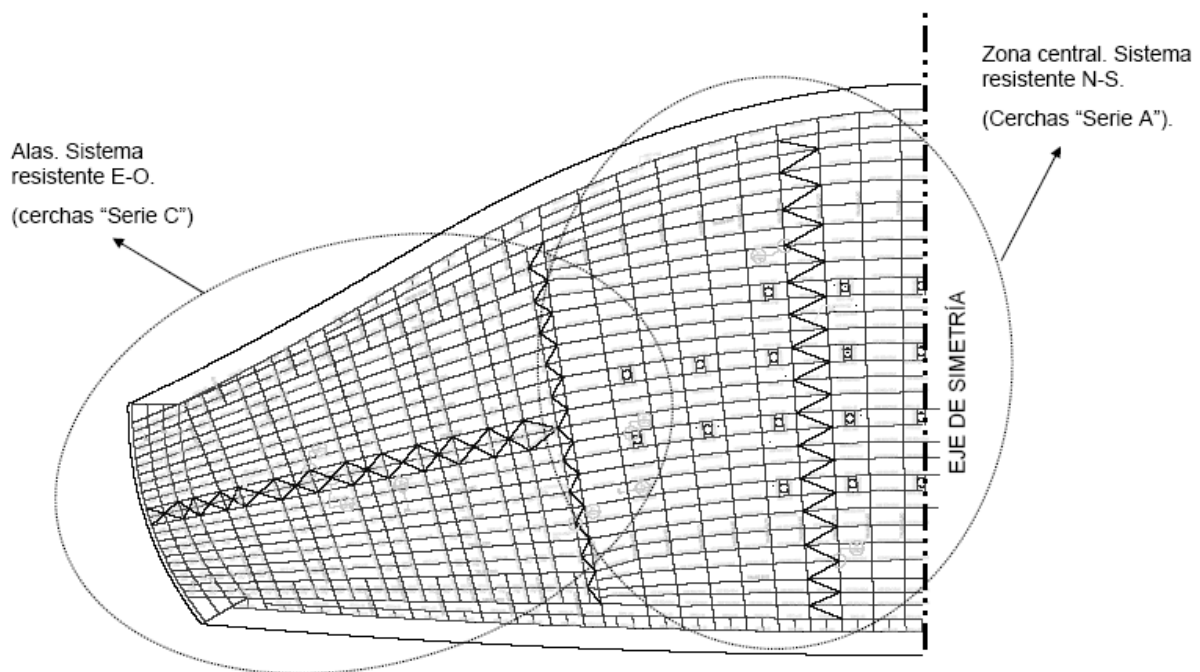


Fig. 3 – Esquema en planta de los 2 sistemas resistentes principales frente a acciones horizontales.

2.2.1. Sistema resistente a cargas gravitatorias

Para soportar las cargas gravitatorias la estructura se compone de una serie de pórticos con orientación N-S (son radiales) en la zona central (comprendida entre los ejes A5.3O y A5.3E) que se conforman de 2 columnas en "V" articuladas en su base (ubicadas sobre los ejes B9 a nivel +14.00 y B3 a nivel +8.00) y una viga reticulada que apoya sobre los 4 puntos que generan las columnas en V. Cada una de estas cerchas (16 en la zona central) poseen voladizos en sus extremos. El más largo de ellos se ubica en la zona norte y el mas corto hacia la zona sur. A estas cerchas se las denomina "Serie A". La luz máxima entre apoyos de columnas es de 60m y la longitud máxima total de la cercha más larga es de 130m. En la figura 4 se puede observar uno de estos pórticos tipo.

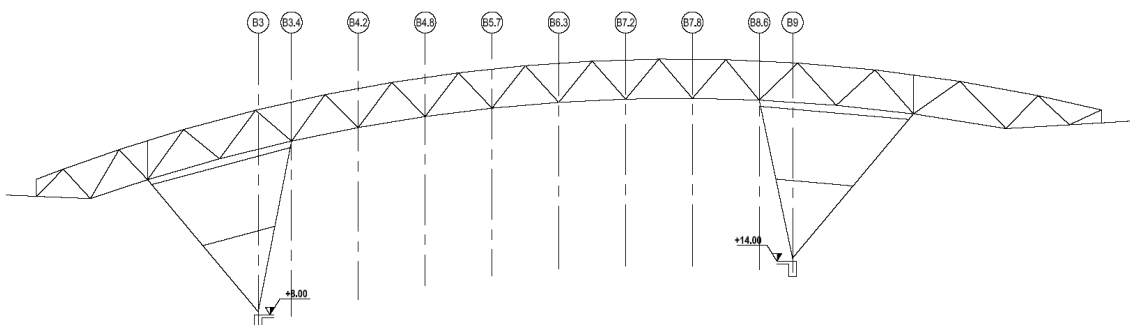


Fig. 4 – Pórtico tipo de la zona centra (Cerchas "Serie A")

Fuera de la zona central, en los laterales este y oeste, se generan una serie de vigas reticuladas en dirección aproximadamente perpendicular a las cerchas del centro, que apoyan en sus extremos mas alejados del centro del edificio sobre el nivel de piso (+0.00) y en el extremo opuesto sobre la estructura resistente de la zona central. A estas cerchas se las denomina “Serie C”. Además, estas vigas poseen un apoyo intermedio que es generado por una serie de 4 columnas (ubicadas en los ejes A93.O y A93.E) y una cercha de apeo.

El esquema anterior se completa con una serie de vigas de repartición en las alas que permiten, a su vez, generar los voladizos necesarios en los lados norte y sur. Dichas vigas también son identificadas como “Serie A”. En la figura 5 se puede observar un pórtico tipo de esta zona con cerchas “Serie C”.

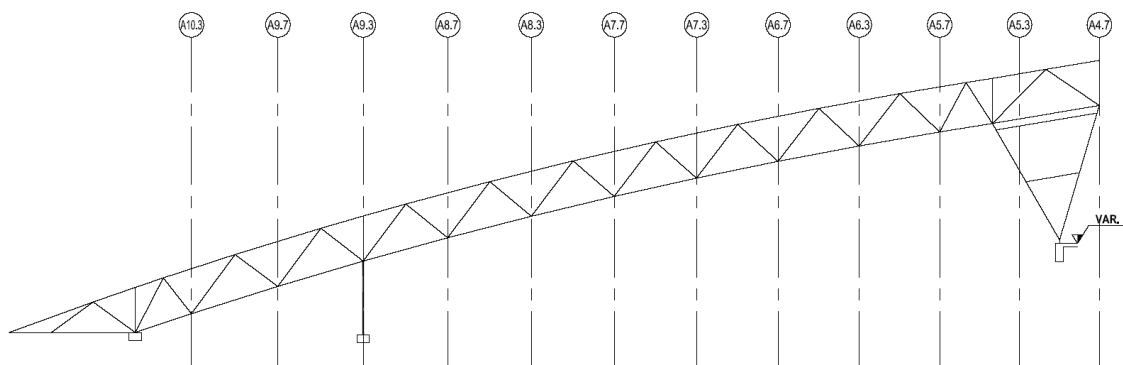


Fig. 5 – Pórtico tipo de alas este y oeste (Cerchas “Serie C”)

2.2.2. Sistema resistente a acciones horizontales dirección N-S

En la zona central los pórticos descritos en el punto 2.2.1 tienen la capacidad necesaria para tomar los esfuerzos horizontales generados en esta dirección (en su mismo plano). Los pórticos se ubican aproximadamente cada 8.00m (la separación es variable debido a que la ubicación de los mismos es radial) y son capaces de soportar la acción de viento correspondiente a su área de influencia de forma independiente uno de otro (figura 6). De todas formas, para mejorar el comportamiento del conjunto y evitar distorsiones que puedan afectar al material de la cubierta ante la presencia de ráfagas de viento puntuales, se dispone un arriostramiento horizontal en el centro de la cubierta que los vincula entre sí (figura 7). La estabilidad lateral de los cordones está asegurada mediante vigas transversales ubicadas cada 3.75m aproximadamente.

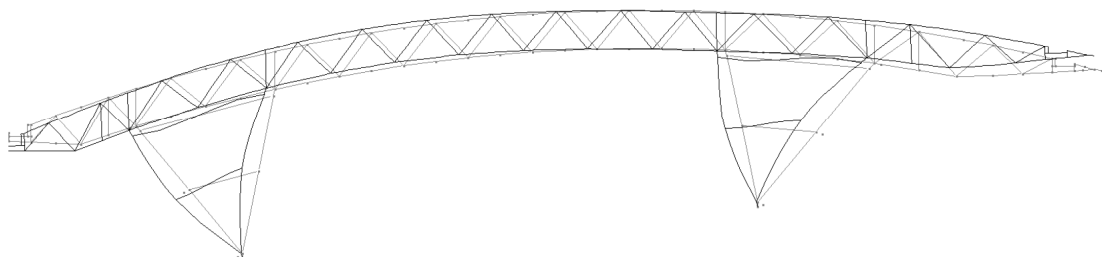


Fig. 6 – Comportamiento frente a acciones horizontales de los pórticos de la zona central (Cerchas “serie A”)

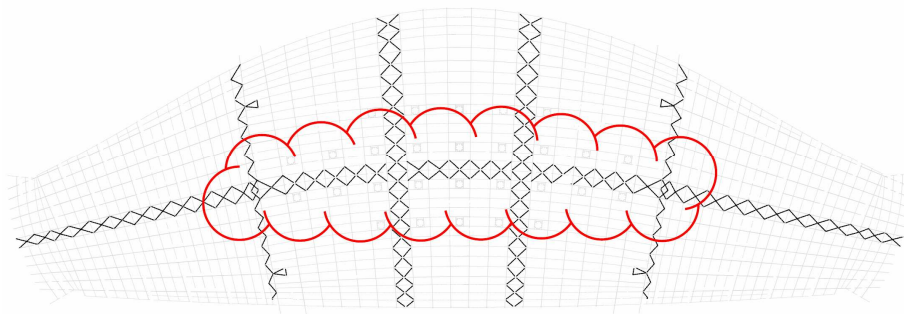


Fig. 7 – Arriostramiento longitudinal en la cubierta

En el caso de los laterales este y oeste, los esfuerzos horizontales son tomados por el plano de la cubierta y trasladados mediante el arriostramiento longitudinal, ubicado entre 2 cerchas centrales, hacia el apoyo inferior de las cerchas “Serie C” por un lado y hacia el apoyo superior en la zona central. Ambos extremos son capaces de tomar estas acciones resultantes y distribuirlas hacia las fundaciones.

2.3. Sistema resistente a acciones horizontales dirección E-O

En esta dirección, la estructura posee un sistema de pórticos formados por las cerchas “Serie C” de las alas y las columnas de los extremos de la zona central ubicadas en los ejes A5.O y A5.E. El esquema del pórtico se observa en la figura 8. En la misma se puede ver que en el extremo inferior el apoyo de la cercha es deslizante en el plano de la misma (esto es lo que permite dilatar a la estructura en dirección E-O) y que el extremo superior se encuentra empotrado a la columna en V. Esta última se encuentra articulada en su base. Este sistema de pórticos se materializa en ambas “alas” y se vinculan entre sí mediante elementos que permiten tomar tracción y compresión tal como se observa esquemáticamente en la figura 9.

Complementariamente con los sistemas detallados en los puntos anteriores, la estructura se completa con 2 cerchas “Serie B” que vinculan los extremos superiores de las ramas interiores de las columnas de la zona central.

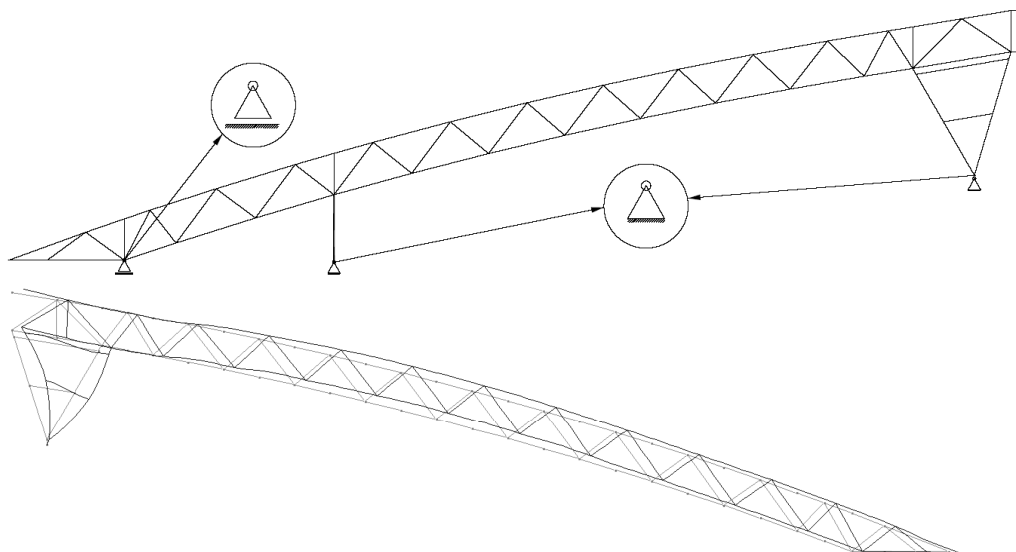


Fig. 8 – Comportamiento frente acciones horizontales de los pórticos laterales (Cerchas “Serie C”).

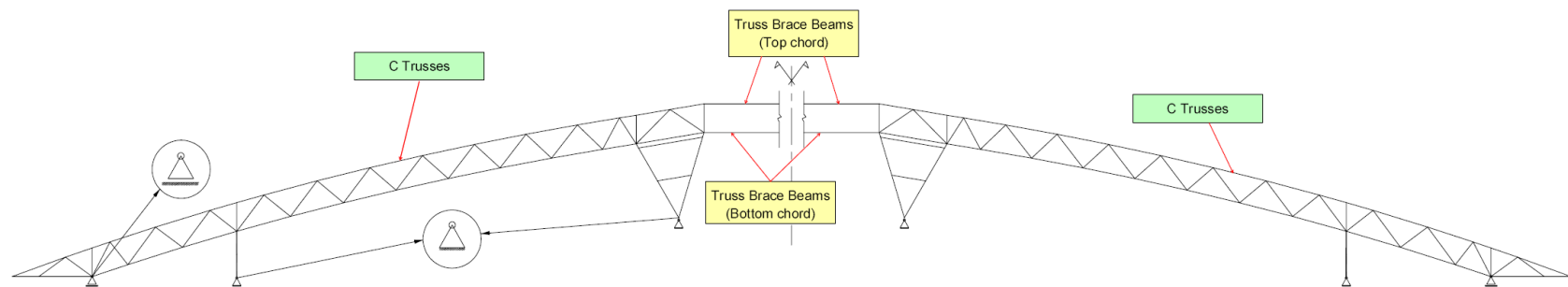


Fig. 9 Pórticos de alas vinculados por sistema de vigas de arriostramiento de cerchas

3. DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE EJECUCIÓN

3.1- Análisis estructural, adaptación de secciones y materiales a estándares argentinos

Para poder llevar a cabo las adaptaciones comentadas en los puntos anteriores, Cinter y su cliente han trabajado en conjunto llevando adelante un plan de trabajo que se resume en este capítulo. Se describirán los principales puntos de dicho plan y finalmente se resaltarán algunas conclusiones sobre temas particulares de la presente estructura.

3.1.1. Análisis global del comportamiento de la estructura y realización de un modelo tridimensional en elementos finitos.

En esta etapa se planteó como objetivo el entendimiento total del comportamiento de la estructura proyectada. Para esto se trabajó sobre el estudio de los planos emitidos por Viñoly, las especificaciones técnicas, la memoria de cálculo generada por Thornton & Tomasetti, etc. A todo ese análisis se agregó la realización de un modelo tridimensional con elementos finitos de barras con el software RAM Advanse (figura 10). Esto último permite corroborar la idea del comportamiento global interpretada partiendo de la información disponible y además nos brinda herramientas para analizar minuciosamente el comportamiento local de cada uno de los elementos modelados.

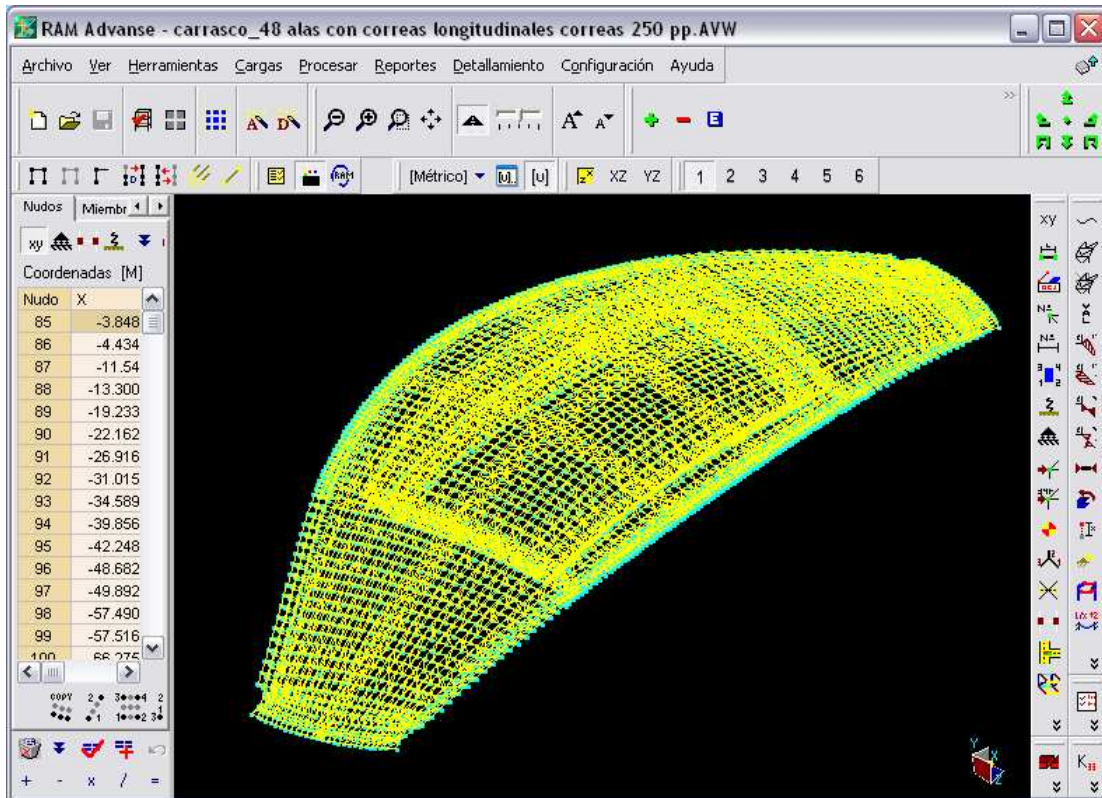


Fig. 10 – Vista de modelo de elementos finitos en Ram Advanse.

3.1.2 Geometría del modelo de cálculo.

La geometría utilizada para este modelo es la obtenida directamente de la documentación emitida por el estudio Rafael Viñoly Arquitectos. La definición geométrica por lo tanto se respeta tal cual ha sido ideada y forma parte condicionante del estudio del problema.

3.1.3. Hipótesis de cálculo. Acciones sobre la estructura.

En este sentido se respetan las hipótesis y acciones consideradas en el cálculo realizado por Thornton & Tomasetti. En definitiva se mantienen, el peso propio de la cubierta y cielorrasos (son valores conservadores), la sobrecarga accidental sobre la cubierta y las acciones de viento que son las recomendadas por BMT Fluid Mechanics Limited en su documento *"Project 43671/00 – Carrasco Airport, Montevideo. Wind Tunnel Testing. Structural Wind Loading Study. Roof Final Design 50 Year Return Period."*

El último punto referido a las acciones de viento es un tema fundamental en el análisis de esta estructura. Al ser una geometría tan particular y por tratarse de una obra de especial importancia como un aeropuerto, el estudio de arquitectura decidió efectuar un análisis en túnel de viento muy minucioso que da como resultado presiones de viento sobre la cubierta para un total de 36 direcciones diferentes (1 cada 10°)

En la figura 11 se muestra un esquema con las direcciones de partida del análisis y en la figura 12 una de las hojas de resumen de valores de presión sobre la cubierta para una de las direcciones analizadas.

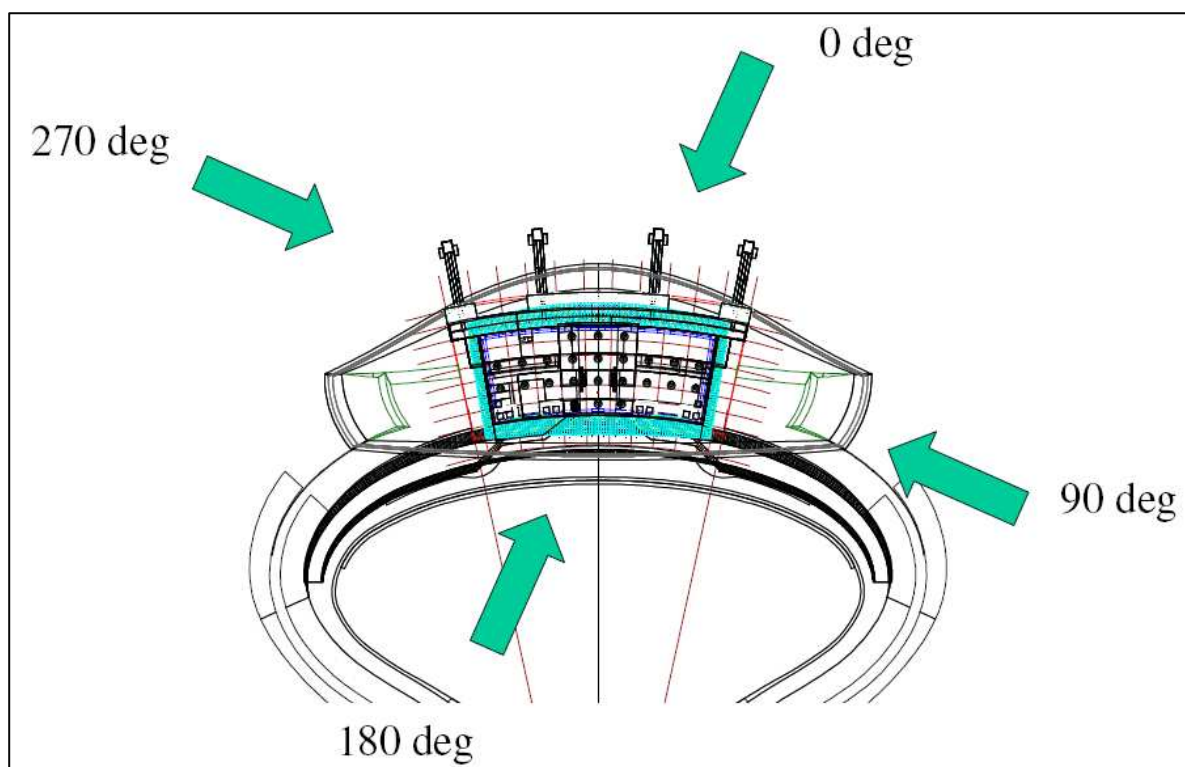


Fig. 11 – Direcciones de viento básicas para el análisis en túnel de viento. Se analizaron en total 36 direcciones, una cada 10°.

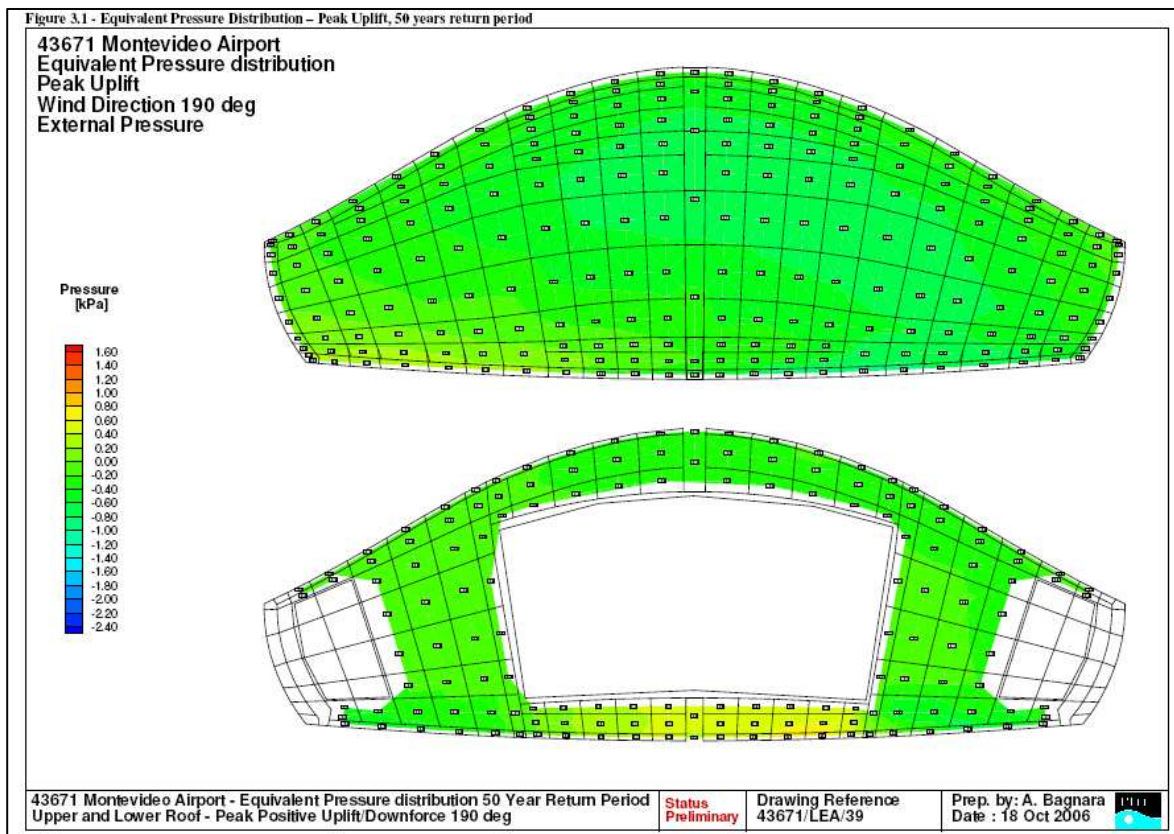


Fig. 12– Ejemplo de hoja de resultados con presiones equivalentes en cubierta y cieloraso para la dirección de 190°.

3.1.4. Evaluación del modelo de elementos finitos.

Una vez completado el modelo se procedió, en primer lugar, a verificar que el comportamiento de la estructura era como el previsto y que estaba de acuerdo con lo sintetizado en el punto 2.2 de este documento.

Además se han hecho 2 verificaciones adicionales. La primera de ellas se refiere a las reacciones de vínculo de la estructura. Este chequeo es fundamental porque permite corroborar que la totalidad de las acciones se hayan introducido en el modelo. Además, es necesario que la distribución de dichas acciones sobre la estructura de hormigón se mantenga en el orden de lo previsto originalmente, para no provocar cambios en la estructura de hormigón que le da apoyo a la cubierta de acero.

3.1.5. Principales adaptaciones realizadas en el proyecto estructural

En este punto caben destacar 2 aspectos, uno referido a la calidad del acero empleado y el otro a la tipología de elementos estructurales.

En el primero de los casos, las características de los aceros de fabricación nacional que se utilizaron, son las mismas que las propuestas por Thornton & Tomasetti. Es decir, los parámetros de diseño del material son equivalentes a los aceros indicados en pliego (ver tabla 13).

El segundo aspecto tiene que ver con la tipología de las secciones empleadas. En Argentina, prácticamente NO se realizan perfiles laminados en caliente, sólo se fabrican algunas secciones de perfiles de series europeas pero de pequeño tamaño, ángulos de alas iguales hasta 4" de ala y barras redondas para armadura de refuerzo de hormigón armado. Sí se lamina en

cambio, chapas de hasta ½” de espesor en calidad de acero F36 (equivalente al A572-G50). Este entorno hace necesario el replanteo del proyecto realizado en USA, pensando en la variada disponibilidad de perfiles que allí disponen.

Algunos ejemplos de dichas adaptaciones son :

- Uso de perfiles de sección doble T armados, partiendo de chapas de producción nacional, en lugar de perfiles W laminados.
- Máximo uso de perfiles ángulos de 4” de alas. Debido a esto hay una serie de diagonales que son con 4 ángulos en lugar de los dobles ángulos planteados originalmente.
- Reemplazo de los perfiles ángulo de gran tamaño como por ejemplo los correspondientes al arriostramiento de cubierta por caños de sección circular con costura.
- Reemplazo de perfiles huecos de sección rectangular (los perfiles propuestos en planos originales tampoco se fabrican en la región) por perfiles doble T armados con el agregado del arriostramiento lateral necesario.

	Plates and Profiles		Circular Hollow Sections	
	A572-50	F36	A500-B	API – X42
Yield point, min (Mpa)	345	355	290	290
Tensile Strength, min (Mpa)	450	490	400	414
Min. elongation %	18	15	23	24
Carb. Max %	0.26	0.24	0.26	0.28

Tabla.13 – Comparativa de aceros nacionales e importados.

3.1.6. Verificación normativa según AISC LRFD 1999

Una vez completado el modelo y corroborado su funcionamiento, se ha procedido a la verificación de cada uno de los elementos estructurales que componen la estructura. Dicha verificación se realizó de acuerdo con lo indicado en *“Load and Resistance Factor Design Specification For Structural Steel Buildings – AISC 1999”*.

Luego de dimensionados los elementos se procedió al diseño de las conexiones de los mismos, de manera que las piezas sean fácilmente transportables y montables. Para esto último se tienen en cuenta las limitaciones geométricas que implica el proceso productivo de la fábrica, el transporte y el montaje.

El modelo final, se exportó mediante un archivo de intercambio SDN (Steel Detail Neutral file) al programa de detallamiento Xsteel.

3.2- Ingeniería de detalle

Para realizar la ingeniería de detalle de la estructura principal se utilizó el software de Tekla Inc “X-Steel 10.1” sobre plataforma Windows XP.

La geometría de la estructura se importó directamente desde el software de cálculo “RAM Advanse” y se modeló la estructura íntegramente en 3D. A pesar de utilizar el soft para el detallamiento de la estructura de acero en particular, también se modela con este programa la estructura de hormigón armado de los primeros para

comprender mejor la estructura en su totalidad y para analizar correctamente las soluciones de interacción acero-hormigón (figura 14).

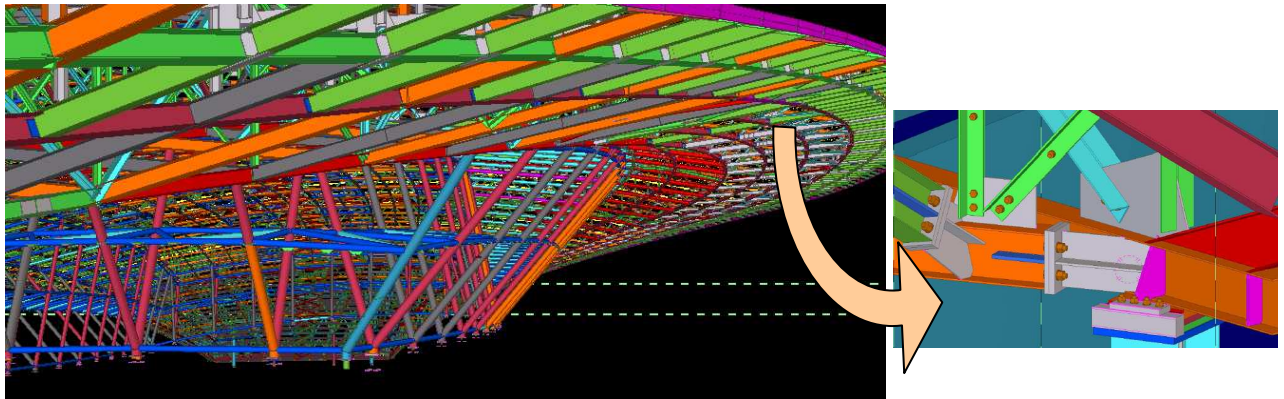


Fig.14 – Vista tridimensional del modelo de la estructura en X-Steel

Con el modelo completo en este programa se plantearon todas conexiones entre elementos (la obra tiene unos 43.000 elementos diferentes) que en su mayoría (salvo las uniones de las columnas que se realizan soldadas en obra) son abulonadas. La bulonería utilizada es del tipo ASTM A325 y A490. En la obra hay muchas conexiones que son del tipo Slip Critical (empalme de cordones de cerchas, arriostramientos principales, diagonales con agujeros OVS, etc.), que para un mejor control en su instalación se diseñaron con arandelas DTI (Direct Tension Indicator)

Una vez completado el modelo 3D, se obtienen en forma automática los planos de fabricación de las partes, los planos de armado, los archivos CNC para perforado de perfiles, lista de materiales, lista de bulones, y se realizan los planos de montaje, en vistas, plantas, detalles e isometrías (Fig. 15).

Debido a que los cordones de las cerchas se fabrican de forma poligonal para aproximar la curvatura, con tramos de aproximadamente 7.5m de longitud, se diseñó un software especial que permitiera generar el archivo CNC para la máquina perforadora, de forma de ubicar los agujeros en el perfil antes de ser facetado. Este sistema se utilizó tomando como datos de partida los archivos CNC generados por el X-Steel para los cordones “quebrados”.



- Montaje de cerchas y columnas por módulos. Realización de planos de prearmado por cada módulo con su respectivo control geométrico (figura 16)
- Ubicación en fábrica de cáncamos para izaje de módulos y determinación de las longitudes de eslingas en cada caso (figura 17)
- Se determinó la necesidad de realizar un premontaje en fábrica para evaluar el comportamiento de los módulos durante el izado (figura 18)
- Se realizó un procedimiento de montaje detallado y se determinaron las grúas necesarias para las principales maniobras

- Verificación de la estructura en estado de montaje. Cálculo de torres y cimbras de apeo provisionarias.

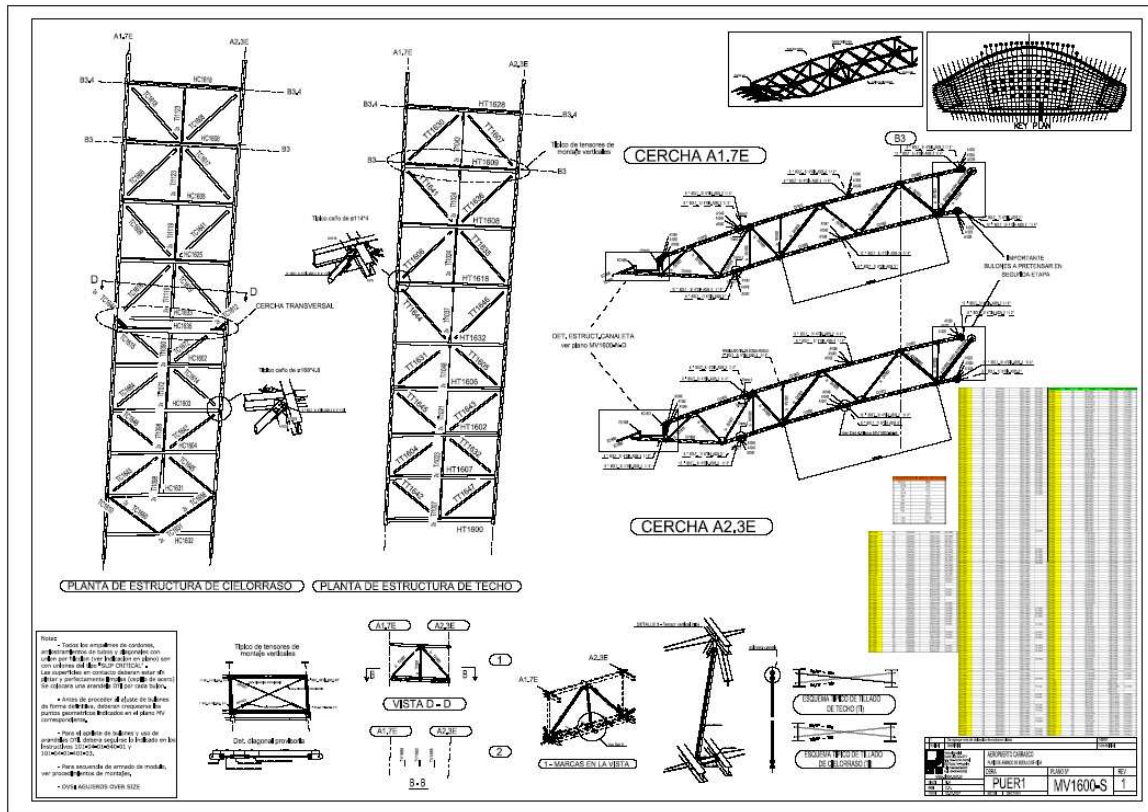


Fig. 16 – Planos de prearmado de módulos de cerchas

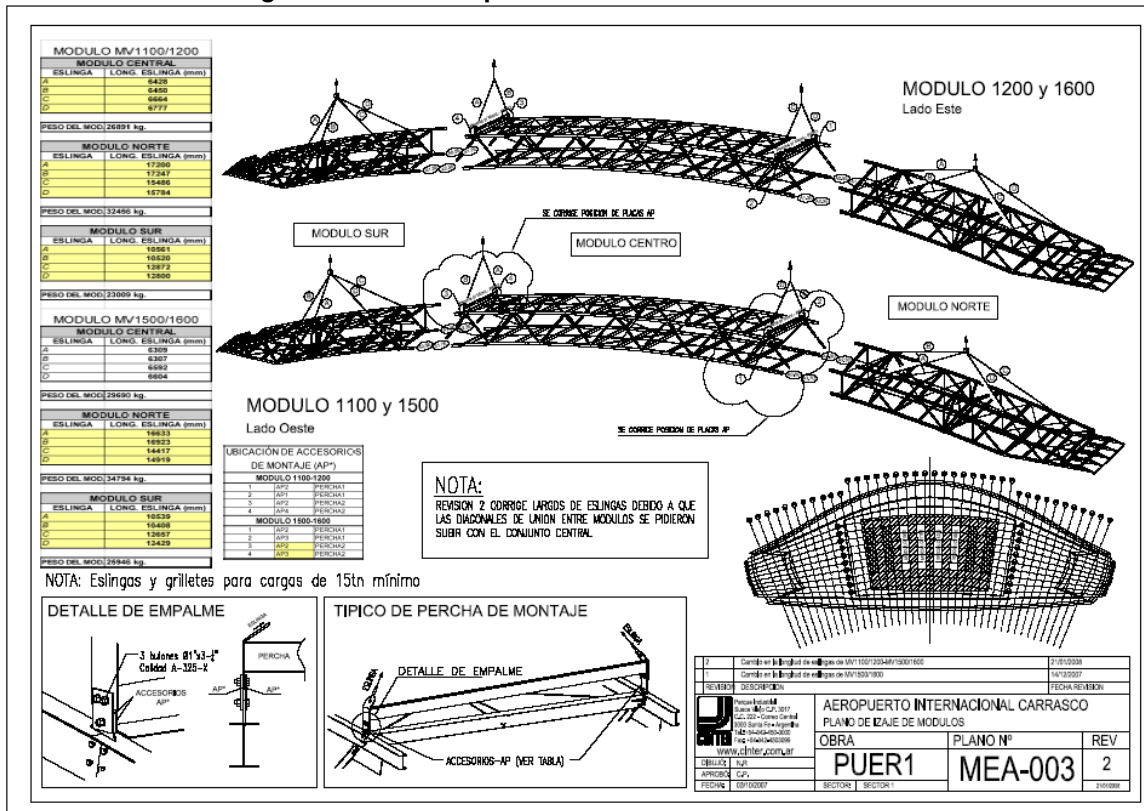


Fig. 17 – Planos con indicación de eslingado de módulos



Fig. 18 – Fotos del premontaje de un módulo típico de cerchas en taller

4 - FABRICACIÓN

La fabricación se realizó siguiendo las especificaciones de fabricación de las normas (AISC y AWS).

Los procesos de fabricación de los perfiles soldados fueron: corte a pantógrafo a control numérico a plasma u oxiacetilénico, soldadura automática de arco sumergido para el armado del perfil, soldadura de accesorios y placas, corte a sierra de perfiles, punzonado o agujereado de perfiles y placas en máquinas de control numérico, granallado de piezas y recubrimiento final de pintura epoxi. Todas las máquinas CNC poseen software de intercambio de información electrónica con ingeniería.

La producción se ejecutó en la planta industrial de Cinter SRL en Santa Fe.

5 - MONTAJE

Se resumirán a continuación las principales etapas del montaje en una secuencia de imágenes y fotografías. Las mismas se corresponden con el procedimiento desarrollado de acuerdo a lo indicado en el punto 3.3.

5.1- Montaje sector central

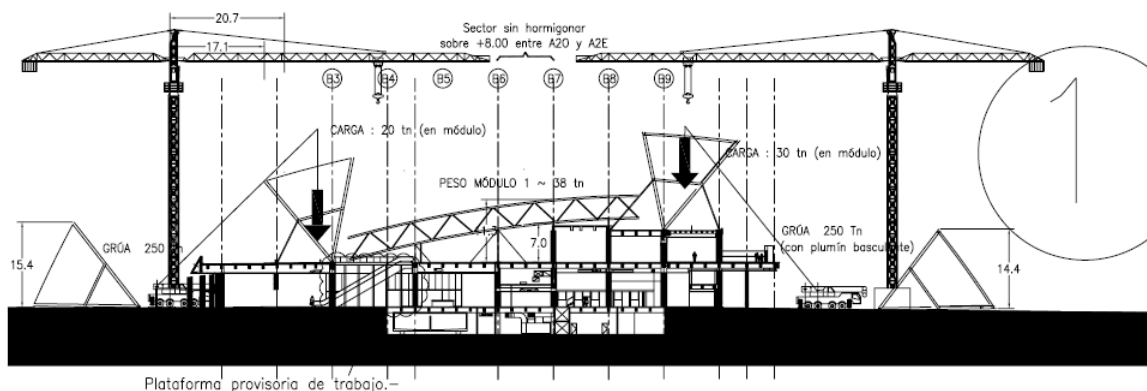


Fig. 19 – Montaje módulos columnas (sector central)

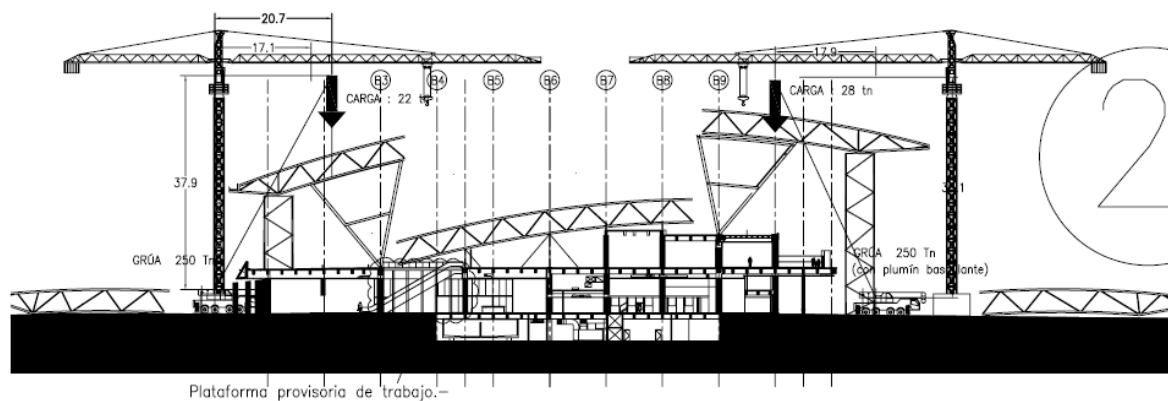


Fig. 20 – Montaje de módulos de voladizos sobre columnas y torres de apeo provisionarias.

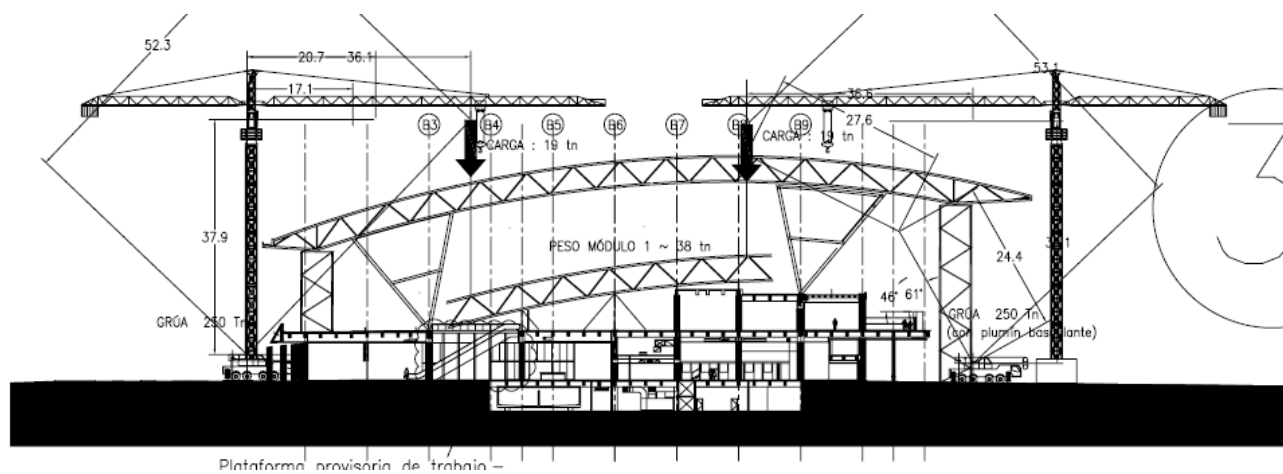


Fig. 21 – Montaje de módulo de cerchas central.



Fig. 22 – Secuencia de fotos montaje módulo central

5.2- Montaje alas

En este sector también se monta por módulos de cerchas. Al igual que en el caso del sector central las cerchas se dividen en 3 tramos como se indica en la figura 23.

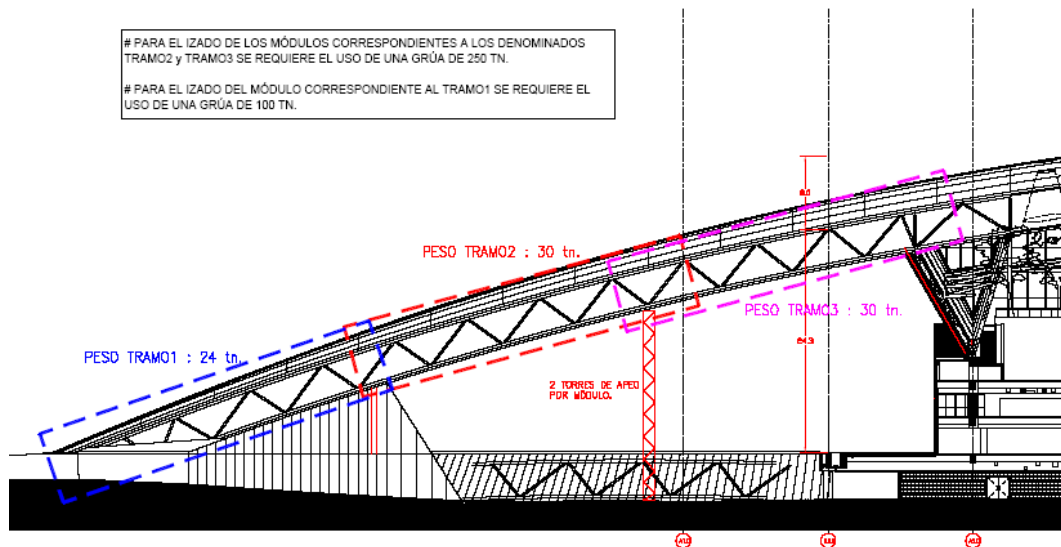


Fig. 23 – Módulos de cerchas para el izado de la estructura de cubierta del sector de "alas"



Fig. 24 – Fotografías con módulo 1 en posición y comienzo del izado del tramo 2.

5.3- Vistas generales del estado actual del montaje (junio 2008)

A continuación se presentan algunas fotografías con el estado de avance a junio de 2008 de la estructura. El montaje de la zona central se encuentra completo y se observa el inicio del montaje de las cerchas principales de las zonas laterales o alas.



Fig. 25 – Fotografías con vistas generales de la estructura montada a junio de 2008.