

Causas y proceso de colapso de una gran cubierta

Causes and process of collapse of a large roof

Javier Martínez García^a, Alejandro Clemente García^b, Antonio Morales Heras^c,
Ismael Carpintero García^d

^aIngeniero Civil. CEDEX. Jefe de Sección Técnica. javier.martinez@cedex.es

^bIngeniero de Caminos Canales y Puertos. CEDEX. Coordinador de Programa Técnico-Científico. alejandro.clemente@cedex.es

^cIngeniero de Caminos Canales y Puertos. TYPESA. Jefe de Equipo. anmorales@typsa.es

^dIngeniero de Caminos Canales y Puertos. CEDEX. Jefe de Área. ismael.carpintero@cedex.es

RESUMEN

La fuerte nevada que descargó sobre Madrid la borrasca “Filomena” en enero de 2021 provocó el colapso de numerosas estructuras de cubiertas que, en teoría, deberían haber soportado las cargas impuestas. Una de estas cubiertas fue la del Laboratorio de Experimentación Marítima del CEDEX, cubierta metálica de grandes dimensiones (unos 8.000 metros cuadrados, sin pilares intermedios) construida a inicios de los años 80 del siglo pasado. Este colapso puso de manifiesto no sólo los defectos que desencadenaron su colapso, sino también la reducida robustez del diseño de esta, lo que obligó a plantear su demolición controlada con medios controlados de forma remota.

ABSTRACT

The heavy snowfall brought to Madrid by the storm "Filomena" in January 2021 caused the collapse of numerous roof structures that, in theory, should have been able to withstand the imposed loads. One of these roofs was that of the CEDEX Maritime Testing Laboratory, a large metal roof (around 8,000 square meters, with no intermediate columns) built in 1980. This collapse highlighted not only the defects that triggered the failure but also the limited robustness of its design, which led to the decision to carry out its demolition using remotely operated means.

PALABRAS CLAVE: robustez, cubierta, nevada, colapso estructural, soldadura.

KEYWORDS: robustness, roof, snowfall, structural collapse, welding

1. Introducción

El 9 de enero de 2021, entre las 14:00 y las 15:00 horas, durante la fuerte nevada provocada por la borrasca Filomena, se produjo el colapso de la cubierta de la nave del Laboratorio de Experimentación Marítima del Centro de Estudios de Puertos y Costas (en adelante, CEPYC) del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (en adelante, CEDEX). Este hundimiento se

produjo para una carga estimada de nieve inferior a la carga representativa adoptada por la reglamentación actual, y por la considerada en el momento del diseño y construcción de la cubierta.

El colapso fue global, pero no completo, de manera que la nave quedó en una situación de inestabilidad no controlada que impidió el acceso a su interior. Se planteó entonces la

necesidad por un lado de determinar las causas del colapso; y por otro, de diseñar un proceso de desmontaje de la cubierta que evitara nuevos daños tanto en elementos del exterior como sobre las instalaciones que habían quedado íntegras en el interior de la nave.



Figura 1. Restitución fotogramétrica del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX tras el colapso (fuente: Google Earth).

Para ello, entre marzo y mayo de 2021 se realizó una serie de vuelos con drones y un escaneado láser de la nave para obtener imágenes del interior y generar una nube de puntos que permitiese definir el estado de los elementos de la estructura de la cubierta, y establecer la ubicación de los distintos elementos que había en el interior de la nave.

Una vez concluido el desmontaje de la cubierta, se procedió a la realización de los trabajos de inspección de detalle de los elementos estructurales críticos, a la toma de muestras de materiales y a la realización de ensayos de Laboratorio para su caracterización física y mecánica.

El desmontaje de la cubierta de la nave concluyó en el verano de 2022, y la construcción de la nueva cubierta terminó a finales de 2023.

2. Descripción general de la cubierta

Fundado por el profesor Ramón Iribarren en 1951 como Laboratorio de la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, el CEPYC se integró en 1957 en el CEDEX, ya como Centro de Estudios de Puertos y Costas.



Figura 2. Planta del Centro de Estudios de Puertos y Costas antes del colapso (fuente: Siggac).

La nave del Laboratorio de Experimentación Marítima, construida aproximadamente en 1980, es el cuerpo constructivo del complejo marcado con el código “C” en la figura anterior. Estaba constituida por una cubierta metálica de grandes dimensiones que apoyaba en unos entramados de hormigón armado cuajados por fábrica de ladrillo que conformaban los cerramientos.

Contaba con unas dimensiones aproximadas de unos 115 x 71 m, con una superficie interior de unos 8.000 m² sin pilares intermedios, lo que permitía disponer de un amplio espacio diáfano para la construcción de modelos físicos. Una red de pasarelas elevadas permitía la observación cenital de los modelos y la captación de imágenes desde puntos elevados.

Existe además un sótano que ocupa, aproximadamente, una cuarta parte de su superficie en planta de su lado noreste.

La nave tenía una cubierta a cuatro aguas cuya estructura descansaba básicamente en dos grandes vigas de celosía tipo Warren, paralelas y arriostradas entre sí, dispuestas en la parte central de la nave y orientadas según el lado mayor de ésta; de 114,5 metros de luz y 10,435 metros de canto total.



Figura 3. Vista de una maqueta de la cubierta y de su interior antes del colapso.

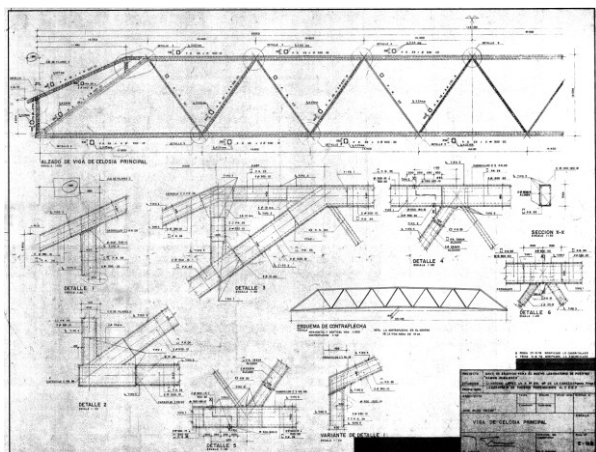


Figura 4. Plano de proyecto descriptivo de las celosías principales.

Las diagonales estaban formadas por perfiles tubulares armados formados por dos perfiles de sección UPN con las alas enfrentadas para materializar la sección cerrada. La sección transversal de las diagonales ascendentes hacia el centro de vano aumentaba su canto mediante sendas chapas que materializan las almas de la sección, de la misma manera que los propios cordones principales de las celosías.

El entramado de los faldones estaba formado por pares de cubierta y correas resueltas con celosías, sobre las que apoyaba un

entramado de largueros que recogían las chapas onduladas de la formación de cubierta. El intradós de los faldones estaba recubierto con planchas de poliespán como material aislante.

Los faldones de la cubierta apoyaban sobre una serie de pilares metálicos perimetrales de doble cordón entre los cuales se dejaba paso a una galería perimetral a modo de triforio.

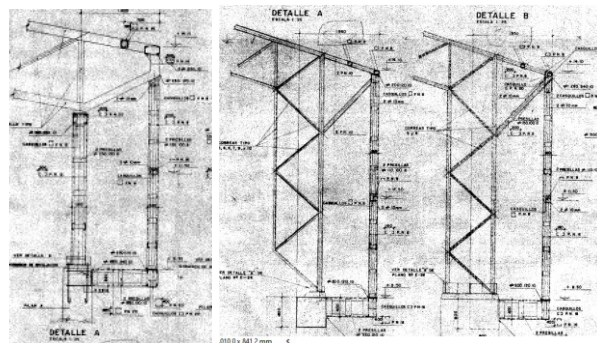


Figura 5. Apoyos de los pares de cubierta en los pilares perimetrales.

Estos pilares apoyaban sobre los entramados de hormigón de las fachadas. Estos entramados de fachada apoyaban en una cimentación directa mediante pozos de profundidad variable.

Los arriostramientos entre las celosías principales eran en cruz de San Andrés; y en K en el caso del entramado perimetral de los pilares metálicos.

Todos los elementos metálicos estaban resueltos con perfiles simples o armados laminados, con uniones soldadas.

3. Inspección de la estructura

El análisis de la situación de la estructura tras el colapso estuvo condicionado por la restricción del acceso al interior de la nave ya que el colapso incompleto ocurrido no permitía garantizar la seguridad. Por ello la inspección del interior se realizó desde el exterior empleando drones y escaneados láser.

La dificultad de realizar los vuelos con **drones** fue altísima por tratarse de un espacio interiores envuelto por una gran masa metálica donde el equipo no detectaba correctamente la

señal GNSS, por lo que el vuelo de la aeronave era muy inestable. Además, en el interior de la nave corrían ráfagas de viento que entraban por los huecos abiertos en la cubierta. Dada la gran cantidad de obstáculos y la falta de visión directa, se tuvo que pilotar con la visión de las cámaras y el apoyo de varios operarios intercomunicados entre sí que vigilaban el vuelo del dron desde distintas perspectivas (BVLOS).

Se realizó un **escaneado** con láser del interior de la nave para el levantamiento 3D de una nube de puntos que permitió ubicar de forma precisa todos los elementos, estructurales y no estructurales.



Figura 6. Estacionamiento del LIDAR desde el exterior (carro con pértiga y plataforma elevada).

Fue necesario realizar un total de 58 posicionamientos, 35 de ellos exteriores y 23 interiores. La restitución se realizó con apoyo de dianas que se lanzaron al interior de la nave.

Se obtuvo una nube de puntos 3D completa, formada por unos 250 millones de puntos, que proporcionó información con una precisión muy alta (concretamente, se consiguió un error medio de 13 milímetros).

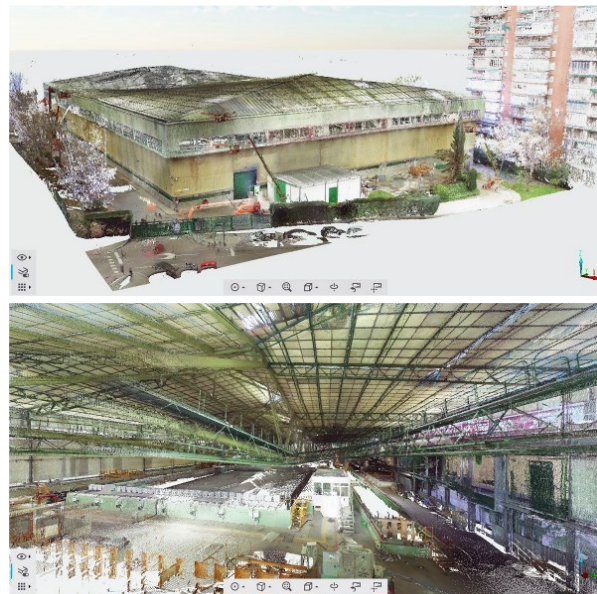


Figura 7. Vistas del exterior e interior de la nave en el modelo 3D de puntos.

Según avanzaron los trabajos de desmontaje de la cubierta se pudo acceder al interior del recinto, pudiéndose inspeccionar elementos críticos de la estructura



Figura 8. Vistas de las celosías principales antes de su desmontaje.

En las inspecciones se detectaron varias marcas de laminación en perfiles: “JMA”, “LNR A42b”, “FAGSA A42b” y “ENSIDESA” (esta última en el alma de uno de los UPN del cordón superior de una de las celosías principales. En el armado de los entramados de hormigón de las fachadas se habían utilizado barras de acero “estirado en frío”.

4. Descripción general de la estructura colapsada

Tras el colapso, los desplazamientos más significativos se encontraban próximos a la fachada NO. de la nave, zona en la que se produjo el hundimiento de la cubierta. El hundimiento se desencadenó como consecuencia del arranque de la unión de las diagonales extremas en las cerchas principales respecto del cordón superior o inferior.

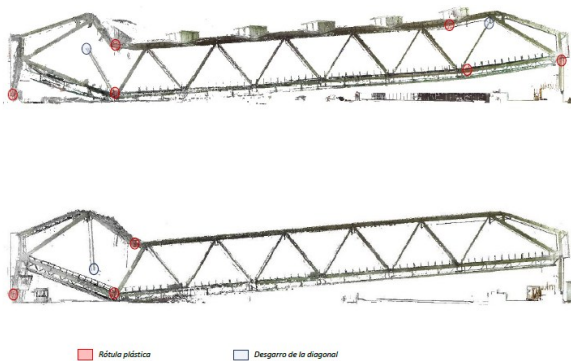


Figura 9. Modo de fallo de las celosías principales de la cubierta (nube de puntos).



Figura 10. Fotografía de la cubierta de la nave tras el colapso, tomada desde un edificio próximo

El arranque de los nudos se produjo según el caso bien en la propia soldadura de unión entre perfiles tubulares, bien arrancando el material base de los perfiles.

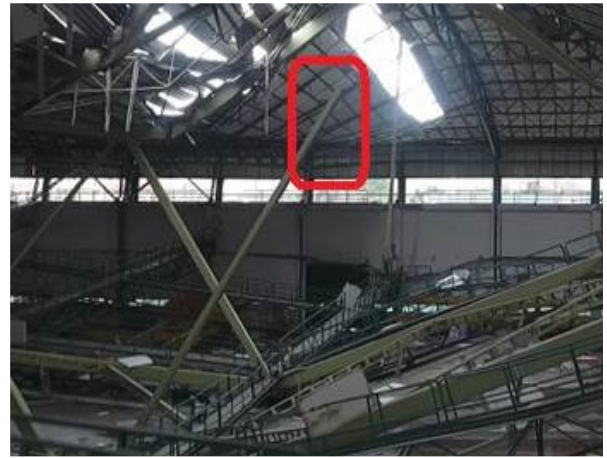


Figura 11. Rotura de uniones en las celosías principales

En general, las roturas de uniones entre elementos de la estructura ocurridas se produjeron arrancándose los cordones de soldadura de ángulo

El hundimiento de las celosías principales arrastró a otros elementos de la estructura:

- Varios pares y correas de cubierta, sobre todo en la zona noroeste de la nave, se desplomaron y alabearon fuera de su plano.

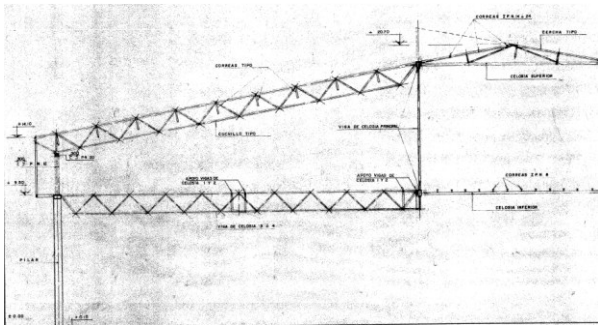


Figura 12. Detalle de un par de cubierta hundido y pérdida de apoyo de la pasarela .

- El desgarró de las chapas de la cubierta en esa misma zona; y la caída de planchas de poliestireno expandido del intradós de los faldones.
- El descenso del extremo superior de los pares provocó un giro en su apoyo sobre los pilares perimetrales, levantando los tirantes que sujetan el extremo del voladizo del pasillo perimetral. Este giro, junto con la sobrepresión interior que se produjo al hundirse la cubierta, es el que provocó la rotura de los ventanales perimetrales que desencadenaron algunos daños en el exterior.

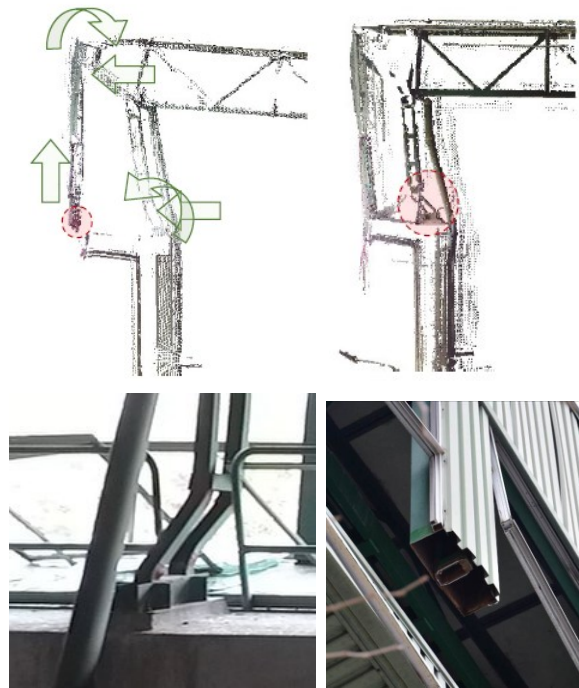


Figura 13. Detalle de las distorsiones ocurridas en pilares perimetrales .



Figura 14. Expulsión de ventanales perimetrales por el colapso.

- El desplome hacia el interior de los entramados de hormigón sobre los que apoyaban las celosías principales, formándose las correspondientes rótulas plásticas en su base.

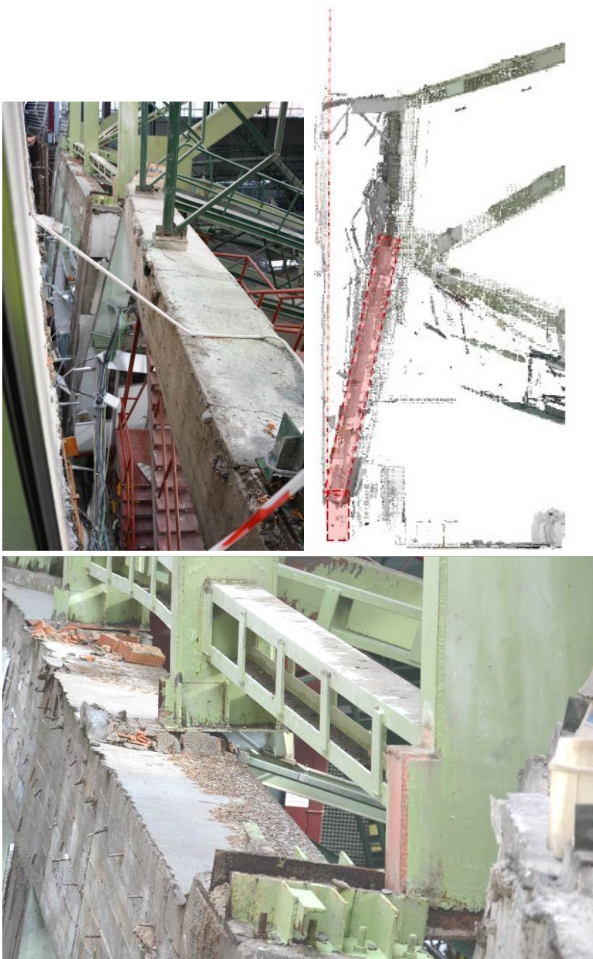


Figura 15. Arrastre de los pórticos de hormigón de apoyo de las celosías principales.

5. Defectos en uniones soldadas

En las zonas donde se produjeron las mayores distorsiones se produjo el fallo de varias uniones soldadas. En el caso de las celosías principales, estas uniones entre perfiles tubulares armados estaban diseñadas para ser ejecutadas en penetración total con preparación en V.

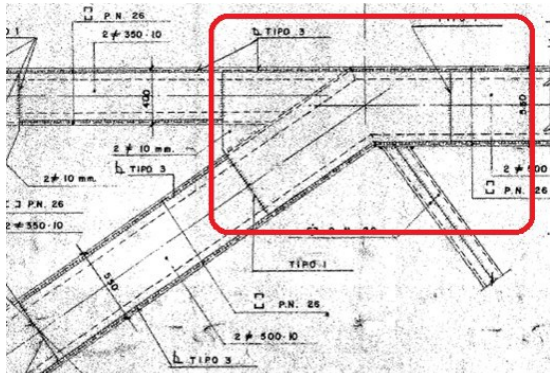


Figura 16. Detalle de proyecto para unión de diagonal en la celosía principal

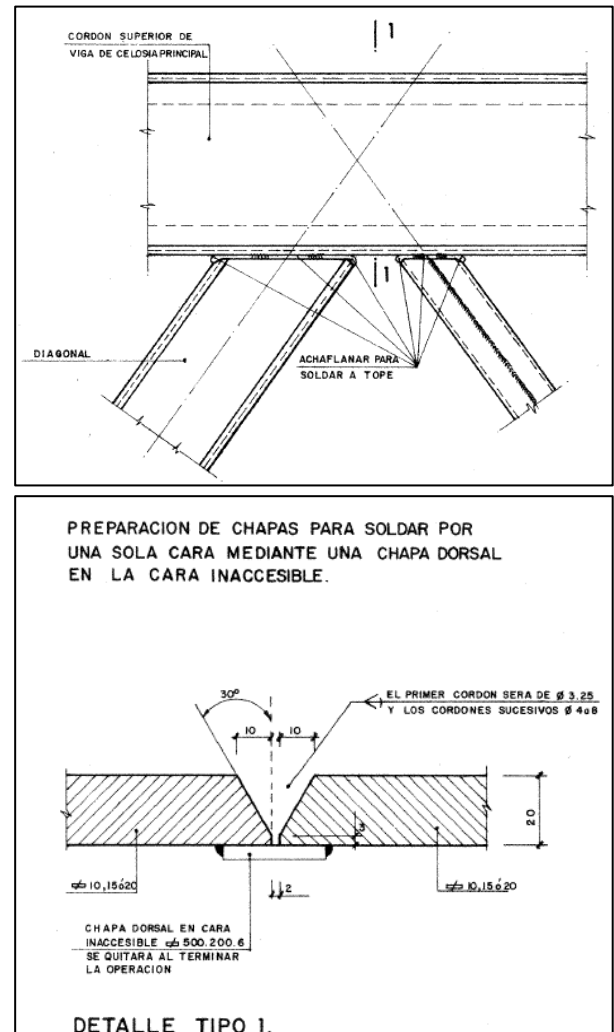


Figura 17. Detalle de proyecto para unión soldada.

Con este diseño se buscaba que, ante el eventual fallo de la unión, se produjese el arrancamiento del metal base [1], como de hecho ocurrió en una de las diagonales. Sin embargo, en el lado obtuso del encuentro en general el cordón no alcanzó esa penetración total por una insuficiente preparación del borde; mientras que en el lado agudo se materializaba en la práctica un cordón en ángulo.

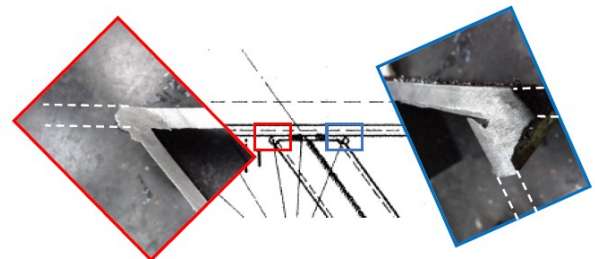


Figura 18. Detalle de las soldaduras en los lados agudo y obtuso de la diagonal tubular en nudo M7.



Figura 19. Extremo de diagonal en M91.

De hecho, en una de las uniones (nodo R14) la preparación de bordes fue muy reducida, de manera que los cordones laterales y del lado obtuso tuvieron penetraciones muy bajas.



Figura 20. Extremo de diagonal en R14.

En este nudo el lado agudo se materializó en la práctica una soldadura de ángulo con un espesor de garganta del orden de 10 milímetros.

Dicha soldadura se arrancó con rotura dúctil prácticamente en toda su longitud (salvo en un tramo central donde se separó de la chapa del cordón inferior de la celosía), con un ancho de contacto de unos 5 milímetros, apreciándose claramente la decohesión en la fractura.



Figura 21. Huellas de decohesión en el lado agudo de la diagonal tubular en R14.

Presumiblemente esta diagonal debió presentarse con mucha distancia respecto la placa de la celosía contra la que se tenía que soldar (unos 15 mm), de manera que se buscó aportar el material necesario para rellenar ese espacio con sucesivos cordones de soldadura.

A la vista de estos fragmentos, se pudieron establecer las siguientes consideraciones:

- El corte de las piezas para su montaje en obra se hizo con oxicorte manual, sin grandes defectos; si bien en ocasiones el corte debió hacerse con una velocidad alta.
- El lado agudo se resolvió en general con soldaduras de ángulo sin penetración total. En el lado obtuso (y laterales) sí se buscó esa penetración total especificada en planos.
- El cordón del ángulo agudo de la unión solía presentar una mejor ejecución (se arrastró metal base de la unión en ambas piezas).
- En dos de los tres nudos rotos de las celosías, los cordones del lado obtuso presentaban una penetración soldadura muy exigua, con una nula o muy escasa preparación de bordes mediante biselado de los bordes de la diagonal. En estos cordones prácticamente no se produjo dilución del material base en el cordón, de manera que la fractura se produjo en la interfaz de contacto de la soldadura con las diagonales.

6. Caracterización de materiales

De cara a analizar la influencia en el colapso de los distintos materiales de la estructura, se realizaron una serie de ensayos sobre muestras tomadas en obra durante el desmontaje (hormigón, armaduras y acero laminado). En el caso de las muestras de acero se observó que efectivamente se habían utilizado distintos tipos de acero; si bien en general, su composición, su ductilidad, su alargamiento en rotura y su resistencia a tracción se mantenían dentro de los requisitos exigidos a los aceros actuales.

7. Comprobaciones de cálculo

Para analizar el proceso de colapso se realizaron unas comprobaciones de cálculo sobre un modelo de barras de la estructura de cubierta, asumiendo las dimensiones de los elementos y de la geometría de la estructura de la nave de acuerdo con las especificaciones de la documentación de proyecto localizada. Estas dimensiones fueron corroboradas “in situ” en distintos elementos que se iban retirando en el desmontaje de la estructura.

Las comprobaciones se realizaron bajo tres hipótesis:

1. Asumiendo la normativa de aplicación actual.
2. Considerando las cargas estimadas que había en el momento previo inmediato al colapso.
3. Considerando la normativa de aplicación en la época de diseño y proyecto de la obra.

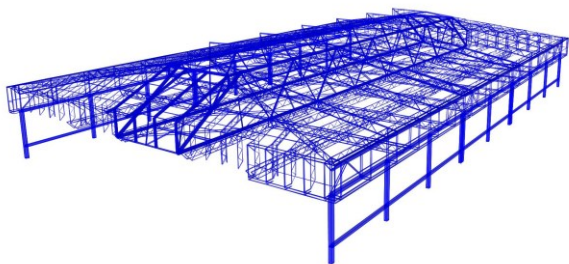


Figura 22. Modelo de análisis de la estructura de la cubierta de la Nave de Ensayos del CEPYC mediante el software SAP2000.

En estas comprobaciones se asumió que el cordón superior comprimido en las celosías principales, vigas cuchillo y correas de cubierta se encontraba en la práctica coaccionado al pandeo lateral por el material de formación de los faldones, y no se consideraron los momentos flectores en los extremos de los nudos de las celosías de los pilares perimetrales (hipótesis habitual que simplificaba el proceso de cálculo en una época [4] en la que la potencia de cálculo era limitada, y que en la práctica suponía asumir la formación de rótulas plásticas en las barras afectadas, manteniéndose la estabilidad para el conjunto de la estructura de la nave frente a los esfuerzos impuestos por las acciones consideradas).

Bajo estas premisas, la estructura proyectada para la cubierta de la nave resultaba estable frente a las acciones impuestas tanto por la reglamentación actual como por la que estaba vigente en la época de su construcción y por las estimadas inducidas impuestas por la nieve acumulada.

8. Causas del hundimiento

En primer lugar, cabe resaltar como causa fundamental del colapso global de la cubierta la muy baja robustez de la solución estructural adoptada, al disponer dos grandes celosías en sentido longitudinal en vez de llevar el forjado principal de la cubierta en sentido transversal, como se previó en el proyecto inicial de la Nave, y como se ha hecho ahora con la nueva cubierta.

Esta solución estructural la hizo extremadamente sensible frente a un potencial fallo puntual de un elemento. De hecho, el colapso se produjo cuando se desencadenó el fallo de la unión de una de las diagonales en una de estas grandes celosías (presumiblemente en el nodo R14), fallo que desencadenó el colapso del conjunto de la cubierta.

Por otro lado, la solución adoptada para la ejecución de las soldaduras de unión de las diagonales a los cordones superior e inferior de

las grandes celosías dificultaba enormemente su materialización habida cuenta de la muy reducida tolerancia que se podía admitir en la separación entre bordes de los elementos que concurrían en el nudo.

Además, el tipo de soldaduras previstas de forma genérica no resultaban adecuadas para el caso de la unión de las diagonales con los cordones superior e inferior de las celosías con perfiles tubulares, dada la dificultad de su materialización por la oblicuidad entre las directrices de ambos elementos [2][3]. Cabe señalar que, si bien este tipo de uniones eran conocidas en los manuales la época, no se detallaban las condiciones de sus cordones [4].

Por último, cabe destacar la ausencia de un eficaz control de ejecución de las uniones soldadas. En efecto, si bien en el colapso hubo uniones de elementos arrastrados que agotaron formando rótulas plásticas, en los casos en los que las uniones se materializaban con soldaduras de penetración total se produjeron muchos fallos secundarios de carácter frágil por fallo del cordón de soldadura.



Figura 23. Formación de rótulas plásticas en elementos de la estructura metálica.



Figura 24. Roturas en uniones soldadas de penetración total con preparación de bordes.

Agradecimientos

El estudio de las causas del colapso de la cubierta fue realizado con medios y personal del CEDEX. Los autores del estudio quieren agradecer la estrecha colaboración de sus compañeros del CEPYC, así como de los equipos de IDEAM y ROVER que participaron en el diseño y ejecución del desmontaje de la obra.

Referencias

- [1] Código Estructural. Volumen IV. Dimensionamiento y comprobación de estructuras de acero. Anejo 26: Proyecto de estructura de acero. Uniones. Artículo 7: Uniones en perfiles tubulares.
- [2] Guía de diseño para nudos de perfiles tubulares rectangulares (RHS) bajo cargas predominantemente estáticas. Packer, J.A. et al. Construcciones con perfiles tubulares de acero. Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire. Verlag TÜV RHEINLAND. 1996.
- [3] Patologías frecuentes en uniones soldadas. Barrios Corpa, R. et al. Cuadernos INTEMAC nº 90. 2º trimestre 2013.
- [4] Cálculo de Estructuras de Acero. Cudós Samblacat, V. H. Blume. 1978