

XI Congreso Latinoamericano de Patología y XIII Congreso de Calidad en la Construcción.
CONPAT 2011. Guatemala.

PATOLOGÍAS SINGULARES Y RECURRENTE. HUNDIMIENTO DE UNA CUBIERTA ESPACIAL METÁLICA

V. Alegre¹, V. Ródenas¹, S. Villalba²

¹COTCA, S.A. Calle Tuset, 8. 08006 Barcelona. España.

²CRACK. Ingeniería Catalana, S.L. Calle Tuset, 8. 08006 Barcelona. España.

RESUMEN

En ocasiones se producen patologías que aún siendo singulares como es el caso que se presenta, ya se han producido anteriormente, y pese a ello, no se ha sabido transmitir las enseñanzas de esas tipologías de daños, y vuelven a repetirse. Se quiere hacer resaltar que los estudios de daños han de servir para implementar en la normativa los requerimientos necesarios para alejarnos de situaciones de riesgo.

Se presenta el colapso de una cubierta espacial metálica con barras de acero inoxidable de sección circular con uniones simplemente ensambladas en sus extremos en una barra que hace las veces de nudo.

Palabras clave: pandeo local y global, cubierta espacial metálica, siniestros, patologías recurrentes.

LOS SINIESTROS UN AVANCE EN LOS ESTUDIOS DE DAÑOS

Al igual que las guerras (con todo lo que tienen de negativo) han supuesto un impulso importante al avance tecnológico; de forma recurrente los colapsos y las catástrofes han ayudado a desarrollar de forma acelerada la solución a problemas desconocidos o no resueltos. Es el caso de los barcos Liberty cuyas roturas supusieron un impulso al conocimiento y desarrollo de las uniones soldadas de estructuras metálicas, o el puente de Tacoma Narrows que impulsó el estudio de las acciones dinámicas del viento, o los sucesivos terremotos que han impulsado el conocimiento de los recursos antisísmicos. El último ejemplo será el tsunami y terremoto del Japón, que ya está suponiendo un ajuste en los sistemas de seguridad de las centrales nucleares, para mejorar el comportamiento ante situaciones de riesgo quizás no contempladas hasta ahora, y de las cuales da aviso periódicamente la naturaleza, obligando a revisar normativas, y protocolos de actuación.

A otra escala más local, situaciones como el colapso de una forjado de cubierta de viguetas de cemento aluminoso que causó una muerte, o el hundimiento en la Estación del Carmelo al producirse una chimenea, que causó alarma social; han supuesto una decena de Documentos de Idoneidad Técnica para refuerzo de forjados, y una mejora en el control de las obras de infraestructuras. Sin embargo el mayor avance ha sido la sensibilidad social antes este tipo de situaciones obligando a la Administración a una prudencia a veces excesiva,... ante este “síndrome de sensibilidad constructiva”.

Un camino importante, que hasta la fecha no parece tener éxito, consiste en la divulgación didáctica de estos siniestros. Existen multitud de libros de patología (1)(2)(3) que relatan las casuísticas de daños más “impactantes” y más comunes, que deberían ser materia de enseñanza para no “caer dos veces en la misma piedra”.

A pesar de que se hayan divulgado, hay una serie de comportamientos que continúan resultando patológicos, y a pesar de haberse estudiado y explicado con anterioridad, se siguen repitiendo sin que, en ocasiones, la magnitud del drama haya podido hacer mella en los técnicos intervinientes, que se continúan olvidando de determinadas situaciones de riesgo y estados límites de las estructuras.

Los colapsos en general, desde el punto de vista técnico, abren a la luz estados límites últimos y de servicio no suficientemente estudiados o tenidos en cuenta en esos casos concretos, que deben ser suficientemente divulgados para que no se repitan. El último ejemplo importante es haber tenido en cuenta en la central nuclear de Fukushima el grado sísmico IX de un terremoto, pero no considerar de forma concomitante el tsunami de 10 m de altura (se había considerado una altura de ola menor) .

EL EJEMPLO DEL PANDEO DE BARRAS COMPRIMIDAS

Un ejemplo ya clásico que se repite desde su origen es la necesidad de tener en cuenta el pandeo de barras comprimidas, el efecto $P-\delta$ ha sido estudiado hasta la saciedad desde Euler (4). Es difícil ver problemas de pandeo en pilares estructurales, pero ya no es tan difícil ver esos problemas en estructuras metálicas auxiliares (apuntalamientos) donde a pesar de que un puntal se ha de diseñar para una altura determinada y una carga, en ocasiones se supera la altura y al no tenerse en cuenta, el apuntalamiento falla por pandeo.

En la misma línea, de olvidarse de esta circunstancia, están las barras comprimidas que forman parte de una celosía metálica. Olvidarse por la razón que sea de este efecto da lugar a riesgos de colapsos importantes como el Quebec Bridge que mientras se realizaba en 1907 colapsó causando 75 muertos.

La causa principal del colapso fue el pandeo de la barra comprimida (curva) junto a los pilares del puente.

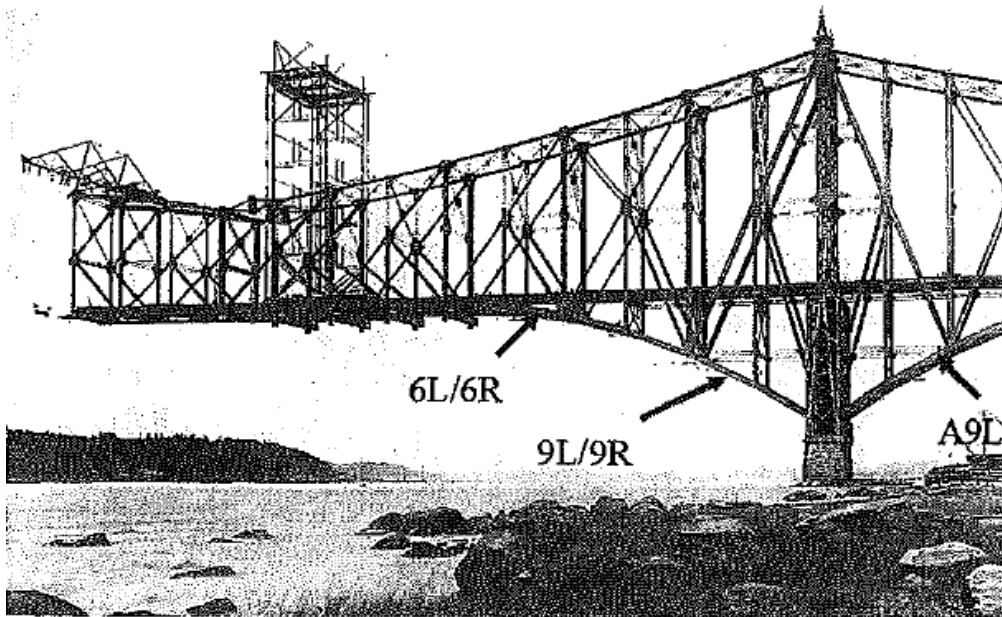


Figura 1. El puente de Quebec justo antes de colapsar por el pandeo de la barra A9L (2).

Tuvieron que transcurrir setenta años para que de nuevo un fallo por pandeo de una barra comprimida se produjera en una estructura suficientemente importante y significativa, para dar señales de nuevo a los técnicos de la existencia e importancia del pandeo de barras comprimidas, esta vez en una celosía tridimensional que cubría una luz de 100 x 50 m. Es el caso del Hartford Civic Center de Connecticut. Llevaba siete años construido, y al producirse una intensa nevada pandearon las diagonales a compresión de la celosía, y se hundió la cubierta. De aquél evento se aprendieron muchas cosas (2), que deberían ser enseñadas y asimiladas por los futuros técnicos, entre otras:



- Hay que evitar el exceso de confianza en los que diseñan la cubierta. Por buenos que sean, no está reñido eso con el control de calidad del proyecto. Cuatro ojos ven más que dos.

- Apurar el diseño más allá de los límites establecidos en la normativa, sin tener en cuenta los múltiples errores posibles respecto de las hipótesis de partida, debe evitarse. Como decía J. Amrhein. “La ingeniería estructural es el arte y la ciencia de moldear materiales que no dominamos del todo, en formas que no podemos analizar con precisión, para resistir fuerzas que no podemos predecir con exactitud, de forma que la sociedad no sospeche nuestra ignorancia”.

- No valorar el control de ejecución, cuando por ejemplo las variaciones de geometría pueden dar señales importantes de diferencia con el modelo.

- No tener en cuenta deformaciones excesivas durante el montaje.
- No estimar correctamente las acciones.
 - No considerar un posible fallo por pandeo de las barras comprimidas.
- Creerse el modelo, cuando, por ejemplo, en la realidad en el nudo no se juntan todas las líneas de fuerza en un punto.

Si todos estos aspectos se tienen en cuenta en el diseño de cubiertas con luces importantes, no pasaría lo que ocurrió en una cubierta abovedada tridimensional de acero inoxidable, de un polideportivo de la provincia de Gerona que prácticamente repite el proceso que ocurrió en Hartford en 1978, treinta años después.

 <p>Figura 2. Colapso del Hartford Civic Center.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -El contrato era de un ayuntamiento que quería algo singular. -Celosía metálica tridimensional de 50 x 100 m. -Se montó en el suelo y se levantó con gatos. -Se construyó en 1971 y colapsó en 1978,7 años después. -Colapsó tras una nevada fuerte. -La causa principal fue el pandeo local de una barra que dio lugar al global de la estructura.
 <p>Figura 3. Colapso del Polideportivo en la provincia de Gerona.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -El contrato era de un ayuntamiento que quería algo singular e impactante. -Celosía metálica tridimensional abovedada de 30x50 m. -Se montó en el suelo y se levantó con grúa. -Se construyó en el 2000 y colapsó en 2010, 10 años después. -Colapsó tras una fuerte nevada. -La causa principal fue el pandeo local de una barra que dio lugar al global de la estructura.

DESCRIPCIÓN DEL POLIDEPORTIVO

El pabellón polideportivo era una estructura de hormigón con gradas en un lado que está cubierta por una cúpula geodésica acarpanelada que cubre una luz de 50 x 30 m. La cubierta es del tipo espacial metálica con barras de acero inoxidable de sección circular y uniones a base de un tornillo que recoge las barras previamente achaflamadas. La cubierta descansa en el perímetro en 48 apoyos sobre un zuncho perimetral metálico apoyado en la estructura de hormigón.

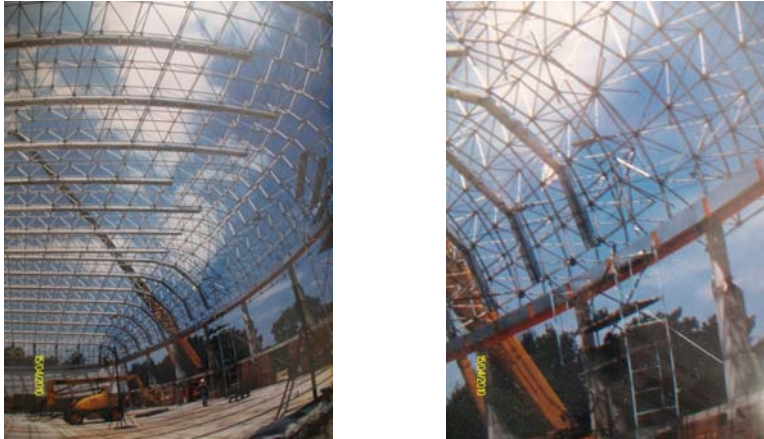


Figura 5. La estructura se montaba sobre el terreno y se levantó a su posición definitiva con grúa.

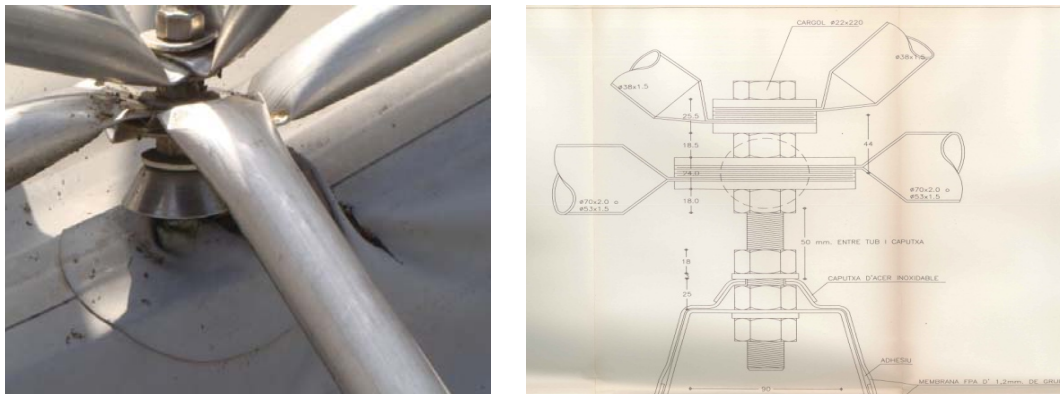


Figura 6. Detalles de un nudo inferior de sujeción del cerramiento de cubierta

EL COLAPSO

En marzo de 2010 tras una fuerte nevada (la mayor de los últimos quince años) con algo de viento se produjo el hundimiento al mediodía (15 horas) cuando no estaba en uso.



Figura 7. La cubierta en una nevada de principios de siglo (2001). Figura 8. La cubierta tras la nevada de marzo de 2009.

LAS CAUSAS DEL HUNDIMIENTO

Diseño de las barras diagonales a pandeo

Para el estudio de las causas, se realizó una toma de datos de los daños y se hizo una modelización de la cubierta con el SAP 2000. Las barras diagonales entre la retícula inferior y superior eran iguales en sección en todo el perímetro, independientemente de si estaban en el centro o en la zona perimetral acarpanelada.

Análisis de la inestabilidad de las barras diagonales de $\varnothing 38 \times 1,5$ mm.

La carga de pandeo es de 16,9 KN, coincidente con el ensayo de la barra en laboratorio cogida por sus extremos. La situación en obra es algo más desfavorable ya que el nudo no es una articulación perfecta.

Las barras de la malla superior de $\varnothing 70 \times 2$ mm soportan una carga de 74,7 KN a pandeo.

En el modelo realizado se aprecia que la bóveda rebajada funciona toda en su conjunto comprimida siguiendo la “teoría de la membrana” y se comporta bien hasta llegar al perímetro donde está acarpanelada. Ese cambio de curvatura de la bóveda hace trabajar de forma singular a las barras diagonales, que con una carga de nieve de menos de 40 kg/m^2 (20 cm de altura de nieve) alcanzan niveles de carga de 16,75 KN en la 5ª alineación próximas a la carga límite de pandeo. Cualquier disfunción de una barra al llegar al nudo o incremento de carga de nieve desplazada por el viento, que produzca su fallo (pandeo) obliga a las barras adyacentes a un incremento de cargas, que en el caso que nos ocupa es del 50% (24,14 KN) que supera claramente la carga de pandeo, y se va trasladando la disfunción al resto de la alineación y al final a toda la estructura.

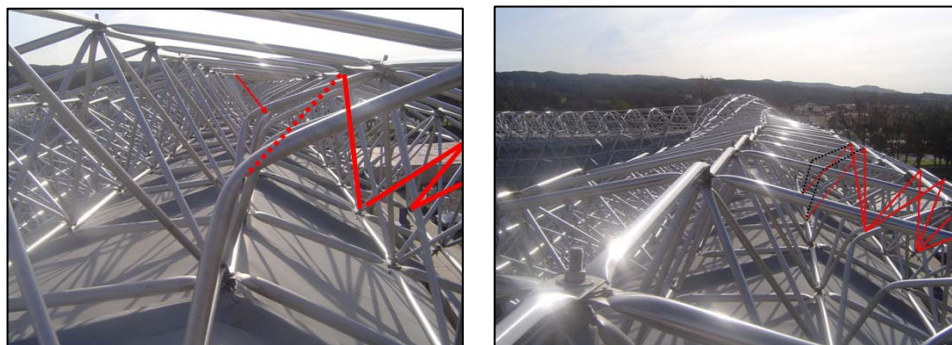


Figura 9. Barras diagonales pandeadas.

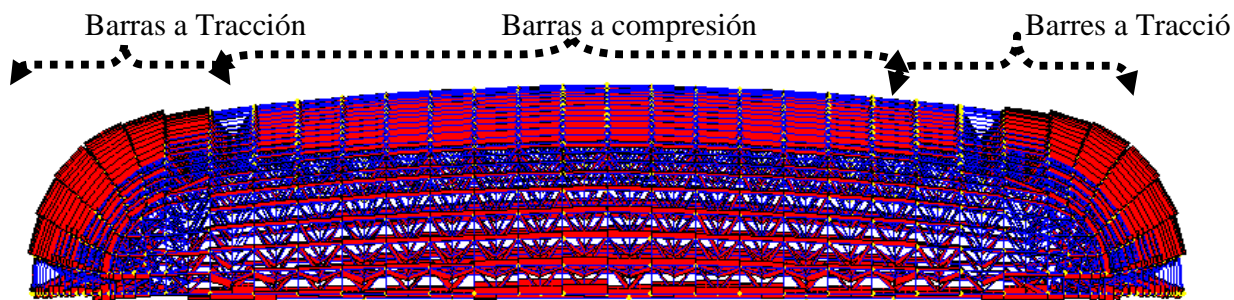


Figura 10. Situación del colapso en barras diagonales

Se observa que cualquier disfunción generada por una sola barra diagonal de la alineación, ejerce una redistribución de esfuerzos en las barras adyacentes que desencadenan un agotamiento general de las barras de la alineación y el pandeo global de la estructura. La estructura no es redundante.

Otras concausas

Al margen de las coincidencias citadas con los casos anteriores similares, se realizó un estudio de sensibilidad de las variables a las hipótesis de partida, analizando entre otros aspectos.

- Las acciones, que aun estando contempladas en la normativa eran importantes. En el proyecto no se consideró la probabilidad de que se acumulase la nieve de forma asimétrica como considera la normativa y como así ocurrió.

- El nudo no funciona correctamente ya que no concentra las tensiones de las barras que acceden a dicho nudo en un punto.



Foto 12. Barras de un nudo superior.

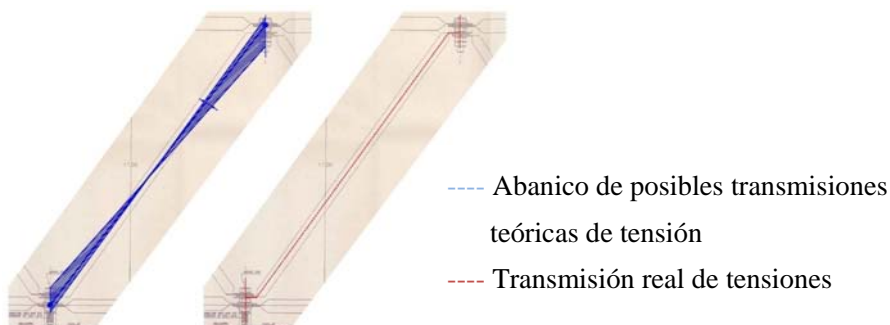


Foto 13. Transmisión de tensiones a los nudos.

- La geometría de la cúpula, que podía variar respecto a la prevista en el modelo, y nunca se midió.

- El modelo, que no puede reproducir la geometría real y las disfunciones inherentes a los nudos, y por lo tanto no tiene en cuenta esos efectos distanciándose del comportamiento real de la estructura.

CONCLUSIONES

- La causa del colapso de la cubierta espacial metálica del Polideportivo es similar a la que se produjo 30 años atrás en el Hartford Civic Center de Connecticut, el pandeo local de una barra que trae consigo el pandeo global de la estructura, y similar a su vez a la que se produjo a principios de siglo pasado en el puente de Quebec.

- Hay que aprender de las situaciones similares en especial cuando éstas han sobrepasado situaciones de riesgo admisibles llegando al colapso. Hay que ser capaz de transmitir a los técnicos las enseñanzas.

- Hay que considerar como un estado límite último a tener en cuenta el pandeo local de barras comprimidas y el pandeo global en las cubiertas resueltas con celosías tridimensionales.

- Hay que ser conscientes de las limitaciones de los modelos que no pueden tener en cuenta todas las disfunciones de la obra, como la geometría final, sus imperfecciones, y el comportamiento de nudos que no son articulaciones perfectas.

- Cuando la administración desee hacer algo singular no debe haber un exceso de confianza y hay que hacer un control de calidad del proyecto y de la ejecución.

- Si estos aspectos se tienen en cuenta en el diseño de cubierta con luces importantes, no pasará lo que ha ocurrido en esta cubierta abovedada resuelta con una celosía tridimensional con barras de acero inoxidable, que prácticamente repite el proceso que ocurrió en el Hartford Civic Center treinta años antes.

En ambos casos el resultado, fue una nueva cubierta, también singular. En el Hartford con una ampliación de las gradas y mayor luz, y en la provincia de Gerona con una nueva cubierta de madera laminada encolada.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los técnicos del Ayuntamiento y al alcalde las facilidades dadas para la toma de datos y la obtención de información.

REFERENCIAS

Levy y Saldavari "Why the buildings fall down". 1992. Ed. Norton

J. Delatte Jr. "Beyond failure". 2009. ASCE Press

J. Calavera. "Patología de estructuras de hormigón armado y pretensado". 1996. Intemac