

Estudio de un colapso local en una cubierta de una nave industrial*

*Study of an industrial ship roof partial collapse***

Ismael Carpintero García^{*, a}, Iván Costa Céspedes^b

^a Civil Engineer. Head Area of Structural Studies and Evaluation. Central Laboratory for Structures and Materials. CEDEX

^b Civil Technical Engineer. General Directorate of Economic Programming and Budgets. Spanish Civil Works Department

RESUMEN

Se presenta un caso de estudio de un colapso de unas correas prefabricadas de hormigón pretensado, aligeradas con un alveolo longitudinal, sin armadura transversal. El colapso se produjo a raíz de unas intensas lluvias que produjeron una acumulación de agua en la cubierta. Se estudiaron las numerosas desviaciones existentes entre la obra ejecutada y la definición del proyecto, analizando la influencia de cada una de ellas en el colapso final.

ABSTRACT

A study case about a local collapse of precast prestressed concrete purlins is showed. The purlins are lightened by a hollow without transverse reinforcement. The collapse was developed because of an intense rain that accumulate water over the roof. All the frequent deviations between the executed work and the definition of the project were studied, analysing the influence of each of them in the final collapse.

PALABRAS CLAVE: colapso, cubierta plana, correa, drenaje, bajas resistentes.

KEYWORDS: ponding effect, collapse, flat roof, purlin, drain system, low-strength concrete

1. Antecedentes

Una tarde de un mes de junio se produjo una fuerte tormenta durante la cual se registró un colapso parcial de la cubierta de una nave recién construida.

La intensidad de la lluvia caída no superó la definida en el CTE DB HS5 en su Anexo B para el diseño de sistemas de drenaje de aguas pluviales, si bien se produjo de manera simultánea con un fuerte viento que arrastró el agua caída sobre la cubierta hacia la esquina noroeste de la misma, donde quedó retenida y acumulada por el efecto de un peto perimetral existente, lo que finalmente produjo el colapso.

2. Descripción de la nave

La nave donde se produjo el siniestro es de planta básicamente rectangular con unas dimensiones de unos 135 x 76 m²; y unos 15 m de altura. Su estructura está constituida por elementos prefabricados de hormigón: forjados y correas de cubierta, jácenas y pilares; así como los paneles de cerramiento de fachada.

Las correas, paralelas a la dirección longitudinal de la nave, están formadas por elementos lineales pretensados de doble alma con un aligeramiento alveolar interior, sin

armadura transversal. Los apoyos simples de las correas sobre la cara superior de las jácenas doble T pretensadas de los pórticos se realizan aparentemente “a hueso”, mediante un elemento de fijación metálico atornillado.

Las jácenas que soportan la cubierta tienen apoyos simples sobre la cabeza de los pilares, que son de sección rectangular. Dichos pilares transmiten la carga al terreno a través de zapatas aisladas de hormigón “in situ”.



Figura 1. Vistas generales de la nave.

La cubierta de la nave está formada por dos faldones, con una limatesa intermedia longitudinal, y una pendiente cada uno del 1,5%. El material de cubierta que apoya en las correas está formado por paneles prefabricados tipo sándwich formados por una lámina impermeabilizante sintética, colocada sobre 40 mm de relleno aislante de espuma de poliuretano, con una chapa de acero inferior grecada.

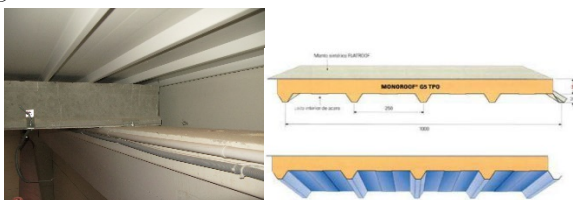


Figura 2. Formación de cubierta.

La evacuación del agua de la cubierta quedaba confiada a la pendiente de los faldones que conducían el agua sin canalizar directamente hacia a una serie de desagües y aliviaderos dispuestos en el perímetro exterior de la nave.

La cubierta carecía de pendiente en sentido perpendicular a la de los faldones que facilitara la canalización del agua hacia los sumideros.

3. Colapso

El colapso local de la cubierta se produjo al romperse tres correas de la cubierta (correas 2, 3 y 4 de la siguiente figura). Las correas adyacentes (la 1 y la 5) quedaron con una deformación por flexión remanente, con fisuración asociada.

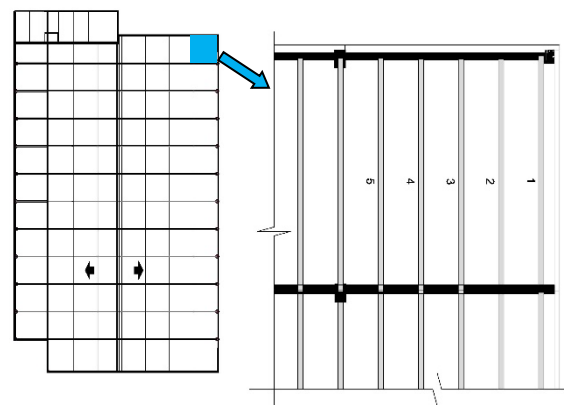


Figura 3. Zona del colapso.



Figura 4. Vista de las correas adyacentes tras el colapso.

4. Aspectos observados en la inspección

4.1 Sobre el sistema de drenaje

El sistema de drenaje y evacuación del agua de lluvia de la cubierta era claramente insuficiente conforme a los criterios del Código Técnico de la Edificación [5]. Hay que tener en cuenta que en el diseño de la nave no se consideró, como es natural, sobrecarga alguna por acumulación de agua (por supuesto sí se consideraron sobrecargas de mantenimiento, nieve y viento).

Además se constató que en la zona donde se produjo el colapso no había sumideros cercanos; y que las condiciones nominales de seguridad de las correas resultaban muy estrictas y muy sensibles frente a la cota mínima de lámina de agua que permitía el labio del aliviadero cercano.

4.2 Sobre los restos del colapso

Las correas que sufrieron el colapso eran de 10,30 m de longitud y 250 mm de canto. La geometría de la sección transversal estaba definida en unas fichas de características técnicas, si bien la fila de alambres de pretensado de menor brazo mecánico estaba compuesta por alambres de 4 mm de diámetro, frente a los 5 mm especificados en las fichas.

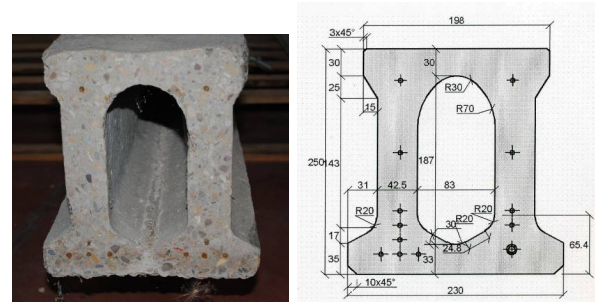


Figura 5. Sección transversal de las correas.

La Propiedad hizo una prueba con una carga repartida en las correas 1 y 5 después de desmontarlas de la cubierta, con una configuración de apoyos simples en sus extremos. Se habrían alcanzado los 25 cm de flecha en centro de vano, desarrollándose la fisuración por flexión previamente observada antes del desmontaje de estas correas (ver figura nº 4).



Figura 6. Fisuración por flexión desarrollada en las correas que fueron sometidas a una prueba de carga.

La forma de rotura de las correas colapsadas no pudo determinarse fehacientemente ya que tras su caída los fragmentos habían sido manipulados (se habían movido fragmentos de su posición en la caída, se realizaron cortes de alambres con cizalla,

extracciones de fragmentos de correas para su ensayo en laboratorio, etc.).

En todo caso, de la inspección de los fragmentos de las correas pudo deducirse que aparentemente la forma de rotura fue de la siguiente manera:



Figura 7. Forma de rotura de las correas deducida de su inspección.

- En la zona central del vano aparecían fisuras de flexión (transversales a la directriz de la pieza, arrancando de la cara inferior y cerrándose en las almas hacia la cara superior).
- El cordón comprimido de las correas en el centro del vano se había desprendido rompiéndose las almas con una fractura característica en forma de diente de sierra.
- No se observó rotura con estricción en los alambres de las correas en zonas próximas al centro del vano.
- En muchos de los fragmentos se produjo una fractura longitudinal de las correas aproximadamente a la mitad del plano de las alas y/o de las almas. En ocasiones, cerca de las zonas de apoyo aparecieron fisuras de trazado inclinado en las almas, ascendiendo hacia el centro del vano.

Estas fisuras tendían a perder inclinación en el encuentro del alma con las alas superior e inferior

- Como consecuencia de la caída, algunos tramos de las correas que colapsaron se rompieron en multitud de fragmentos.

Así pues el hundimiento se produjo por el fallo de la zona central de los vanos por agotamiento súbito del cordón comprimido de la sección.

5. Estudio de calidad de materiales

Se realizó un estudio de calidad del hormigón y de la armadura de las correas para analizar sus prestaciones mecánicas y poder así estimar en qué medida habían podido influir en el colapso ocurrido.

Sobre los alambres de pretensado se realizaron ensayos de tracción, composición química, doblado, etc. obteniéndose resultados

del orden de los esperables de acuerdo a las prescripciones de las fichas de características técnicas.

Para analizar la resistencia del hormigón fue necesario extraer probetas de las almas de 30,4 mm de diámetro (para un tamaño máximo del árido de 12 mm). De estos ensayos se dedujo una resistencia media de 31,9 MPa y estimada de 28,7 MPa, con un coeficiente de variación de 0,06. Cabe señalar que en las fichas de características técnicas se especificaba una resistencia de 40 MPa.



Figura 8. Microtestigos de hormigón extraídos para su ensayo.

6. Comprobaciones de cálculo

6.1 Hipótesis consideradas

Se realizaron comprobaciones de cálculo sobre las correas colapsadas a flexión, cortante y deformabilidad frente a cargas repartidas; considerando las siguientes hipótesis:

- Se consideró la geometría de las correas definida en las fichas de características técnicas, verificada con medidas sobre los fragmentos caídos.
- En relación con las armaduras se analizó el efecto de que la fila superior de la armadura en dos situaciones: con alambres de 5 mm como se indicaba en

las Fichas de Características Técnicas, y con alambres de 4 mm según se midió en las correas colapsadas.

- Se asumió el diagrama tensión-deformación deducido de los ensayos realizados sobre los alambres de las correas siniestradas.
- Se realizaron comprobaciones considerando la resistencia del hormigón indicada en las fichas de características técnicas y la resistencia del hormigón deducida de los ensayos.

6.2 Resultados obtenidos

Las comprobaciones se realizaron considerando las acciones que debieron tenerse en cuenta en el diseño.

En estas circunstancias, bajo todas las hipótesis se obtenían resultados correctos o técnicamente admisibles, si bien se pudieron establecer las siguientes consideraciones:

- El modo de fallo para todas las hipótesis fue el de flexión. Cabe señalar la reducida seguridad de las correas frente a incrementos de las sobrecargas.
- Bajo todas las hipótesis el agotamiento de la sección de centro de vano a flexión se producía porque se alcanzaba la máxima deformación en la fibra más comprimida de hormigón; y la deformación en la armadura inferior superaba la del límite elástico. Es decir, el agotamiento se encontraba en el dominio 3 del diagrama de pivotes¹ [4].
- Como se ha comentado, no se contaba con un sistema de drenaje eficaz de la cubierta. De hecho el drenaje en sentido perpendicular a la pendiente de los faldones de la cubierta quedaba confiado a las contraflechas del pretensado de las correas.

¹ Esta circunstancia hacía a las piezas más sensibles a una baja de resistencia como la estimada en los ensayos.

Sin embargo, de acuerdo con las comprobaciones realizadas, esta contraflecha se perdía poco tiempo después de colocarse en obra las correas, por lo que se anulaba esta posible funcionalidad. Esta circunstancia provocó que durante la tormenta, al acumularse el agua por la ineficacia del drenaje y la retención del peto perimetral, las correas cogiesen de manera incremental flechas positivas, aumentando aún más la acumulación de agua sobre ellas, desencadenándose finalmente el colapso (lo que se conoce como efecto “ponding”).

- A la hora de considerar en el diseño de la nave el efecto de la sobrecarga de nieve, la presencia del peto permitía la acumulación de la nieve por efecto del viento. A este respecto, el CTE DB-SE AE, en su apartado 3.5.2 en relación con la sobrecarga de nieve en edificaciones, indica que *“Los modelos de carga de este apartado sólo cubren los casos del depósito natural de la nieve. En cubiertas accesibles para personas o vehículos, deben considerarse las posibles acumulaciones debidas a redistribuciones artificiales de la nieve. Asimismo, deben tenerse en cuenta las condiciones constructivas particulares que faciliten la acumulación de nieve”*.

No obstante, la presencia del peto de cubierta hacía que la nieve fuese susceptible de ser contenida por él, pudiéndose producir acumulaciones, debido por ejemplo al viento y favorecidas por la baja rugosidad de la superficie exterior de la cubierta.

Este aspecto obligaba bien a no haber construido el peto, o bien haber diseñado una estructura de cubierta capaz de soportar dicha acumulación, cosa que las correas colocadas en obra no cumplían.

7. Descripción del proceso de fallo deducido

A la vista del estudio que se realizó se pudo deducir cuál había sido el proceso de desarrollo del colapso:

Durante la tormenta se produjo una acumulación de agua no prevista en la cubierta. Esta acumulación se debió a la combinación de tres factores:

- Una elevada intensidad de precipitación, que en todo caso no fue de carácter extraordinario.
- Una reducida capacidad de drenaje de la cubierta para canalizar el agua, dada la reducida pendiente de los faldones, la nula o negativa pendiente en sentido perpendicular, las elevadas distancias entre sumideros, y el insuficiente número de ellos.
- La acumulación de agua arrastrada por el viento y retenida por el peto perimetral, frente a la cual no fue suficiente la capacidad de desagüe de los escasos aliviaderos y sumideros existentes en esa zona.

El agua fue pues acumulándose en la esquina noroeste de la nave. Dado que las correas contaban ya con deformaciones positivas frente a cargas permanentes, la acumulación de agua sobre ellas incrementó de manera notable sus flechas, retroalimentándose el proceso hasta alcanzar un nivel de carga que produjo la rotura de las correas (efecto “ponding”).

El fallo de la sección de centro de vano de las correas a flexión se produjo por agotamiento del cordón comprimido. El colapso último de éste no se debió a la plastificación de las fibras más comprimidas, que hubiese supuesto la formación de una rótula en el centro del vano y la caída de la correa por la formación de un mecanismo, sino que antes de llegar a ese

extremo se produjo sin ductilidad la rotura por inestabilidad del cordón comprimido.

En efecto, el colapso final de una sección a flexión, superado el criterio de agotamiento del diagrama de pivotes, habitualmente se produce por el aplastamiento de la cabeza comprimida por la plastificación de sus fibras, formándose una rótula capaz de absorber giros sin incremento del momento flector.

Incluso, para cuantías habituales (piezas con armadura superior a la crítica e inferior a la límite, diseñadas para agotar la armadura en el pivote A dentro del dominio 2), tras el fallo de la sección por excesivas deformaciones en la armadura, se produce seguidamente la rótula con aplastamiento del hormigón (a costa de una mayor deformación de la armadura).



Figura 9. Formación de rótula en una sección agotada a flexión simple en el dominio 2 (cuantía habitual) [3].



Figura 10. Formación de rótula en una sección agotada a flexión simple en el dominio 3 (cuantía alta) [3].

En este caso sin embargo, la ausencia de armadura transversal que coaccionase el bloque comprimido, y la menor masividad de las almas, hizo que el cordón comprimido se descompusiera de forma súbita en fragmentos, lo que justificaba la forma de rotura observada.

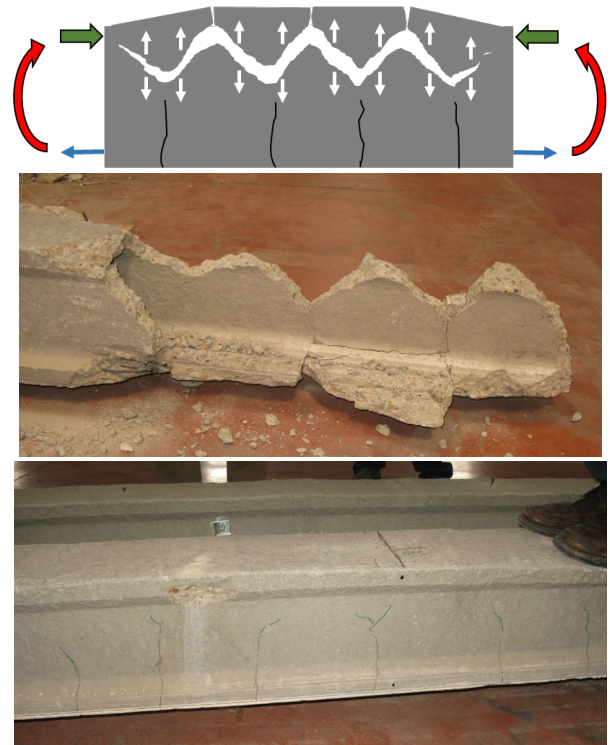


Figura 11. Croquis explicativo de la rotura del bloque comprimido y trazado de las fisuras desarrolladas en las correas sometidas a una prueba de carga por la propiedad.

Cabe señalar que la pieza contaba con un amplio margen de seguridad frente a esfuerzos tangenciales. La ausencia de armadura transversal no suponía una merma en la capacidad estructural de la pieza, sino que influyó de manera determinante (junto con las condiciones de la carga y la forma de la sección transversal), en la forma de la rotura.

De hecho, si en la prueba de carga que hizo la Propiedad se alcanzaron los 25 cm de flecha, la sección de centro de vano se habría considerado claramente agotada conforme a los criterios del diagrama de pivotes. Es decir, la ausencia de armadura transversal no influyó en

la capacidad última asignable a la pieza, sino en el modo de rotura ocurrido.

Al no poder formarse una rótula en el centro del vano, no se originó un mecanismo como tal, sino que las correas cayeron al suelo ya rotas al descomponerse la sección central.

7. Resumen

En el estudio del colapso de unas correas de la cubierta de la nave se advirtieron varios factores que influyeron en su agotamiento:

- La correa contaba en su diseño con una baja capacidad de seguridad a sobrecargas. Es decir, ante pequeños incrementos de la sobrecarga se reducía notablemente sus márgenes de seguridad globales.
- Una menor capacidad mecánica del hormigón y de los alambres de pretensado respecto de la nominal de diseño. Esto se debía a una baja de la resistencia estimada superior al 25%; y a que se emplearon alambres de 4 mm de diámetro en vez de los 5 mm especificados en las fichas de características técnicas de las correas.
- Unas inadecuadas condiciones de drenaje de la cubierta que facilitó la acumulación de agua sobre la zona de colapso. Este fue el factor desencadenante último que produjo el hundimiento.

La rotura de las correas afectadas se produjo por colapso a flexión de su sección central de vano. Dada la configuración de las correas, no se formó una rótula, sino que se produjo el agotamiento del bloque comprimido de hormigón por inestabilidad del mismo (sin alcanzarse el agotamiento de la armadura longitudinal traccionada). Dicho bloque comprimido se descompuso en fragmentos, para una deformación máxima de la fibra extrema comprimida notablemente superior a la de

agotamiento en el dominio 3 del diagrama de pivotes.

Referencias

- [1] J. Calavera. Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón en masa, armado y pretensado. INTEMAC. 2008.
- [2] J. Fernández, et al. Evaluación de la capacidad resistente de estructuras de hormigón. INTEMAC. 2001.
- [3] DVD de formación técnica nº 2002 (1-3). Flexión simple en hormigón armado. INTEMAC EDICIONES.
- [4] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.
- [5] Código Técnico de la Edificación. Documento Básico Salubridad. Evacuación de aguas. CTE DB HS 5.
- [6] Código Técnico de la Edificación. Documento Básico Seguridad Estructural. Acciones en edificación. CTE DB-SE AE