

Colapso de estructuras industriales sencillas

Cuando hablamos de estructuras sencillas nos referimos fundamentalmente a estructuras de edificios industriales. Esta tipología, por sus características de regularidad y simplicidad formal, permite la modulación del esqueleto del edificio y, por lo tanto, prefabricar y repetir los elementos estructurales que lo componen. Los siniestros de colapsos en este tipo de estructuras evolucionan con el tiempo. Este artículo pretende ser una visión fugaz de la situación actual y de lo que creemos que son las tendencias de esta modalidad de siniestros. Para ello, describiremos tres siniestros recientes de colapsos ocurridos en esta clase de estructuras e intentaremos sacar conclusiones que puedan ayudar a la comprensión de la situación actual.

LICINIO RIVERO FERNÁNDEZ
MAPFRE EMPRESAS



Hundimiento de la cubierta de una nave industrial en el País Vasco

El primero de los ejemplos se refiere a una nave industrial de menos de un año de antigüedad y 1.000 m² de superficie. La cubierta a dos aguas está compuesta por una doble chapa metálica con aislamiento térmico interior apoyada sobre



Sección de la nave industrial.



Vista general de la cubierta colapsada.

correas metálicas. La estructura principal, prefabricada de perfiles laminados, está compuesta por 8 pórticos de 20 metros de luz.

Debido a las limitaciones de transporte, y para facilitar el montaje, cada uno de los ocho pórticos fue fabricado en el taller de cerrajería, dividido en cuatro piezas (dos pilares y dos medios dinteles), que se ensamblaron en la propia obra mediante uniones atornilladas.



Detalle de una de las uniones atornilladas de la estructura en la que han desaparecido los hilos de la rosca de los tornillos y detalle de uno de los tornillos rotos.

Como consecuencia de un temporal de nieve registrado en la zona de forma súbita y durante las horas nocturnas, en el que la capa de nieve lle-

gó a alcanzar un espesor aproximado de unos 40 centímetros, se hundió la totalidad de la cubierta del edificio en cuestión.

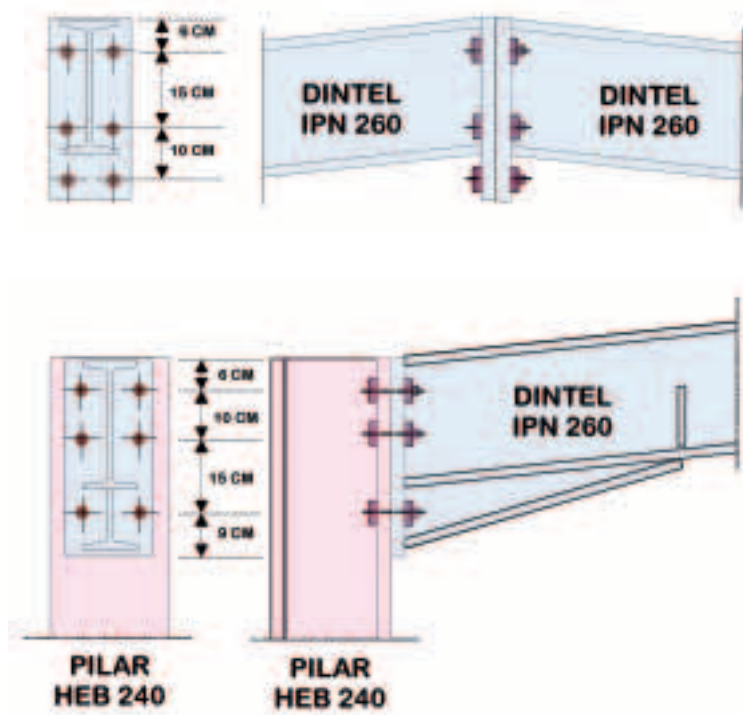
En los restos de la estructura siniestrada podía observarse la rotura generalizada de las uniones atornilladas dintel-pilar y dintel-dintel, mien-

tras que los perfiles metálicos que componían la estructura no habían sufrido deformaciones apreciables. Esta observación era un indicio evidente de

que el colapso de la cubierta podía haberse producido por el fallo de las uniones atornilladas de las cuatro piezas que componían cada uno de los pórticos.

Se realizó el cálculo de los esfuerzos a los que estaba sometida la estructura en el momento de su colapso y de los esfuerzos que agotaban las uniones atornilladas.

Comparando los resultados de ambos cálculos, se pudo comprobar que el peso propio de la cubierta, unido a la sobrecarga de la nieve acumulada, duplicaba la capacidad resistente de las uniones atornilladas, pese a que la sobrecarga de nieve depositada sobre la cubierta era menor que la que debería haberse considerado para el cálculo de la estructura según la normativa vigente.



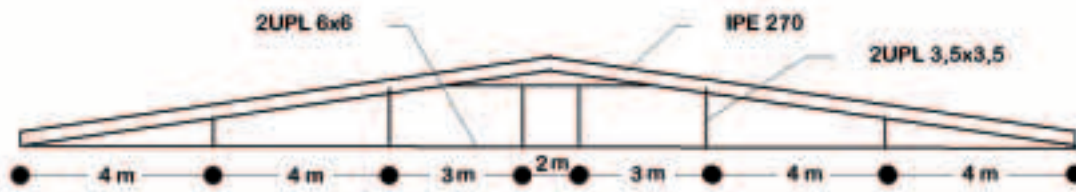
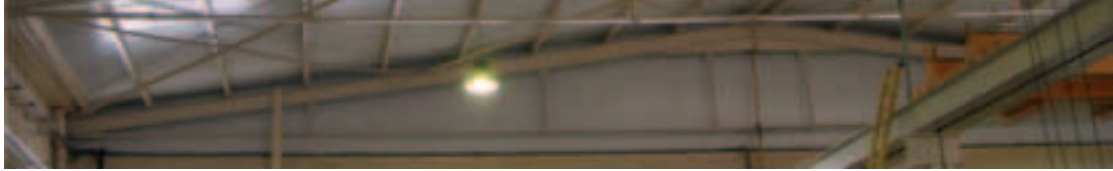
Hundimiento parcial de la cubierta de una nave industrial en Navarra

De nuevo, como consecuencia de un temporal de nieve, se produjo el hundimiento parcial de la cubierta de un edificio industrial de 1.200 m² en Navarra, causando daños de distinta consideración en el resto de la cubierta, en los cerramientos laterales y en el núcleo de oficinas.

En el momento del hundimiento había una capa de nieve sobre la cubierta con un espesor de aproximado 30-35 cm.

Aspecto de la cubierta parcialmente hundida.





Alzado de los dinteles atirantados que componían la estructura principal de la cubierta y fotografía de uno de los que no sufrió daños.

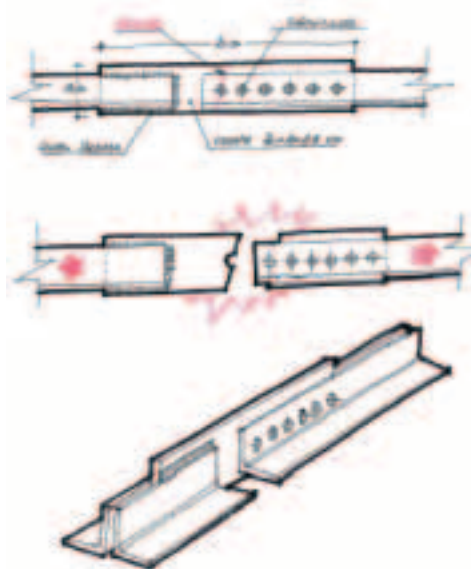
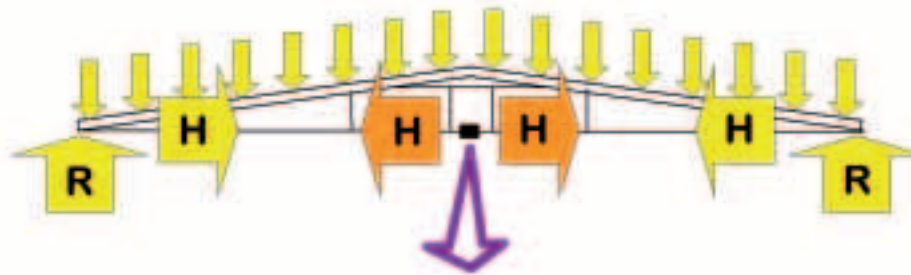
La estructura del edificio siniestrado es metálica, resuelta mediante pórticos atirantados de 24 metros de luz.

Con la sobrecarga de nieve existente en el momento del colapso de la

cubierta, el tirante estaba sometido a un esfuerzo de tracción de 46 toneladas.

Este tirante había sido prefabricado y puesto en obra en dos piezas que estaban unidas mediante un sistema

atornillado que, aunque en un principio no estaba incluido en el proyecto, fue diseñado y dimensionado por la empresa que fabricó y montó finalmente la estructura.

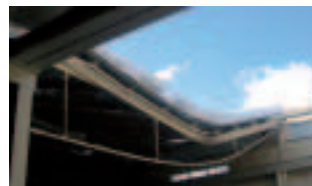


El sobredimensionamiento del número de tornillos unido a la falta de sección de la chapa empleada son indicios que nos hacen pensar que este sistema de empalme del tirante fue calculado «a ojo».

Con la sobrecarga de nieve, el esfuerzo de tracción del tirante superó la capacidad resistente del sistema de empalme, lo que produjo su rotura y, en consecuencia, el colapso de la cubierta.

Según los cálculos, el sistema rompió cuando ya se superaba casi en un 30% su carga máxima admisible.

La redistribución de esfuerzos hizo que colaborasen otras partes de la estructura, no consideradas en el cálculo, lo que explica que no se colapsase antes.



**LOS ERRORES
DE DISEÑO O
CÁLCULO DE**

**ELEMENTOS DE SEGUNDO ORDEN
SON LA PRIMERA CAUSA DE
RUINA DE EDIFICIOS
INDUSTRIALES SENCILLOS**



En la fotografía puede verse el aspecto que presentaba, tras su rotura, el sistema de unión del tirante de uno de los pórticos colapsados.

Según la normativa vigente, un edificio situado en la ubicación de la nave siniestrada (entre 401 y 600 metros sobre el nivel del mar) debe poder soportar una sobrecarga de nieve de 60 kg/m^2 , que corresponde a una capa de 50 centímetros de nieve en polvo (120 kg/m^3). En este caso, el colapso se produjo con una acumulación de nieve de 30–35 centímetros de espesor.

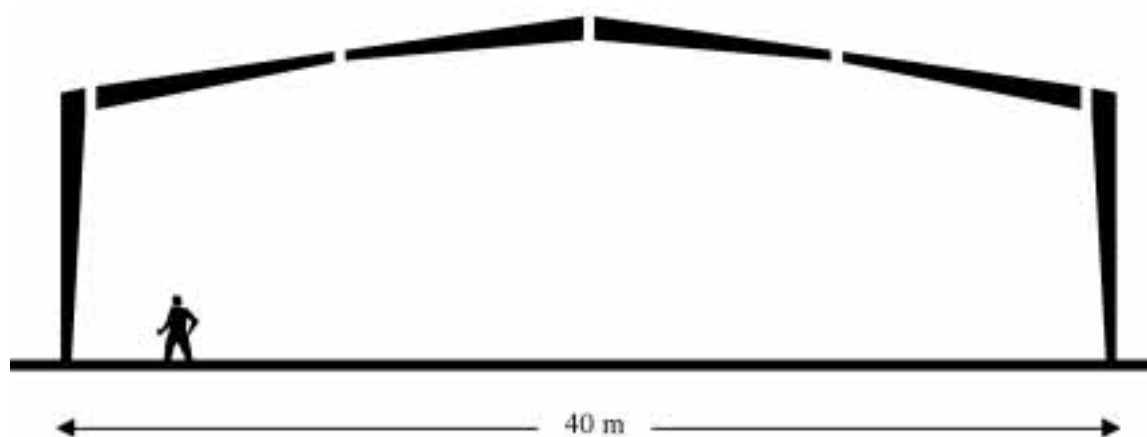


Los dinteles atirantados con los que realmente fue construido el edificio eran distintos a la solución de la estructura que fue definida en el proyecto de construcción.

Hundimiento de la cubierta de una nave industrial en Andalucía

Tal y como ocurrió en los otros casos anteriores, también en este caso fue un temporal de nieve el factor externo que produjo el hundimiento total de la cubierta de un edificio industrial de 3.000 m², cuatro

años después de haber entrado en servicio. El día del hundimiento había caído una nevada en la zona que supuso una acumulación de nieve sobre la cubierta de unos 15 centímetros de espesor.



Tipología de estructura principal del edificio siniestrado, compuesta por seis piezas ensambladas mediante tornillos.



Aspecto que presentaba la cubierta hundida de la nave.

La estructura principal de la nave había sido resuelta mediante grandes pórticos metálicos de 10 metros de altura por 40 metros de luz.

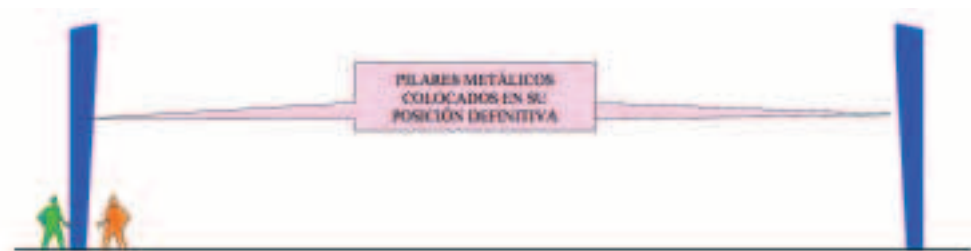
Debido a las dimensiones de la estructura y a las limitaciones de transporte y de montaje, los pórti-

cos fueron prefabricados en el taller de cerrajería, divididos en seis piezas que fueron ensambladas en la propia obra mediante uniones atornilladas.

Los pilares están formados por una pieza cada uno de ellos. El dintel

se divide en cuatro piezas de aproximadamente 10 metros de longitud.

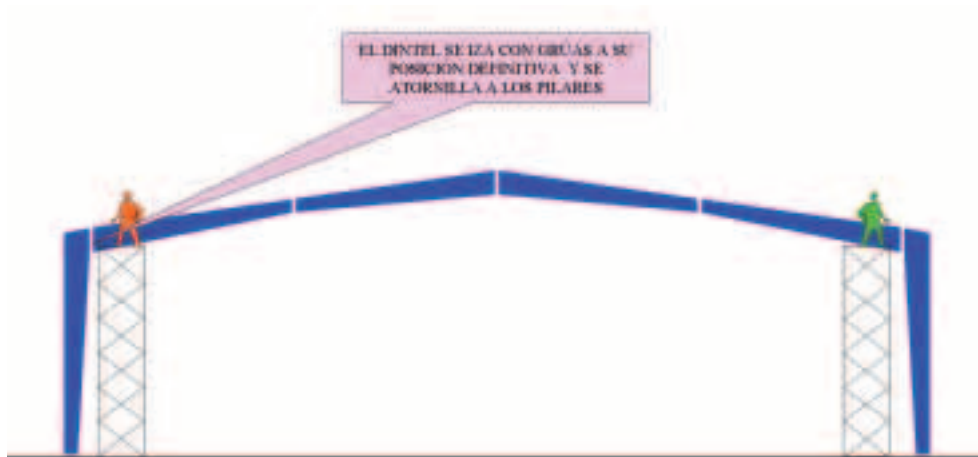
El montaje de los pórticos metálicos, que componen la estructura principal de la nave, se realizó en tres fases:



1. Replanteo e implantación de los pilares de los pórticos en las que serían sus posiciones definitivas.



2. El dintel de cada uno de los pórticos se montó en el suelo de la nave, ensamblando mediante uniones atornilladas los cuatro tramos de 10 metros que lo componen.



3. Una vez ensamblados los dinteles de 40 metros de longitud, se izan mediante grúas hasta su posición definitiva. En esa posición el dintel es atornillado a sus dos pilares.

En la fase de replanteo e implantación de los pilares (primera fase de las descritas anteriormente) se produjeron pequeños errores en la determinación de su posición correcta, errores que tuvieron como consecuencia que los pilares se situaran unas decenas de milímetros más próximos o más separados entre sí.

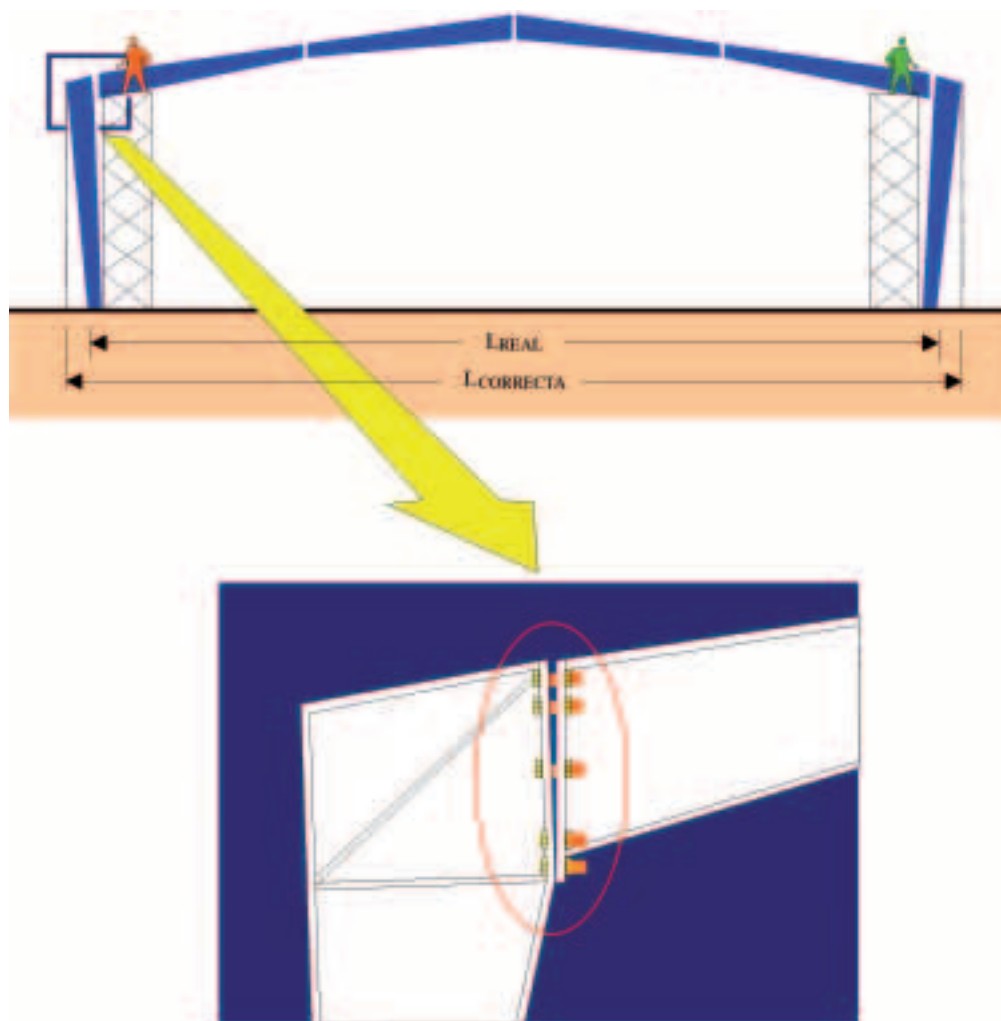
Se realizó una medición topográfica de la distancia entre pilares de cada uno de los pórticos. Los resultados mostraron que la distancia entre pilares del mismo pórtico presentaba diferencias de hasta 10,2 centímetros.

Como consecuencia de los errores de replanteo, cuando se iza el dintel de 40 metros entre dos pilares, no ajusta exactamente entre ellos, resultando largo (si los pilares están más juntos de lo que debían) o corto (si, contrariamente al caso anterior, los pilares están más separados de lo debido).

Este error en el replanteo de los pilares se resolvió inclinándolos ligeramente, abriéndolos o cerrándolos en cabeza según convenía en cada caso, de manera que la distancia entre sus cabezas se ajustase exactamente a la longitud del dintel, permitiendo atornillar ambas piezas.

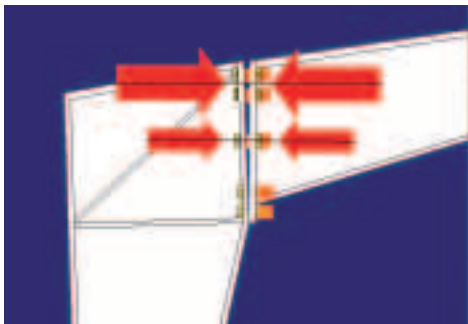
Esta solución, adoptada durante la fase de montaje de la estructura para corregir las imprecisiones cometidas en el replanteo de los pilares, produjo efectos realmente catastróficos para la propia estructura.

Se produjeron dos situaciones anómalas: la primera cuando la distancia real entre los arranques de los pilares era menor que la distancia necesaria para que los encuentros viga-pilar ajustasen perfectamente. Con el objetivo de corregir este error de replanteo los pilares se inclinaron hacia afuera, separándolos en cabeza.



Como consecuencia de haber inclinado los pilares, la unión atornillada pilar-dintel no ajusta perfectamente. Las placas de ambos elementos, que deben estar totalmente en contacto, únicamente se tocan en su extremo inferior.

En estas condiciones, la tensión de los tornillos que unen dintel y pilar provoca un momento flector que hace que se traccione la fibra superior del dintel y se comprima la inferior.



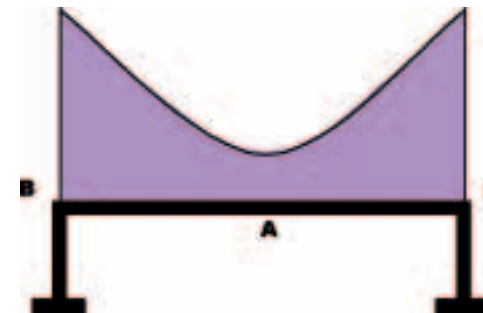
La gráfica de momentos flectores resultante difiere mucho de la esperada.

En los extremos del dintel (punto B en la figura), el momento flector se incrementa en casi un 250% respecto a la cuantía esperable (la que debiera tener en el caso de que el pórtico hubiese sido montado correctamente).

La segunda situación anómala se produjo cuando la distancia real entre los arranques de los pilares era mayor que la distancia necesaria para que los encuentros viga-pilar ajustasen perfectamente.



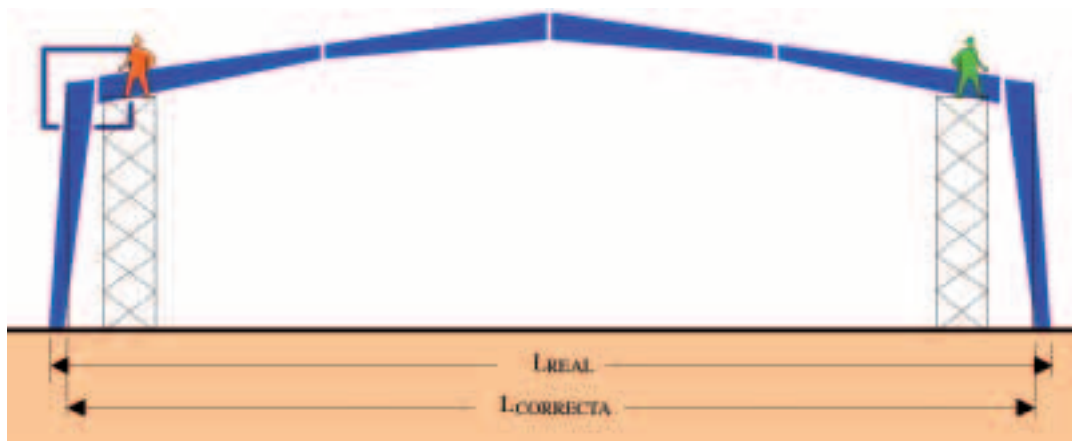
Gráfica de los momentos flectores esperados en el dintel.

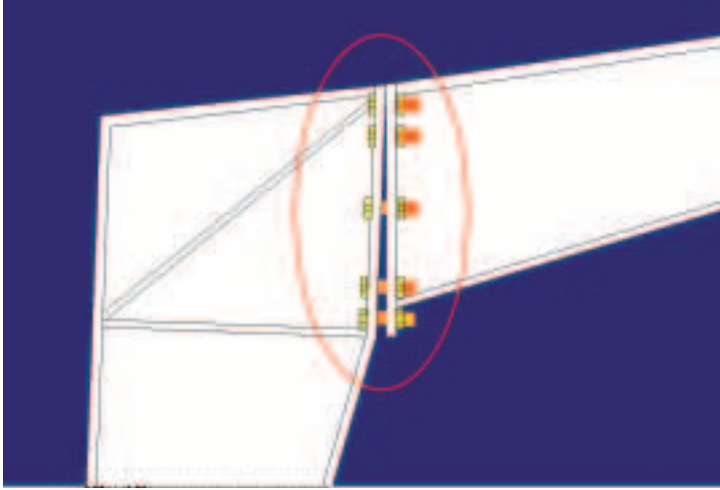


Gráfica de los momentos flectores reales en el dintel.

Para corregir este error de replanteo los pilares se inclinaron ligeramente hacia el interior de la nave, acercándolos en cabeza, lo que tuvo como consecuencia que la unión dintel-pilar no ajustase perfectamente.

Básicamente se trata de un caso similar al anterior y, de la misma forma que en aquél, la estructura trabaja mucho peor de lo que estaba previsto que lo hiciese.





Como vemos en la figura, las placas de la unión del dintel con el pilar únicamente están en contacto en su zona superior.

En estas condiciones, los tornillos de la unión dintel-pilar provocan un momento flector que comprime la fibra superior del dintel y tracciona la inferior.



La gráfica de momentos flectores resultante es la suma de la correspondiente a las cargas permanentes más la generada por la sobrecarga de nieve y la producida por la tensión de los tornillos viga-pilar, y difiere mucho de la esperada.

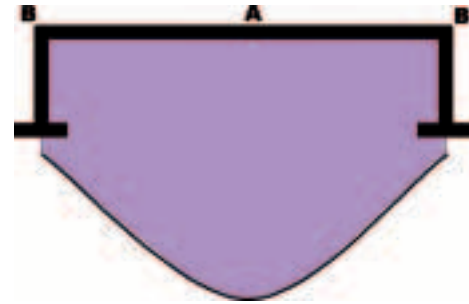


LA ACUMULACIÓN DE NIEVE EN LA CUBIERTA DE

EDIFICIOS INDUSTRIALES SENCILLOS TIENE UNA IMPORTANCIA CAPITAL A LA HORA DE EXPLICAR EL COLAPSO DE ESTAS ESTRUCTURAS



Gráfica de los momentos flectores esperados en el dintel.



Gráfica de los momentos flectores reales en el dintel.

En el centro del vano (punto A), el momento flector se incrementa en casi un 450% respecto a la cuantía esperable (la que debería tener en el caso de que el pórtico hubiese sido montado correctamente). Estos esfuerzos superan la capacidad portante de la estructura, por lo que ésta es la causa de su colapso.

Éste es un caso al que merece prestar una especial atención porque es relativamente fácil que pueda repetirse. Por un error aparentemente nimio, en el proceso de montaje, la estructura nace

sometida a esfuerzos que la tienen en un estado próximo al de agotamiento. En estas condiciones totalmente precarias, cualquier sobreesfuerzo, como en este caso el derivado de la acumulación de

una capa de nieve de 15 centímetros de espesor (equivalente aproximadamente a una carga de 18 kg/m²), puede ser suficiente para arruinar completamente la estructura del edificio.



Detalle de la estructura siniestrada y de dos de los tornillos de unión entre las piezas que componían los pórticos.

CONCLUSIONES

¿Cuál es la naturaleza de los errores estructurales que colapsan los edificios industriales sencillos?

Los tres ejemplos descritos pueden representar la tendencia de los siniestros de colapso en estructuras de edificios industriales sencillos. Los errores en el diseño o en el cálculo de lo que pueden parecer elementos estructurales de segundo orden van convirtiéndose en la primera causa de ruina de estas estructuras sencillas, mientras que decrecen los colapsos parciales o totales de edificios industriales causados por defectos de cálculo de los elementos principales de la estructura o los

motivados por la falta de calidad de sus materiales.

Existen varias razones que parecen justificar esta tendencia. La primera de estas causas tiene relación con la creciente informatización de los cálculos estructurales.

Hace aproximadamente veinte años comenzaron a popularizarse los programas de cálculo de estructuras. Aquellos primeros programas eran caros, tenían muchas limitaciones y, pese a que ya suponían un ahorro muy no-

table del tiempo dedicado al cálculo, resultaban relativamente engorrosos de manejar. La evolución de la informática en estos años discurrió pareja a la de los programas específicos para el cálculo de estructuras, que en la actualidad son mucho más potentes, permiten el cálculo tridimensional de las estructuras y se aproximan cada vez más a su comportamiento real.

Su facilidad de manejo, tanto en la definición de la geometría de la estructura como en la introducción de las

cargas actuantes, los hace sencillos e intuitivos; además, poseen salidas gráficas que posibilitan el ploteado directo de los planos de estructura.

Por último, y paralelamente a la evolución técnica de los programas de cálculo, se viene produciendo una contención de su precio que los hace sensiblemente más asequibles de lo que eran antaño. De manera que hoy con el cálculo de un par de estructuras casi se amortiza el precio del programa.

Las características descritas hacen que actualmente este tipo de programas tengan cada vez más difusión entre técnicos y empresas. Pero todo desarrollo tiene limitaciones y los programas informáticos (al menos los de mayor difusión en nuestro mercado) no calculan la totalidad de la estructura, dejando sin resolver detalles constructivos y encuentros (por ejemplo soldaduras y uniones atornilladas en estructuras metálicas), que deben ser diseñados y calculados por el proyectista utilizando métodos «tradicionales». Es en este tipo de detalles, aparentemente de segundo orden, donde se cometen errores de cálculo o de diseño que en ocasiones pueden ser susceptibles de arruinar la estructura.

El desarrollo informático ha hecho que el cálculo de estructuras sea hoy mucho más rápido, sencillo y eficaz que hace relativamente poco tiempo. Pero aspectos *a priori* positivos, como la popularización y la facilidad de manejo de los programas disponibles en el mercado, convierten el cálculo de estructuras sencillas, como

son las de estos edificios industriales a los que venimos refiriéndonos, en una actividad para la que ya no resulta imprescindible poseer sólidos conocimientos estructurales. Es en este escenario donde surge una nueva familia de siniestros, cuyo origen es la deficiente resolución de los pequeños detalles que los programas informáticos no resuelven, y que necesariamente deben ser resueltos por métodos tradicionales de cálculo.

¿POR QUÉ LOS EDIFICIOS INDUSTRIALES SENCILLOS SE COLAPSAN CUANDO NIEVA?

El temporal, y concretamente la acumulación de nieve en la cubierta de los edificios industriales sencillos, tiene una importancia fundamental.

La normativa en vigor en el momento de proyectarse y construirse los edificios mencionados en este artículo obligaba a considerar una sobrecarga de nieve de, por ejemplo, 80kg/m² si el edificio se ubica en Madrid (altitud topográfica entre 600 y 800 metros), o de 120 kg/m² si el mismo edificio se construye en Cuenca (altura topográfica entre 1.000 y 1.200 metros).

El peso de la cubierta de un edificio industrial sencillo (peso propio de los elementos de cubrición más el aislamiento térmico y la estructura) es muy pequeño, oscilando en torno a los 30 kg/m². Por lo tanto, en el caso de ubicarse en Madrid, la estructura de un edificio industrial sencillo será diseñada para soportar una carga total en la que el 70% corresponde a una

posible y/o previsible acumulación de nieve sobre la cubierta, porcentaje que alcanza el 80% de la carga total de cálculo si el mismo edificio se construye en Cuenca. Esta preponderancia de la sobrecarga de nieve respecto al peso propio de la cubierta es una característica típica y prácticamente exclusiva de este tipo de edificios.

El cálculo de las estructuras de los edificios se realiza aplicando coeficientes de seguridad que mayoran las cargas actuantes y minoran la resistencia de los materiales empleados en la estructura. Si unimos este hecho a la importancia porcentual de la sobrecarga de nieve respecto a la carga total de cálculo, concluimos que por mal que se haga, por muchos errores que se cometan en el proyecto y/o en la construcción de este tipo de estructuras, es muy difícil que se produzca su colapso si el edificio no se ve sometido a la sobrecarga de nieve.

La nevada hace las funciones de una prueba de carga para este tipo de estructuras sencillas, que hasta entonces vivieron desahogadamente, sometidas a cargas que oscilaban entre un 20 y un 40% de su capacidad resistente teórica.

Sería absolutamente injusto ser alarmista, ya que este tipo de siniestros son una verdadera excepción que confirma la regla de la calidad y bien hacer en el cálculo y construcción de estos edificios de estructura sencilla. ■