

Edificio de oficinas para Gmp en Las Tablas (Madrid): Estrategia estructural para una fachada portante y sometida al fuego

Gmp's office building in Las Tablas (Madrid): Structural strategy for a load-bearing façade subjected to fire

José Antonio MARTÍN-CARO ÁLAMO

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Ines Ingenieros Consultores, S.L.

Director Gerente

jmc@inesingenieros.com

Damián Javier TERRASA DÍAZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Ines Ingenieros Consultores, S.L.

Proyectista y Responsable de Direcciones de Obra

djtd@inesingenieros.com

Daniel BUESO-INCHAUSTI TORO

Ingeniero Civil e Industrial

BUIN Ingenieros

Director General

dbi@buiningenieros.com

RESUMEN

El edificio administrativo que Gmp está construyendo en Las Tablas tiene como singularidad una estructura metálica exterior que se dispone en paralelo a cada una de sus tres fachadas, separada aproximadamente 1 m de estas. Se trata de celosías con malla romboidal cuyos componentes son de sección tubular y cuyos puntos de intersección son a su vez de apoyo para los forjados sobre rasante. INES, como autor del proyecto de estructuras, justificó que esta celosía portante exterior desarrollará un correcto comportamiento mecánico-térmico durante los 90 ó 120 minutos de duración del incendio interior que indica la normativa, sin necesidad de protección pasiva alguna.

ABSTRACT

Gmp's administrative building in Las Tablas has a main singularity: an external steel load-bearing structure, placed in the perimeter of the over-ground levels, parallel to each of its three façades (approximately 1 m out from them) and solved with a truss with rhomboidal mesh and hollow steel sections, where the intersection points of the mesh are also supporting points for the five over-ground levels. INES developed the project of structures and demonstrated that this external load-bearing truss will develop a correct mechanical-thermal behavior during the whole duration of the indoor fire required by the standards (90 or 120 minutes), without any need for passive protection.

PALABRAS CLAVE: estructura portante exterior, protección ante incendio, comportamiento mecánico-térmico.

KEYWORDS: external load-bearing structure, fire-case protection, mechanical-thermal behavior.

1. La singular estructura metálica portante exterior del edificio de Gmp en Las Tablas

En colaboración con Rafael de la Hoz Arquitectos, INES Ingenieros Consultores desarrolló el proyecto constructivo de cimentaciones y estructuras del edificio administrativo en la parcela M-1.1 de las Tablas (C/ Puerto de Somport nº 9, C/V/ Quintanadueñas, distrito de Fuencarral, Madrid)

para el grupo inmobiliario Gmp. Asimismo, INES está llevando la asistencia técnica de las obras proyectadas.

La principal singularidad de este edificio de planta triangular (con los vértices achaflanados) es la disposición de una estructura portante exterior que se eleva desde la planta baja y se dispone en paralelo a cada una de sus tres fachadas, separada aproximadamente 1 m de estas: se trata de celosías con malla romboidal que se resuelven con elementos metálicos de sección tubular (ver figuras 1 a 3).



Figura 1. Infografía virtual del futuro edificio de Gmp en Las Tablas.

Los puntos de intersección de la malla, ubicados estos cada 8.10 m (medidos en horizontal) y contrapeados entre dos plantas consecutivas, sirven como elementos de apoyo del perímetro de los cinco forjados sobre rasante: plantas 1ª a 4ª y cubierta, resueltos todos ellos como forjados mixtos formados por vigas, viguetas y chapa colaborante.



Figura 2. Infografía virtual del exterior e interior del edificio en las que se ven las diagonales de la celosía portante exterior.

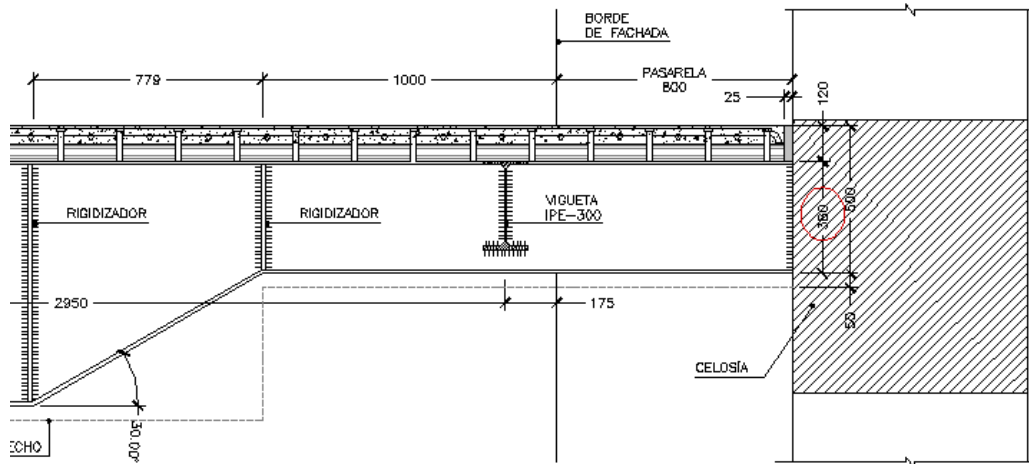


Figura 3. Detalle de encuentro de celosía exterior con fachada.

La rigidez de las celosías frente a acciones horizontales es suficiente para garantizar la intraslacionalidad de las plantas, por lo que no resultó necesario prever núcleos rígidos, pantallas interiores ni tampoco pórticos que proporcionen rigidez horizontal adicional. Por último, esta celosía perimetral, además de las anteriores funciones, cumple la de protección solar de la fachada propiamente dicha.

La sección transversal de las diagonales de la celosía tiene dimensiones exteriores de 400x800 mm a lo largo de toda su altura, por requerimientos del proyecto de arquitectura. Estas se resuelven, al igual que los nudos de las intersecciones, mediante palastros metálicos soldados entre sí, con rigidizadores interiores, tal como puede apreciarse en la figura 4, obtenida de un plano de taller para fabricación elaborado en fase de obra.

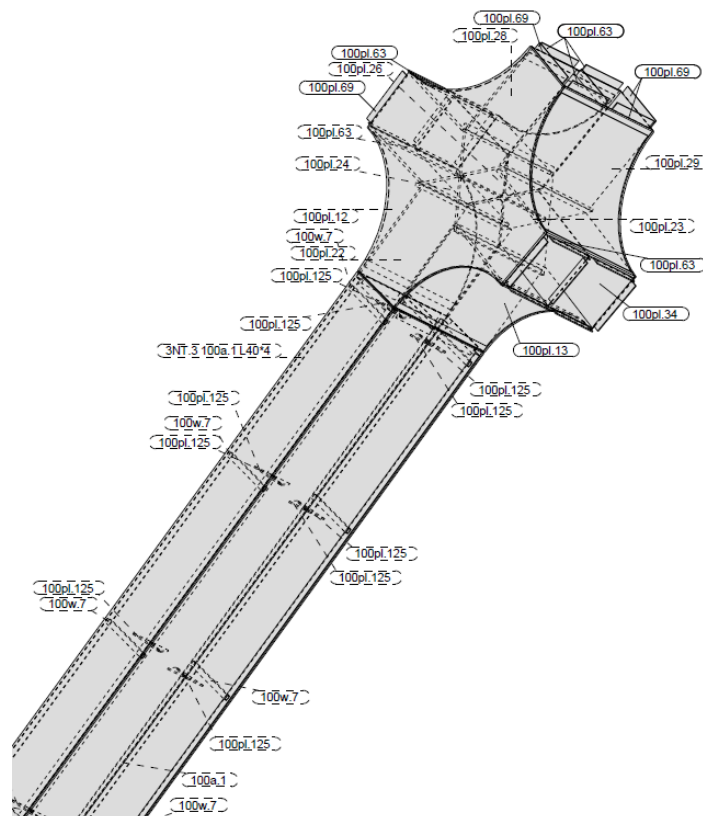


Figura 4. Extracto de un plano de taller de una diagonal + nudo.

Las celosías parten de la losa de hormigón armado de planta baja, con sus nudos de arranque ubicados sobre pilares del mismo material que a su vez descansan sobre zapatas, por debajo del sótano -2.

2. Estrategia para la evaluación del comportamiento estructural de la celosía en caso de incendio

INES desarrolló para esta “fachada estructural en celosía” una estrategia particular para la evaluación de su comportamiento mecánico-térmico en situación de incendio, dado que la aplicación de sistemas pasivos que garantizaran el cumplimiento de la clase exigida por el CTE-DB-SI (R-90 en plantas tipo y R120 en planta baja, incluido su techo) hubiera derivado en un sobredimensionamiento excesivo tanto de la estructura propiamente dicha (por un tema de masividad de sus elementos constituyentes) como de su protección pasiva al fuego.

2.1. Análisis del contexto normativo

El diseño del edificio debía cumplir las exigencias básicas de seguridad en caso de incendio establecidas en el CTE y reflejadas en las Secciones 1 a 6 del Documento Básico SI “Seguridad en caso de Incendio”.

Con respecto a la estructura portante de los edificios, la Exigencia Básica SI 6 “Resistencia al fuego de la estructura” determina que esta debe mantener su resistencia, considerando el impacto del fuego sobre la capacidad resistente de la estructura y sus materiales, durante un tiempo determinado, para que puedan cumplirse el resto de exigencias básicas: propagación interior, propagación exterior, evacuación de ocupantes, instalaciones de PCI (protección contra incendio) e intervención de bomberos.

Asimismo, según lo indicado en la norma UNE-EN 1991-1-2, las construcciones deben proyectarse y construirse de forma que, en caso de incendio:

1. se mantenga la capacidad portante de la construcción durante un tiempo especificado;
2. se limite la aparición y la propagación de fuego y del humo dentro de la construcción;
3. se limite la propagación del fuego a construcciones vecinas;
4. los ocupantes puedan abandonar la construcción o ser rescatados por otros medios;
5. se tenga en cuenta la seguridad de los equipos de rescate.

Para garantizar el punto 1 (que coincide con la exigencia básica SI 6 del CTE), se utilizan fuegos nominales para generar acciones térmicas, entendiendo por “fuegos nominales” a aquellos en los que la evolución de la temperatura con el tiempo viene determinada por la curva normalizada tiempo-temperatura. Esta curva se define en la norma EN 13501-2 y sirve para representar un modelo de fuego totalmente desarrollado en un sector de incendio, es decir, en un escenario de incendio en espacio interior, no aireado.

El método de comprobación consiste en un cálculo simplificado, que sirve para la mayoría de las situaciones habituales y permite determinar que un elemento de la estructura principal del edificio tiene una resistencia al fuego suficiente, si alcanza la clase indicada en la tabla 3.1 del SI-6 (la cual es función del tipo de uso y de la altura de evacuación del edificio, reproducida como tabla 1 en el presente artículo). Dicha “clase” representa el tiempo en minutos de resistencia ante la acción de la curva normalizada de tiempo temperatura.

Tabla 3.1 Resistencia al fuego suficiente de los elementos estructurales

Uso del <i>sector de incendio</i> considerado ⁽¹⁾	Plantas de sótano	Plantas sobre rasante altura de evacuación del edificio		
		<15 m	<28 m	≥28 m
Vivienda unifamiliar ⁽²⁾	R 30	R 30	-	-
Residencial Vivienda, Residencial Público, Docente, Administrativo	R 120	R 60	R 90	R 120
Comercial, Pública Concurrencia, Hospitalario	R 120 ⁽³⁾	R 90	R 120	R 180
Aparcamiento (edificio de uso exclusivo o situado sobre otro uso)		R 90		
Aparcamiento (situado bajo un uso distinto)		R 120 ⁽⁴⁾		

⁽¹⁾ La *resistencia al fuego* suficiente de un suelo es la que resulte al considerarlo como techo del *sector de incendio* situado bajo dicho suelo.

Tabla 1. Clases de resistencia al fuego en función de alturas y usos según CTE-DB-SI-6.

Un elemento alcanza una resistencia al fuego suficiente si alcanza la clase indicada en la tabla anterior, que representa el tiempo en minutos de resistencia ante la acción representada por la curva normalizada tiempo-temperatura, o en su defecto, que soporta dicha acción durante un tiempo de exposición equivalente. El concepto de “tiempo equivalente de exposición”, contempla la reducción de tiempo de exposición en la curva normalizada tiempo-temperatura, debido a determinadas situaciones favorables respecto al escenario bajo el cual se construye la curva normalizada. Este planteamiento queda reflejado en el CTE en su Anexo B, en el cual se establece un procedimiento para calcular el tiempo equivalente de exposición al fuego normalizado teniendo en cuenta estas variables: características geométricas y térmicas del sector y valor de cálculo de la carga de fuego, así como los efectos favorables de los sistemas de protección activa. En todos los casos la aplicación de esta formulación considera que el elemento en cuestión se encuentra en el interior del edificio.

La curva normalizada tiempo-temperatura está, por tanto, sobre dimensionando para la estructura exterior, ya que por el hecho de ser, precisamente, exterior, la acción térmica sobre la misma va a ser inferior a la acción térmica de la curva normalizada sobre la estructura interior.

Esto se debe a que, el desarrollo de un incendio en un espacio, se caracteriza por la evolución de la temperatura en el tiempo, la cual es función de las condiciones particulares del espacio donde se produce, esto es; geometría y tamaño del sector, carga de fuego, ventilación y transmisión térmica.

2.2. Exigencias de seguridad en caso de incendio de este edificio en particular

La altura de la cota más alta de evacuación, desde el nivel de la calle, es de alrededor de 20 m. El uso del edificio en principio es administrativo, aunque la propiedad pretende alquilar la totalidad del mismo y, de momento, se desconoce la actividad de los inquilinos que lo ocuparán. Se pretende dar la posibilidad de usar únicamente la planta baja para una actividad comercial.

De todo lo anterior, los elementos resistentes deberán ser capaces de alcanzar las siguientes clases:

- Niveles bajo rasante: R-120
- Planta baja (incluido su techo): R-120
- Desde planta primera hasta cubierta: R-90

El proyecto prevé garantizar el cumplimiento de la resistencia al fuego de la estructura interior mediante la aplicación de sistemas pasivos que garanticen alcanzar la clase indicada. Sin

embargo, tal y como se ha explicado en el apartado anterior, la estrategia de aplicación de sistemas pasivos que garanticen el cumplimiento de la clase exigida derivaría en un sobredimensionamiento excesivo para el caso de la estructura exterior, que debería asegurar R-120 hasta el suelo de planta primera y R-90 en cotas superiores.

Para un cálculo realista de la resistencia de los elementos sometidos a la acción del fuego es necesario conocer la temperatura de la estructura metálica durante el desarrollo del incendio. El propio DB SI-6 en su punto 1, "Generalidades", contempla la posibilidad de utilizar otras metodologías para el cálculo de temperaturas, haciendo una mención específica a los modelos de fuego propuestos en la UNE EN 1991-1-2 ("Acciones en estructuras. Parte 1.2: Acciones generales. Acciones en estructuras expuestas al fuego").

2.3. Metodología seguida para la comprobación de la resistencia al fuego de la estructura exterior

Debido a lo anteriormente explicado, la situación de este gran elemento arquitectónico-estructural exterior, a menos de 1 m de la envolvente del sector de incendio (fachada propiamente dicha del edificio) fue objeto de un análisis justificativo de acuerdo con los procedimientos propuestos en las normas UNE EN 1991-1-2 y 1993-1-2. En concreto, el anejo B de la 1991-1-2 contiene una metodología para evaluar la resistencia al fuego de estructuras exteriores: "Acciones térmicas sobre elementos exteriores - cálculo simplificado" que fue la seguida en el caso de la celosía del edificio que Gmp está construyendo en Las Tablas. Dicha metodología permite evaluar la temperatura y la geometría de la llama exterior.

Una vez hecho esto, se siguió el procedimiento propuesto en el documento normativo UNE EN-1993-1-2, también en su anejo B, "Transferencia de calor a estructuras de acero externas", para el cálculo de la temperatura en la estructura metálica exterior.

La metodología propuesta supone en todo momento el estado de equilibrio termodinámico del sistema, es decir, al contrario de lo que ocurre en las curvas normalizadas tiempo-temperatura, este método no considera la cinética del proceso termodinámico, es decir, supone que la temperatura, tanto de la llama como de los elementos metálicos, alcanzan de manera inmediata su estado de equilibrio. Esta hipótesis está del lado de la seguridad, al obviar el tiempo consumido durante el periodo transitorio hasta que se alcanza el estado de equilibrio. Una vez calculada la temperatura de equilibrio en los elementos metálicos exteriores, se calcularon las temperaturas críticas a partir de los grados de utilización de la estructura metálica.

Como ya ha sido explicado, en el momento de redacción del proyecto de estructuras se desconocía la distribución de los inquilinos en el espacio interior de la edificación. Por esta razón, INES realizó los cálculos para tres hipótesis diferentes que contemplan distintas casuísticas de sectores de incendios según se enumera a continuación:

- Inquilino único con ventilación no forzada.
- Inquilino único con ventilación forzada.
- Cuatro inquilinos en una misma planta.

En el primer caso, se supone un único sector de incendio. Al ser el cerramiento exterior de muro cortina en todo el perímetro del edificio, se dispone de fachadas acristaladas opuestas (figura 5).

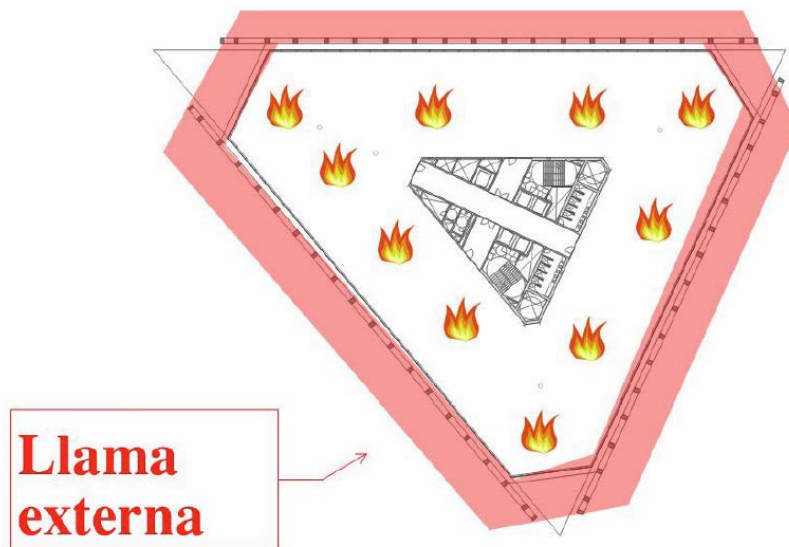


Figura 5. Sector de incendio para un único inquilino.

En el segundo caso, de inquilino único con ventilación forzada, se sigue suponiendo un único sector de incendio, pero con la situación de viento esquematizada en la figura 6.

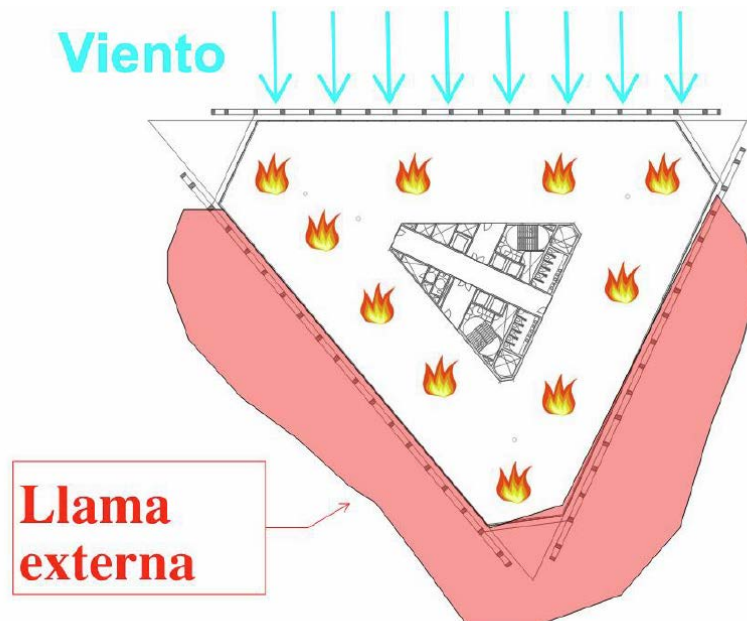


Figura 6. Incendio para un único inquilino con ventilación forzada.

En el último caso, de cuatro inquilinos en una misma planta, se supone que la planta está dividida en varios sectores de incendio, separados por los elementos de partición dispuestos entre las oficinas de distintos inquilinos. Por lo tanto, se supone que no existen muros perpendiculares que tengan ventanas (ver figura 7).

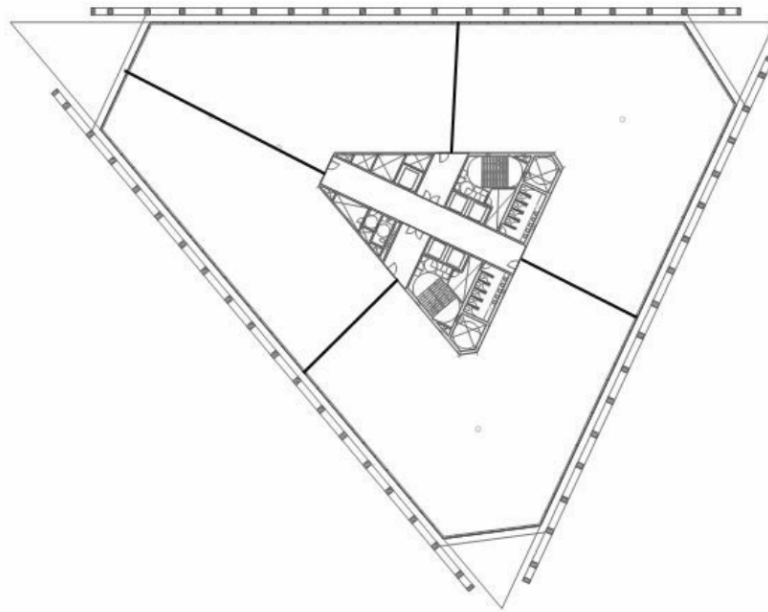


Figura 7. Sectores de incendio para 4 inquilinos.

La ecuación de equilibrio obtenida según la metodología antes explicada se cumplió para una temperatura de la estructura metálica (T_m) de 557, 647 y 573 °C, respectivamente, en cada una de las situaciones analizadas (figuras 5 a 7).

2.4 Cálculo de las temperaturas críticas de la celosía

Se ha realizado un modelo global de los niveles sobre rasante de la estructura.

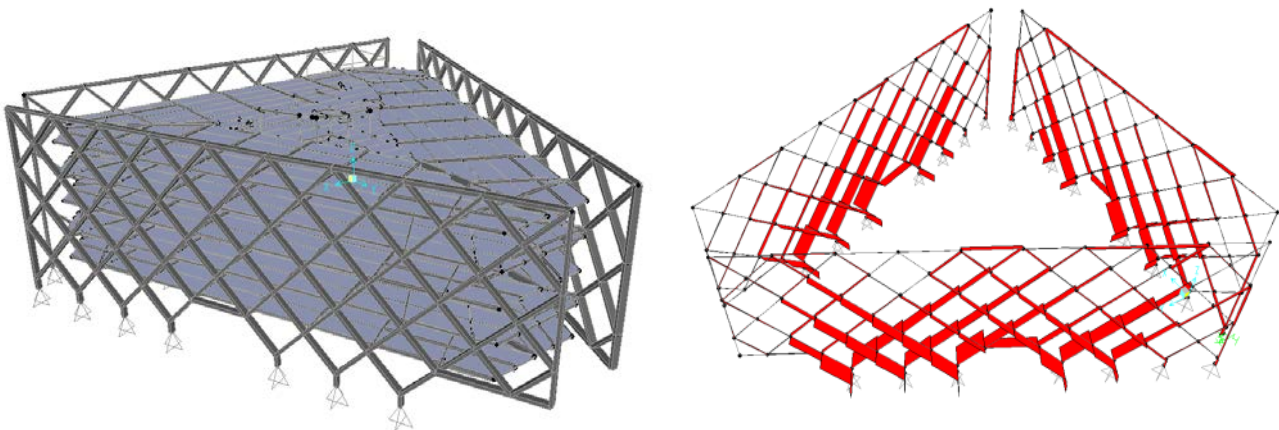


Figura 8. Modelo de cálculo tridimensional del edificio y su celosía metálica portante exterior y distribución de axiles de la celosía exterior.

De acuerdo con la norma UNE EN 1991-1-2, título 4.3.1, los esfuerzos en los elementos de la estructura metálica deben de calcularse para las combinaciones de carga accidentales, quedando éstas definidas en la UNE EN 1990.

Las diagonales de la celosía trabajan a flexo-compresión (ver figura 9).

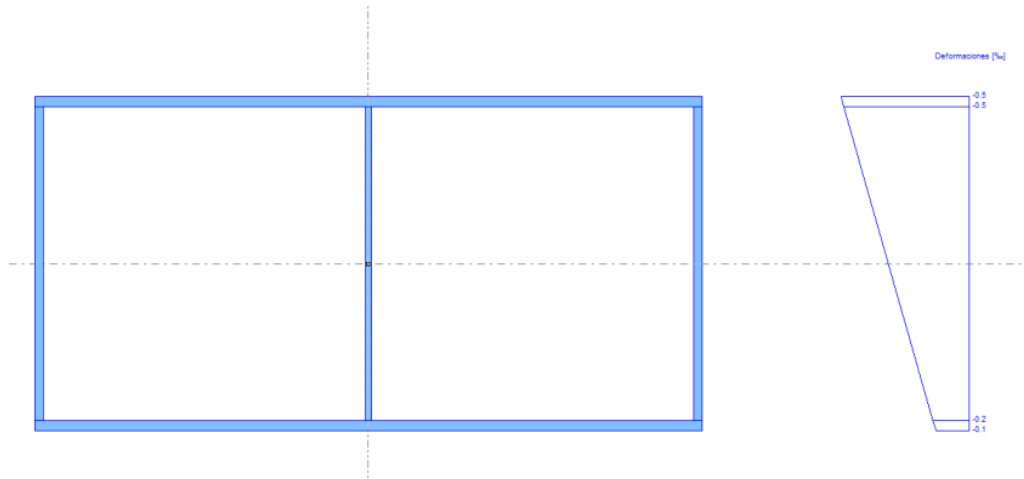


Figura 9. Plano de deformación en la diagonal de menor espesor más solicitada.

Para la clasificación de la sección según UNE EN 1993-1-1, apartado 5.6, se clasifica la que tiene chapas de menor espesor (ver figura 10), por ser la más localmente esbelta, según la ecuación dada a continuación de dicha figura.

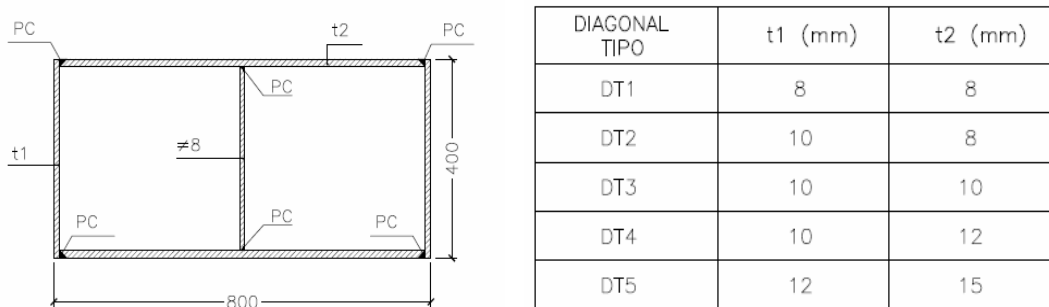


Figura 10. Espesores de chapas de las diagonales.

$$\frac{c}{t} = \frac{\frac{0.8}{2} - 0.008 - 0.004}{0.008} = 48.5 \tag{1}$$

La sección es de clase 3 si se cumple la siguiente desigualdad:

$$\frac{c}{t} \leq \frac{42\varepsilon}{(0.67 + 0.33\psi)} \tag{2}$$

Para el plano de deformaciones que se muestra en la figura 9, correspondiente a la diagonal de menor espesor —todas sus chapas son de 8 mm—, el valor límite para un acero tipo S355 ($f_y = 355$ MPa) resulta, de aplicar la ecuación (2), también de 48.5. De este modo, las secciones de todos los elementos de la celosía son de clase 3 y, por tanto, la temperatura crítica se puede calcular a partir de la expresión indicada en UNE EN 1993-1-2 (título 4.22), función del grado de utilización de la sección analizada.

$$\theta_{a,cr} = 39.19 \ln \left[\frac{1}{0.9674 \mu_0^{3.8333}} - 1 \right] + 482 \tag{3}$$

Se calcularon entonces los grados de utilización de cada uno de los elementos de la celosía exterior para las combinaciones de carga en situación accidental, así como las temperaturas críticas asociadas a dichos grados de utilización. Para el caso más desfavorable, la temperatura crítica resultó de 659 °C.

Siendo así, en todos los casos la temperatura crítica resulta superior a la de la estructura metálica en los tres escenarios de incendio analizados (557, 647 y 573 °C). Por lo tanto, la estructura portante exterior cumple con los criterios de resistencia al fuego sin necesidad de aplicar tratamientos de protección pasiva ante fuego, como ser pinturas intumescentes.

3. Conclusiones finales

Como en todos los elementos de la celosía portante exterior se obtuvieron temperaturas críticas superiores a las temperaturas anteriormente calculadas sobre la estructura metálica (estas últimas, obtenidas a partir de la geometría y temperatura de la llama exterior) se consideró que la celosía portante exterior objeto de estudio cumplía con las exigencias de resistencia en caso de incendio.

La celosía exterior portante (clase R-90 ó 120, según CTE-DB-SI, para las plantas tipo o baja, respectivamente) desarrollará por tanto un correcto comportamiento mecánico-térmico durante los 90 ó 120 minutos de duración del incendio interior indicado por la normativa, sin necesidad alguna de protección pasiva. Para ello, fue necesario adaptar detalles constructivos de la celosía de acero para que toda ella fuera clase 3 (ver figura 10 y ecuaciones 1 y 2) y considerar los factores de utilización de cada uno de sus elementos constitutivos (ecuación 3).

De esta manera, se ha justificado a, entre otros, los organismos gestores de las licencias urbanísticas, una “resistencia al fuego equivalente” de la celosía metálica portante exterior R90 en plantas tipo y R120 en planta baja (incluido su forjado techo, es decir, el suelo de planta primera) en cualquier situación de funcionamiento del edificio y sin necesidad de ningún tipo de protección pasiva (pinturas intumescentes, morteros ignífugos tipo vermiculita o perlita, placas de yeso, etc.).