



ESTUDIO DE RESISTENCIA AL FUEGO EN SISTEMA ESTRUCTURAL MIXTO

*Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación
Universidad de Sevilla*

*Tutores: Don Emilio Yanes Bustamante
Don Víctor Compán Cardiel*

Antonio Jesús Jiménez Rodríguez



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE LA EDIFICACIÓN

GRADO EN EDIFICACIÓN

ESTUDIO DE RESISTENCIA AL FUEGO EN SISTEMA ESTRUCTURAL MIXTO

Trabajo de fin de grado presentado por el alumno Antonio Jesús Jiménez Rodríguez, siendo sus tutores Don Emilio Yanes Bustamante y Don Víctor Compán Cardiel.

Tutores:

D, Emilio Yanes Bustamante

D, Víctor Compán Cardiel

Autor:

Antonio Jesús Jiménez Rodríguez

Sevilla, Septiembre de 2017

Dar las gracias a todas las personas que me han ayudado y apoyado durante este proyecto:

En primer lugar a mis tutores por ayudarme y señalarme el camino en todo este complicado proceso que es la investigación.

Seguidamente a mis padres, por aguantarme, animarme a llevar a cabo este proyecto, poner todos los recursos posibles a mi disposición y por mi padre llevarme a la facultad día sí y día también cuando no pude andar durante unos meses.

A mi hermana porque sí.

Y a Kike, Javi, Mercedes y Ángel por ayudarme con las partes de este trabajo que no pude realizar solo, hacerlo de forma desinteresada y encima de todo, hacer que me lo pasara bien realizando un trabajo de fin de grado, algo que hasta que ocurrió no lo creía posible.

Y por supuesto, a todos los que me han escuchado hablar y hablar sobre el tema y divagar en mil y una ideas y han tenido la deferencia de no bostezar demasiado durante el discurso.

Gracias.

ÍNDICE

CAPÍTULO 0: INTRODUCCIÓN

0.1.- Antecedentes.....	7
0.2.- Problema observado.....	8

CAPÍTULO 1.- ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DEL FUEGO EN EL ACERO Y HORMIGÓN

1.1.- Introducción.....	11
1.2.- Relaciones tensión-deformación del acero a temperaturas elevadas.....	12
1.3.- Relaciones tensión-deformación.....	13
del hormigón a temperaturas elevadas.	
1.4.- Dilatación térmica del acero y del hormigón.....	14
1.5.- Pérdida de resistencia del acero y del hormigón.....	14

CAPÍTULO 2.- PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO FRENTE AL FUEGO

2.1.- Introducción.....	17
2.1.- Propiedades características de los materiales.....	17
2.2.1.- Calor específico.....	17
2.2.2.- Conductividad térmica.....	18
2.3.- Parámetros variables de los materiales.....	18
2.3.1.- Masividad o factor de forma.....	18
2.3.2.- Relación entre conceptos previos.....	21
2.3.3.- Hiperestaticidad.....	22

CAPÍTULO 3.- PROPUESTA DE SOLUCIÓN.

3.1.- Sistema estructural propuesto.....	25
3.2.- Funcionamiento del sistema.....	26

CAPÍTULO 4.-RELACIÓN TEÓRICA DE NUESTRO SISTEMA

4.1.- Principio físicos que actúan en nuestro sistema estructural.....	29
4.2.- Relación con el sistema de modelos parciales de Heinz Hossdorf.....	30

CAPÍTULO 5.-DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

5.1.- Materiales y herramientas.....	33
A) Materiales usados.....	33
B) Herramientas utilizadas.....	34
5.2.- Preparación del ensayo.....	36
A) Zona del ensayo.....	36
B) Obtención y preparación del perfil tubular para el ensayo.....	36
C) Hormigonado del perfil y espera del fraguado.....	41
D) Vigilancia y control del sistema.....	45
E) Realización del ensayo.....	46

CAPITULO 6.-RESULTADOS

6.1.- Tablas de resultados medidos.....	61
6.2.- Gráficas de resultados.....	62

CAPITULO 7.-CONCLUSIONES

7.1.- Resultado global.....	67
7.2.- Aspectos no esperados.....	67
7.3.- Diferencias entre las perforaciones.....	67
7.4.- Fallos en la ejecución.....	68
7.5.- Limitaciones al uso del sistema	69
A) Económicas.....	69
B) Falta de conocimiento.....	69
C) Factor tradición.....	69

CAPITULO 8.- COMPARATIVA CON LA PUBLICACIÓN ENCONTRADA

8.1.- Introducción.....	73
8.2.- Diferencias entre nuestro ensayo y la publicación.....	73
8.3.- Aspectos a destacar.....	77

CAPÍTULO 0.- INTRODUCCIÓN.

0.1.-ANTECEDENTES DEL TRABAJO

Desde hace algún tiempo hacia aquí, me ha interesado bastante el comportamiento de las estructuras y los edificios frente al fuego, y, el hecho de como afecta, en especial, al acero.

Algo tan presente y común en nuestro oficio y en cualquier obra de edificación, con el aliciente de que, por norma general, las obras monumentales, lugares por los que circula gran cantidad de gente, suelen usar estructuras de acero o mixtas por su tamaño, por la amplitud de luces que permite, por la comodidad de montaje frente al encofrado del hormigón etc.

Empezaremos esta introducción, estudiando nuestra normativa de seguridad ante el fuego. Al empezar con este trabajo, noté que todas las soluciones que recogía el DB-SI estaban, aunque usando diferentes materiales, basadas en el mismo principio de funcionamiento: recubrir el material que hay que proteger en sus caras exteriores.

Pero no solo eso, la normativa Inglesa y la americana (normativas que ojeé por encima al principio de cuatrimestre cuando no tenía claro en que centrar este trabajo), también se basan en el mismo principio para la protección frente al fuego.

Esto empezaba a hacer que me plantease más de una pregunta, como el hecho de si no estaría todo ya más que estudiado y las opciones más económicas y que dan mejor resultado no estarían ya en el mercado, ensayadas y siendo utilizadas desde hace bastante tiempo hasta ahora.

Este tipo de ideas me hicieron tener que plantearme el problema desde otra perspectiva distinta, no me quedaba otra opción si quería seguir estudiando el tema; así que continué en mi empeño de buscar algún punto de enfoque que me motivase a seguir trabajando sobre él, y no acabar cambiándolo o haciendo algún trabajo que no me entusiasmase demasiado.

También me ha llamado siempre mucho la atención, como cuando se habla de resistencia al fuego, se busca evacuar a las personas, que el fuego no se expanda, y que los bomberos puedan actuar, algo lógico, prioridades bien establecidas sin duda alguna, pero nadie recoge el hecho de que se conserve el edificio, claramente por un motivo económico, si hiciéramos edificios que resistieran el fuego sin ningún tipo de daño, su precio sería tan elevado que prácticamente nadie podría permitírselo.

Lo que me llevó a plantearme lo siguiente; ¿y si hubiese alguna solución para edificios con un alto presupuesto ya establecido, como edificios monumentales, o edificios del ejercito quizá?, y de ser así, ¿en qué parte del edificio podríamos justificar una resistencia contra el fuego desmesurada sin aumentar el presupuesto de nuestra edificación de forma significativa?

La única respuesta que se me ocurrió fue simple, la estructura; si en un incendio la estructura falla, todo colapsa, si la estructura aguanta y por ende, apenas sufre daños considerables, estaría más que justificado un pequeño aumento del presupuesto. ¿Y si además, no existiese tal aumento?.

Creo que es necesario aclarar un punto antes de continuar exponiendo mi trabajo; todo lo que voy a exponer a continuación, la solución alternativa que propongo y el ensayo y estudio que realizo; tanto los campos que dejo abiertos en las conclusiones, serán solo contemplando la estructura del edificio, no se hablará de cerramientos ni de ninguna otra tipología constructiva dentro de este estudio, mayormente, no por falta de ganas, sino como siempre, de tiempo.

Todas estas ideas rondaban en mi cabeza, así que llegados a este punto, solo necesité oír una anécdota a manos de mi tutor para terminar de convencerme de lo comentado anteriormente.

Nos explicó durante una de sus clases, como, para un trabajo que le encargaron, utilizaron una serie de pilares formados por perfiles tubulares de acero, con pequeñas perforaciones cada cierta distancia previamente establecida y calculada y rellenos de hormigón y armadura, consiguieron unos pilares de unas resistencias excepcionales y cuya temperatura no aumentaba lo suficiente como para que el acero perdiese propiedades mecánicas o tuviese dilataciones importantes al exponerlos al fuego.

Debo decir que ya le había comentado que me interesaba estudiar el fuego, y estoy bastante seguro de que él expuso este tema a sabiendas de que me llamaría la atención y me gustaría. No sé si llegó a imaginarse que me gustaría hasta el punto de realizar un ensayo yo mismo, pero esto lo trataremos más adelante.

Poco a poco, preguntando, informándome sobre el tema y estudiando con más profundidad los factores de los que depende el impacto del fuego sobre cualquier cuerpo sistema termodinámico, comprendí el funcionamiento de este sistema del que me habían hablado.

Y pidiendo el visto bueno de mis dos tutores y permiso para tratar el tema del que me había hablado de este sistema, decidí escribir, estudiar y publicar algo sobre este sistema, ya que no había datos de ningún ensayo realizado al alcance de cualquiera que necesitase información sobre el mismo.

0.2.-PROBLEMA OBSERVADO

Después de todas las ideas expuestas en el punto anterior, debía pensar alguna forma de justificar porque no me interesaba tener solo sistemas de resistencia al fuego que funcionasen teniendo que recubrirlos con otro material.

Llegué a la conclusión de que, aunque los sistemas funcionan y cumplen la función de mantener la estabilidad estructural hasta que el incendio sea sofocado o el edificio evacuado, tienen algunos factores importantes que pueden dar lugar a fallos o que podrían, si se solventarán, incluso aumentar los metros cuadrados de superficie útil de nuestro edificio, con el consiguiente aumento de beneficios que esto supone. Los dos factores a los que me refiero son:

-El aumento del volumen de los pilares: al tener que recubrir sus caras exteriores con alguno de los materiales aislantes que propone la norma y que están regulados y, posteriormente, tener que proteger estos materiales recubriéndolos a su vez, provoca un aumento significativo de el volumen del total de nuestros pilares del edificio, lo que se traduce en menos superficie construida y útil en nuestra edificación.

-Los fallos del ser humano: los pilares deben estar recubiertos antes de, por ejemplo, colocar las instalaciones de nuestro edificio. Debemos tener en cuenta que el operario que va a colocar un ascendente, un bajante, o cualquier otra parte de una instalación, necesita anclar estos a la estructura, el simple hecho de anclar en lana de roca un ascendente con un anclaje metálico, ya provocaría un puente térmico que no haría que nuestro sistema de protección contra el fuego funcionara correctamente.

Y por supuesto el hecho de que la estructura es una de las primeras fases de toda obra, y que al quedar mucho trabajo aún por delante, es más que probable que por un descuido, este recubrimiento reciba algún golpe, pierda partes del mismo etc. y así, su buen funcionamiento.

Tras esta introducción, entremos en materia propiamente dicha y analicemos el desarrollo del estudio, el ensayo, los errores y aciertos cometidos, lo esperado, lo inesperado y sobre todo, sus conclusiones.

CAPÍTULO 1.- ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DEL FUEGO EN EL ACERO Y HORMIGÓN

1.1.-INTRODUCCIÓN

El acero es, junto con el hormigón, el material de construcción más utilizado del mundo, y además, es el material preferido cuando se busca llevar las estructuras a nuevos límites, ya sea en altura o en longitud.

La práctica totalidad de las personas que habitan en un país desarrollado conviven cada día con estructuras cuyo principal material de construcción es el acero. Ya sea lugar de residencia, trabajo o compras, todos pasan parte de su tiempo cerca de vigas, pilares u otros elementos estructurales que se sustentan gracias a un material cuyo proceso de fabricación es bien conocido y cuyas capacidades mecánicas lo han convertido en uno de los materiales de construcción líder en todo el mundo.

Su gran ventaja reside en su relación resistencia/peso, que presenta un valor sensiblemente elevado. Esto significa que los elementos que formarán la estructura en cualquier construcción podrán ser de una sección transversal mucho menor que en el caso del hormigón, ocupando por lo tanto menos espacio. Así pues la estructura metálica permite disponer de grandes espacios diáfanos, donde, en todo caso, sólo existen columnas muy ligeras. También pueden construirse edificaciones de gran altura, en las que el espacio ocupado por la estructura es mucho menor respecto al que ocuparía si ésta fuese de hormigón.

Otra de las ventajas que presenta la construcción metálica es que puede ser preparada en taller, lo que se traduce en que los elementos llegan a la obra prácticamente elaborados, necesitando un mínimo de ajustes para estar operativos. Además, cuando termina el periodo de vida útil del edificio, la estructura metálica puede ser desmontada y posteriormente utilizada en nuevos usos, o ser reaprovechada con un fácil reciclaje.

Las estructuras de acero son, en general, más ligeras, más esbeltas, más resistentes, presentan un montaje más rápido y son ambientalmente más sostenibles que las estructuras de hormigón.

Entonces, ¿por qué no se proyectan muchas más estructuras de acero

en nuestro país?.

Seguramente un gran inconveniente sea el precio, que comparado con el coste del hormigón, es sensiblemente más elevado. O quizás sean las ideas preestablecidas en el mundo de la construcción de nuestro país, donde predomina desde hace años la cultura del hormigón, lo que no permite destacar suficientemente las ventajas de la estructura metálica.

No obstante, existen otros dos inconvenientes objetivos remarcables: la necesidad de proteger la estructura metálica contra el fuego y también la necesaria protección contra la corrosión, lo que produce un incremento en el coste.

En este trabajo trataremos una alternativa a la resistencia contra el fuego. Una alternativa en la que el recubrimiento del perfil metálico no es necesario. Un sistema poco conocido y con ningún resultado de su eficacia publicado en castellano.

La normativa actual vigente en España para resistencia al fuego es el Documento básico de seguridad contra incendios (DB SI), el cuál forma parte a su vez del Código Técnico de la Edificación (CTE).

En este documento se establece la resistencia al fuego según la cantidad de tiempo que nuestra estructura aguante sin colapsar.

[FIGURA 1.1]

Por norma general si el incendio es prolongado, los daños suelen ser tan graves que es preferible demolerlo a repararlo.

Esta resistencia, la expongo para relacionarla al finalizar este capítulo con los nuestro sistema estructural.

Después de observar como se establece la resistencia al fuego, pasemos a ver cómo afecta a los dos materiales más usados en el proceso edificatorio.

Tabla 3.1 Resistencia al fuego suficiente de los elementos estructurales

Uso del sector de incendio 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.

⁽²⁾ En viviendas unifamiliares agrupadas o adosadas, los elementos que formen parte de la estructura común tendrán la resistencia al fuego exigible a edificios de uso Residencial Vivienda.

⁽³⁾ R 180 si la altura de evacuación del edificio excede de 28 m.

⁽⁴⁾ R 180 cuando se trate de aparcamientos robotizados.

Tabla 3.2 Resistencia al fuego suficiente de los elementos estructurales de zonas de riesgo especial integradas en los edificios ⁽¹⁾

Riesgo especial bajo	R 90
Riesgo especial medio	R 120
Riesgo especial alto	R 180

⁽¹⁾ No será inferior al de la estructura portante de la planta del edificio excepto cuando la zona se encuentre bajo una cubierta no prevista para evacuación y cuyo fallo no suponga riesgo para la estabilidad de otras plantas ni para la compartimentación contra incendios, en cuyo caso puede ser R 30.

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

Figura 1.1

Tabla de resistencia al fuego de elementos estructurales del DB-SI

1.2.-RELACIONES TENSIÓN-DEFORMACIÓN DEL ACERO A TEMPERATURAS ELEVADAS

El efecto del fuego en el acero, es simplemente devastador.

Su resistencia en función de la temperatura así como las relaciones tensión- deformación correspondientes son ilustradas en la figura 1. Podemos constatar que la pérdida significativa de resistencia para el acero de construcción comienza capacidad resistente del acero inicia su caída a partir de los 100-200°C, a los 400°C. A 600°C, su resistencia se reduce aproximadamente al 50% de tal manera que en los alrededores de los 700°C queda poco más del 23% de la resistencia a temperatura ambiente. En cambio, su rigidez podría reducirse alrededor del 70%. Las informaciones detalladas relativas a sus propiedades mecánicas a temperaturas elevadas se encuentran en las normativas UNE EN1993-1-2 [1] y UNE EN 1994-1-2 [2]

En el caso del acero, el diagrama tensión-deformación recomendado por el eurocódigo es el siguiente:

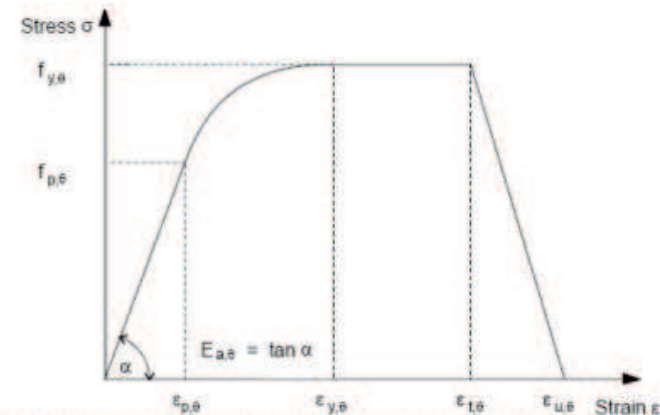


Fig. IV.2.3. Gráfico del diagrama tensión-deformación aceptado por el EN1993-1-2 [2] (EN 1993-1-2 (2004))

Gráfica de deformación del acero frente a el efecto del fuego.

1.3.-RELACIONES TENSIÓN-DEFORMACIÓN DEL HORMIGÓN A TEMPERATURAS ELEVADAS

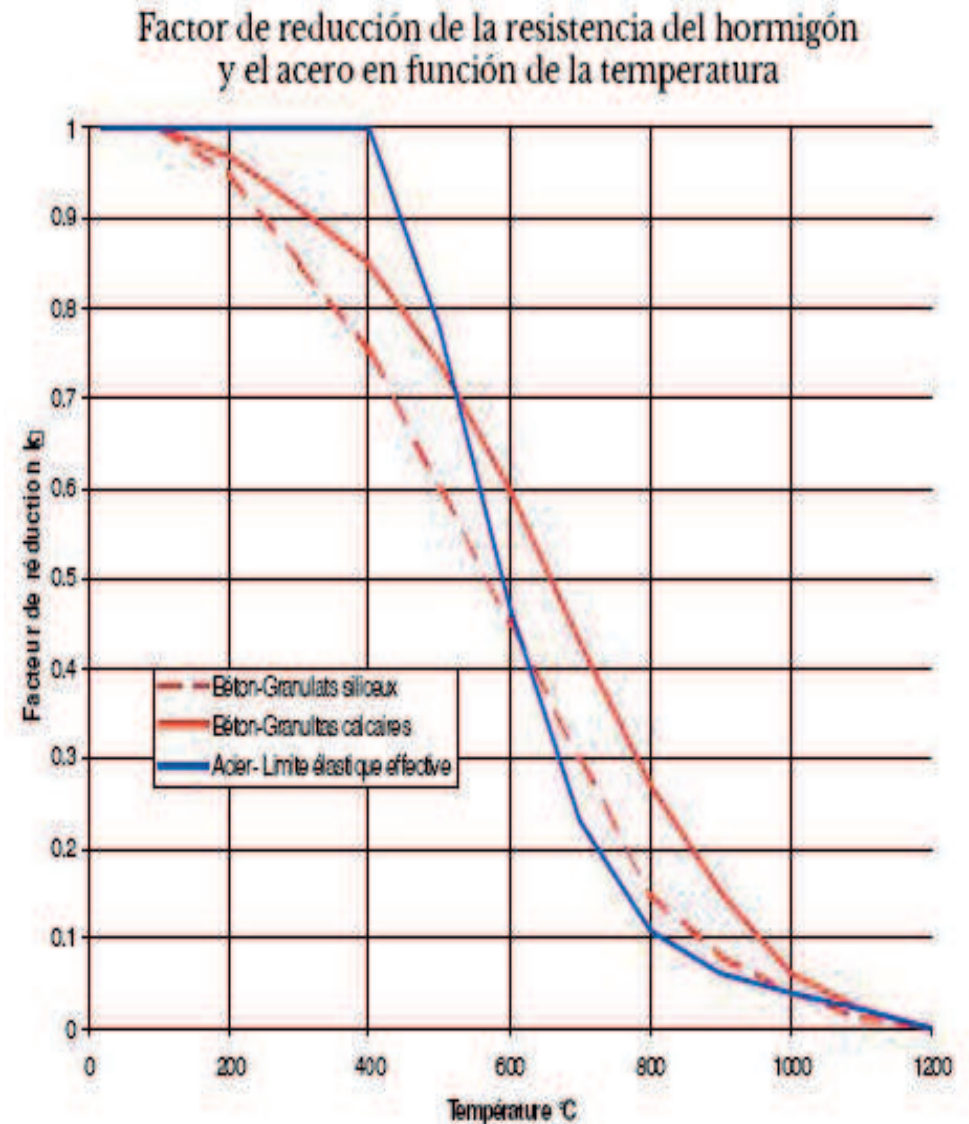
De manera similar, las propiedades del hormigón a temperaturas elevadas pueden obtenerse a partir de la EN 1992—1-2 [3]. Si observamos detenidamente la resistencia a compresión del hormigón en función de la temperatura, se puede constatar inmediatamente la caída progresiva a alrededor del 50% de su valor inicial a temperatura de 600°C.

El comportamiento mecánico del hormigón es de hecho relativamente parecido al comportamiento del acero de construcción. No obstante, el hormigón es utilizado en obra en espesores más importantes que el acero y además es mal conductor del calor, contrariamente al acero.

Sin embargo, el hormigón sufre un fenómeno de estallido superficial muy molesto contra el cual es necesario disponer una armadura de piel. Un estallido local no es necesariamente peligroso para la resistencia pero acentúa la penetración térmica y el calentamiento que acaba disminuyendo la resistencia teórica.

	Madera	Acero	Hormigón
Resistencia al fuego sin protección	Muy baja	Baja	Alta
Combustibilidad	Alta	Ninguna	Ninguna
Contribución a la carga de fuego	Alta	Ninguna	Ninguna
Conductividad del calor	Baja	Muy alta	Muy baja
Incorpora protección frente al fuego	Muy baja	Baja	Alta
Posibilidad de reparación después del fuego	Ninguna	Baja	Alta
Protección para los usuarios durante la evacuación y los bomberos	Baja	Baja	Alta

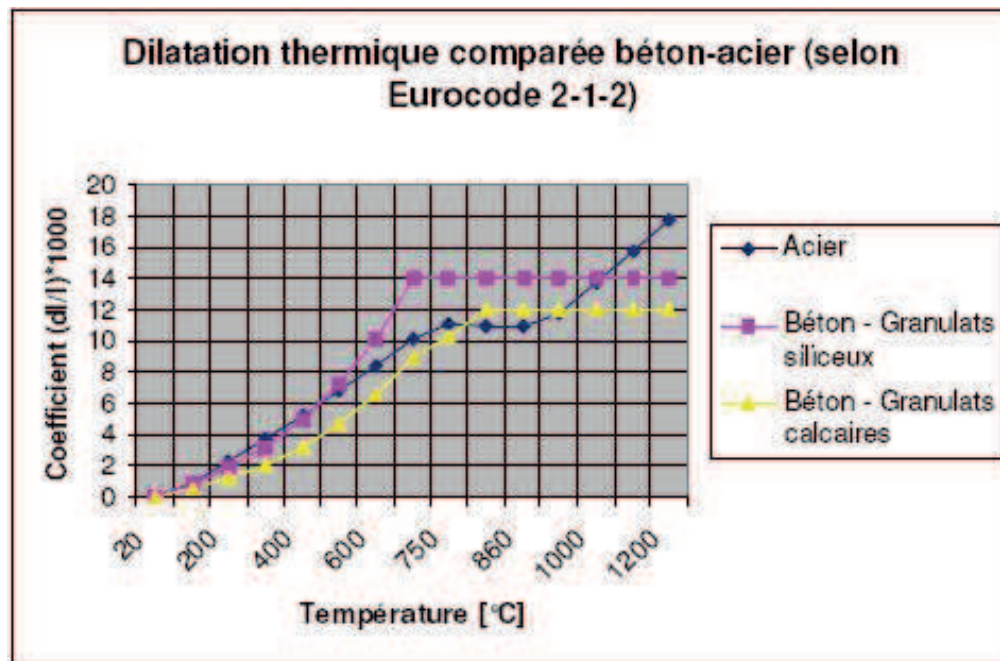
Comparativa de comportamientos ante el fuego.



Gráfica comparativa de las deformaciones del acero y del hormigón frente a la acción del fuego.

1.4.-DILATACIÓN TÉRMICA DEL ACERO Y DEL HORMIGÓN

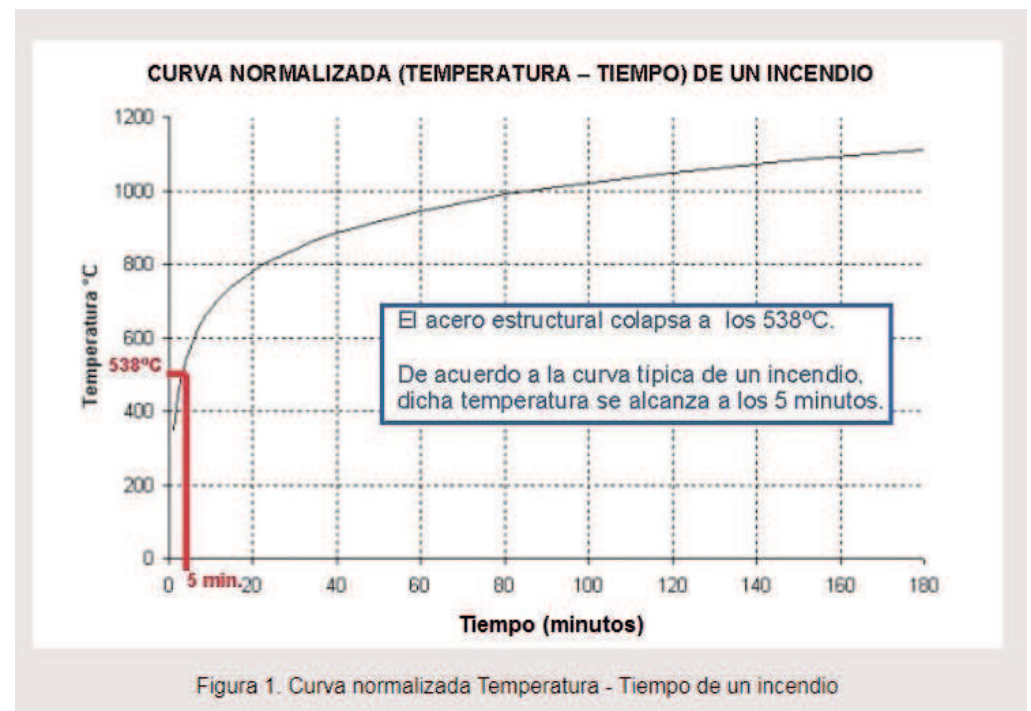
Al mismo tiempo que las propiedades mecánicas, el comportamiento relativo a la dilatación térmica necesita tenerse en cuenta en numerosos cálculos específicos en ingeniería de seguridad ante incendios, en particular medios de cálculo avanzados.



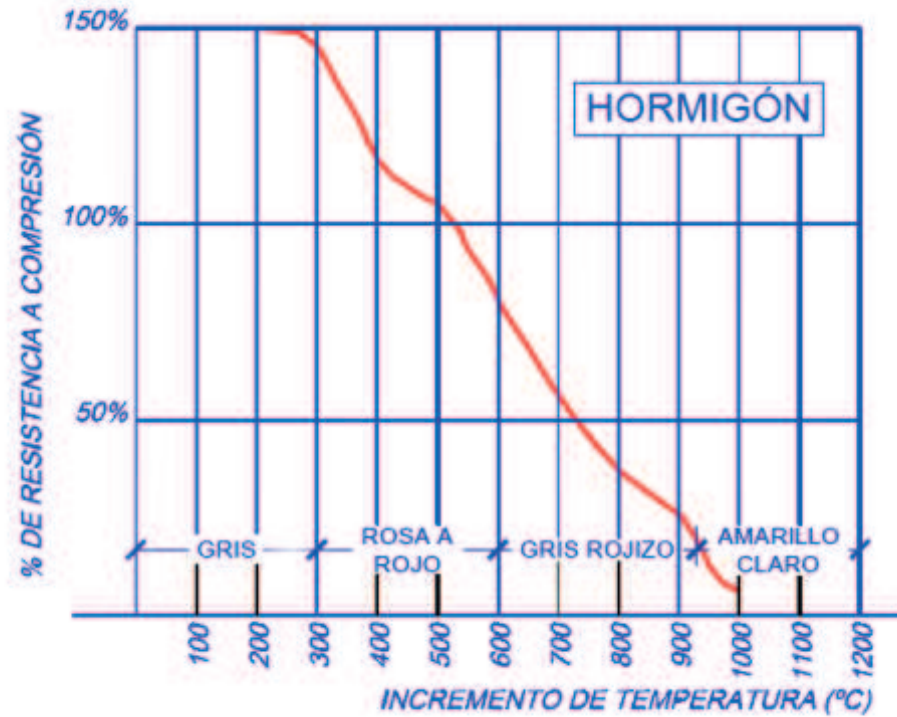
Gráfica comparativa de las dilataciones del acero y del hormigón frente a la acción del fuego .

1.5.-PÉRDIDA DE RESISTENCIA DEL ACERO Y DEL HORMIGÓN.

La deformación del acero es mucho más acusada que la del hormigón lo que propicia que los sistemas estructurales tengan más probabilidades de colapsar, moverse y que se provoquen más daños, incluso si no contamos con uniones hiperestáticas de que las vigas “salten” de los pilares provocando así daños importantes.



Gráfica de tiempo y temperatura en un incendio



Gráfica de pérdida de resistencia del hormigón frente al tiempo expuesto a un incendio

Como explicamos anteriormente, las pérdidas de temperatura del acero se vuelven insostenibles a 400°C, lo que hace que sea el material más afectado en un incendio (a nivel estructural).

Aun así las comparativas de las pérdidas de resistencia y dilataciones térmicas entre acero y hormigón son muy similares, ambos pierden prácticamente la misma cantidad de resistencia a temperaturas alcanzables en el mismo tiempo en un incendio y se dilatan de forma similar.

Aún con todo esto, el acero sigue siendo mucho más afectado que el hormigón, esto se debe a las características intrínsecas de cada material que se expondrán en los sucesivos puntos.

CAPÍTULO 2.- PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO FRENTE AL FUEGO.

2.1.-INTRODUCCIÓN

En el punto anterior observamos cómo afecta el fuego a nuestros materiales.

En este capítulo expondré cuales son los principales factores que influyen en esta parte del estudio y sus posteriores consecuencias.

Para exponer estos factores, la mejor forma que puedo imaginar consiste en dividirlos en factores que no podemos cambiar, factores que dependen del material, y factores que podemos alterar o mejorar para aumentar su resistencia al fuego.

Aclarar que, cuando hablo de factores que no podemos cambiar ni modificar me estoy refiriendo a que son las características del material propiamente dicho, del material que compramos a cualquier proveedor para nuestras obras y sin contar con ningún producto con tratamientos especiales más allá de lo común en la fabricación del mismo.

2.2.- PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.

2.2.1-CALOR ESPECÍFICO

El concepto de calor específico se emplea en el ámbito de la física con referencia al calor que requiere una sustancia o sistema termodinámico por unidad de masa para lograr incrementar su temperatura en un grado Celsius.

Para comprender la noción, por lo tanto, debemos tener varias ideas claras previamente.

Se llama calor, en el contexto de la física, a la energía que se traslada de un cuerpo hacia a otro, provocando cambios de estado y una dilatación. La masa, por otra parte, es una magnitud física que hace referen-

cia a la cantidad de materia que está presente en un cuerpo. La temperatura, por último, es otra magnitud física, en este caso orientada al nivel de calor que tiene el ambiente o un cuerpo.

El calor específico es una propiedad intensiva de la materia.

Cuanto mayor es el calor específico de las sustancias, más energía calorífica se necesita para incrementar la temperatura.

La fórmula del calor específico es la siguiente:

El CALOR ESPECÍFICO es la cantidad de calor que necesita 1gr de una sustancia para elevar su temperatura 1°C.

$$C_e = \frac{Q}{m(T_f - T_i)}$$

$$Q = C_e \cdot m (T_f - T_i)$$

C_e = Calor específico (cal/ g°C)

Q = Cantidad de calor (cal o Kcal.)

m = masa de la sustancia (gr.)

T_f = temperatura final (°C)

T_i = temperatura inicial (°C)

Fórmula del calor específico

El calor específico puede medirse en: [cal/g°C],[Kcal/kg°C] ó [J/kg°C]

2.2.2.-CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor.

Se refiere a la cantidad de calor transmitida a través de un material por unidad de tiempo.

La transferencia de calor se produce en mayor proporción en los materiales con alta conductividad térmica.

Al igual que el calor específico es una propiedad intensiva de la materia, inherente a cada material.

La fórmula de la conductividad térmica es la siguiente:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = kA \frac{T_c - T_f}{\epsilon}$$

Donde:

ΔQ : calor transferido en el intervalo tiempo Δt .

T_c : temperatura del foco caliente.

T_f : temperatura del foco frío.

A : área transversal.

ϵ : espesor de la lámina.

k : constante de conductividad térmica.

Fórmula de la conductividad térmica

2.3.-PARÁMETROS VARIABLES DE LOS MATERIALES

2.3.1.- MASIVIDAD O FACTOR DE FORMA

El concepto masividad o factor de forma del perfil se define como la relación entre el perímetro expuesto del perfil y el área de la sección de dicho perfil.

La fórmula de la masividad es la siguiente:

$$\text{Masividad} = \frac{P}{A} \quad (m^{-1})$$

donde:

P - Perímetro expuesto al fuego del perfil (m).

A - Área de la sección del perfil (m^2).

Fórmula de la masividad.

Al observar la fórmula podemos deducir que cuanto más compacto sea el perfil de acero menor será nuestra masividad (dada la forma en la que está presentada la fórmula, los mejores valores se observan cuando el resultado del cálculo de la masividad es pequeño) y más tiempo tardará en calentarse nuestra sección.

Este ejemplo se observa claramente en la figura 2.1.

Factor de masividad







Perímetro grande y sección pequeña = calentamiento rápido



Perímetro pequeño y sección grande = calentamiento lento

Figura 2.1. Aclaración de la masividad

Si seguimos estudiando este concepto podremos observar que la masividad máxima que se puede conseguir en un perfil de acero sería de 2 m-1, pero este tendría que ser completamente macizo y cuadrado.

Perfiles HEB (UNE 36.522)							Masividades			
HEB	PESO Kg/m	h mm	b mm	T mm	T mm	Sección cm ²				
100	20,4	100	100	6,0	10,0	26,0	218,1	153,8	179,6	115,4
120	26,7	120	120	6,5	11,0	34,0	201,8	141,2	166,5	105,9
140	33,7	140	140	7,0	12,0	43,0	187,2	130,2	154,7	97,7
160	42,6	160	160	8,0	13,0	54,3	169,1	117,9	139,6	88,4
180	51,2	180	180	8,5	14,0	65,2	157,7	110,3	130,2	82,7
200	61,3	200	200	9,0	15,0	78,1	147,2	102,4	121,6	76,8
220	71,5	220	220	9,5	16,0	91,0	139,6	96,7	115,4	72,5
240	83,2	240	240	10,0	17,0	106,0	130,2	90,6	107,5	67,9
260	93,0	260	260	10,0	17,5	118,0	126,7	87,8	104,7	65,9
280	103,0	280	280	10,5	18,0	131,0	123,3	85,2	102,0	63,9
300	117,0	300	300	11,0	19,0	149,0	116,0	80,5	95,9	60,4
320	127,0	320	320	11,5	20,5	161,0	109,7	76,9	91,1	58,3
340	134,0	340	340	12,0	21,5	171,0	105,9	74,9	88,4	57,3
360	142,0	360	360	12,5	22,5	181,0	102,4	73,1	85,8	56,5
400	155,0	400	400	13,5	24,0	198,0	97,6	70,8	82,4	55,6
450	171,0	450	450	14,0	26,0	218,0	91,3	68,4	77,5	55,0
500	187,0	500	500	14,5	28,0	239,0	88,9	67,1	76,3	54,5
550	199,0	550	550	15,0	29,0	254,0	87,4	66,9	75,6	55,1
600	212,0	600	600	15,5	30,0	270,0	85,9	66,7	74,8	55,6

Ejemplo de normativa exigida a los perfiles HEB en lo relativo a la masividad.

La única opción de conseguir una masividad menor, sería con una esfera, dado que es la figura geométrica que ocupa mayor volumen en menor espacio.

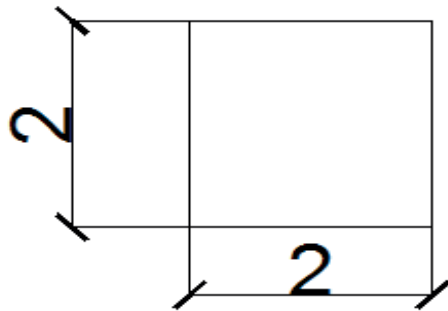
Es necesario una determinada masividad para que el perfil metálico cumpla con la normativa, pero si el perfil es completamente macizo, no tendremos ningún problema para que nuestro perfil cumpla con la normativa vigente.

A continuación usaremos el cálculo de la masividad en figuras simples para ver cuál es la mayor masividad posible y el por qué no es rentable su aplicación en perfiles metálicos.

Por fórmula la mayor masividad que podemos conseguir sería si usásemos perfiles macizos para el cálculo al tener el mayor área posible.

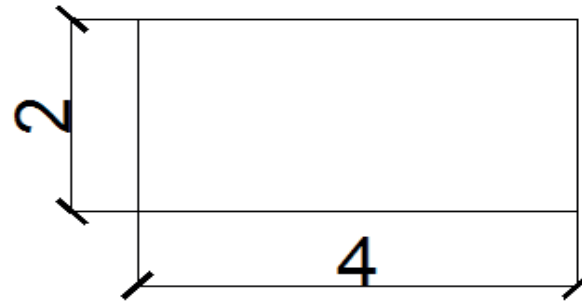
$$\text{Masividad} = \text{Perímetro} / \text{Área} = m^{-2} / m^{-3}$$

Masividad en perfil cuadrado



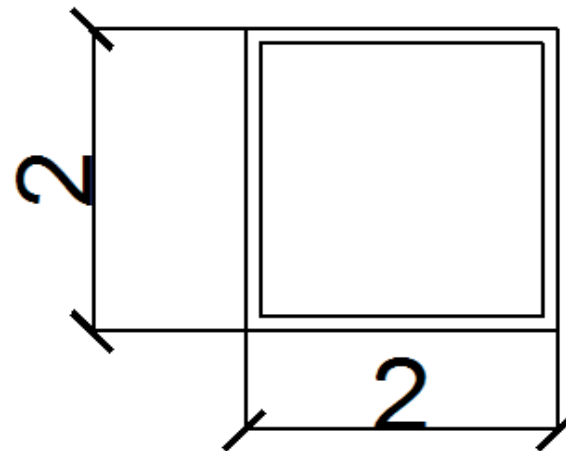
$$\begin{aligned} \text{Masividad} &= \\ \text{Perímetro} / \text{Área} &= \\ 8 / 4 &= 2 \text{ m}^{-2} / \text{m}^{-3} = \\ &= 2 \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$

Masividad en perfil rectangular:



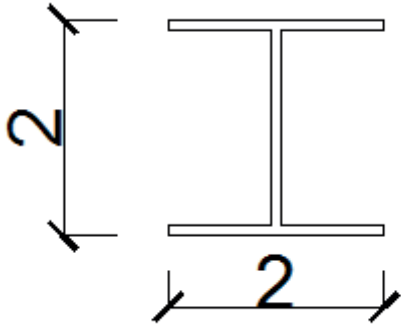
$$\begin{aligned} \text{Masividad} &= \\ \text{Perímetro} / \text{Área} &= \\ 12 / 8 &= 1,5 \text{ m}^{-2} / \text{m}^{-3} = \\ &= 1,5 \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$

Masividad en perfil tubular no macizo:
Pared del perfil de 10 cm.



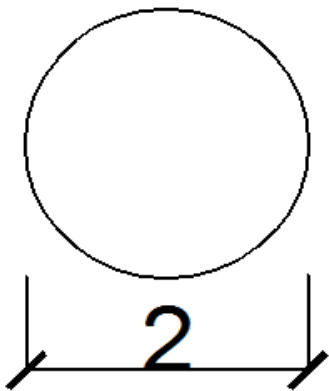
$$\begin{aligned} \text{Masividad} &= \\ \text{Perímetro} / \text{Área} &= \\ 8 / 0,40 &= 20 \text{ m}^{-2} / \text{m}^{-3} = \\ &= 20 \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$

Masividad en perfil en I:
Pared del perfil de 10 cm.



$$\begin{aligned}\text{Masividad} &= \\ \text{Perímetro/Área} &= \\ 11,8/0,58 &= \\ 20,34 \text{ m}^{-2}/\text{m}^{-3} &= \\ 20,34 \text{ m}^{-1}\end{aligned}$$

Masividad en esfera maciza:



$$\begin{aligned}\text{Masividad} &= \\ \text{Perímetro/Área} &= \\ 2\pi R/4 \pi R &= \\ 0,5 \text{ m}^{-2}/\text{m}^{-3} &= \\ 0,5 \text{ m}^{-1}\end{aligned}$$

2.3.2.- RELACIÓN ENTRE CONCEPTOS PREVIOS.

Con estos sencillos cálculos podemos llegar a varias conclusiones.

La primera de todas es la unidad en la que se expresa la fórmula de la masividad, es una unidad que incita a confusión, al dividir el perímetro entre el área y no al contrario, obtenemos que la unidad de la fórmula es metros elevados a -1, por lo que cuanto menor sea el resultado de la fórmula, mayor será la masividad y así cumpliremos con la normativa vigente.

Para solucionar este problema lo único que habría que hacer es invertir la fórmula, dividir el área entre el perímetro y no al revés y este detalle sería subsanado.

La siguiente conclusión a la que llegamos es que cuanto más macizo sea el perfil, mejor cumplimos con la masividad que necesitamos, pero esto es irrealizable si tenemos en cuenta que según la forma del perfil al usarlo como elemento estructural resistirá mejor unos esfuerzos de un tipo u otro.

Y en ningún momento es factible el realizar perfiles macizos con las dimensiones necesarias para poder realizar una edificación por motivos puramente económicos, el precio se dispararía de forma insostenible. Y si los que usamos son demasiados esbeltos también tendremos muchos problemas con los que lidiar a la hora de resolver determinados esfuerzos a los que nuestra estructura estará sometida.

Otra conclusión que podemos observar es que la mayor masividad conseguida es con una esfera maciza, esto se debe al hecho de que la esfera es el elemento que ocupa mayor volumen en una menor superficie.

También debemos observar que si nos basamos en perfiles que no sean esféricos la mayor masividad conseguida es 1,5 m⁻¹. Esta masividad la conseguimos en un perfil rectangular cuyos lados tienen una proporción de 2 a 1, y la siguiente será el perfil cuadrado con el que obtenemos una masividad de 2m⁻¹.

La conclusión a la que llego con este punto es el intentar buscar perfiles rectangulares o cuadrados para asegurar el cumplimiento de la masividad siempre que sea posible.

Incluso sin ser macizos podemos observar como el perfil cuadrado nos da una mejor masivida que el perfil en I.

Este principio es fundamental a la hora de permitir que nuestro sistema estructural cumpla con la normativa vigente.

Recordemos que al no estar nuestro perfil recubierto con ningún tipo de material aislante, la normativa no contemplaría el hecho de colocarlo en algunas de las obras en las que fuera aconsejable su uso.

Pero como hemos podido observar anteriormente, si el perfil está macizo cumplimos a la perfección este requisito y, al ser este nuestro caso, cumpliríamos la normativa existente a pesar de no haber aplicado en el sistema ninguna de las formas tradicionales de protección pasiva frente al fuego y las que incluye la normativa.

De este requisito me informó mi tutor del proyecto, comentándome que si llevabas el perfil al parque de bomberos y estos daban su visto bueno por haber cumplido con el requisito de masividad no habría ningún problema en colocarlo en nuestra obra.

2.3.3.-HIPERESTATICIDAD

Es importante hablar de la hiperestaticidad de la estructura a la hora de analizar la resistencia al fuego de los materiales.

Una estructura es hiperestática cuando está en equilibrio pero las ecuaciones de la estática resultan insuficientes para determinar todas las fuerzas internas o las reacciones.

Por regla general, la hiperestaticidad de un sistema favorece un buen comportamiento, ya que permite la redistribución de cargas hasta la aparición de la última rotura plástica por el calor.

La hiperestaticidad en una estructura se consigue construyendo nudos rígidos en todas las uniones de la misma, esto también evitará que las vigas se puedan salir de su apoyo por dilataciones del acero.

Y lo más importante, hará posible que al deformarse los esfuerzos que recibe una parte de la estructura dañada se repartan entre el resto de la estructura garantizando así más tiempo de aguante al colapso.

Al ser los nudos rígidos también la deformación será distinta, el pórtico se deformará más lentamente al tener sus elementos unidos de esta forma entre sí, y esto también nos ayudará a retrasar el colapso frente a una exposición al fuego prolongada.

Todo esto sin tener en cuenta las grandes ventajas que este tipo de nudos le aportan en niveles de resistencias contra sismo y viento a las estructuras.

CAPÍTULO 3.- PROPUESTA DE SOLUCIÓN.

3.1.-SISTEMA ESTRUCTURAL MIXTO PROPUESTO.

Después de estudiar los puntos expuestos anteriormente, y entender cómo funcionan, era el momento de plantear el sistema de estudio.

-El sistema a estudiar consiste en un perfil tubular metálico, que rellenaremos de hormigón y armadura (la función principal de la armadura será evitar la retracción del hormigón y conseguir mayores resistencias en el pilar), en nuestro sistema no usaremos armadura interior ya que para el objetivo que pretendemos conseguir no es necesario controlar los dos parámetros a los que afecta su colocación (resistencias añadidas) y podemos monitorizarlos correctamente sin su colocación.

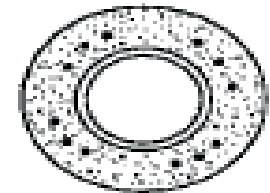
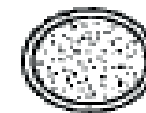
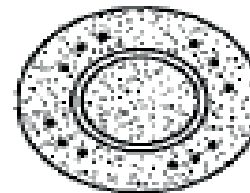
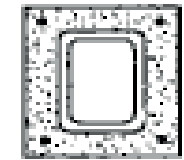
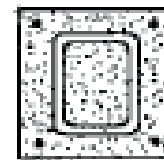
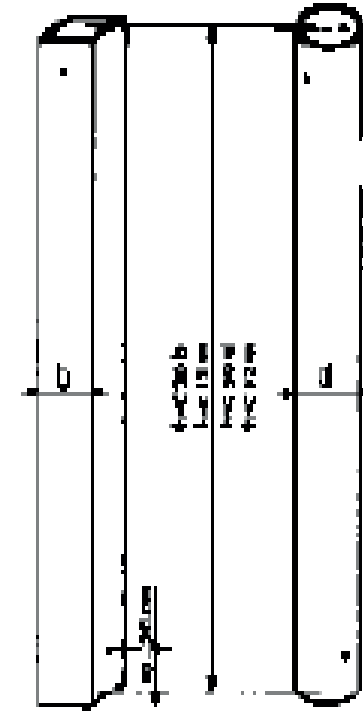
-Antes de rellenarlo con hormigón le realizaremos unas perforaciones al perfil de 6 mm de diámetro en uno de los pilares y de 3 mm de diámetro en el otro.

Las perforaciones se realizarán solo en una cara del perfil y la distancia entre ellas será de aproximadamente tres veces el diámetro del perfil que usemos.

-Ambos extremos del perfil estarán cerrados con dos placas metálicas soldadas, esto evitará que el vapor de agua escape por los poros del hormigón de los extremos y se agoté así antes la protección pasiva y además, nos proporcionará una superficie plana sobre la que apoyar otros elementos estructurales de acero para así poder unirlos de forma hiperestática de forma sencilla.

-Aclarar que al estar el perfil relleno de hormigón y ser macizo cumpliremos con creces la masividad exigida por normativa, con lo que no será necesario recubrir el perfil de ningún elemento protector de los que nos habla la normativa.

Si el ensayo resulta satisfactorio habremos cumplido lo que se propuso, un sistema alternativo de protección pasiva contra el fuego.



3.2.-FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

Tras un estudio de las características descritas en los puntos anteriores y de las propiedades físicas que describiré en el siguiente capítulo, entendí cómo funcionaba este sistema estructural.

El hecho de describir las características físicas en el siguiente capítulo, no es otro que hacer la lectura del trabajo más amena, me resulta más interesante describir primero como funciona el sistema y posteriormente explicar, definir y clarificar las propiedades de la física termodinámica que hacen que esto sea posible.

En el momento en el que se produce un incendio y el foco de las llamas o el calor llega a un pilar metálico (supongamos que no tiene ningún tipo de recubrimiento exterior) pasará lo siguiente:

El acero empezará a aumentar su temperatura en la zona del foco, al no haber ningún material que lo recubra, su elevada conductividad térmica hará que el calor vaya aumentando por toda su sección, al ser uno de los perfiles normalizados con una masividad no demasiado elevada no podemos esperar que el acero tarde mucho en llegar a los 400°C en los que perderá la mitad de sus propiedades mecánicas características lo que conllevará a que el pilar se deforme, doble o colapse con las consiguientes consecuencias para nuestra edificación.

Recordemos que un incendio de características significativas puede llevar a un pilar de acero a temperaturas de colapso en 5 minutos, teniendo en cuenta la carga que soporta este pilar aparte del aumento de temperatura.

Veamos ahora que le ocurriría a nuestro sistema estructural:

El foco de las llamas se centra en cualquier parte de nuestro pilar, el acero empieza a calentarse, pero justo llegados a este punto ocurre algo distinto, por las mismas características por las que el acero del ejemplo anterior llega a aumentar su temperatura tan rápidamente, el

agua de amasado que contiene el hormigón entrará en ebullición y empezará a moverse por los poros y huecos de la estructura del hormigón buscando una salida. Esto no ocurre a los 100°C a los que el agua entra en ebullición por el simple hecho de que antes debe calentar la cara del perfil metálico, así que la temperatura medida en la cara del perfil en el momento en el que el agua empieza a cumplir su función refrigerante será distinta, superior.

La salida serán las perforaciones realizadas a nuestro perfil tubular metálico.

Este fenómeno conocido como entalpía, será el que evite que nuestro perfil alcance temperaturas de pérdida de resistencia, colapso y que haya deformaciones y dilataciones importantes.

“Al llegar a este punto de estudio del sistema solo vi una posible salida, realizar por mi propia mano el ensayo. Pensé que iba a ser un poco complicado, pero conforme lo propuse, las cosas resultaron mucho más asequibles a la hora de prepararlo y conseguir el resultado esperado.”

CAPÍTULO 4.-RELACIÓN TEÓRICA DE NUESTRO SISTEMA.

4.1.-PRINCIPIOS FÍSICOS QUE ACTUAN EN NUESTRO SISTEMA ESTRUCTURAL.

Empezaremos este punto explicando justamente el último concepto comentado, la entalpía:

La entalpía es un concepto de física termodinámica que se puede definir como la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.

Permite expresar la cantidad de calor puesto en juego durante una transformación isobárica.

Un proceso isobárico es un proceso termodinámico que ocurre a presión constante. La Primera Ley de la Termodinámica, para este caso, queda expresada de la siguiente forma:

$$\Delta U = Q - P\Delta V,$$

Donde:

Q = Calor transferido.

U = Energía interna.

P = Presión.

V = Volumen.

Fórmula de primera ley de la termodinámica.

La primera ley de la termodinámica propuesta por Nicolas Léonard Sadi Carnot (1766-1832), expone que la energía no se crea, ni se destruye, sino que se conserva. Entonces esta ley expresa que, cuando un sistema es sometido a un ciclo termodinámico, el calor cedido por el sistema será igual al trabajo recibido por el mismo, y viceversa.

La relación de estos conceptos con lo ocurrido en nuestro sistema es la siguiente: “Al calentar un cuerpo, se “gasta” energía, las partículas del cuerpo incrementan su actividad lo que se traduce en un incremento del movimiento.”

Esto es una transferencia de energía, pero el agua de amasado del hormigón reacciona antes de que el acero siga aumentando su temperatura. Reacciona entrando en ebullición (tarda un poco más en llegar a este estado por el tiempo que se tarda en transferir la energía calorífica de un cuerpo a otro, una media de 130°C en vez de los 100° a los que el agua entra en ebullición).

Al entrar en ebullición, el agua de amasado empieza a moverse entre los poros del hormigón buscando los orificios de que taladramos en el perfil tubular como orificios de salida.

Todo esto es una transformación de energía, al aplicar energía calorífica y entrar el agua en ebullición, esta se convierte en energía mecánica, lo que hace que la temperatura que alcanza el tubo de acero se estabilice a aproximadamente 230°C y, por consiguiente, no llegamos a la temperatura necesaria para que el acero pierda características mecánicas importantes, incluyendo que al estar relleno de hormigón las dilataciones están reducidas a prácticamente nada y que no se va a producir prácticamente ninguna deformación.

En definitiva, hasta que toda el agua de amasado del sistema se evapore y salga por los orificios nuestro sistema mantendrá una temperatura constante durante todo el incendio e igual de importante, no transmitirá altas temperaturas a los elementos a los que esté conectados o que

estén adyacentes o en sus alrededores.

4.2.-RELACIÓN CON EL SISTEMA DE MODELOS PARCIALES DE HEINZ HOSSDORF

Heinz Hossodrf fue un ingeniero e investigador que siempre trabajó en campos poco estudiados, siendo el campo que me interesa tratar en este trabajo la teoría de modelos parciales en el que evolucionó el ensayo sobre modelos físicos de forma científica aportando innovaciones de relevancia mundial.

Partiendo del conocimiento de la naturaleza, de sus Leyes y del comportamiento de todo cuanto esta produce —seres vivos, plantas, rocas, agua, o sustancias—, estudió las leyes de semejanza por las cuales se rige, aplicándolas al ensayo sobre modelos físicos reducidos.

Tras sus investigaciones científicas, Hossdorf niega la semejanza geométrica al igual que la niega la propia naturaleza no construyendo seres geoméricamente semejantes.

Su célebre comparación entre el elefante y el saltamontes deja patente cuán imposible sería que existiera un saltamontes del tamaño de un elefante sin que éste cambiara para ello de forma o de proporciones entre sus partes. Y es que, como decía Hossdorf: “Cuanto más pequeña es una forma sustentada, tanto más fina relativamente puede ser la estructura que sustenta su peso”.

Pero Hossdorf no se limitó a asumir las sabias observaciones de Galileo, conocidas como la ley del cuadrado-cubo, por la cual, en el siglo XIX, enunció que el peso de un cuerpo crece con el cubo de sus dimensiones mientras que las secciones que soportan las cargas crecen con su cuadrado. Porque la Naturaleza no aísla un solo aspecto físico para construir un nuevo ser vivo, sino que, en este nuevo diseño, intervienen todas y cada una de sus cualidades y características.

Por eso, el tamaño y la forma de las alas de un colibrí son diferentes a las del águila, también tienen diferentes tamaños sus corazones, siendo diferentes sus ritmos cardiacos, diferentes las secuencias dinámicas de sus movimiento, diferentes las necesidades de generar articulaciones y entramados sanguíneos, diferentes las voces que salen de sus tesadas gargantas.

Esto se aplica a nuestro ensayo de la siguiente forma: no sabíamos si usando la misma distancia entre orificios, el mismo tipo de hormigón, el mismo tipo de acero, y las mismas proporciones que se realizaron en el primer ensayo iban a ser funcionales en el que yo iba a realizar.

Así que decidimos aplicar algunos cambios:

A) El ensayo que realizó mi tutor, era de un pilar de 4 metros de alto y 200 mm de diámetro, el hormigón que utilizó para rellenar el perfil fue de tamaño máximo del árido de 20 mm, al ser mi perfil de ensayo de solo 1,40 m de altura y 140 mm de diámetro, decidimos que el tamaño máximo del árido sería de 10 ó 12 mm y que el orificio de salida sería de 3 mm en vez del de 6 mm con el que se realizó el primer ensayo.

B) El tamaño máximo del árido se cambió para que los poros internos del hormigón no fuesen demasiado grandes y la perdida de agua de amasado no fuese excesiva y por lo tanto el perfil perdiese su protección pasiva frente al fuego con demasiada rapidez.

C) Más tarde al conseguir el perfil metálico para mi ensayo, vi que se podían hacer dos probetas y decidí poner en uno de ellos los orificios de 6 mm también para comprobar si había diferencia entre ellos y como afectaba la diferencia de tamaño entre los tubos, si esta afectaba a la pérdida de agua de amasado, al tiempo de estabilización de la temperatura máxima y para observar, si existía algún factor que no había tenido en cuenta en el proceso teórico de la solución estructural propuesta.

D) La distancia entre las perforaciones de la pared del perfil se mantuvieron, serían de tres veces el diámetro del perfil, al ser una distancia proporcional a uno de los elementos, creímos que era bastante probable que funcionase y decidimos conservarla.

CAPÍTULO 5.-DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

Después de haber estudiado todos los principios físicos que actuaban en el sistema y como lo hacían había llegado el momento de ver con mis propios ojos si funcionaba, para ello decidí recrear el ensayo en la nave de un amigo de la familia que tuvo a bien permitirme disponer de ella para realizar el ensayo.

5.1.-MATERIALES Y HERRAMIENTAS

A) MATERIALES USADOS EN EL ENSAYO

-Perfil tubular de acero ISO EN 10255



-Tubos soldados S/EN-10225 tipo L2, negro galvanizado con extremos lisos, longitud 2800 mm (dividido en dos probetas), y 140 mm de diámetro con un espesor de pared de 4 mm

-Mezcla de hormigón preparada para añadirle el agua hormigrand HS-25.



-Tres planchas quemadoras con soporte propio.



- Agua de amasado
- Chapa de acero.



- Gas butano.



B) HERRAMIENTAS UTILIZADAS

- Amoladora de disco.



- Taladradora portátil.



- Brocas de 3 y 6mm de diámetro.



-Pistola medidora de temperatura laser.

Etekcity 1080 Termómetro Infrarrojo Digital Láser IR Sin Contacto, Pistola de Temperatura -50 °C a 550 °C.



-Recipiente para amasar el hormigón.

-Pie de rey.

-Flexómetro.



-Banco de trabajo móvil para trabajar con el tubo.



5.2.-PREPARACIÓN DEL ENSAYO.

A) ZONA DE ENSAYO

El mayor problema que se nos presentó a la hora de plantear la realización del ensayo fue, sin duda el poder disponer de un sitio en el que llevarlo a cabo.

Al final, pudimos conseguir disponer de una parte de una nave industrial despejada para poder trabajar con nuestro sistema.

B) OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DEL PERFIL TUBULAR PARA EL ENSAYO

El perfil para el ensayo se consiguió antes que la zona en la que realizarlo, así que decidimos empezar a prepararlo antes de trasladarlo a otro lugar, pero sin llegar a hormigonarlo, por no creer conveniente moverlo mientras fragua debido al aumento de peso del tubo hormigonado y nuestra limitada capacidad de transporte de peso y con los posibles efectos de mover el hormigón durante las primeras horas de fraguado como decantación de la mezcla.

En primer lugar, el perfil no fue comprado en ese momento, casualmente, un familiar que trabaja como soldador se había hecho con uno un par de meses antes y no lo había llegado a usar, así que después de ponerme en contacto con el fabricante y obtener sus especificaciones técnicas, y decidir que resultaba perfectamente válido para probar la teoría, empezamos con su preparación.

Al recoger el perfil decidimos tratarlo primero con la amoladora de disco para eliminar una zona que se había oxidado.

Así que, colocamos el perfil en la mesa de trabajo y eliminamos el óxido producido por acopiarlo en una zona indebida.

Este trabajo nos llevó todo un día.



Lo siguiente fue realizarle al perfil las perforaciones y limpiarlo para asegurarnos que no había restos orgánicos dentro del mismo que pudieran ralentizar o parar por completo el fraguado del hormigón.

Primero realizamos las medidas oportunas para la colocación de las perforaciones, se colocarían cada tres veces el diámetro del perfil; cada 42 cm, dejando en cada uno de los extremos la misma cantidad de acero, 7 cm.





Seguidamente, volvimos a limpiarlos por dentro y los guardamos en la nave de almacenaje.

Esta segunda parte de la preparación del perfil para su hormigonado nos supuso otro día de trabajo.

El siguiente día, el del hormigonado, se le hizo la última preparación al tubo, se le soldó la tapa de acero de la parte inferior del perfil.





C) HORMIGONADO DEL PERFIL Y ESPERA DEL FRAGUADO

El tercer día de preparación del ensayo fue el día de hormigonar el perfil.

Aquí nos encontramos con la primera incidencia en el ensayo. No tuvimos opción a conseguir una hormigonera para el hormigón, así que hubo que amasarlo a mano, lo que conllevó una mayor cantidad de agua de amasado para que fuera trabajable y tuviese la consistencia requerida para rellenar el tubo y para que el ensayo funcionase correctamente.

Al haber valorado anteriormente esa posibilidad, llegué a la conclusión de que no era un factor determinante, yo pretendía conseguir una temperatura estable en el sistema, no iba a comprobar su resistencias características o el aumento de las mismas al estar relleno de hormigón a los esfuerzos a los que está sometido un pilar en cualquier edificación.

De haber sido de otra manera, no podría haber hormigonado ese día, pero después de esta conclusión, decidí continuar con el hormigonado del sistema.

Empezamos a hormigonar de forma manual, y a picar el hormigón con una barra de acero corrugado para eliminar posibles burbujas de aire y para que las distintas tongadas que rellenaban el tubo (eran tres), formaran una sola lo más homogénea posible.

Para el proceso de picado el hormigón, decidí que usaría las 42 veces que establece el ensayo del cono de Abrams y en espiral tal como se indica en el mismo, de dentro hacia fuera.

En las siguientes imágenes se muestra el proceso de hormigonado de ambos perfiles tubulares con las perforaciones pertinentes ya realizadas.





Al añadir el hormigón a los perfiles podemos observar como por los orificios ya sale un poco de agua de amasado del hormigón.





Después de hormigonar los dos perfiles, solo quedaba esperar los 28 días correspondientes al fraguado y realizar por fin el ensayo.

La decisión de esperar los 28 días fue algo controvertida. Barajamos la opción de a los 10 días realizar el ensayo, pero al final, al ser la preparación del sistema algo para lo que no disponíamos de equipo especializado, el esperar 28 días nos pareció buena idea, al menos dejábamos que el hormigón alcanzase su máxima resistencia, y si por cualquier problema a los 10 días no había alcanzado la que debería, a los 28 habría más probabilidades de que la tuviese.

D) VIGILANCIA Y CONTROL DEL SISTEMA

Las siguientes semanas lo que se hizo fue contactar con quien nos iba a alquilar los quemadores para fijar la fecha exacta y vigilar que no ocurriese nada extraño durante el proceso de fraguado del hormigón.

Así que fui realizando visitas periódicas a la nave para ver que tal iba, lo único notable fue la retracción distinta en los dos tubos.

Uno tuvo una retracción de 0,5 cm y el otro de 1,5 cm. Probablemente debido al carácter manual de nuestro hormigonado y a la falta de herramientas para conseguir exactamente la misma consistencia en todo el hormigonado.



Retracción del hormigón de 1,5 cm.



Retracción del hormigón de 0,5 cm.

Les planteé el problema a mis tutores y tres posibles soluciones:

- La primera, hormigonar la parte que se había retraído.
- La segunda, dejar el perfil tal y como estaba y soldarle la tapa directamente.
- La tercera, cortar la parte de perfil sobrante y soldarle seguidamente la tapa superior.

Mi análisis de las soluciones fue el siguiente: la primera solución podría servir, pero implicaba otra espera para el fraguado y endurecimiento del hormigón, y sinceramente me parecía poco práctico y un esfuerzo demasiado grande para poder obtener el mismo resultado de otra forma distinta, así que decidí barajar las otras dos opciones.

La segunda opción la descarté en el mismo momento en el que empecé a planteármela, me parecía demasiado peligroso realizar un ensayo que en principio, si salía mal, lo único que ocurriría es que el sistema alcanzaría una temperatura mayor de la que se estimaba y todo el trabajo solo habría servido para demostrar que el sistema fallaba en su formulación teórica o en su montaje y puesta en práctica; lo que al fin y al cabo, seguía siendo una conclusión útil si llegas a ella y al por qué de la misma

Pero el hecho de tener una cámara de aire implicada en la ecuación del fallo del sistema me preocupaba bastante.

Y si, hipotéticamente hablando, la soldadura no se había realizado correctamente, el sistema fallaba de tal forma que toda la presión del agua movida por la energía calorífica se concentraban en esa cámara de aire y de repente la tapa salía despedida con la fuerza que eso puede conllevar y sus respectivas consecuencias, para con la propiedad que me habían cedido para el ensayo con suerte, para alguna de las personas que me han ayudado durante todo este tiempo con la peor de la misma.

Aunque el supuesto sea el mayor cúmulo de factores y negligencias que se pueda llegar a dar, y estaba bastante seguro de que, que ocurriese

era hartamente improbable, por no decir casi imposible; no estaba dispuesto a arriesgarme. Ni estaba dispuesto ni quería hacerlo.

Así que después de esta amalgama de divagaciones y supuestos teóricos me decidí por la tercera opción, no supondría un tiempo significativo y el sistema continuaría funcionando exactamente igual en teoría.

E) REALIZACIÓN DEL ENSAYO.

Finalmente llegamos al momento decisivo, comprobar si el sistema funciona realmente.

Los quemadores de los que disponíamos eran del mismo modelo, pero no sabía que temperatura alcanzaban ni si nos podía proporcionar la temperatura que necesitábamos para realizar el ensayo. Así que el primer paso fue el colocar dos pletinas metálicas del mismo material y características del perfil de nuestro ensayo, y observar en cuanto tiempo conseguía estabilizarse y tener la máxima temperatura.

Procedimos a quemar la pletina durante 18 minutos, el tiempo del ensayo fue menor porque se estabilizó a los 7 minutos y 30 segundos aproximadamente y ya no aumentó la temperatura en el resto del tiempo que se le estuvo aplicando la llama.

La temperatura alcanzada por las dos pletinas colocadas fue de 500°C, lo que nos permitía comprobar si nuestro sistema funcionaba, puesto que debíamos evitar que la temperatura fuera mayor que unos 270 °C aproximadamente, que era el valor que teníamos preestablecido; y por supuesto, que no aumentase en ningún momento de 400 °C o el ensayo no habría funcionado.

Seguidamente, colocamos los quemadores en fila.

Previamente habíamos decidido apoyar los perfiles directamente en los quemadores para no tener que fabricar un soporte auxiliar para el en

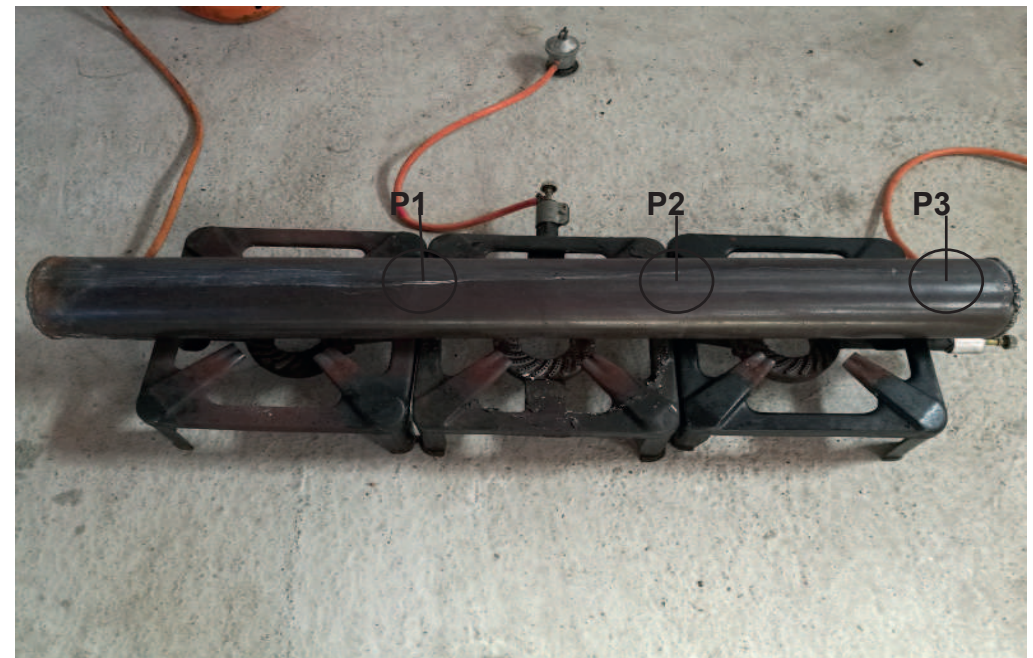


sayo.

La decisión fue tomada por pura comodidad y rapidez pero no contamos con un pequeño detalle, al estar el fuego tan cerca del tubo, las llamas ascendían por las paredes del mismo y no podíamos tomar la medida de la temperatura en el mismo foco del fuego porque cambiaba constantemente al subir el fuego y bajar. Y bajar la llama del quemador no era una opción viable debido a la intención de nuestro ensayo.

La solución fue simple, tomar la medida en puntos intermedios que coincidían con las perforaciones por las que debía salir el agua de amasado.

A estos orificios donde tomamos la medida se les asignó un número para poder compararlos más tarde en la gráfica entre ellos con los resultados obtenidos, serían: P1, P2 Y P3





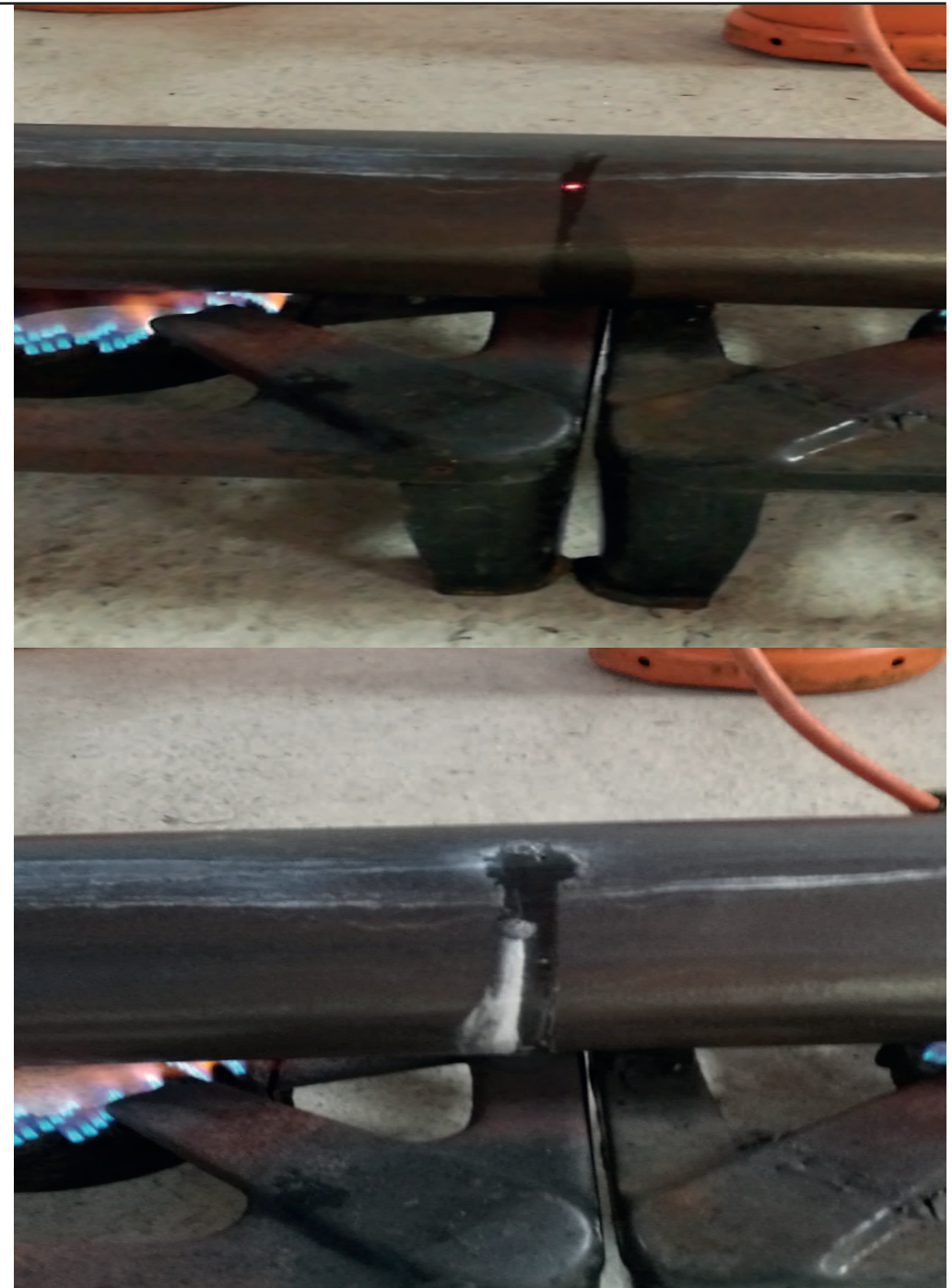


Funcionó. A pesar de que al salir vapor de agua por los orificios que se condensaba y caía en el perfil lo que provocaba un descenso en la temperatura de los mismos unos grados.

Pero como lo que buscábamos confirmar era la estabilidad de la temperatura, no nos preocupaba demasiado trabajar con ese par de grados de diferencia, pues seguíamos pudiendo medir a que temperatura se estabilizaba el perfil y al acabar el ensayo teníamos la opción de medir la temperatura directamente en la cara del perfil que había estado en contacto con el fuego, y en la que estaban las perforaciones, pudiendo así conseguir más conclusiones si eran diferentes entre sí.

El intervalo de tiempo entre cada medida de temperatura fue de 3 min.

A los 5 minutos 38 segundos, empezó uno de los orificios a expulsar agua de amasado en el primer tubo, y a los 27 minutos la temperatura se estabilizó en ese orificio y en los demás también, en los dos perfiles, excepto en uno de los orificios, el que menos temperatura alcanzó en los dos perfiles, que se estabilizó en el minuto 39, solo 9 minutos antes de finalizar el ensayo. Y aun así, la temperatura final en la cara del perfil que estaba en contacto directo con las llamas fue la misma que en las otras dos.

















Después de 48 minutos de ensayo, movimos el perfil y dejamos que se fuera enfriando mientras preparábamos el otro para realizarle el ensayo, esta vez el de las perforaciones de 6 mm.

Antes de colocar el segundo perfil, medimos la temperatura de las caras superior e inferior del perfil:

-Cara inferior (en contacto con las llamas): máxima de 240 °C y mínima de 220°C.

-Cara superior (cara en la que estaban las perforaciones: máxima 149,7 y mínima 120,2°C.

Estas medidas despertaron mi curiosidad, ¿cómo era posible que hubiese tal diferencia de temperatura entre las dos caras del perfil?, ¿habría habido algún factor determinante en este proceso que no tuvimos en cuenta?.

Decidí resolverlo más adelante, en ese momento habíamos conseguido unos resultados dentro de lo esperado y teníamos que realizar el ensayo en el otro perfil, así que nos pusimos a ello.

Segundo perfil. El ensayo de este fue exactamente igual que el otro, la única diferencia fue que el ruido había del agua saliendo por el orificio había disminuido de forma drástica y, de nuevo, era algo que anotar y valorar en otro momento en el que el ensayo estuviese completado.

Al finalizar este ensayo, tomamos de nuevo las mismas medidas de temperatura que en el anterior.

-Cara inferior (en contacto con las llamas): máxima de 240 °C y mínima de 218°C (esta temperatura se mantiene estable con la medición anterior)

-Cara superior (cara en la que estaban las perforaciones: máxima 129,4 y mínima 111,7

De nuevo vemos la diferencia de temperaturas entre una cara del perfil y la contraria, con un pequeño matiz, en este perfil la temperatura de

la cara que tiene los orificios es algo menor que en el otro, otro punto a valorar en las conclusiones que obtener de todo este proceso.

-Por último, decidimos pesar ambos perfiles, para ver la cantidad de agua de amasado habían perdido durante el proceso de quema y valorar los resultados obtenidos.

Previamente habíamos pesado los perfiles antes de empezar el ensayo. Los resultados fueron:

PERFIL CON PERFORACIONES DE 3 MM:

-Peso inicial: 62,5 kg

-Peso final: 60,3 kg

PERFIL CON PERFORACIONES DE 6 MM:

-Peso inicial: 62 kg

-Peso final: 59,9 kg

CAPÍTULO 6.- RESULTADOS DEL ENSAYO

Con los resultados obtenidos elaboramos las siguientes gráficas y tablas de aumento de temperatura con respecto al tiempo de ensayo.

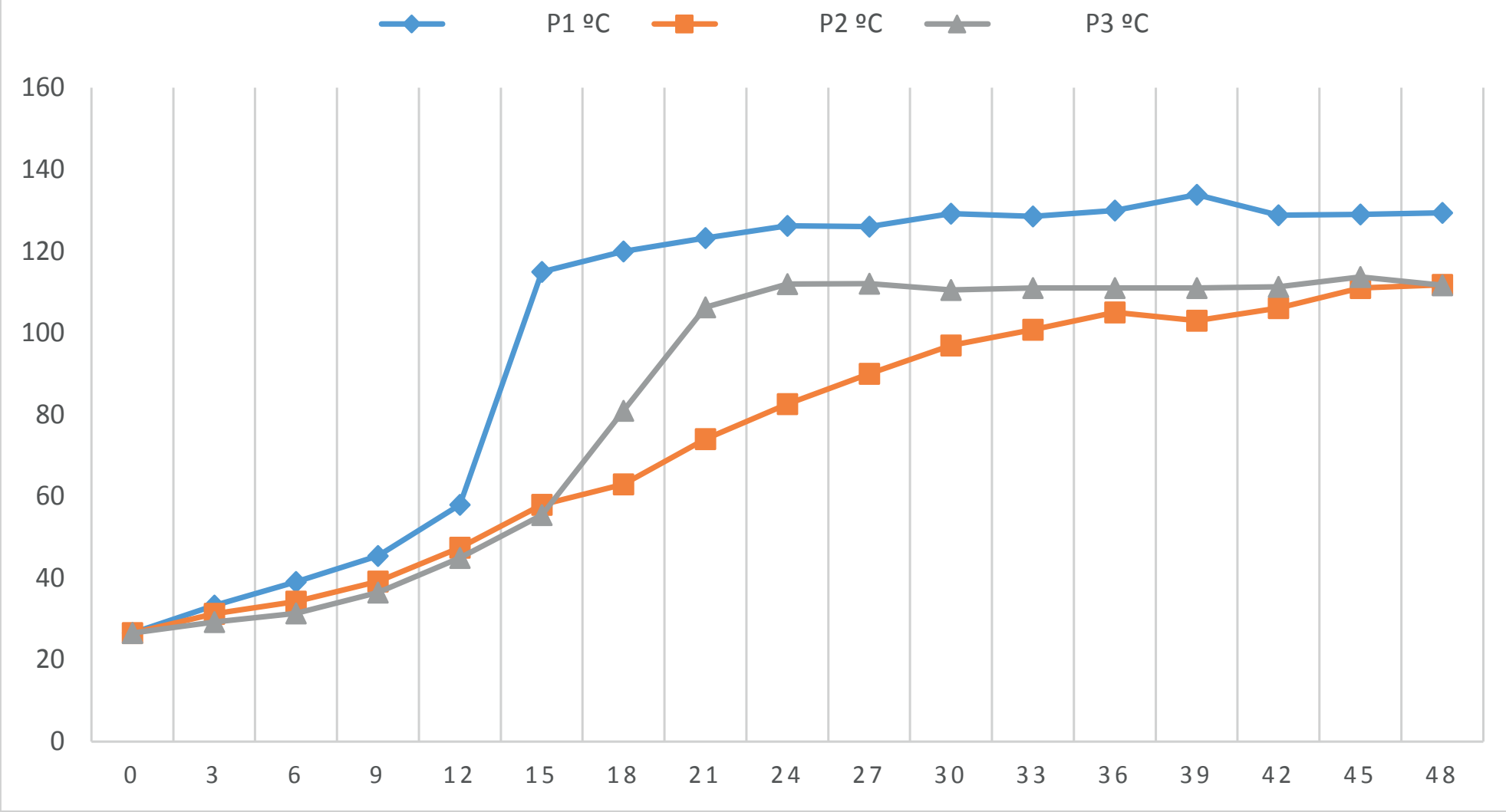
PERFIL CON PERFORACIONES DE 3 mm.

Tiempo (min)	P1 °C	P2 °C	P3 °C
0	26,6	26,6	26,6
3	31,7	31,7	30,7
6	51,1	35,2	35,6
9	45,3	41,9	35,6
12	59,9	46,4	40
15	75,8	54	52,4
18	110	64	109,8
21	136,9	74,8	112,8
24	138,9	90,5	116,1
27	146,8	95	121
30	151,6	101,9	126
33	153	102,1	123
36	153	106	130
39	151,3	109	129,2
42	149	112,8	129,2
45	151	115,7	129,2
48	149,7	120,2	131,1

PERFIL CON PERFORACIONES DE 6 mm.

Tiempo (min)	P1 °C	P2 °C	P3 °C
0	26,6	26,6	26,6
3	33,3	31,3	29,3
6	39,1	34,3	31,4
9	45,4	39,2	36,5
12	58	47,5	45
15	115	58	55,5
18	120	63	81
21	123,2	74	106,3
24	126,2	82,6	112
27	126	90	112,1
30	129,2	97	110,5
33	128,5	100,8	111
36	130	105	111
39	133,8	103	111
42	128,8	106,1	111,3
45	129	111	113,7
48	129,4	111,8	111,7

PERFIL CON PERFORACIONES DE 3 MM.



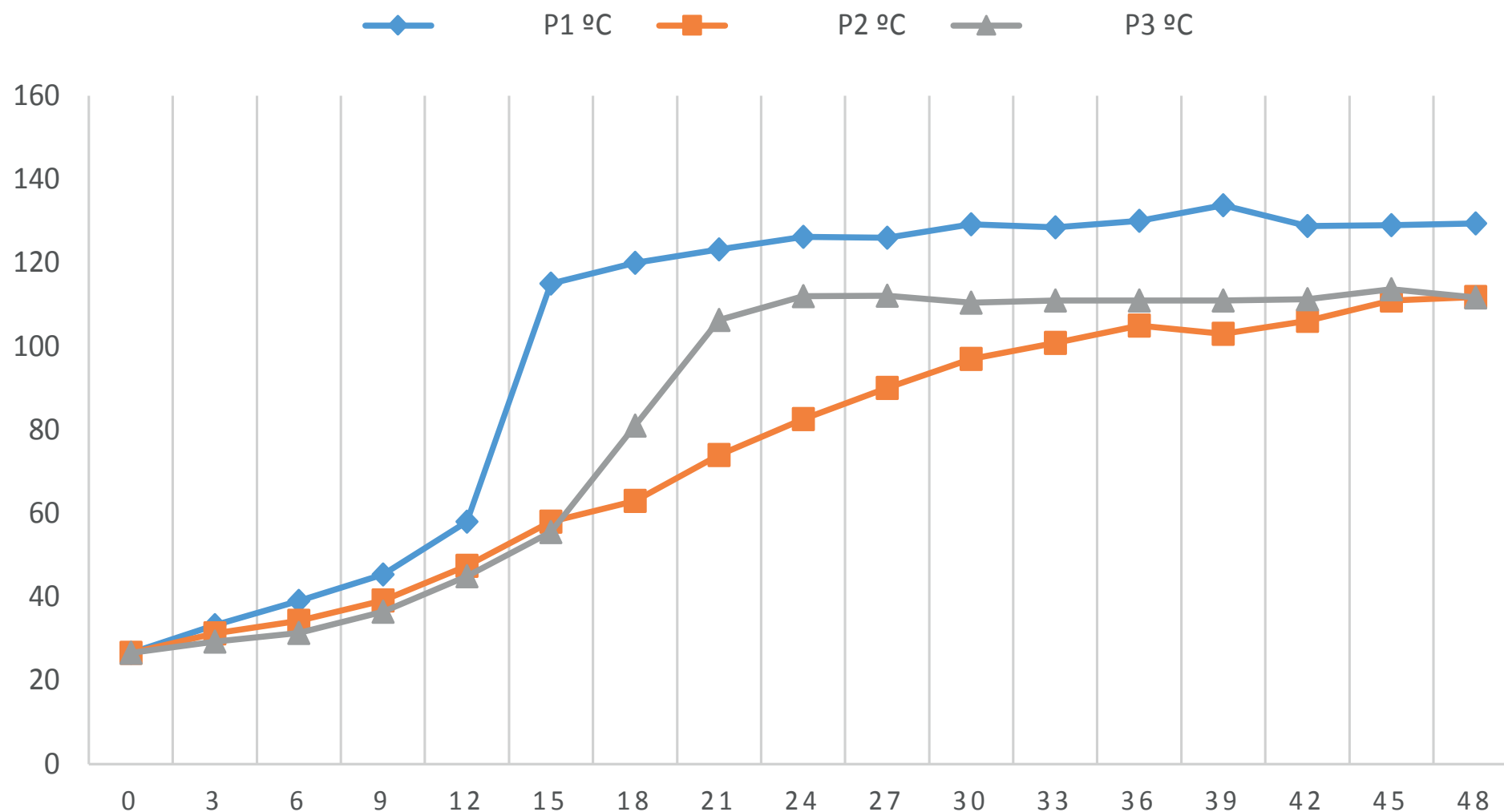
INICIO DE REACCIÓN DE PERFORACIONES

P1- 5,38 min - 37,6°C
P2- 9 min- 37,2°C

P3- 13,52 min - 37,1°
P4- 13,40 min- 37,4°

PESO INICIAL: 62,5 kg
PESO FINAL: 60,3 kg

PERFIL CON PERFORACIONES DE 6 MM



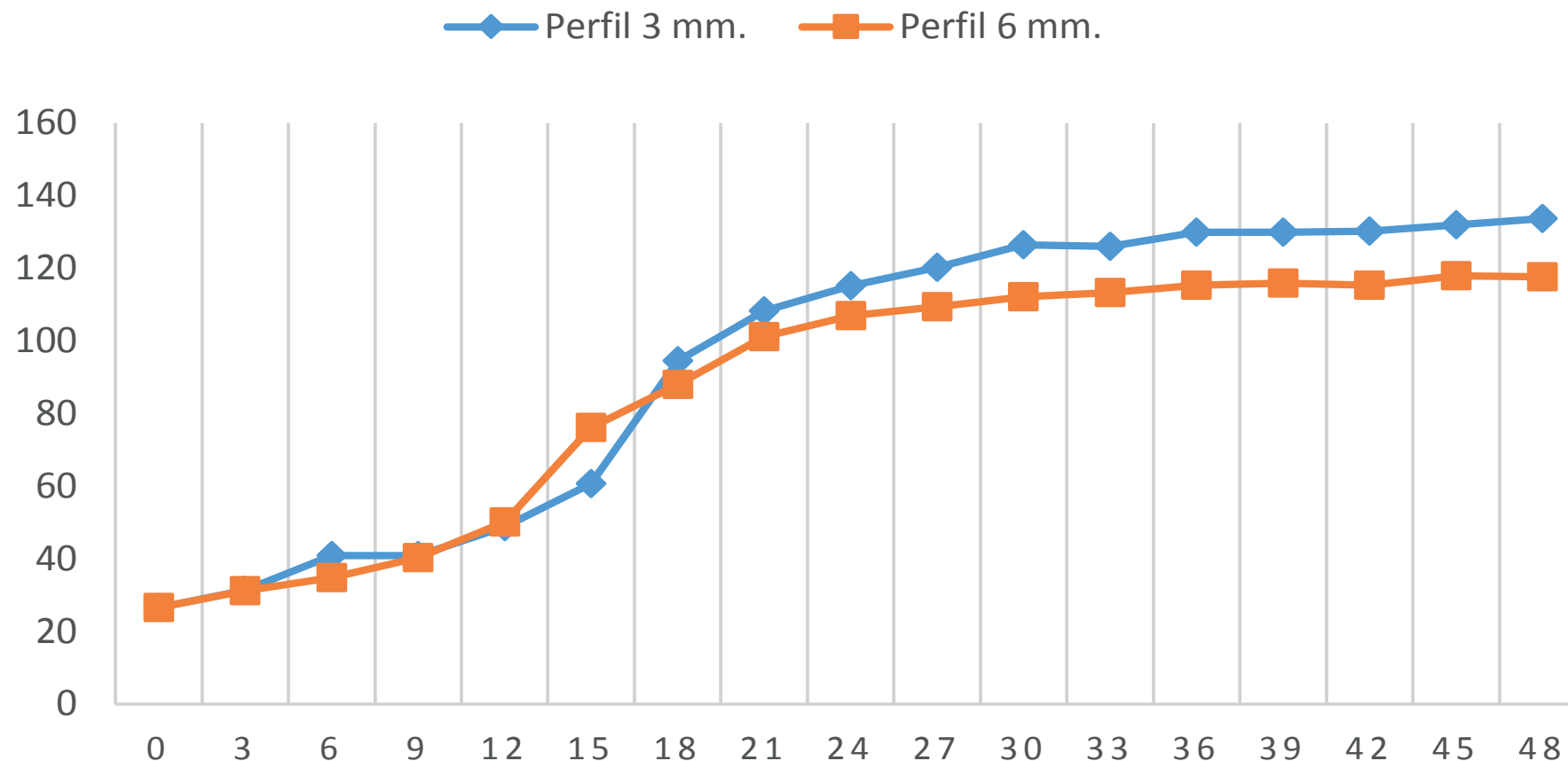
INICIO DE REACCIÓN DE PERFORACIONES

P1- 6,58 min -40,4°C
P2-6 min- 34,3°C

P3-10,47 min- 40,2°C
P4-11,42 min- 35,5°C

PESO INICIAL: 62,0kg
PESO FINAL: 59,9 kg

COMPARATIVA DE AMBOS PERFILES.



Peso perdido al realizar el ensayor:
 Perfil 3 mm: 2,2 kg
 Perfil 6 mm: 2,1 kg

Temperatura media alcanzada en ambos perfiles:
 240°C en ambos perfiles en la cara expuesta al fuego
 Temperatura en cara con las perforaciones:
 Perfil 3 mm: 133,7°C Perfil 6 mm: 117,6°C

CAPÍTULO 7.- CONCLUSIONES

En este capítulo trataremos varios aspectos del ensayo.

7.1.-RESULTADO GLOBAL

El resultado final del ensayo, en el que se pretendía comprobar que gracias al sistema la temperatura del perfil de acero no llegaba a alcanzar la temperatura crítica en la que pierde grandes resistencias (400°C) fue completamente satisfactorio.

Al acabar el ensayo y darle la vuelta al perfil que había sido objeto del ensayo, se midió la temperatura a lo largo del mismo, y se pudo observar que era de 240° C, si tenemos en cuenta que el primer orificio por el que empezó a salir vapor de agua se estabilizó a los 21 minutos del ensayo y se mantuvo estable durante los 27 minutos restantes del mismo, tenemos que a partir de 240 °C no aumenta la temperatura de nuestro sistema, lo que nos corrobora la hipótesis inicial que se describía en el capítulo 3 del presente trabajo, que la energía calorífica se transforma en energía mecánica al entrar en ebullición el agua de amasado y empezar a moverse entre los poros del hormigón ya endurecido.

Resaltar que para que esto suceda las perforaciones son imprescindibles, puesto que sin ellas, lo que estaríamos creando sería un nuevo esfuerzo dentro del pilar al no tener orificio de salida el agua, esta empujaría la pared del perfil, y al no poder salir al exterior, la temperatura seguiría aumentando con la consiguiente pérdida de características mecánicas del perfil y añadiéndole el esfuerzo del agua contra las paredes del sistema.

Por lo tanto tenemos un sistema eficaz que nos proporciona la capacidad de no tener que recubrir de ningún elemento el perfil metálico así como el proporcionarle al pilar que queramos colocar en obra más resistencias mecánicas al estar relleno de hormigón.

7.2.-ASPECTOS NO ESPERADOS.

Un efecto del que no se esperaba que fuera relevante demostró serlo, el hecho de que se supuso que el agua de amasado que fuera expulsada por las perforaciones no reduciría la temperatura de este por convección fue algo que se discutió con anterioridad al ensayo, y que pensamos sería tan nimio que no merecía la pena tenerlo en cuenta vista ya la efectividad de los otros factores del ensayo que entraban en juego.

Pero a la hora de medir la temperatura tuvo mucho que ver, observemos que la mayor temperatura que alcanza el perfil en su parte superior es de 153°C cuando, a esta temperatura, el perfil estaba por la parte posterior a 240°, y no solo eso, duró 27 minutos a esta temperatura estando ya estabilizado, por lo tanto podemos afirmar que el agua de amasado al ser expulsada por los poros en forma de vapor de agua (vemos en las imágenes como se condensa parte de este mismo agua), enfría toda la parte superior del perfil, siendo la temperatura de este unos 110 °C inferior a la de la parte del perfil que estaba bajo efecto directo de las llamas.

Esto nos proporciona un detalle importante a tener en cuenta, si el perfil estuviese cerca de otro material en la edificación que pudiese ser susceptible de transmitir la temperatura de forma dañina o peligrosa, se debería colocar en esa parte los orificios, puesto que al estar algo más de 100°C por debajo de la estabilización del fuego, transmitiría menos calor a los elementos adyacentes ayudando de forma pasiva a combatir el incendio y sus consecuencias.

7.3.-DIFERENCIAS ENTRE LAS PERFORACIONES.

El hacer perforaciones de dos diámetros distintos no es fortuito, esto nos permitiría según los resultados de nuestro ensayo realizar varias comprobaciones.

La primera, era ver si influía en el momento en el que el sistema empezaba a funcionar, observando el momento en el que la perforación empezaba a expulsar vapor de agua, pudimos comprobar que apenas variaba de uno a otro, solo 1 minuto de diferencia.

La diferencia más notable fue sin duda el ruido, en el perfil con las perforaciones de menor tamaño, el vapor de agua expulsado hacía mucho más ruido que en el de las perforaciones de 6 mm. Es más, al valorar esto en el momento, pensé que estaba expulsando más cantidad de vapor de agua, aunque erré en mi suposición.

La forma de comprobarlo fue sencilla y ya formaba parte de la planificación de nuestro ensayo, pesar los perfiles antes y después de realizar el ensayo.

El perfil con las perforaciones de 3 mm pesó 62,5 kg al inicio del ensayo y al finalizar pesó 60,3 kg, perdió un total de 2,2 kg entre agua y sedimentos que eran arrastrados por la misma.

El perfil con las perforaciones de 6 mm pesó 62 kg (recordemos que este perfil había sufrido una retracción de un centímetro mayor que el anterior y que la cantidad de agua añadida era un poco menor) y al terminar el ensayo pesaba 59,9 kg, con lo que había perdido un total de 2,1 kg.

La pérdida ha sido prácticamente la misma, un valor de 100 gramos de diferencia, no era algo significativo.

Por lo tanto, tenemos como conclusión que cualquiera de los dos nos habría servido de igual forma, y que el sistema funciona igual de bien tanto con el primero como con el segundo.

Si observamos las gráficas y las tablas de aumento de temperatura con respecto al tiempo podemos ver que los dos perfiles se estabilizan al mismo tiempo, pero hay una pequeña diferencia:

-En el perfil de 6 mm, al ser mayores los orificios, la temperatura de estabilización de la pared que tiene los orificios es unos 20°C menos que la del tubo de 3 mm, algo que quizá se deba a la mayor dispersión del vapor de agua por el perfil al ser el orificio el doble.

Si nos fijamos en la diferencia de ruido y visual al ver como en el perfil de 3 mm el vapor era expulsado con mayor agresividad esta teoría cobra sentido. Al ser expulsado de forma menos brusca, el vapor de agua se condensa en mayor parte de la superficie del perfil bajando su temperatura unos grados más que en el perfil con las perforaciones de diámetro menor.

7.4.-FALLOS EN LA EJECUCIÓN (POR QUÉ SIEMPRE ENTRABA EN FUNCIONAMIENTO EL MISMO ORIFICIO EN PRIMER LUGAR)

Hay un detalle importante sobre el que llamar la atención. Como se explicó con anterioridad, este ensayo ha sido algo “casero”, no disponíamos de un medio que más tarde demostró debía ser considerado importante en extremo, una amasadora de hormigón.

Al estar hecho y vertido a mano el hormigón, notamos diferencias importantes en las tongadas, no al verterlas o al hacerlas propiamente, sino al realizar el ensayo.

En los dos perfiles podemos observar que es la perforación que queda justo encima de la primera tongada la primera en la se observa el funcionamiento del sistema.

El perfil fraguó y endureció estando vertical sobre esa tongada, así que cabe la posibilidad de que al unirse las dos tongadas con el añadido del peso de la tercera tongada y la gravedad terrestre, el hormigón de la parte inferior quedará más compacto que el resto, y que la parte intermedia fuera en la que se consiguió la mejor consistencia y la cantidad de poros adecuada, puesto que al entrar en funcionamiento mucho antes que los otros orificios, podemos suponer que los poros de su composición eran los más adecuados tanto para su propia parte del perfil

como para la primera tongada, cuya compactación debió ser demasiado ya que la temperatura en la parte superior apenas ascendió a más de 50°C y el orificio apenas expulsó vapor de agua de amasado.

En conclusión, a pesar de este percance debido a nuestra inexperiencia en realización de ensayos y falta de suposición de posibles errores, el ensayo resultó un éxito, aunque de esta parte en concreto debemos tener en cuenta un punto muy importante:

-A pesar de su correcto funcionamiento, la consistencia continua en el sistema es muy importante, para mantener un funcionamiento constante del mismo.

-Si variamos la consistencia del hormigón, podremos retrasar o aumentar el tiempo en el que empiezan a expulsar vapor de agua las perforaciones aunque el sistema siga en funcionamiento, lo que puede aumentar las resistencias del perfil hormigonado y, con el cálculo correcto, que dure el mismo tiempo en funcionamiento que uno con más agua de amasado.

La diferencia radica en el camino que el agua tendría que recorrer entre los poros del hormigón, aunque como se explica antes, teniendo una salida, la temperatura se mantendrá constante.

Este es un punto importante para hormigonar los perfiles con hormigones de mayores resistencias y poder conseguir elementos estructurales con resistencias mecánicas altísimas.

7.5.-LIMITACIONES AL USO DEL SISTEMA.

Las limitaciones al uso del sistema propuesto son las siguientes.

A)Económicas: al ser un sistema basado en el uso de perfiles de acero rellenos de hormigón armado, no podemos aplicarlo a construcciones de viviendas comunes puesto que el presupuesto sería demasiado grande, por lo que es un sistema que se aplicará en grandes construcciones de estilo monumental como museos, edificios emblemáticos etc, y en construcciones de industriales como astilleros o militares como polvorines, naves en las que se trabaje con material inflamable o explosivo, hangares de aviones etc.

B)Falta de conocimiento: la falta de conocimiento del sistema y sobre todo, la falta de ensayos prácticos que muestren sus características tanto al fuego como mecánicas es un factor a tener muy en cuenta.

No importa que le contemos a alguien lo bien que funciona el sistema y le expliquemos toda la base teórica, a la hora de usar, instalar o vender un producto, debemos tener datos que respalden que ese producto funciona, por lo tanto, se deberían publicar mas estudios y ensayos sobre este sistema para poder implantarlo a un nivel mayor, y no solo en las edificaciones cuyos calculistas, proyectistas etc, sepan de la existencia de esta solución.

Por lo tanto, incentivar la investigación en este tipo de campos nos llevaría a poder demostrar sobre el papel en documentos oficiales, su efectividad y por supuesto, a mejorar sus características variando su: geometría, materiales, disposición etc.

C)El factor de la tradición en el ámbito constructivo: en nuestro país es muy común usar sistemas tradicionales mejorados con el paso del tiempo para realizar cualquier tipo de construcción, las innovaciones se aplican solo a sectores muy particulares, en los que se necesita resistencias, formas, o pesos determinados de los materiales y sistemas constructivos por enumerar algunos factores.

No intento decir con esto que el uso de sistemas tradicionales que funcionan y son viables económicamente no sea correcto o bueno, pero si es cierto que debido al tradicionalismo en este sentido los sistemas novedosos no son tan bien vistos en nuestro sector y cuesta bastante introducirlos a no ser que la ganancia sea muy extrema y beneficiosa en todos los sentidos (Véase la introducción del hormigón en nuestro sector, la rapidez con la que se produjo y como a día de hoy no concebimos el sector de la edificación sin él).

CAPÍTULO 8.- COMPARATIVA CON PUBLICACIÓN ENCONTRADA.

8.1.- INTRODUCCIÓN

Varios días antes de finalizar Julio, por pura casualidad, di con una publicación que hablaba sobre el sistema de perfiles tubulares de acero rellenos de hormigón.

Había estado buscando algo así durante bastante tiempo por si ya había algo publicado o por si alguien había realizado el mismo trabajo que yo antes de empezar a estudiar y redactarlo, y encontrármelo justo cuando el trabajo estaba ya encaminado, dos días antes de realizar el ensayo supuso un duro golpe, no podía ocultar esta publicación al tribunal ni a cualquiera que leyese el trabajo para informarse o para llegar a usar el sistema, no habría sido ético. Así que solo me quedaba una opción; realizar el ensayo y hacer una comparativa con lo descrito en la publicación ya fuera para bien o para mal de los resultados obtenidos, y para que el trabajo no fuese en vano, matizar si había errores en cualquier parte de mi trabajo o en su conjunto o si había información imprecisa en esta publicación, y así, que el esfuerzo hubiese merecido la pena aunque hubiese sido para explicar cómo no hacer las cosas, que, aunque a nadie le guste que su trabajo sea una guía de cómo no actuar, pudiese ser de utilidad a la hora de ayudar a combatir un incendio a nivel pasivo e incluso, no tener que demoler la estructura, poder simplemente sustituir la parte dañada y minimizar los costes de reparación.

Para realizar la comparativa en el siguiente punto compararemos entre el texto escrito en la publicación y nuestro estudio realizando un comentario comparativo.

8.2.-DIFERENCIAS ENTRE NUESTRO ENSAYO Y LA PUBLICACIÓN

A) PUBLICACIÓN: El núcleo de hormigón incrementa el tiempo de resistencia frente al fuego de las columnas de perfiles tubulares. Usando la correspondiente cuantía de armaduras, las columnas de perfiles tubulares pueden resistir frente al fuego durante más de 90 minutos. En esta situación no se necesita protección externa frente al fuego para dicho perfil.

COMENTARIO: En este pequeño apartado situado al principio de la publicación nos explica que será el núcleo de hormigón el que proporcione la resistencia frente al fuego, aunque en la práctica sería correcto, en ningún momento se especifica el porqué, se presupone que es porque el hormigón resiste de forma más efectiva el fuego que el acero, no habla del agua de amasado entrando en ebullición ni de la entalpía etc.

B)PUBLICACIÓN: Las columnas de perfil tubular relleno de hormigón deben tener pequeños agujeros de ventilación en las paredes con el fin de evitar que la columna estalle bajo la presión de vapor originada por la evaporación del agua de hidratación sobrante encerrada en el relleno de hormigón durante un incendio. En lo que respecta a las columnas de edificios de varias plantas, es preferible que los agujeros estén dispuestos en parejas por cada tramo simple y en cada planta. Los agujeros deben estar a una distancia entre 10 y 20 cm del extremo superior e inferior de la columna, las cuales están cerradas con placas de acero. Hay que taladrar agujeros intermedios si la longitud de la columna es mayor de 5m. El diámetro de los agujeros de ventilación no debe ser menor de 20 mm.

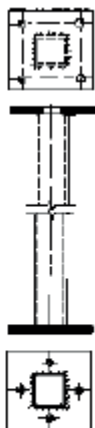
COMENTARIO: En primer lugar, nos dice que los agujeros serán de ventilación para evitar el estallido de las columnas, no los tiene en cuenta como parte fundamental de la protección contra incendios, si anteriormente nos dijo que era el núcleo de hormigón era lo que evitaba que aumentase la temperatura, encontramos una pequeña contradicción,

probablemente por falta de conocimiento de los conceptos básicos al no haber prácticamente información relacionada con el sistema disponible.

*Quiero aclarar antes de continuar con el análisis, que esta crítica no pretende ser destructiva, sino complementaria, y que si alguien decide usar este sistema y considera estos dos documentos como base de su estudio para decidir su aplicación o no, tenga toda la información posible en sus manos y haga las cosas con todo el conocimiento de causa y del tema a tratar que le pueda proporcionar.



Longitud de columnas rellenas con hormigón y disposición de los agujeros de ventilación.



Columnas de perfil tubular relleno de hormigón con placas de testa.

C)PUBLICACIÓN: La superficie interior de los perfiles tubulares debe estar libre de agua y otras impurezas, por ejemplo aceite, grasa, etc. antes del rellenado con hormigón. Sin embargo, la superficie interna no necesita ninguna preparación especial.

COMENTARIO: Aquí se observa una errata en la descripción que puede inducir a error, el principio es correcto hasta que podemos leer que la superficie interna no necesita ninguna preparación especial, se refiere a la externa por el contexto.

Aclarar también que aunque no necesite ningún tipo de preparación externa especial, debemos realizar las perforaciones siempre antes de hormigonar al igual que la colocación de la tapa metálica inferior.

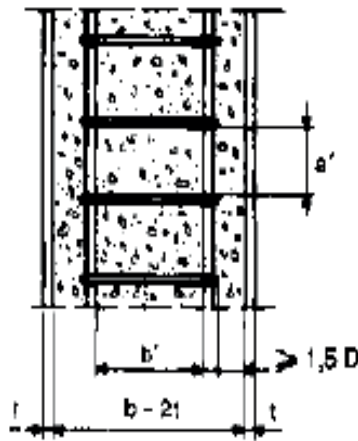
D)PUBLICACIÓN: La mezcla de hormigón se prepara de forma que tenga suficiente colabilidad. Se recomienda utilizar mayores contenidos de arena y cemento (junto con relaciones agua-cemento bajas) y reducir el tamaño máximo de la grava. Se requiere prestar especial atención en el caso de bombear el hormigón al interior de la columna desde el fondo.

COMENTARIO: me gustaría realizar un pequeño apunte personal en este apartado, nos comenta que habrá que conseguir la menor relación agua/cemento posible en nuestro hormigón, es algo común y cierto en edificación, pero existe un pequeño matiz que no se tiene en cuenta; hablamos de un perfil de acero relleno de hormigón armado, quizá la resistencia que tengamos sea mucho mayor a la que necesitemos, quizá podamos permitirnos aumentar la relación agua cemento del sistema y así conseguir una protección pasiva frente al fuego más duradera. Claramente, el decidir tomar este tipo de acciones debe estar respaldado por un estudio estructural que nos permita hormigonar con un hormigón de resistencias menores a favor de un alargamiento de la resistencia estructural frente a un incendio.

E)PUBLICACIÓN: El diámetro máximo de la grava "D" debe cumplir lo siguiente:

- Menor que 1/8 de las dimensiones internas del perfil tubular correspondiente a una columna sin armar.
- Menor que el radio ficticio r de la armadura definido para la malla más cerrada.

$$\gamma = \frac{a' \cdot b'}{2 \cdot (a' + b')}$$



Disposición de barras y estribos en columnas de perfil tubular relleno de hormigón.

- Menor que la mitad de la distancia b' entre dos barras longitudinales.
- Menor que dos tercios de la distancia entre la barra longitudinal y la superficie interior del perfil tubular.

COMENTARIO: en nuestro ensayo el primer parámetro del diámetro mínimo se cumple, es más, es bastante menos, si lo calculamos tendríamos que nuestro tamaño máximo del árido es de 17,5 mm y nosotros hemos usado uno de 12 mm de diámetro, fue el máximo que establecí con mis tutores para la realización del ensayo, por esto y viendo que nuestro ensayo funcionó a la perfección solo puedo comentar que habría que realizar un ensayo en un perfil de las mismas características al que hemos mostrado para comprobar si se produce algún cambio al

aumentar de esa forma el tamaño máximo del árido o se mantiene igual.

Aun así, tengamos en cuenta que al ser el tamaño mayor, lo más probable es que los poros del hormigón sean mayores y el agua de amasado alcance las perforaciones de forma más rápida y se agote antes.

F)PUBLICACIÓN: Los aditivos que pueden producir corrosión en el acero deben estar excluidos, como por ejemplo cloruro de calcio. Sin embargo, se recomienda el empleo de plastificantes y fluidificantes.

COMENTARIO: La primera parte es indiscutible, nada de aditivos que corroan al acero, en la parte que recomienda el uso de plastificantes y fluidificantes vuelvo a poner de manifiesto una idea expuesta anteriormente; si las resistencias del perfil son más que suficientes quizá interese más aumentar un poco la relación agua/cemento para alargar el uso contra incendios del perfil.

Si esto no fuese así y se quisiera conservar la resistencia o aumentarla por supuesto es recomendable el uso de plastificantes y fluidificantes a la hora de hormigonar el perfil tubular.

G) PUBLICACIÓN: Durante un incendio, la distribución de temperaturas resultante en una columna de SHS vacía, ya sea con o sin protección externa, es más o menos uniforme. Por el contrario, el comportamiento al calentamiento de una columna de SHS rellena de hormigón es significativamente diferente: al combinar materiales con conductividades térmicas muy diferentes, se produce un comportamiento con transitorios de calentamiento acusados y fuertes diferencias de temperatura a través de la sección transversal.

A causa de estos diferenciales las columnas de SHS rellenas de hormigón pueden calcularse para que tengan una resistencia al fuego de hasta 120 minutos o más sin protección externa.

Sin embargo, no pueden utilizarse los modelos simples de cálculo para el diseño a fuego basados en el factor de forma (masividad). Es necesario un método especial de cálculo a fuego que tenga en cuenta las diferentes características térmicas de los diferentes materiales y el ca-

lentamiento transitorio resultante.

COMENTARIO: volvemos a observar como la publicación en ningún momento habla de la ebullición del agua de amasado, sino de conductividades térmicas de materiales muy diferentes, el resultado final sería un perfil con características similares, pero no se comenta el por qué real del funcionamiento de la estructura mixta.

H) PUBLICACIÓN: Debido a su diferente localización en la sección transversal, los componentes de una columna SHS rellena de hormigón tendrán cada uno diferentes características de reducción de resistencia dependiente del tiempo. Las láminas de acero expuestas directamente, no protegidas, se calentarán rápidamente y presentarán una significativa reducción de la resistencia en un breve periodo de tiempo.

El núcleo de hormigón, con su masa importante y su baja conductividad térmica, mantendrá durante un tiempo una proporción significativamente alta de su resistencia, principalmente en la zona interior del núcleo más que cerca de la superficie.

Si se utiliza armadura, estará normalmente situada cerca de la superficie, pero protegida habitualmente por 25-50 mm de hormigón. Por esta razón, se producirá en ella una reducción lenta de la resistencia.

En el cálculo a temperatura ambiente es probable que la lámina de acero sea el componente resistente dominante, debido a la alta resistencia del acero y a la situación en el perfil. Sin embargo, tras un tiempo de fuego t_1 , sólo puede aprovecharse un pequeño porcentaje de la capacidad resistente original de la lámina de acero. Esto significa que en caso de incendio la parte principal de la carga resistida por el perfil de acero se redistribuirá al núcleo de hormigón que pierde resistencia y rigidez más lentamente que el acero. Si esta carga redistribuida sobrepasara la capacidad del hormigón, la columna se rompería en breve tiempo.

Por lo tanto puede concluirse lo siguiente:

- debe minimizarse la capacidad de carga del acero, lo que supone un bajo espesor de la lámina y un tipo resistente de acero bajo.

- se deberá optimizar la capacidad de carga del núcleo de hormigón, lo que supone resistencia del hormigón alta y cuantía de armadura elevada.

COMENTARIO: lo que llevo a sacar en claro de esta parte de la publicación es que no es que el perfil mantenga sus resistencias características, si no que la parte hormigonada al mantener sus resistencias durante más tiempo evitará el colapso de esa parte de la estructura.

De nuevo me reafirmo en que no es el hormigón el que mantiene la estructura, es la combinación de ambos y el evitar el aumento de temperatura en el acero lo que realmente nos permitirá conseguir grandes luces y unas resistencias enormes con respecto cualquiera de los dos materiales por separados, por tanto y por primera vez en toda la publicación se deja ver que no se contempla el hecho de que el acero no pierda resistencias y no transmita altas temperaturas que es el objeto del presente trabajo, si no que se presupone que el acero no va a aguantar la temperatura ni sus resistencias, sino que el relleno de hormigón mantendrá la estructura.

Esto nos plantea varias cuestiones: el hormigón es un elemento que resiste muy bien la compresión y el acero la tracción, si aplicamos los conceptos expuestos en este apartado y tenemos en cuenta que el uso del hormigón armado es debido a esta mezcla de buenas resistencias a esfuerzos que el complementario no soporta igual de bien, ¿para qué queremos un perfil metálico relleno de hormigón con el que podemos conseguir grandes luces si en el momento en el que se produzca un incendio se va a perder una grandísima parte de la resistencia a tracción pudiendo producirse un colapso de la estructura?

Si nos guiamos por este punto, la estructura es ineficiente contra en su cometido base, resistir un incendio, comenta que nos proporcionará algo más de tiempo al estar armado interiormente y evitar el hormigón de recubrimiento que el la energía calorífica llegue a la armadura cuando he demostrado con anterioridad que no es esa la base de su funcio-

namiento.

Debido a esto es probable que recomienden el uso de fluidificantes y plastificantes para conseguir unas resistencias mayores en el perfil ya que no cuentan con la del acero como principal en caso de incendio.

Es más, al cumplir de sobra con resistencias exigidas por proyecto no necesitaríamos ni armar el perfil excepto para evitar la retracción del hormigón y aun así, el sistema seguiría funcionando a la perfección frente a incendios (recordemos que en el ensayo que se ha realizado no existía ningún tipo de armadura en el interior del perfil).

8.3.-ASPECTOS A DESTACAR

Cabe destacar que hay una parte del documento realmente útil. Las recomendaciones sobre montaje, hormigonado, uniones de los perfiles con otros elementos, refuerzos a distintos tipos de esfuerzos y el aproximamiento a características a cumplir debe ser tenido en cuenta aunque a falta de exactitud y sin saber realmente porqué el sistema funciona como lo hace es una guía que dará resultados válidos.

El mayor problema a tener en cuenta a la hora de un incendio es tener que sobredimensionar las resistencias del hormigón al no tener en cuenta las del acero que no se pierden al no superar (en el caso del ensayo que he realizado) los 240°C, lo que nos permitirá contar con unas resistencias mucho mayores, menos armado del perfil y hormigones de menos resistencias para obtener las resistencias necesarias.

Todo esto se traduce en un factor fundamental: no es necesario aumentar en exceso el presupuesto de ejecución de la estructura para que sea funcional, solo es necesario el cálculo adecuado.

No deja sin embargo, teniendo en cuenta los detalles explicados anteriormente, de ser un documento que aporta información útil y de ayuda a la hora de informarse sobre este sistema.

BIBLIOGRAFÍA

1. L. TWYLT, R. HASS, W. KLINGSCH, M. EDWARDS, D. DUTTA (1994). *Guía de diseño para columnas de perfiles tubulares estructurales sometidas a fuego*; Colección Construcción con perfiles tubulares de acero. CIDECT-TÜV Verlag
2. R. BERGMANN, C. MATSUI, C. MEINSMA, D. DUTTA (1996). *Guía de diseño para columnas de perfiles tubulares rellenos de hormigón bajo cargas estáticas y sísmicas*; Colección Construcción con perfiles tubulares de acero. CIDECT-TÜV Verlag
3. D. DUTTA, J. WARDENIER, N. YEOMANS, K. SAKAE, Ö. BUCAK, J.A. PACKER (1997). *Guía de diseño para la fabricación, ensamble y montaje de estructuras de perfiles tubulares*; Colección Construcción con perfiles tubulares de acero. CIDECT-TÜV Verlag
4. JULES MATTIEU. Arcelor Luxemburgo APATA (Asociación para la Promoción Técnica del Acero). *Asegurar la resistencia al fuego de las estructuras metálicas*. Publicación.
5. XAVIER VIRGILI GRAU, ESTHER REAL SALADRIGAS, ENRIQUE MIRAMBELL ARRIZABALAGA (Noviembre 2007). *Comportamiento de elementos estructurales a incendio, análisis de la normativa*. Trabajo de fin de grado.
6. GRUPO DE TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. *Las columnas mixtas de acero y de hormigón*. Publicación.
7. HECTOR CIFUENTES BULTÉ (Septiembre de 2001). *Análisis del comportamiento al fuego de estructuras mixtas*. Proyecto de fin de grado.
8. JOHN R. HOWELL (1990). *Principios de termodinámica para ingeniería*. MCGRAW-HILL.
9. EUROCÓDIGO 4. *Proyecto de estructuras mixtas de hormigón y acero*.
Parte 1.1. *Reglas generales y reglas para edificación*. Octubre de 1990.
Parte 2.2. *Reglas generales. Proyectos de estructuras sometidas al fuego*. Junio de 1996.

