

Estudio de Factores para el Diseño Sostenible de Pilares Metálicos Tubulares y Pilares Mixtos Tipo Concrete Filled Tube (CFT)

A. Piquer⁽¹⁾, D. Hernández-Figueirido⁽¹⁾, A. Hospitaler⁽²⁾, J. Portolés⁽¹⁾, J.M. Montalvá⁽³⁾

(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica y Construcción. Universitat Jaume I de Castelló
ana.piquer@uji.es

(2) ICITECH, Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Universitat Politècnica de València.

(3) Dpto. Ingeniería de la Construcción. Universitat Politècnica de València.

El propósito del presente trabajo es establecer un conjunto de factores o de objetivos independientes o contradictorios que permitan abordar el proyecto sostenible de pilares metálicos tubulares rellenos de hormigón (CFT) y perfiles tubulares de acero, por medio de un procedimiento basado en la optimización multiobjetivo.

El criterio económico es el que tradicionalmente se ha utilizado para realizar la optimización de estructuras, aunque no es el único que debe considerarse, debiéndose incluir también el concepto de sostenibilidad. El marco de la sostenibilidad implica la consideración de tres criterios fundamentales: económicos, medioambientales y funcionales.

En este trabajo se seleccionan por primera vez un conjunto de funciones objetivo asociadas a cada criterio de sostenibilidad, realizando un estudio de independencia de las mismas, para establecer un conjunto eficaz de objetivos a emplear en procesos posteriores de optimización de pilares tubulares rellenos de hormigón.

Del estudio realizado se concluye que los pilares mixtos tipo CFT resultan más eficientes, desde todos los puntos de vista, que los perfiles tubulares de acero, para las mismas exigencias de proyecto.

1. INTRODUCCIÓN

El propósito del presente trabajo es establecer un conjunto de factores o de objetivos independientes o contradictorios que permitan abordar el proyecto sostenible de pilares mixtos del tipo tubulares de acero rellenos de hormigón (en adelante, CFT Concrete-Filled Steel Tubes) y perfiles tubulares de acero, mediante un procedimiento basado en la optimización multiobjetivo. Para poder realizar la optimización, es necesario un paso previo, que implica la selección de un conjunto de funciones objetivo asociadas a cada criterio de sostenibilidad y el estudio de independencia de las mismas.

El proyecto de una estructura es un proceso interactivo e iterativo en el que confluyen necesidades arquitectónicas y funcionales, aspectos de resistencia, de fabricación y montaje y criterios de índole económica. En un buen diseño todos estos factores se consideran de forma “equilibrada”. Para establecer el conjunto de objetivos, se ha empleado el concepto de sostenibilidad, que agrega criterios económicos, medioambientales y sociales (funcionalidad) para guiar el proyecto de estructura en un marco más amplio del estrictamente económico.

Los pilares son elementos estructurales con solicitaciones verticales principalmente, a esfuerzos de compresión, simple o compuesta. A lo largo de los años, para la configuración de los pilares se han empleado diferentes materiales en función del nivel de desarrollo o de conocimientos del momento, de las materias primas disponibles, del grado de sollicitación, etc. Entre los diferentes materiales, el hormigón y el acero se han impuesto a todos los demás por motivos de disponibilidad, economía, rapidez de ejecución y capacidad resistente.

Entre los perfiles de acero, los tubulares cuentan con ventajas frente a los de sección abierta convencionales, como son las excelentes propiedades resistentes a compresión, torsión y flexión, menor factor de sección (masividad), características estéticas y la posibilidad de ser rellenos [1].

El uso de sistemas mixtos acero-hormigón, se ha extendido gracias a las ventajas que presentan frente al uso de sistemas tradicionales de hormigón armado o pilares de acero. Las características de ambos materiales son bien conocidas: la sección de hormigón tiene una rigidez elevada, es más económica y tiene un buen comportamiento frente al fuego. El acero tiene una elevada ductilidad y se alcanzan elevadas resistencias con pesos significativamente menores. La combinación “inteligente” de estos dos materiales genera sistemas con una mejor eficiencia que la de sus componentes por separado [2].

Existen múltiples configuraciones para combinar el acero y el hormigón en un pilar. Las tipologías de pilares mixtos que recoge el Eurocodigo 4 [3] se muestran en la Figura 1. De entre ellos, los perfiles tubulares rellenos de hormigón (CFT) presentan un comportamiento óptimo frente al resto. Este tipo de pilares cuentan con la ventaja de que el propio perfil tubular constituye el encofrado además de soportar una carga considerable hasta que se produce el fraguado y endurecimiento del hormigón fresco, características que proporcionan una mayor eficiencia del proceso constructivo. El tubo de acero proporciona confinamiento pasivo al núcleo de hormigón, y éste a su vez, atenúa y modifica el pandeo local del perfil de acero. En comparación con los perfiles tubulares de acero, los perfiles rellenos de hormigón incrementan la capacidad mecánica, la ductilidad, la absorción de energía durante la acción sísmica y la resistencia al fuego [1].

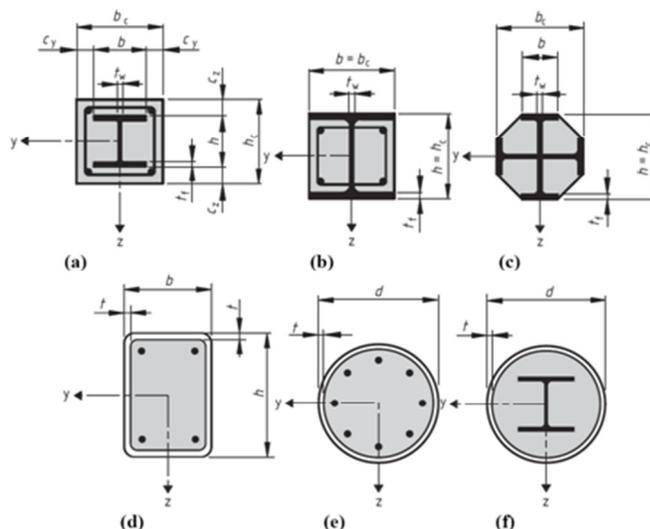


Figura 1. Diferentes configuraciones de pilares mixtos de acuerdo con el EC4: 2004[3].
a) Embebidos; b)-c) Parcialmente embebidos d)-e) CFT; f) CFT con perfil embebido

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

2.1. INTRODUCCIÓN

El criterio más extendido para comparar estructuras entre sí es el coste económico [4]. Obviamente, la comparación entre dos soluciones estructurales únicamente se puede realizar si ambas satisfacen las mismas prestaciones, que se reducen al cumplimiento de un conjunto de diferentes estados límite. Atendiendo a este único criterio, la mejor estructura sería la más económica, siendo el coste, la única función objetivo a minimizar.

En el contexto actual, donde se exige un desarrollo sostenible, además del aspecto económico es necesario considerar otros aspectos adicionales como son la protección medioambiental y la aceptación social. A este triángulo se le denomina “sostenibilidad”. El sector de la construcción tiene una incidencia significativa en el impacto medioambiental en las diferentes fases del proceso constructivo, extracción, procesado y elaboración de

materiales de construcción, prefabricación, transporte, construcción, gestión de residuos, etc..., por todo ello, se deben focalizar los esfuerzos en realizar diseños que incorporen criterios de sostenibilidad. Cabe señalar que la industria del cemento contribuye en un 5% del total de las emisiones de CO₂ y el sector de la construcción es responsable del 17% de las emisiones de efecto invernadero en India y del 8% - 12% en la Europa occidental [5].

En base a las consideraciones anteriores, éste se puede formular como un problema de optimización multiobjetivo, con la finalidad de obtener las mejores soluciones atendiendo a distintos objetivos relacionados con los criterios de sostenibilidad. El propósito sería obtener un conjunto de Pareto de soluciones eficientes de entre las que se podría seleccionar una de ellas atendiendo a diferentes criterios de utilidad. La formulación multiobjetivo como procedimiento para el diseño de pilares, es limitada en la bibliografía actual y se centra en el problema clásico de optimización bicriterio coste-resistencia [6].

2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA MULTI OBJETIVO

Para poder plantear adecuadamente el problema se deben definir las variables y parámetros, los objetivos y sus funciones y restricciones asociadas, tanto a las prestaciones exigibles, como a los modelos de cálculo de estados límite o a los materiales disponibles. El conjunto de variables ha de ser tal que permita definir unívocamente cualquier configuración. Se entiende por solución a cualquier configuración que verifique las restricciones del problema, es decir que sea factible.

La formulación general de un problema de optimización multiobjetivo que incluya variables discretas puede expresarse como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar / Maximizar } \underline{f}(\underline{x}) \\
 \text{Sujeto a } & \begin{cases} g_j(\underline{x}) = 0, & j = 1, \dots, p \\ g_j(\underline{x}) \leq 0, & j = p + 1, \dots, m \end{cases} \\
 & x_i \in D_i, D_i = \{d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{iq_i}\}; \quad i = 1, \dots, n_d \\
 & x_{iL} \leq x_i \leq x_{iU}; \quad i = n_d + 1, \dots, n
 \end{aligned} \tag{1}$$

Donde:

- f es el vector de las funciones objetivo,
- x vector de variables que representa una configuración determinada,
- n es el número de variables de diseño,
- n_d es el número de variables de diseño discretas,
- D_i conjunto de los q_i valores d_i que puede adoptar la i -ésima variable discreta,
- x_{iL} y x_{iU} son los límites inferior y superior de la variable de diseño continuas x_i .
- $g_j(x)$ es la restricción j ,
- m es el número total de restricciones y
- p es el número de restricciones de igualdad

Cargas Permanentes			
Superficiales		Lineales	
Forjado unidireccional vigueta pretensada 30 cm espesor	4.00 kN/m ²	Cerramientos	7.00 kN/m
Solado	0.80 kN/m ²		
Falso techo	0.15 kN/m ²		
Tabiquería	1.00 kN/m ²		
Cargas Variables			
Sobrecarga uso	2.00 kN/m ²		

Tabla 1. Cargas Aplicadas según CTE DB SE-AE [7].

Los parámetros del problema sujeto a estudio son la carga aplicada al pilar y su excentricidad. Con la finalidad de determinar las cargas y excentricidades de un caso concreto y poder ilustrar el estudio de independencia de objetivos, se considera un edificio estándar de cinco plantas, con una separación regular entre pilares de 5 metros en ambas direcciones y una altura libre entre plantas de 3 metros, centrando el estudio en los pilares de la planta inferior, pues son los que soportan mayores cargas.

Las solicitaciones en cada uno de los pilares de la planta baja son diferentes según su posición. El análisis se efectúa para dos pilares, el tipo 1 es un pilar central y el tipo 2 es un pilar de medianera, tal y como se muestra en la Figura 2. Para el edificio definido, según geometría y cargas indicadas, se obtiene una carga de 1350 kN, con excentricidades $e_{1y}=e_{2y}=0\text{mm}$ y $e_{1z}=e_{2z}=35\text{ mm}$, para el pilar tipo 1 y una carga de 950 kN, con excentricidad $e_{1y}=e_{2y}=50\text{mm}$, $e_{1z}=e_{2z}=20\text{ mm}$, para el pilar tipo 2.

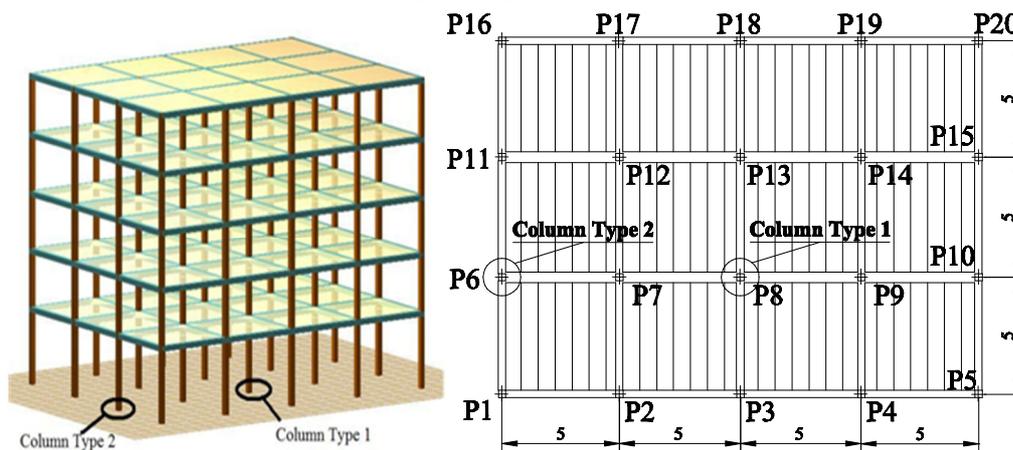


Figura 2. Tipo de pilares considerados.

2.3. VARIABLES CONSIDERADAS Y ESPACIO DE SOLUCIONES

La configuración de un pilar queda definida mediante un conjunto de siete variables discretas. Cada una de ellas, toma valores de un conjunto de q_i valores posibles. La combinación de todos los posibles valores da lugar al espacio de configuraciones posibles de las que serán soluciones aquellas que verifiquen las restricciones $g_j(x)$ del problema. La naturaleza de las variables consideradas en este problema son geométricas, como las dimensiones comerciales de los tubos de acero [8] y mecánicas, como las propiedades de los materiales utilizados en el pilar: el límite de rotura del acero, el proceso de conformado del perfil tubular (conformado en frío o laminado en caliente) y la resistencia del hormigón utilizado (f_{ck}).

En la Tabla 2, se resumen las variables consideradas, con la cantidad q_i de valores posibles de cada una y el tamaño del espacio de soluciones para los distintos tipos de pilares considerados: perfiles rellenos de hormigón, circulares o rectangulares (CCFT y RCFT respectivamente).

	Variables geométricas Sección del pilar				Variables mecánicas Propiedades de los materiales			Nº Pilares (tamaño del espacio de soluciones)
	Diámetro D	Canto h	Ancho b	Espesor t	Acero		Hormigón f_{ck}	
					Conf.	f_y		
CCFT	31	/	/	15	2	5	14	65.100
RCFT	/	22	22	12	2	5	14	813.120
CHT	31	/	/	15	2	5	/	4.650
RHT	/	22	22	12	2	5	/	58.080

Tabla 2. Número de valores considerados para cada variable y tamaño del espacio de soluciones de cada tipo de pilar.

Las variables geométricas así como las propiedades del acero, son variables discretas y se seleccionarán de catálogos comerciales [8]. La resistencia del hormigón, también variable discreta, dependerá de la dosificación empleada y se ajusta a la tipificación de resistencias de la norma EHE-08 [9]. Para establecer un marco de referencia, se resumen en la Tabla 3 las dosificaciones propuestas por 15 autores.

Autor	f_{ck}	CEMI	Árido Fino (D<4 mm)	Árido Grueso	Agua	Humo Silíce	Cenizas Volantes	Escorias	Aditivos	D
	MPa	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	l	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	mm
Han [10]	25	(32,5) 457	1129.00	608.00	206.00					12
Hernández-Figueirido [11]	30	(32,5) 348	1065.00	666.00	220.00					12
Chitawadagi [12]	35	(32,5) 390	702.00	889.20	175.50	20.00			9.02	12
Han [10]	40	(32,5) 414	630.00	1170.00	207.00					15
Chitawadagi [12]	45	(32,5) 410	722.00	885.60	164.00	20.00				12
Tao [13]	50	(32,5) 523	581.00	1077.00	220.00					15
Liu [14]	55	(42,5) 480	620.00	1120.00	160.00		30.00			10
Liu [14]	60	(42,5) 550	530.00	1170.00	158.00		70.00			10
Tao [13]	65	(52,5) 527	589.00	1086.00	201.00					12
Portolés [15]	70	(52,5) 425	918.00	918.00	180.00				10.60	12
Zeguiche [16]	75	(52,5) 500	600.00	1200.00	150.00	12.00			7.50	10
Liu [14]	80	(52,5) 480	665.00	1025.00	170.00	20.00				20
Lue [17]	85	(52,5) 453,8	702.60	890.80	155.60		129.60	64.80	18.20	12
Hernández-Figueirido [11]	90	(52,5) 570	705.00	890.00	180.00	50.00			12.30	12

Tabla 3. Dosificaciones de hormigón propuestas, con su resistencia característica.

2.4. RESTRICCIONES

El problema de optimización cuenta con las restricciones mostradas en la Figura 3, que vienen impuestas por el modelo seleccionado y la normativa de aplicación.

Explicitas	Estados Límite a cumplir por el elemento
	Ámbito de los modelos de Estados Límite
	Relaciones geométricas entre partes
	Dominio de las variables
	Limitaciones geométricas
Implícitas	Debidas al tipo de pilares seleccionados

Figura 3. Restricciones del problema.

En función del tipo de pilar y de los parámetros (carga, excentricidades) que se empleen, el conjunto de soluciones, configuraciones factibles, es diferente. En la Tabla 4 se muestran los tamaños del conjunto de configuraciones y la factibilidad según el tipo de pilar. Dado el tamaño reducido de los espacios de soluciones, es posible realizar un estudio completo de todas las soluciones posibles.

2.5. FUNCIONES OBJETIVO

Tal y como se comentó en la introducción, el marco de la sostenibilidad implica la consideración de tres criterios fundamentales: económicos, medioambientales y funcionales; para alcanzarlos se proponen siete funciones objetivo:

Área (Función a Minimizar): El área ocupada por la sección del pilar es uno de los objetivos a minimizar, cuanto menor sea el área del pilar, mayor será el área útil de la planta y la diafanidad.

		Tamaño espacio soluciones	Pilar tipo 1		Pilar tipo 2	
			N: 1350kN e _{1y} =e _{2y} =0mm e _{1z} = e _{2z} =35mm		N: 950kN e _{1y} =e _{2y} =50mm e _{1z} =e _{2z} =20mm	
		Nº Pilares	Pilares factibles	Ratio de factibilidad	Pilares factibles	Ratio de factibilidad
Rellenos de hormigón	Circulares (CCFT)	65.100	9.334	14.34%	9.644	14.81%
	Rectangulares (RCFT)	813.120	54.615	6.72%	55.260	6.80%
Tubos Huecos	Circulares (CHT)	4.650	690	14.84%	794	17.08%
	Rectangulares (CHT)	58.080	556	0.96%	1.180	2.03%

Tabla 4. Espacio de soluciones factibles.

Peso (Función a Minimizar): El peso es una medida relacionada con la constructibilidad de la solución propuesta e indirectamente, con el consumo de materias primas. Los elementos pesados tienen mayor dificultad de montaje en fase de ejecución; por tanto es un factor que incrementa los tiempos y costes de ejecución, además de requerir el uso intensivo de maquinaria. También un mayor peso del elemento, redundará en un mayor coste económico y medioambiental, debido a la fabricación y al transporte de las piezas.

Resistencia al fuego (Función a Maximizar): Un criterio fundamental en el diseño de estructuras, es la capacidad resistente frente al fuego exigida a los elementos estructurales, algo que varía en función del uso y dimensión del edificio, entre 30 y 180 minutos. El tiempo que un pilar puede soportar la acción debida a un incendio es uno de los objetivos a maximizar.

Durabilidad (Función a Maximizar): Una estructura bien diseñada debe tener una vida útil prolongada (mediante la aplicación de un mantenimiento regular). La durabilidad es la capacidad de los materiales y, de la solución adoptada, para resistir las acciones climáticas o cualquier otro tipo de ataque, manteniendo sus características resistentes. La maximización de la durabilidad tiene su interés en el coste de mantenimiento asociado a la explotación del elemento proyectado.

Coste Económico. (Función a Minimizar): El coste económico es el objetivo fundamental de la optimización de estructuras. En el caso de los pilares, se obtiene mediante la suma de los costes de cada uno de sus componentes, obtenidos de la base de datos de BEDEC [18] del ITeC (Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña) con los precios revisados en Enero de 2011. La función objetivo del coste, incluye el precio de los materiales (acero y hormigón) y todos los costes asociados (maquinaria, manufactura...) por metro lineal de elemento.

$$f_5(\underline{x}) = C(\underline{x}) = \sum_{i=1}^r p_i \cdot m_i(\underline{x}) \quad (2)$$

Donde p_i son los precios unitarios y $m_i(x)$ es la medición de los diversos componentes.

Energía embebida. (Función a Minimizar): Es un indicador del consumo de energía en los diferentes procesos necesarios para la construcción de un metro lineal de pilar. Los datos se obtienen de la base de datos de BEDEC[26] del ITeC. La energía embebida dependerá de la tecnología y procesos de fabricación de los materiales.

$$f_6(\underline{x}) = E(\underline{x}) = \sum_{i=1}^r e_i \cdot m_i(\underline{x}) \quad (3)$$

Donde e_i es la energía unitaria embebida y $m_i(x)$ es la medición de los diversos componentes.

Emisiones de CO₂ (Minimizar): Evalúa las emisiones de CO₂ en los diferentes procesos necesarios para la construcción de un metro lineal de pilar. Los datos se obtienen de la base de datos de BEDEC[26] del ITeC. Las emisiones de CO₂ dependerán de la tecnología y procesos de fabricación de los diferentes materiales y del modelo energético de cada país.

$$f_7(\underline{x}) = CO_2(\underline{x}) = \sum_{i=1}^r CO_{2i} \cdot m_i(\underline{x}) \tag{4}$$

Donde CO_{2i} son la emisiones unitarias y $m_i(x)$ es la medición de los diversos componentes.

2.6. ESTUDIO DE OBJETIVOS

Una vez definido el problema de optimización, inicialmente compuesto por siete funciones objetivo, deberá analizarse en primer lugar la independencia de cada una de ellas respecto a las demás, para agilizar el proceso. Dado que el tamaño del espacio de configuraciones y el de soluciones factibles no es elevado, se evalúan, de modo enumerativo, los objetivos para los distintos tipos de pilares y soluciones propuestas representado gráficamente, dos a dos los valores obtenidos, tal y como se muestra en la Figura 4, para uno de los casos posibles. Si el tamaño del espacio de soluciones fuera elevado, debido a la explosión combinatoria asociada a este tipo de problemas, la evaluación de la independencia de objetivos debería realizarse mediante un paseo aleatorio representativo.

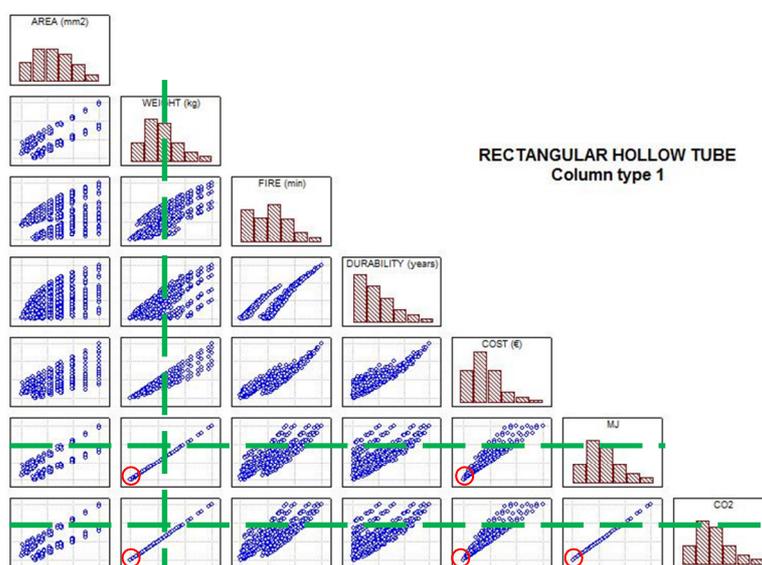


Figura 4. Comparación dos a dos de las funciones objetivo para pilares rectangulares huecos tipo 1.

De las representaciones gráficas mostradas en la Figura 4, se aprecia que las funciones objetivo: Coste, Peso, MJ y CO₂ son congruentes o dependientes, dado que la minimización de una de ellas supone la minimización de las demás, por tanto, será suficiente considerar una de ellas como representativa en el proceso de optimización, optándose por el Coste por ser la función objetivo de uso más extendido. El resto de funciones son independientes entre sí, de modo que el problema se reduce a optimizar 4 objetivos. Hay que señalar que la dependencia entre las funciones objetivo está implícita en la base de datos BEDEC [18] utilizada para evaluar las funciones objetivo. De este modo, este resultado es consecuencia de las tecnologías de fabricación de los componentes de los soportes y también del modelo energético de cada país. Así pues, esta conclusión sólo tiene validez para un marco tecnológico, energético y económico dado.

Cuando se trabaja con objetivos contradictorios (independientes o complementarios), la mejora de uno de ellos suele acarrear el empeoramiento de otro, por tanto no se llega a una solución óptima única atendiendo a los diferentes criterios. En el caso de pilares circulares, reducir el área del pilar disminuyendo su diámetro, mejora el objetivo de minimizar el Área, pero empeora el objetivo de maximizar su resistencia al fuego, por tanto no se hablará de soluciones óptimas, sino de un grupo de soluciones eficientes, conocido como el conjunto de Pareto. Estas se representan como la frontera de Pareto en el espacio de las funciones

objetivo, que es un subconjunto de las soluciones factibles que contienen al menos uno de los objetivos optimizados.

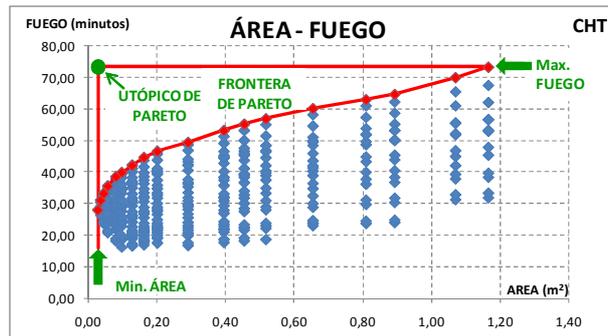


Figura 5. Frontera de Pareto del par de objetivos Área-Resistencia al fuego, para pilares CHT tipo 1.

En la Figura 5 se representan de los objetivos Área (Min) -Resistencia al fuego (Max) del conjunto de soluciones factibles para el pilar tipo 1, con carga de 1350kN, en el caso de CHT. De todos ellos, se remarcan en rojo aquellas soluciones que forman la frontera de Pareto. El resto de soluciones se dice que están dominadas por las soluciones de la frontera.

El diseño óptimo del pilar estará en uno de los puntos de la frontera de Pareto, dado que éste contiene todas las soluciones eficientes del problema. Reducir el espacio de diseño únicamente a este conjunto, permitirá optimizar el proceso de verificación de los pilares.

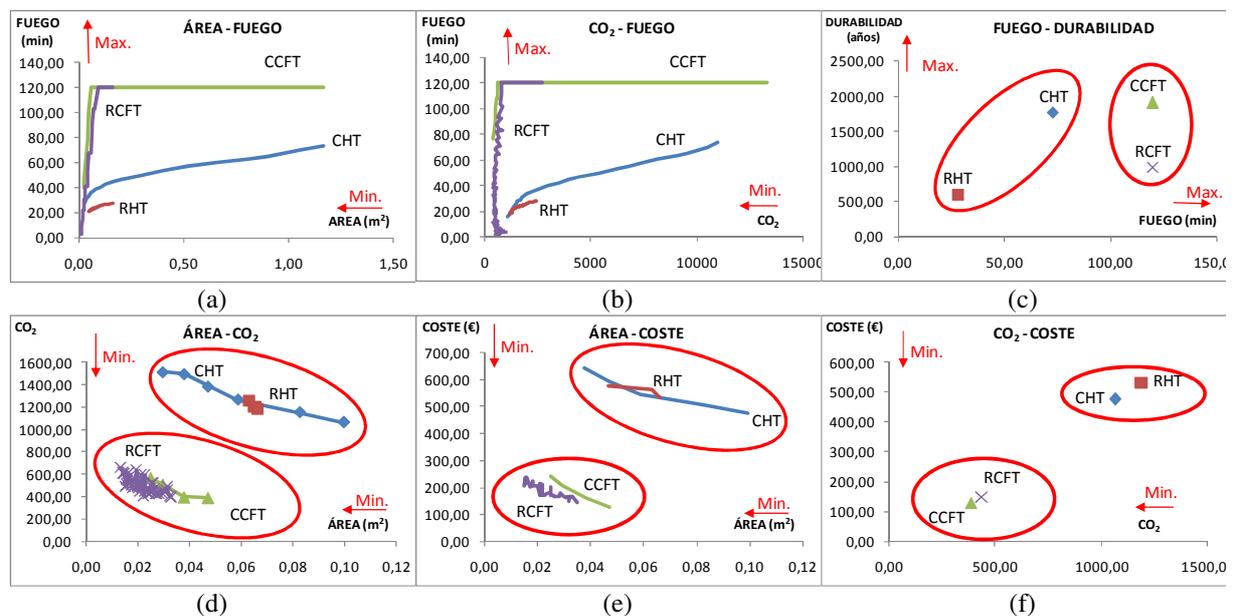


Figura 6. Comparación de fronteras de Pareto, para los cuatro tipos de pilares.

3. RESULTADOS

En la Figura 6 se representa las funciones objetivo dos a dos, de las dos configuraciones de pilares para el tipo 1 (las del tipo 2 resultaron muy similares), para los objetivos más significativos de los comentados en apartados anteriores.

En cada país las normativas nacionales establecen la resistencia mínima de la estructura frente al fuego, medida en minutos: para edificios administrativos y residenciales, está del orden de 90 minutos. En la Figura 6.a y Figura 6.b se representa la resistencia al fuego frente al área y a las emisiones de CO₂. Se observa que para perfiles rellenos de hormigón (RCFT, CCFT) se alcanzan valores superiores a 90 minutos con áreas reducidas, en comparación con los perfiles huecos (RHT, CHT), que únicamente llegan a los 70 minutos,

para valores de área y de emisiones de CO₂ extremadamente altos. Además, este tipo de perfiles emite una cantidad muy reducida de dióxido de carbono en comparación con perfiles huecos para valores similares de resistencia. Por tanto, desde el punto de vista medioambiental, los perfiles rellenos de hormigón (CFT), son mejores que los perfiles huecos (Figura 6.b).

4. CONCLUSIONES

El objetivo del presente artículo era establecer un conjunto de factores o de objetivos que permita abordar el proyecto sostenible de pilares metálicos tubulares rellenos de hormigón y su comparación con otro tipo de soluciones. En la bibliografía existente sólo se pueden encontrar estudios sobre pilares, atendiendo a criterios económicos o estructurales. En el presente trabajo se han incorporado criterios funcionales y medioambientales. Los perfiles tubulares rellenos de hormigón (tanto los rectangulares como los circulares), presentan beneficios en todos los aspectos estudiados.

1. Del estudio de factores relacionados con la sostenibilidad se concluye que en el contexto tecnológico, económico y energético, el coste, las emisiones de CO₂, la energía embebida y el peso son congruentes o dependientes, de modo que la optimización de uno de ellos conlleva o arrastra los demás. Esta dependencia deriva de la información de la base de datos BEDEC [18].
2. La conclusión de la referencia [6] en la que se indica que un diseño óptimo económico es un diseño sostenible, es una conclusión limitada al marco tecnológico, económico y energético en el país que se proyecta, y debe evaluarse en cada contexto la dependencia de las funciones objetivo.
3. Solo cuatro de los factores u objetivos considerados son contradictorios o independientes: el coste, la vida útil (durabilidad), la resistencia al fuego y el área de la sección. Estos cuatro objetivos configuran el marco de referencia para la comparación de soluciones y para abordar el problema de proyecto de pilares con una metodología basada en la optimización multiobjetivo.
4. A partir del marco de referencia de los cuatro objetivos independientes, se constata que los CFT ofrecen un mejor funcionamiento frente al fuego y durabilidad, proporcionando a su vez una mayor diafanidad, como consecuencia de sus menores dimensiones.
5. Desde un punto de vista constructivo, los perfiles rellenos cumplen mejor que los perfiles huecos, porque se pueden utilizar pilares de menor peso para soportar las mismas cargas, siendo la colocación de los mismos más sencillo.
6. Desde un punto de vista económico, los CFT son más económicos, fundamentalmente porque el hormigón es un material más barato que el acero (requiere espesores muy elevados), y las secciones mixtas son más económicas, ofreciendo características resistentes superiores a precios más competitivos.
7. El coste económico y medioambiental de los perfiles huecos (RHT, CHT), para prestaciones similares, respecto al de los perfiles rellenos de hormigón (RCFT, CCFT) es muy superior.

5. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido posible gracias al patrocinio de la Fundació Caixa Castelló-Bancaixa, bajo el programa para la promoción de la investigación de la Universitat Jaume I (Proyecto P1-1A2009-10).

6. REFERENCIAS

- [1] [1] Wardenier J, Packer JA, Zhao XL et al. *Hollow Sections in Structural Applications*, 2ª edición. Ginebra: CIDECT, 2011. ISBN: 978-90-72830-86-9.
- [2] Zhao X-L, Lu H. "Concrete-filled tubular members and connections". Spon Press, 2010. ISBN: 9780415435000.

- [3] Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2004.
- [4] Perea C, Alcalá J, Yepes V *et al.* “Design of reinforced concrete bridge frames by heuristic optimization”. *Advances in Engineering Software*. Vol. 39-8 p.676-688. (doi: 10.1016/j.advengsoft.2007.07.007)
- [5] Long HV, Jean-François D, Lam LDP *et al.* “Field of application of high strength steel circular tubes for steel and composite columns from an economic point of view”. *Journal of Construction Steel Research*. Vol.67-6 p.1001-1021 (doi: 10.1016/j.jcsr.2011.01.008)
- [6] Paya-Zaforteza I, Yepes V, Hospitaler A, González-Vidosa F. “CO₂-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing”. *Engineering Structures*. Vol. 31-7 p.1501-1508. (doi: 10.1016/j.engstruct.2009.02.034)
- [7] Ministerio de vivienda de España. Código técnico de la edificación. Documento básico seguridad estructural, acciones en la edificación. CTE DB SE-AE. Madrid, 2009.
- [8] Arcelor Mittal Catalog. <http://www.arcelormittal.com/sections/> [consulta 18 enero 2012].
- [9] Ministerio de fomento de España. Instrucción de hormigón estructural. EHE-08. Madrid, 2008.
- [10] Han LH, Yang YF. “Analysis of thin-walled steel RHS columns filled with concrete under long-term sustained loads”. *Thin-Walled Structures*. Vol.41-9 p.849–870. (doi: 10.1016/S0263-8231(03)00029-6).
- [11] Hernández-Figueirido D, Romero ML, Bonet JL *et al.* “Ultimate capacity of rectangular concrete-filled steel tubular columns under unequal load eccentricities”. *Journal of constructional steel research*. Vol. 68 p.107-117. (doi:10.1016/j.jcsr.2011.07.014)
- [12] Chitawadagi MV, Narasimhan MC, Kulkarni SM. “Axial capacity of rectangular concrete-filled steel tube columns – DOE approach”. *Construction and Building Materials*. Vol.24-4 p.585–595. (doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.09.006 2010).
- [13] Tao Z, Han LH, Wang DY. “Strength and ductility of stiffened thin-walled hollow steel structural stub columns filled with concrete”. *Thin-Walled Structures*. Vol.46-10 p.1113–1128. (doi: 10.1016/j.tws.2008.01.007)
- [14] Liu D. “Tests on high-strength rectangular concrete-filled steel hollow section stub columns”. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol.61-7 p.902–911. (doi: 10.1016/j.jcsr.2005.01.001)
- [15] Portolés JM, Romero ML, Bonet JL *et al.* “Experimental study of high strength concrete-filled circular tubular columns under eccentric loading”, *Journal of constructional steel research*. Vol.67-4 p.623-633 (doi: 10.1016/j.jcsr.2010.11.017).
- [16] Zeghiche J, Chaoui K. “An experimental behaviour of concrete-filled steel tubular columns”. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 61-1 p.53–66. (doi: 10.1016/j.jcsr.2004.06.006)
- [17] Lue DM, Liu JL, Yen T. “Experimental study on rectangular CFT columns with high-strength concrete”. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol.63-1 p.37–44. (doi: 10.1016/j.jcsr.2006.02.009).
- [18] Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya. Construction products data base, banco BEDEC. <http://www.itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx> [consulta Enero 2011].