

10. Conclusiones y futuros trabajos.

10.1. Conclusiones generales

En general, el término de material compuesto se reserva para aquellos materiales bifásicos fabricados expresamente para mejorar los valores de las propiedades que los materiales constituyentes presentan por separado. Dentro del mundo de los materiales compuestos se incluyen los llamados materiales compuestos avanzados. Estos, tal y como se ha discutido en el capítulo 1, son los que están formados a partir de matrices orgánicas, cerámicas o metálicas y reforzados mediante fibras (orgánicas o inorgánicas) que consiguen unas altas prestaciones respecto a los materiales usados tradicionalmente.

En la actualidad, el mercado general de los materiales compuestos está formado principalmente por las matrices orgánicas (epoxi, poliuretano, viniléster, etc.) y diferentes tipos de fibras (vidrio E y R, carbono y aramida). Los materiales compuestos de matrices cerámica y metálica son los menos utilizados aunque es posible que a medio y largo plazo vayan tomando mayor relevancia en el área de materiales avanzados.

En general, los MC presentan la gran ventaja principal de su baja densidad con unas muy buenas propiedades mecánicas, permitiendo el diseño de elementos constructivos muy ligeros y una construcción más amena. Por el contrario, sus principales inconvenientes son dos: el conservadurismo histórico del sector de la construcción, y el elevado coste económico del material.

Profundizando en el estudio de pros y contras del uso de MC, se concluye como ventajas teóricas (en función del tipo concreto de MC a usar) su ligereza, comportamiento ante la corrosión, buena resistencia mecánica, libertad de formas y diseños, autolimpiables con la lluvia, transparencia ante las ondas electromagnéticas, se pueden pigmentar durante el proceso de fabricación, se pueden lograr distintos tipos de acabados, son inertes al agua y a agentes químicos en general, y la mayoría de ellos no conducen electricidad. Por el otro lado, sus desventajas son el escaso conocimiento por parte de los usuarios, problemas de delaminación y durabilidad debido a un diseño erróneo, un elevado coste del material en sí, el reciclaje y el comportamiento ante el fuego. Respecto al reciclaje, para los MC con matrices termoplásticas la reciclabilidad es directa (teóricamente), simplemente calentando la pieza por encima de su punto de fusión el material está disponible para su uso posterior sin ningún tipo de limitación teórica. Para los materiales compuestos de matriz termoestable, el reciclaje directo no es posible y deben aplicarse tratamientos de tipo mecánico para su reducción en partículas, permitiendo así su utilización posterior como cargas de otros materiales compuestos con menores exigencias mecánicas. Por lo que respecta al fuego, en función de los materiales utilizados se puede lograr la no propagación de la llama, aunque no se puede evitar que el material se degrade ante temperaturas relativamente bajas en caso de incendio. Ello puede suponer un grave problema para el caso de uso de estos materiales como elementos estructurales en edificios industriales donde se requiera (aplicando la normativa contra incendios) cierto nivel de estabilidad ante el fuego. De todas maneras, este problema no es nuevo, pues lo mismo sucede con las estructuras metálicas.

Los MC presentan multitud de posibles aplicaciones en numerosos sectores. De hecho, en algunos de ellos su uso ya es masivo y la tendencia es ascendente. Por ejemplo en el sector de la automoción, de la energía eólica, de la aeronáutica o el aeroespacial. Todos ellos tienen en común que son muy exigentes en cuanto a las prestaciones requeridas a los materiales a utilizar, y que además impera la ligereza del conjunto.

En el sector de la construcción en general, los MC ya se están usando en la actualidad pero mayoritariamente en elementos secundarios. Como tal se entiende elementos no estructurales, con lo que un fallo de los mismos no debería provocar daños catastróficos. Sus aplicaciones son muy variadas, persianas, piezas sanitarias, biombos, elementos de fachada, elementos de cubierta, etc. A nivel estructural, los MC se están introduciendo en el mundo de la ingeniería civil, sobretodo en la construcción de puentes (si bien su uso todavía se considera minoritario). Los materiales conocidos como tradicionales ejercen una competencia muy fuerte en el sector (hormigones, metales, cerámicas, etc.). Sus prestaciones son muy bien conocidas por todas las figuras que aparecen en la construcción: proyectistas, contratistas, operarios e incluso los propios clientes. Según las estadísticas, este problema se acrecienta en el mercado español. El uso de materiales compuestos en la construcción es mucho menor respecto a lo que se observa en otros países del mundo. La construcción sólo representa un pequeño porcentaje del mercado español de materiales compuestos en volumen (13%), contra el 35% en Japón, el 32% en Brasil y el 30% de promedio mundial.

Para el sector concreto de la construcción industrial, se han separado los sistemas constructivos en resistentes (estructurales) y no resistentes (no estructurales). Para los primeros existen pocas aplicaciones conocidas, siendo la mayoría de ellas aprovechadas de otros usos. Así se obtiene el uso de perfiles estructurales de MC para finalidades secundarias como por ejemplo correas de cubiertas ligeras, usando secciones análogas a las usadas por las estructuras de acero. Para los sistemas constructivos no resistentes, existen multitud de aplicaciones comerciales en el mercado, que si bien no han estado específicamente diseñadas para su fin, sí que se pueden usar o adaptar fácilmente para su uso en edificios industriales.

Según el estudio realizado en la presente Tesis Doctoral, se llega a la conclusión que el material compuesto concreto más adecuado, actualmente, para usarse en elementos estructurales de edificios industriales es el formado por una matriz de poliéster isoftálico reforzado con fibras de vidrio E. Este MC es transparente ante las ondas electromagnéticas, no presenta problemas de corrosión, es el más conocido en el sector de la construcción, su precio no es desmesurado comparado con otros tipos de MC, y su proceso de fabricación es relativamente sencillo y económico, también comparado con otros tipos de MC.

Así mismo, se llega a la conclusión que la tecnología de fabricación que mejor se adapta a las exigencias concretas de este material para la construcción industrial, es la pultrusión. Esta permite la realización de gran variedad de tipos de perfiles (macizos o vacíos, rectilíneos o curvados, con distintas formas, etc.), perfiles de grandes dimensiones y gran automatización del sistema (producción en serie). Además acepta un elevado porcentaje de fibra de refuerzo en sus perfiles, estando estos altamente reforzados en la dirección de pultrusión. Este sistema admite la utilización de la resina de poliéster y de la fibra de vidrio para formar el material compuesto deseado sin ningún problema.

Mediante el ensayo de una serie de perfiles del MC seleccionado fabricado con el sistema de pultrusión, y su simulación mediante software de elementos finitos, se ha obtenido un perfil con una sección optimizada para los esfuerzos a soportar por parte de una estructura (vigas y pilares) de un edificio industrial. A este perfil se le ha llamado Elemento Resistente Mejorado (ERM) y consta de una sección rectangular hueca con las dimensiones indicadas en el capítulo 6.

Así mismo, se ha detectado una grave laguna de información referente a las uniones entre elementos de MC (resistentes o no resistentes). Por ello también ha sido necesario estudiar la tipología de unión más adecuada para cada caso de los sistemas constructivos analizados. Los resultados se pueden dividir entre lo que son uniones estructurales (básicamente uniones entre ERM), y lo que se ha considerado solamente como uniones constructivas.

Desde el punto de vista resistente, la tipología de unión que presenta mejor comportamiento es la atornillada con tornillos metálicos (tanto a cortante como a tracción). Por lo que respecta a los tiempos de unión, la solución que presenta más rapidez en su montaje en obra es la unión encajada, seguida muy de cerca por la unión adhesiva. Esta última clasificación se ve modificada si se considera el tiempo total necesario para que la unión pueda entrar en servicio. En este caso es necesario añadir al propio tiempo de montaje en obra, para la unión adhesiva, el tiempo de curado del adhesivo antes de poder cargarlo. Este tiempo varía entre 12 y 24 horas. Ello convierte a esta tipología de unión en la que más tiempo precisa con gran diferencia. Respecto a los costes de las distintas uniones, se concluye que la que menor coste presenta es la solución formada por unión atornillada con tornillos metálicos, mientras que en cuanto a la complejidad de diseño, las uniones encajadas presentan una gran dificultad debido al estudio individualizado que se requiere para cada unión. Así mismo, estas también presentan ciertas dificultades para realizar su control posterior, problema que se ve compartido y aumentado por las uniones adhesivas.

En general, se llega a la conclusión que, hoy por hoy, la mejor solución para unir los ERM en elementos estructurales de MC en edificios industriales es la unión atornillada con tornillos metálicos. Esta es la que mejores prestaciones presenta de eficiencia estructural y costes, siendo sólo superada en tiempo de ejecución por las uniones encajadas. De todas maneras, de forma general se puede apreciar que el resto de técnicas se ven limitadas por la falta de conocimientos, de métodos de cálculo fiables, o de materiales compuestos más avanzados.

Por lo que respecta a las uniones constructivas (no estructurales) de elementos formados por MC, en la tabla 10.1 se muestran las conclusiones obtenidas.

Tabla 10.1. Técnicas de unión seleccionadas para cada tipología de unión constructiva estudiada

Tipologías de unión no estructurales en un edificio industrial		Técnicas de unión escogidas
UNIONES EN FACHADAS	Uniones entre elementos de fachada	Encajada
	Uniones entre elementos de fachadas y la estructura	Atornillada con tornillos metálicos
UNIONES EN CUBIERTAS	Uniones entre elementos de cubiertas planas	Adhesiva
	Uniones entre elementos de cubiertas inclinadas	Atornillada con tornillos metálicos
	Uniones entre elementos de cubiertas planas y la estructura	Atornillada con tornillos metálicos
	Uniones entre elementos de cubiertas inclinadas y la estructura	Atornillada con tornillos metálicos
	Uniones entre elementos de cubiertas planas y la fachada	Adhesiva
	Uniones entre elementos de cubiertas inclinadas y la fachada	Adhesiva

Para constatar la aplicabilidad de los materiales compuestos avanzados en la construcción industrial, se ha demostrado la viabilidad técnica de las soluciones mediante MC, y se han analizado y comparado cuatro aspectos más por separado. Se ha realizado un estudio de costes, de tiempos, de seguridad en obra y de impactos medioambientales producidos por las soluciones constructivas estudiadas para el ciclo de vida del edificio industrial (desde la construcción hasta la desconstrucción). Estos cuatro aspectos no se pueden sumar entre ellos ni tampoco dar más importancia a uno de ellos para todos los casos. En el sector de la construcción pueden aparecer multitud de casuísticas, que si bien implican que siempre se debe cumplir la viabilidad técnica, no siempre existe un aspecto de los analizados que sea el más decisivo.

Se han analizado distintas soluciones constructivas (incluidas las de MC) para el sistema constructivo estructura, para el sistema constructivo fachadas, y para el sistema constructivo cubierta de un edificio industrial tipo (intervalos de dimensiones de edificios industriales extraídos de las necesidades de las PIMES españolas). Este análisis se ha desarrollado por separado para cada aspecto de los mencionados en el párrafo anterior teniendo en cuenta el ciclo de vida completo del edificio industrial. Los resultados indican cual es la solución constructiva más adecuada para cada sistema constructivo y para cada aspecto considerado. Bajo estas premisas, los resultados obtenidos para cada sistema constructivo estudiado se muestran en la tabla 10.2.

Tabla 10.2. Resultados del estudio del ciclo de vida de los sistemas constructivos analizados.

	Tiempo	Coste	Seguridad	Impacto medioambiental
SISTEMA CONSTRUCTIVO ESTRUCTURAL	Hormigón Prefabricado / ERM (1)	Hormigón prefabricado (2)	ERM	ERM / Hormigón Prefabricado (3)
SISTEMA CONSTRUCTIVO FACHADAS	Hormigón Prefabricado / Paneles alveolares de MC (4)	Paneles alveolares de MC	Paneles alveolares de MC / Hormigón Prefabricado	Paneles alveolares de MC
SISTEMA CONSTRUCTIVO CUBIERTA	Paneles de MC con núcleo de poliuretano	Paneles metálicos con núcleo de poliuretano (5)	Paneles de MC con núcleo de poliuretano	Paneles de MC con núcleo de poliuretano

(1) El hormigón prefabricado presenta una ligera ventaja frente a los MC (ERM) respecto el tiempo de construcción, mientras que en el tiempo de desconstrucción sucede todo lo contrario. Ello implica que se igualen los tiempos totales permitiendo realizar la afirmación de que ambas soluciones estructurales están igualadas en cuanto al estudio de tiempos se refiere.

(2) Para anchos de pórtico pequeños (10m), el coste de ERM es muy parecido e incluso ligeramente inferior al de hormigón prefabricado. Ello es debido a que el coste de las operaciones de construcción y de desconstrucción (sin tener en cuenta el material) es menor para MC. Consecuentemente, para pórticos con menor cantidad de material estructural presenta ventajas el MC, mientras que a medida que se aumenta la cantidad de peso necesario en la estructura, la diferencia total va aumentando. Resulta mucho más económica la tonelada de hormigón prefabricado que la de ERM.

(3) La tipología estructural de materiales compuestos (ERM) es la que presenta mejor comportamiento medioambiental a lo largo de su vida útil, con una muy ligera ventaja sobre la estructura prefabricada de hormigón. Esta ligera ventaja se puede aumentar fácilmente controlando las emisiones de zinc y plomo producidas en la fabricación del material, y las emisiones de cobre y plomo al final de su vida útil una vez en vertedero. La solución de MC todavía tiene margen para mejorar estos resultados (mayor control en aspectos concretos de su vida útil), mientras que el hormigón prefabricado difícilmente podrá mejorar pues los aspectos que más le castigan (desde un punto de vista medioambiental) son los relacionados con el peso (propiedad intrínseca de la solución estructural).

(4) La fachada de hormigón prefabricado presenta una ligera ventaja frente a los paneles alveolares de MC, en cuanto a tiempo de construcción, mientras que en el tiempo de desconstrucción se invierten las tendencias. Ello implica que las diferencias en los tiempos totales sean muy pequeñas, sobretodo comparado con las diferencias con el resto de soluciones constructivas para fachadas.

(5) La solución de cubierta formada por paneles de MC con núcleo de poliuretano, presenta unos costes totales ligeramente superiores a la mejor tipología encontrada (paneles metálicos con poliuretano). Si se

observan los resultados parciales del capítulo 8, se aprecia que ello es debido al elevadísimo precio de compra que tiene el panel de MC. En el resto de fases, el coste de la solución de cubierta con MC es menor. Ello implica que con un consumo a gran escala de este tipo de materiales, reduciendo el precio de compra, la solución de cubierta con MC fácilmente pasaría a presentar las mejores condiciones económicas en el conjunto del ciclo de vida de las cubiertas.

De la tabla 10.2 se concluye que para el sistema estructural, la solución de ERM presenta el mejor comportamiento (en solitario o compartido con otra solución) en 3 de los 4 aspectos analizados. El único aspecto considerado en el que no mejora los resultados del resto de soluciones es el coste. Este se ve claramente afectado por el elevado precio de compra del material, el cual se podría ver reducido en caso de fabricación industrializada del MC. Precisamente la solución más económica es la de hormigón prefabricado, la cual gracias a la economía de escala presenta unos precios de compra por tonelada muy reducidos.

Para el sistema constructivo fachadas, la solución mediante paneles de hormigón prefabricado y la solución mediante paneles alveolares de MC presentan un comportamiento muy parecido respecto a los tiempos y la seguridad, mientras que la segunda opción adquiere una clara ventaja en los aspectos de costes e impactos medioambientales.

En el tercer y último sistema constructivo analizado, la cubierta, los paneles de MC con núcleo de poliuretano presentan el mejor comportamiento en todos los aspectos menos en el coste, donde de nuevo se ven castigados por un elevado precio de compra del material.

Los resultados de los estudios de ciclo de vida realizados para los distintos sistemas constructivos, podrían verse alterados en un medio plazo de tiempo en función de la evolución de los precios de los MC, del desarrollo de las técnicas de unión encajada, adhesiva o soldada, o bien con el avance tecnológico e introducción en el sector de la construcción de los MC termoplásticos. Todo ello puede contribuir a mejorar los resultados obtenidos mediante el diseño de edificios basados en el uso de MC más económicos, más resistentes, con menor necesidad de mantenimiento, con velocidades de montaje muy superiores y con un grado de reciclabilidad muy elevado.

La conclusión general principal, en vistas de los resultados obtenidos, es que la aplicabilidad de los MC en la construcción industrial es posible, y que hoy día, ya es parcialmente ventajosa respecto a otras soluciones consideradas tradicionales. El punto débil de esta aplicación es el coste, pero su diferencia con otras soluciones se reduce en el momento en que se tiene en cuenta el ciclo de vida entero de un edificio industrial. La tendencia en los últimos años del mercado de MC ha sido la de bajar sus precios de venta al aumentar su producción. Ello implica que a corto-medio plazo se prevé que el coste dejará de ser un elemento desventajoso para este tipo de materiales, cobrando mayor importancia precisamente los aspectos ventajosos como son el tiempo, la seguridad y el impacto medioambiental del uso de estos materiales. Para todo ello, la tecnología usada por los MC debe avanzar para cubrir las necesidades del sector de la construcción. Así se pide al material compuesto más prestaciones y menor coste, se pide al proceso más rapidez y más precisión, pasando todo ello por una optimización de los moldes utilizados, por automatizar los procesos, por utilizar

nuevas fibras y combinaciones, por combinar los materiales compuestos con materiales tradicionales, y por potenciar las matrices reciclables y las fibras naturales.

Una de las exigencias actuales principales para un material compuesto es que trabaje en las tres dimensiones (normalmente sólo lo hace en dos). Para ello se está experimentando en lo que se denomina la arquitectura textil. En función de cómo se dispongan las fibras se puede lograr un trenzado en 3D. Tan sólo es cuestión de saber como tirar de la fibra y como girar las bobinas. Ejemplos de ello son el 3D Weaving, el Stitching y el 3D Braiding (Chiminelli et al., 2003), aunque ninguno de ellos por el momento se ha desarrollado completamente.

10.2. Contraste de las hipótesis planteadas

En el capítulo 5 de conclusiones del Estado del Conocimiento, se plantearon una serie de hipótesis las cuales se contrastan en este apartado. Este contraste se realiza recogiendo todo el trabajo realizado en esta Tesis Doctoral. Las hipótesis realizadas se dividen en Hipótesis Particulares e Hipótesis General.

10.2.1. Hipótesis particulares.

➤ *Hipótesis 1:*

Técnicamente es viable el uso de MC avanzados en sistemas constructivos de edificios industriales.

En el Estado del Conocimiento se mencionan distintas soluciones constructivas formadas por MC para sistemas constructivos en general. Muchas de estas soluciones ya se aplican a edificios industriales (fachadas, cubiertas, etc.) mientras que otras se aplican en otros sectores como el de la ingeniería civil. En el capítulo 6 se realiza una propuesta de proceso constructivo para un edificio industrial usando MC, siendo para ello necesario el haber realizado un estudio de selección del material compuesto concreto y optimización de secciones para perfiles estructurales, así como un estudio completo de las distintas soluciones de uniones para elementos formados por MC. Con todo ello se muestra que es factible (técnicamente viable) la construcción de un edificio industrial mediante el uso de MC avanzados en los sistemas estructural, fachadas y cubierta.

Así pues, del contraste de la hipótesis 1, se concluye que esta se puede considerar como CIERTA.

➤ *Hipótesis 2:*

El uso de MC avanzados en edificios industriales presenta costes menores respecto a las soluciones tradicionales.

Tal y como se analiza en los capítulos 7 y 8 de la Tesis, y se resume en la tabla 10.2 de este mismo capítulo, para el aspecto de costes, la solución constructiva mediante MC presenta menores costes para el sistema constructivo fachadas (paneles alveolares de MC). Sin embargo, esta afirmación no se puede realizar para el sistema constructivo estructural ni para el sistema constructivo cubierta. En ambos casos existe una solución

constructiva, considerada como tradicional, que presenta menores costes, a día de hoy, que la solución propuesta de MC.

Así pues, del contraste de la hipótesis 2, se concluye que esta se puede considerar como FALSA.

➤ *Hipótesis 3:*

El uso de MC avanzados en edificios industriales presenta tiempos de construcción menores respecto a las soluciones tradicionales.

Según el trabajo realizado reflejado en los capítulos 7 y 8 de la Tesis, y resumido en la tabla 10.2 de este mismo capítulo, para el aspecto de tiempos, la solución constructiva mediante MC presenta menores tiempos para el sistema constructivo cubierta (paneles de MC con núcleo de poliuretano). Sin embargo, para los sistemas constructivos estructura y fachadas, la solución mediante MC no es la que presenta el menor tiempo de todas las analizadas, sino que comparte esta posición con otra solución constructiva como la estructura de hormigón prefabricado, para sistema estructural, y los paneles de hormigón prefabricado, para las fachadas. De todas maneras tampoco se puede afirmar que existe una solución considerada tradicional que presente tiempos menores que las propuestas usando MC avanzados.

Del contraste de la hipótesis 3, se concluye que esta se puede considerar como CIERTA CON MATICES.

➤ *Hipótesis 4:*

El uso de MC avanzados en edificios industriales presenta mayor seguridad de construcción respecto a las soluciones tradicionales.

Al igual que para la hipótesis anterior, tal y como se analiza en los capítulos 7 y 8 de la Tesis y se resume en la tabla 10.2 de este mismo capítulo, para el aspecto de seguridad en obra, las soluciones constructivas mediante MC presentan menores magnitudes de riesgo (mayor seguridad) para todos los sistemas constructivos considerados. En la tabla 10.2, para el sistema constructivo fachadas se consideran como mejores la solución de MC (paneles alveolares de MC) y la de paneles de hormigón prefabricado. De hecho se ha considerado como una especie de empate técnico debido a la poca diferencia existente entre ellos. Sin embargo, a efectos de contrastar esta hipótesis, en el capítulo 8 se aprecia una pequeña diferencia a favor de la solución de MC en cuanto a magnitud de riesgo se refiere.

Así pues, del contraste de la hipótesis 4, se concluye que esta se puede considerar como CIERTA.

➤ *Hipótesis 5:*

El uso de MC avanzados en edificios industriales presenta un menor impacto ambiental respecto a las soluciones tradicionales.

Al igual que para las hipótesis anteriores, tal y como se analiza en los capítulos 7 y 8 de la Tesis y se resume en la tabla 10.2 de este mismo capítulo, para el aspecto de impacto medioambiental, las soluciones constructivas mediante MC presentan mejor comportamiento (menores impactos medioambientales) para todos los

sistemas constructivos considerados. En la tabla 10.2, para el sistema constructivo estructura se consideran como mejores la solución de MC (ERM) y la de estructura de hormigón prefabricado. A efectos de contrastar esta hipótesis, en el capítulo 7 se aprecia una pequeña diferencia a favor de la solución de MC en cuanto a impacto medioambiental se refiere.

Así pues, del contraste de la hipótesis 5, se concluye que esta se puede considerar como CIERTA.

10.2.2. Hipótesis general.

➤ *Hipótesis General:*

La aplicación de MC avanzados en edificios industriales presenta ventajas respecto a las soluciones consideradas tradicionales.

Realizando una lectura literal de la hipótesis general, se entendería que tan sólo que exista una ventaja de la aplicación de los MC avanzados respecto a las soluciones tradicionales, la hipótesis debería ser cierta. El doctorando no ha querido transmitir esta idea con la formulación de esta hipótesis, sino que también se ha querido tener en cuenta las desventajas de una posible aplicación de estos materiales respecto a los tradicionales. De esta manera se ha analizado para que casos es ventajoso el uso de MC, y para cuales no es así (implicando que una solución tradicional mejora las prestaciones de la solución mediante MC).

Resulta ventajoso la aplicación de MC para el sistema constructivo estructura en los aspectos de seguridad y de impacto medioambiental, para el sistema constructivo fachadas en los aspectos de costes, de seguridad y de impacto medioambiental, y para el sistema constructivo cubierta en los aspectos de tiempos, seguridad y de impacto medioambiental. En cambio, existe una solución constructiva mejor que la propuesta de MC para los casos de sistema constructivo estructura en los aspectos de tiempos y costes, para el sistema constructivo fachadas en el aspecto de tiempos, y para el sistema constructivo cubierta en el aspecto de costes. Analizando todas las ventajas y desventajas, así como la magnitud de estas desventajas para cada caso, se llega a la conclusión general que la aplicación de MC avanzados, en global, presenta más ventajas que inconvenientes respecto a las soluciones consideradas como tradicionales para edificios industriales.

Del contraste de la hipótesis general, se concluye que esta se puede considerar como CIERTA CON MATICES.

10.3. Redacción de las Tesis

En la tabla 10.3 se recogen los resultados del contraste realizado de las hipótesis de trabajo. Este contraste posibilita el enunciado de las Tesis que resuelven las hipótesis planteadas en el capítulo 5.

Tabla 10.3. Resultados del contraste de las hipótesis de trabajo planteadas.

Formulación de las hipótesis de trabajo planteadas	Resultado del contraste
Hipótesis 1. Técnicamente es viable el uso de MC avanzados en sistemas constructivos de edificios industriales	CIERTA
Hipótesis 2. El uso de MC avanzados en edificios industriales presenta costes menores respecto a las soluciones tradicionales	FALSA
Hipótesis 3. El uso de MC avanzados en edificios industriales presenta tiempos de construcción menores respecto a las soluciones tradicionales	CIERTA CON MATICES
Hipótesis 4. El uso de MC avanzados en edificios industriales presenta mayor seguridad de construcción respecto a las soluciones tradicionales	CIERTA
Hipótesis 5. El uso de MC avanzados en edificios industriales presenta un menor impacto ambiental respecto a las soluciones tradicionales	CIERTA
Hipótesis General. La aplicación de MC avanzados en edificios industriales presenta ventajas respecto a las soluciones consideradas tradicionales	CIERTA CON MATICES

Las Tesis a las que se llega como resultado de la presente Tesis Doctoral son las siguientes:

➤ *Tesis 1:*

Desde un punto de vista técnico, es viable el uso de MC avanzados en los sistemas constructivos estructura, fachadas y cubierta de edificios industriales.

➤ *Tesis 2:*

La aplicación de MC avanzados en los edificios industriales, en general, no presenta costes menores respecto a las soluciones tradicionales.

➤ *Tesis 3:*

El uso de MC avanzados en edificios industriales presenta tiempos de construcción menores o iguales a los obtenidos en las soluciones tradicionales.

➤ *Tesis 4:*

El uso de MC avanzados en edificios industriales presenta mayor seguridad de construcción y desconstrucción respecto a las soluciones tradicionales.

➤ *Tesis 5:*

El uso de MC avanzados en edificios industriales presenta un menor impacto ambiental, a lo largo del ciclo de vida, respecto a las soluciones tradicionales.

➤ *Tesis 6:*

La aplicación de MC avanzados en los sistemas constructivos estructura, fachadas y cubierta de edificios industriales, presenta ventajas respecto a las soluciones constructivas consideradas tradicionales, en los edificios industriales más habituales para las PIMES españolas.

10.4. Validación de resultados

Una vez extraídas las conclusiones del trabajo realizado, y redactadas las Tesis alcanzadas, se ha procedido a la validación de los resultados obtenidos. Con ello se persigue constatar entre los proyectistas de edificios industriales la validez del trabajo desarrollado, de las conclusiones obtenidas y de las Tesis redactadas, así como sondear las predisposiciones de estos profesionales ante una hipotética introducción de los MC en la construcción industrial.

La validación ha consistido en un trabajo de campo, en el cual se ha realizado una entrevista personal y pasado un cuestionario a distintas empresas proyectistas de naves industriales. El detalle de este proceso se ha incluido en el capítulo 9 de la presente Tesis Doctoral.

Las conclusiones obtenidas de la validación se indican a continuación:

- Existe un gran desconocimiento entre los profesionales proyectistas, sobre la aplicación y ventajas de los MC en la construcción en general, y en la construcción industrial en particular.
- Este desconocimiento se ve aumentado cuando se trata de empresas proyectistas de tamaño pequeño, precisando estas de un plan de formación continua que sí tienen las empresas grandes.
- Una posible opción para lograr un mayor conocimiento de los MC por parte de los proyectistas, es su introducción en los planes de estudio de carreras como la ingeniería industrial, la arquitectura, etc.
- Las ventajas más valoradas por los proyectistas son la ligereza del material y su rapidez de construcción.
- Las desventajas principales son el elevado coste y los problemas que presentan los MC ante el fuego.
- Los proyectistas son más bien reacios a utilizar estos materiales, aún y reducir el coste y solucionar el problema del fuego. Consideran que no tienen conocimientos teóricos suficientes sobre estos materiales como para poderlos aplicar, y piden experimentaciones prácticas aplicadas que no presenten problemas con el tiempo. Una de las primeras preguntas que efectúan es sobre los edificios ya existentes en que se han aplicado estas soluciones.
- Del cuestionario contestado se extrae que el trabajo realizado en la Tesis ha modificado en general su visión sobre los MC, y que los proyectistas opinan que precisamente este trabajo puede ayudar a la introducción de estos materiales en el sector de la construcción industrial.
- En cambio, son reticentes (sobretudo las grandes organizaciones) a la posibilidad de una penetración en masa de los MC, justificándose en que el aspecto del coste todavía es demasiado importante y en que existen presiones económicas de determinados “lobbies” que impedirán su extensión en el sector de la construcción.

10.5. Contribución al conocimiento

El trabajo realizado en esta Tesis Doctoral ha significado un avance en el Conocimiento en los puntos siguientes:

- Se ha completado un Estado del Conocimiento sobre la aplicación actual de soluciones constructivas usando MC en el sector de la construcción en general, y concretamente en la construcción industrial.
- Se ha obtenido un Elemento Resistente Mejorado (ERM), consistente en un perfil estructural con un MC seleccionado, fabricado con una tecnología seleccionada, y con una sección determinada para aplicar a los elementos estructurales (pilares y vigas) de un edificio industrial, mejorando las prestaciones de las soluciones actuales.
- Se ha caracterizado el MC seleccionado a través de ensayos en laboratorio y simulación mediante software de elementos finitos.
- Se ha realizado un estudio para dictaminar la técnica de unión más adecuada para cada unión potencial de un edificio industrial.
- Se han definido las necesidades de intervalo de dimensiones para un edificio industrial tipo según las PIMES españolas.
- Se ha realizado una comparación de costes totales (ciclo de vida de un edificio industrial) de las soluciones constructivas más habituales y la solución propuesta de MC, para los sistemas constructivos estructura, fachadas y cubierta de un edificio industrial.
- Se ha efectuado una comparación de tiempos totales (ciclo de vida de un edificio industrial) de las soluciones constructivas más habituales y la solución propuesta de MC, para los sistemas constructivos estructura, fachadas y cubierta de un edificio industrial.
- Se ha realizado una comparación de seguridad (a lo largo del ciclo de vida de un edificio industrial) de las soluciones constructivas más habituales y la solución propuesta de MC, para los sistemas constructivos estructura, fachadas y cubierta de un edificio industrial.
- Se ha modificado y adaptado un método de evaluación de riesgos (FINE) para permitir la comparación de seguridad en obra entre distintas soluciones constructivas para un mismo sistema constructivo de un edificio industrial.
- Se ha desarrollado una comparación de impactos medioambientales (a lo largo del ciclo de vida de un edificio industrial) de las soluciones constructivas más habituales y la solución propuesta de MC, para los sistemas constructivos estructura, fachadas y cubierta de un edificio industrial.

En general, se ha demostrado la aplicabilidad de los MC en la construcción industrial analizando la viabilidad técnica con las propuestas y modificaciones necesarias en el proceso constructivo, y se han obtenido las ventajas y desventajas concretas y cuantificadas del uso de MC en soluciones constructivas para los sistemas constructivos estructura, fachadas y cubierta de un edificio industrial, considerando los aspectos de costes, tiempos, seguridad e impactos medioambientales a lo largo del ciclo de vida de un edificio industrial. Se han modelizado los resultados obtenidos mediante un Modelo de Regresión Lineal Múltiple (MRLM), permitiendo una predicción de resultados y un estudio de la significación de cada variable explicativa.

10.6. Futuras líneas de investigación

En el transcurso de esta Tesis Doctoral se han apreciado una serie de lagunas y posibilidades de continuación de esta Tesis, que perfectamente pueden ser objeto de futuras líneas de investigación. Estas se indican a continuación:

- El estudio de los MC realizado en esta Tesis Doctoral se ciñe a los existentes actualmente en el mercado. Un posible campo de trabajo futuro sería el desarrollo de un nuevo MC con mejores prestaciones para cumplir con los requisitos para su aplicación en edificios industriales. En el trabajo realizado se ha tenido en cuenta el MC desde un punto de vista macroscópico, siendo una posible línea de investigación su análisis microscópico.
- Desarrollar la tecnología para la mejora de la fabricación de MC con matriz termoplástica. Ello implicaría la posibilidad del uso de esta tipología de materiales en los sistemas constructivos de los edificios industriales, facilitando el reciclaje al final de su vida útil.
- Estudiar nuevas tecnologías para la revalorización de los MC, sobretodo para los formados por matrices termoestables. Se pueden buscar posibles soluciones para reciclar, reusar o recuperar energéticamente los MC una vez terminado su ciclo de vida.
- Otro campo de trabajo futuro es el de la protección contra incendios de los MC. En la actualidad existen una serie de cargas a introducir en el material, gracias a las cuales se retrasa la propagación de la llama o incluso se elimina. Ello implica una ventaja respecto a otras soluciones constructivas en sistemas como fachadas o cerramientos interiores. En cambio, el gran hándicap de estos materiales respecto al fuego aparece en su uso como estructura de un edificio. En este caso el elemento estructural puede precisar de una cierta estabilidad al fuego (si bien en muchos casos para edificios industriales, según la nueva normativa RD2267/2004, no precisa de ninguna EF). Una posible línea de trabajo es el estudio y diseño de la protección contra incendios para estos elementos.
- Desarrollo de nuevos métodos de unión o mejora de los actuales para unir elementos formados por MC. De los analizados en esta Tesis Doctoral, se podrían perfeccionar la soldadura para desarrollarla en obra, la unión adhesiva para incrementar su rapidez y facilitar los controles no destructivos, y la unión tipo C-Lock industrializando sus soluciones.
- Evidentemente, otra línea de trabajo sería la continuación directa de la seguida en esta Tesis. Se podría continuar con la aplicabilidad y comparación con soluciones constructivas tradicionales de elementos formados de MC para otros sistemas constructivos como forjados, cerramientos interiores, carpintería, etc.
- Se podría realizar una campaña de ensayos para “normalizar” distintos perfiles estructurales y proponer algún método simplificado de calculo aproximado.
- Por último, indicar que otro posible trabajo de futuro sería la construcción física real de un edificio industrial, bajo los parámetros indicados en esta Tesis, para constatar que se cumplen las hipótesis y resultados teóricos obtenidos de la misma.

