

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se exponen tanto las conclusiones generales como las conclusiones específicas, relativas a los diferentes temas que se han tratado y que han sido objeto de análisis de la investigación realizada. Éstas últimas se desarrollan puntualmente sobre cada tema en particular en la parte final de cada uno de los capítulos que comprenden la presente tesis. Asimismo, se muestran las futuras líneas de investigación que pueden plantearse a partir de los trabajos desarrollados a lo largo de esta tesis doctoral.

9.1. CONCLUSIONES GENERALES

Este trabajo de investigación ha sido planteado con el **objetivo principal** de proponer una metodología para el diseño y cálculo estructural del sistema constructivo de paneles aligerados con poliestireno expandido y malla electrosoldada espacial, lo cual se entiende se ha logrado de forma satisfactoria.

El análisis del elemento se ha basado, por un lado en la realización de campañas experimentales: paneles de pequeñas dimensiones y paneles esbeltos a escala real a compresión simple y a flexión en forjados a escala real biapoyados y continuos, y por otro lado, en la propuesta de un modelo numérico para simular el comportamiento del panel en vertical y horizontal, validado por medio de los resultados obtenidos experimentalmente.

Los resultados experimentales mostraron un comportamiento satisfactorio del elemento; la buena concordancia entre los resultados obtenidos a través del modelo y los resultados experimentales, dio cabida a simular numéricamente varios tipos de paneles, interponiendo nuevas variables de análisis que ajustaron el modelo de forma tal, que puede ser utilizado como una herramienta útil para el cálculo de este tipo de elementos.

Cabe anotar que se tomó como criterio de análisis lo estudiado en el estado del conocimiento, donde hasta el momento se tienen diferentes aplicaciones del sistema, pero

no se define ni especifica ningún tipo de procedimiento claro para el cálculo, lo que motivó sin duda a investigar acerca del tema. Dentro de esta metodología propuesta se definen cada una de los estados límites presentes en la estructura, en ella se procura seguir y dar aplicación a la instrucción española vigente, a pesar de estar el elemento fuera de ella ya que se emplean materiales no usados de manera estructural como lo es el acero liso.

Para dimensionar y efectuar el cálculo a compresión del panel se propone una *función de tipo exponencial en forma de "s"*, en donde los valores límites de ésta dependen de las variables principales utilizadas, la *longitud (L)* y de la *separación (S) entre conectores*, para luego obtener finalmente las correspondientes cargas de rotura. Por medio de esta formulación se reproduce de manera clara y fehaciente el comportamiento de este tipo de elementos sometidos a cargas axiales, dando lugar a su aplicación como una herramienta para la predicción del comportamiento del panel.

Las *soldadura de unión* de la malla electrosoldada con los conectores es de gran importancia, de ésta depende el trabajo de forma conjunta del elemento ya sea en vertical o en horizontal. El análisis efectuado da lugar a afirmar que al no tener el 100% de los conectores soldados, se presenta una disminución de la carga de rotura del panel, debido al aumento de la separación entre los conectores, lo que incrementa igualmente la tensión en el mismo. Horizontalmente la falta de esta soldadura de unión provocaría que cada una de las placas de hormigón y mortero actúe de forma independiente. Es indispensable llevar una puesta a punto a nivel industrial de estas uniones de soldadura para garantizar una mayor respuesta del elemento.

Igualmente se propone una *formulación para el cálculo de flechas máximas en el centro del vano para elementos fisurados de sección constante*, tomando como base lo propuesto en la instrucción española vigente [EHE, 1999] y los trabajos realizados por Branson (1980), teniendo en cuenta una inercia efectiva del elemento resultante de la suma de los porcentajes de una inercia fisurada y sin fisurar. Por medio de la formulación propuesta se obtienen un grado de aproximación entre los valores medidos y calculados bastante razonables, lo que da lugar a su aplicación desde el punto de vista de tener previo conocimiento acerca del comportamiento del panel sometido a flexión.

Para la implementación práctica de la propuesta y cara a potenciar el uso por parte del proyectista de este tipo de sistemas, se proponen diferentes *diagramas y tablas de interacción para realizar el diseño del elemento a compresión y a flexión*. Las variables principales utilizadas, en concordancia con las formulaciones propuestas anteriormente, son la *longitud (L)* y de la *separación (S) entre conectores*.

Esta investigación se llevo a cabo mediante un análisis paso a paso del comportamiento mecánico del panel, teniendo en cuenta resultados experimentales y numéricos, alcanzando satisfactoriamente los objetivos principales y específicos que se plantearon para esta tesis. Lo anterior, finalmente deriva en una serie de conclusiones específicas que se exponen a continuación.

9.2. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

Durante la definición de la metodología para el cálculo estructural de los paneles aligerados se obtuvieron en cada uno de los capítulos que comprenden la presente tesis, una serie de conclusiones específicas sobre cada tema en particular. Ahora bien como complemento a cada una de ellas a continuación se exponen las conclusiones específicas más relevantes de la investigación:

- En los **paneles a compresión** actuando como muros o paredes, la variable principal es la longitud del conector ($L_{conector} = e_{eps} + 30 \text{ mm}$), los análisis realizados muestran que al aumentar la longitud del conector (mayores cantos), se incrementa la tensión en el mismo y la carga de rotura del panel disminuye, por esto en longitudes pequeñas del conector el comportamiento es a **compresión simple**. A mayores longitudes en el conector se produce una **rotura por flexión en una de las caras del panel**, debido a la rotura de la soldadura de unión del conector con la malla. Esta rotura por flexión se presenta entre los puntos de soporte dados por los conectores que no están desprendidos, para los cuales la soldadura de unión con la malla aún permanece. Es aquí donde se produce un descenso en la resistencia del panel.
- Por medio del modelo se establece la importancia de la separación (S) entre conectores, para dar aplicación al panel verticalmente se recomienda disminuir dicha separación si se quiere aumentar la longitud del conector (mayor canto). A menor separación mayores longitudes del conector ($L_{conector} = e_{eps} + 30 \text{ mm}$). Una de las aplicaciones que se entiende necesaria en la construcción de viviendas, es la de instalar persianas de rollo, para las cuales es preciso si se quiere conservar una estética preponderante, incluir este rollo dentro de los muros de la vivienda. En este caso es donde se debe tener en cuenta la longitud y la separación de los conectores, para obtener un mayor canto del muro y así poder introducir el rollo dentro de éste.
- Para los casos estudiados de paneles con una altura de 2,8 m y espesor total de 180 mm, a efectos de inestabilidad según la normativa EHE artículo 43°, no se presentan efectos de segundo orden en el elemento y se desprecian los mismos. Las dos capas de hormigón trabajan solidariamente sin presentarse deformaciones laterales representativas, cabe anotar que industrialmente estas son las características y dimensiones generalmente usadas en la práctica.
- De la misma manera para muros de apoyo de 3,0 a 3,3 m de altura, teniendo en cuenta una condición de contorno empotrado en ambos extremos, teóricamente no presentarían ningún efecto de pandeo, cumpliendo con los parámetros de esbeltez geométrica y mecánica que establece la norma. En consecuencia no se realiza comprobación alguna en relación con el estado límite de inestabilidad, sin embargo, si se quiere llegar a alturas superiores, es indispensable realizar la verificación correspondiente.
- En el **comportamiento a flexión** del panel, los esfuerzos de tracción son absorbidos por las cuantías de la armadura espacial del panel. Para los casos en estudio existe una contribución y un comportamiento en conjunto entre capas, la fibra neutra sube

y se sitúa usualmente dentro de la capa de compresión de hormigón, por lo que las compresiones son absorbidas completamente por dicho material ($x < h_I$).

- Si bien es cierto que dados los resultados experimentales y aplicando la formulación de Branson (1980), la rigidez del elemento representa un 20 % de la rigidez estimada por medio del cálculo, para el cálculo de deformaciones máximas en el centro del vano, propiamente para el módulo de elasticidad del hormigón, se propone un 60 a 80% del valor definido por la instrucción española para el hormigón equivalente. De la misma manera, para la obtención de la inercia efectiva, ya sea por medio de la aplicación de la formulación propuesta ó por medio de la sugerida en la EHE, ambas tienen como resultado la sumatoria de un porcentaje de la inercia sin fisurar y la inercia fisurada del elemento.
- Las deformaciones instantáneas máximas, tanto en forjados biapoyados como continuos, son menores a las estipuladas según la instrucción española vigente ($L/400$), lo que confirma el buen funcionamiento del sistema a flexión. Igualmente las deformaciones estimadas mediante la formulación propuesta, en comparación con los resultados experimentales, dejan un margen de seguridad suficiente para dar aplicación, sin ningún problema, a los tamaños estudiados. Las dimensiones utilizadas experimentalmente son representativas de un forjado frecuente en una vivienda unifamiliar, por esto desde el punto de vista mecánico y técnicamente rentable, se pueden recomendar luces no superiores a los 4,5 m para que de esta manera no se presenten mayores deformaciones en el elemento.
- Al igual que la soldadura de unión entre el conector y la malla, el zuncho de borde en el trabajo del panel como forjado es de gran importancia. En los casos estudiados la unión entre el forjado y el muro se realizó con ganchos de acero en forma de “u” para unir ambos elementos, los resultados fueron satisfactorios. Indiscutiblemente por medio del zuncho de borde se tiene una menor deformación del forjado ya que le proporciona una mayor rigidez al elemento, éste contribuye además a una mejor distribución de los esfuerzos a los apoyos, todo lo anterior se corroboró de forma experimental y numérica. De esta manera es posible situar la capacidad del elemento a flexión en un término medio del empotramiento perfecto, en el entorno de 1/16 como un valor conservador del lado de la seguridad del panel.
- A través del zuncho en los extremos se crea un arriostramiento entre capas que impide mayores desplazamientos horizontales y cualquier movimiento de forma independiente entre ellas, lo que daría lugar a un posible *efecto de rasante*. Numéricamente el estudio realizado para este efecto, confirma que sin la necesidad del anillo de borde existe contribución entre capas sin presentarse mayores desplazamientos que causen una rotura de la soldadura de unión entre el conector y la malla, sin embargo las ventajas mencionadas que ofrece el zuncho dan lugar a recomendar su aplicación en obra. El caso más desfavorable al efecto de rasante se presenta aplicando en uno de los extremos de un panel sin zuncho una carga puntual a 45°, este desplazamiento disminuye indudablemente con la conformación del zuncho en los extremos.
- Ahora bien, de forma tanto vertical como horizontal se estudia el comportamiento del conector, ya que éstos actúan a manera de cercos o flejes que mantienen al

panel comportándose como un solo elemento en conjunto. Verticalmente, los conectores se comportan de forma intercalada a compresión y a tracción, estos esfuerzos en los conectores disminuyen con la incorporación del zuncho en la parte superior del elemento. Éste absorbe gran parte de los esfuerzos que llegan a cada uno de los conectores, lo que favorece al comportamiento del panel ya que las tensiones en los mismos disminuyen. Horizontalmente, los conectores se encuentran comprimidos y en longitudes cortas no se presenta ningún *efecto de punzonamiento* y de igual manera no se presentan *efectos de inestabilidad*, pandeo del conector. El zuncho en los extremos al igual que en el caso anterior, absorbe mayores esfuerzos axiales y reparte de forma uniforme los esfuerzos que llegan a cada uno de los conectores, evitando que se sobrecarguen y se presenten algunos de los efectos mencionados.

9.3. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

En base al trabajo de investigación que se ha desarrollado, se mencionan a continuación algunos temas puntuales de investigación que pueden complementar y profundizar los estudios realizados en este proyecto.

Con el fin de agotar los límites del sistema, hubiera sido posible realizar una estructura de 2 a 3 plantas a escala real, analizando las posibilidades estructurales del sistema en altura. Realizar una *simulación numérica* que establezca el comportamiento estructural del sistema y mediante *ensayos* complementar la información, estudiando el comportamiento y el trabajo en conjunto del panel, movimientos horizontales y verticales que se presenten en la estructura, además de tener en cuenta si es preciso construir forjados de tipo continuo. Lo anterior da lugar a estudiar otro tipo de factores determinantes dentro del comportamiento estructural del sistema, como las uniones entre elementos, muro-muro, muro-forjado, muro-forjado-muro, aberturas ya sean cuadradas o curvas, dinteles, etc.

Igualmente se entiende que la malla actualmente utilizada en los paneles se encuentra fuera de la instrucción ya que se utiliza un diámetro de 3,4 mm de acero liso. Ésta puede ser una de las barreras para la implantación de este tipo de sistemas en el ámbito constructivo, para evitar esto puede realizarse una verificación y un estudio acerca de la utilización de mallas que sean aceptadas como estructurales, sustituir las con mallas de 4; 4,5 ó 5 mm establecidas en la norma. Los conectores en este caso no se encuentran fuera de la norma, sin embargo puede profundizarse el estudio tomando los conectores de forma angular o inclinada, como se tiene en varias de las aplicaciones de sistemas de familias similares.

Los *Ensayos de tipos sísmicos numéricos y experimentales* para determinar cualquier tipo de daño o fisuración en los paneles luego de una acción dinámica, ampliaría la implementación del sistema en países que tengan riesgo sísmico alto, definiendo un procedimiento para la puesta en obra del sistema con el fin de reducir este riesgo.

De forma puntual dentro del análisis de la estructura se pueden estudiar el confort del sistema: aislamiento térmico, acústico y resistencia al fuego.

- La construcción del zuncho de borde crea un **puente térmico** latente dentro de la estructura, esto se puede solventar mediante la aplicación de productos de construcción complementarios. Ahora bien, se puede realizar el estudio de la influencia térmica que se tiene en este caso al incluir o no el zuncho en los extremos. Se considera que el panel trabaja como una viga isostática, de forma que no se transmiten momentos de empotramiento a los elementos verticales, así se evita el puente térmico ocasionado por el zuncho de borde pero se incrementa la deformabilidad del panel.
- La **aislación acústica** del panel es determinante si se enfoca desde el punto de vista de la estructura. Pruebas piloto mostraron la influencia de cada uno de los componentes del panel, influyen las condiciones de contorno que se impongan, la forma de unión entre elementos, el espesor del mortero y EPS, etc. Asimismo, interviene dentro del comportamiento el nivel de transmisión que tengan cada uno de los materiales, los conectores por su ubicación en los muros, además de su material son transmisores directos del sonido. Una línea de investigación importante desde el punto de vista de confort del sistema, puede estudiarse si es necesario el uso de paneles especiales con núcleo de diferentes materiales como lana de roca o simplemente con la variación de la densidad del poliestireno expandido para mejorar la capacidad de aislamiento.
- La realización de investigaciones sobre la **Resistencia al fuego** del sistema, complementando la información de tipo confort, se puede efectuar mediante ensayos estructurales sobre paneles. Pruebas piloto de resistencia al fuego sin ningún tipo de carga sobre el panel, mostraron que se crea en la parte central del panel, luego de desaparecer el EPS, una cámara de aire que impide que el calor al que esta expuesta una de las caras del panel, llegue al otro lado, lo que sin duda es una ventaja. Los resultados fueron satisfactorios, teniendo un RF dentro de lo establecido por la normativa. Determinar la estabilidad al fuego de muros y de forjados bajo cargas que simulen las condiciones dadas en el caso de incendio de viviendas o edificaciones, puede ser de gran importancia dentro del comportamiento del sistema.

El estudio de la seguridad frente a agresiones externas y las diferentes situaciones a las que podría estar expuesto el sistema, resulta un punto crítico dentro del estudio en general. El **impacto y seguridad**, pueden ser un frente a analizar como complemento del estudio, situaciones de **viento o impacto de tipo golpe o choque**, ya que los espesores de capas de mortero y EPS, pueden ser atravesados con facilidad si no se toman las medidas necesarias para garantizar la seguridad de la edificación.

De esta forma se tiene la posibilidad de realizar una aplicación de la metodología propuesta con el fin de aportar y de dar un conocimiento más exhaustivo del panel y del sistema constructivo, corroborando y mejorando lo expuesto en la presente tesis.