

PROPUESTA DE CONFIGURACIÓN Y DE MÉTODO DE INSPECCIÓN DE UNIONES MIXTAS MEDIANTE PERNOS CONECTORES

Autor:

Antonio Aznar López. Arquitecto

Directores:

Jaime Cervera Bravo. Doctor Arquitecto

José Ignacio Herando García. Doctor Arquitecto



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE MADRID

DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS DE EDIFICACIÓN

2013

Índice general

Índice general	1
1 Introducción	3
1.1. Motivación de la investigación	3
1.2. Alcance de la investigación	6
1.3. Objetivos	6
1.4. Medios disponibles	7
2 Estado actual de la cuestión	9
2.1. Uniones mixtas en edificación	9
2.2. Conectores	18
2.3. Revisión histórica de la investigación	24
2.4. Métodos de cálculo de anclajes	43
2.5. Aplicación normativa	54
3 Propuesta de unión entre pilares metálicos y vigas de hormigón mediante pernos conectores	73
3.1. Introducción	73
3.2. Análisis teórico previo	73
3.3. Objetivos	82
3.4. Campo de aplicación	83
3.5. Investigación analítica	84
3.6. Ensayos experimentales	127
3.7. Discusión	242
3.8. Propuesta de unión entre pilares metálicos y losas o vigas de hormigón armado mediante pernos conectores	271
3.9. Propuesta de método de cálculo para uniones mediante pernos	275
3.10. Resumen de la investigación y principales aportaciones	281
4 Propuesta de método de inspección de pernos conectores	283
4.1. Introducción	283
4.2. Análisis teórico previo	283
4.3. Objetivos	294
4.4. Campo de aplicación	295
4.5. Investigación analítica	295
4.6. Ensayos realizados	299
4.7. Discusión	312
4.8. Propuesta de criterio de inspección	322
4.9. Resumen de la investigación y principales aportaciones	327
5 Conclusiones y posibles trabajos futuros	329
5.1. Conclusiones sobre el trabajo de investigación	329
5.2. Conclusiones finales	331
5.3. Aportaciones al estado del conocimiento	332
5.4. Posibles futuras líneas de investigación	332
Anejo A	333
A.1 Conversión de unidades	333
A.2 Listado de símbolos	334
Anejo B	340
B.1 Artículos publicados en revistas de investigación y congresos internacionales	340
Bibliografía	377

1. Introducción

1.1. Motivación de la investigación

La investigación aquí presentada dio comienzo en 2008 con la intención de plantear una nueva conexión entre pilares metálicos con losas y vigas de hormigón armado mediante pernos conectores. La idea surgió del análisis de las uniones más habituales en las estructuras mixtas de edificación.

Hasta hace no mucho tiempo, las estructuras metálicas y las estructuras de hormigón pertenecían a mundos distintos. Cada material define una tipología clásica de muy diferente tecnología y, obviamente, cada una es caracterizada con sus propias ventajas e inconvenientes. Afortunadamente esta situación está cambiando con la aparición de soluciones estructurales mixtas donde, en la mayoría de los casos, surgen las soluciones óptimas formadas por una combinación de ambos sistemas, de modo que suman sus ventajas y eluden sus inconvenientes.

En las últimas décadas se ha observado un aumento de la utilización de estructuras mixtas en USA, Japón y algunos países Europeos para la construcción de edificios de viviendas y oficinas, centros comerciales, aparcamientos y puentes. Se trata de un crecimiento de la construcción mixta frente a las tipologías clásicas, donde se ejecutaban de forma global mediante hormigón armado o estructura metálica. Esta variación en la tendencia constructiva se explica, en parte, porque la construcción mixta acero-hormigón en edificación agrupa las ventajas de los forjados tradicionales de hormigón armado (cierta libertad dimensional, facilidad de ejecución, buen comportamiento acústico y frente a condiciones de incendio, menor coste, etc.) con las facilidades de los pilares metálicos (rapidez y sencillez de montaje, reducido espacio requerido dada su alta resistencia, posibilidad de prefabricación, menor elemento masivo, alta utilización, etc.)

El principal inconveniente que presenta la fusión de ambos sistemas estructurales es la complejidad de sus nudos. En la actualidad, la solución más utilizada para resolver las uniones estructurales consiste en la incorporación de crucetas de perfiles UPN soldados a los pilares, como se puede observar en la figura 1. Se dispone de otras muchas soluciones, expuestas en capítulos posteriores, pero dada la robustez de la solución, ha resultado la más aplicada de forma general. La función de estas uniones se resume en recoger los esfuerzos de cortante y una pequeña fracción de momento de los forjados o vigas de hormigón armado, y transmitirla a los pilares metálicos.

Desde el punto de vista de la seguridad estructural la unión mediante crucetas no se puede considerar una solución muy acertada, debido principalmente a sus soldaduras. Para poder confiar en la buena calidad de las soldaduras, estas deberían ser ejecutadas en taller, con lo que se dificulta mucho el transporte a obra, o bien, llevar a cabo un completo programa de inspección que respalde su buena ejecución, lo que perjudica seriamente el factor económico.

Los principales inconvenientes de las uniones mixtas en general se resumen en:

- Complejidad: Agravada especialmente en las soluciones habituales con soportes de forjados bidireccionales. En estos casos se añade la necesidad de interrumpir y posteriormente dotar de continuidad a los UPN en una de las direcciones y se aumenta significativamente la ejecución de soldaduras.
- Dificultad de transporte: Si su ejecución se realiza “en taller”, que sería lo recomendable, resulta complicado transportar un pilar continuo de varias plantas con uniones intermedias.
- Elevados costes de supervisión y comprobación: Si sus soldaduras se ejecutan en obra, dada la responsabilidad que estas uniones presentan en la seguridad global de la estructura, implica un laborioso trabajo añadido que no puede ignorarse.
- Dificultad de prefabricación: Resulta difícil llegar a poder ejecutar pilares continuos incorporando nudos intermedios de forma prefabricada.

Tras analizar la serie de desventajas que lastran las estructuras mixtas en el campo de la edificación, se concluye que se trata de un campo susceptible de amplias mejoras, por lo que se procedió al análisis que dio pie al desarrollo de la investigación en que se basa esta Tesis Doctoral.

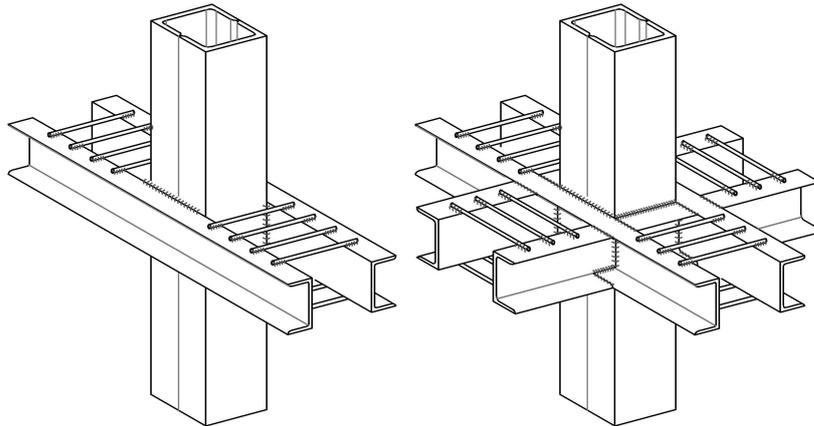


Figura 1: Uniones mediante crucetas de UPNs. En una dirección y en dos.

Entre los indicios de hallarse en un punto de necesaria innovación, se observa un gran número de países europeos donde apenas se utiliza la construcción mixta. Las razones pueden achacarse a la falta de experiencia y de mano de obra cualificada en este campo, pero principalmente se debe a la falta de reglas claras de diseño y cálculo. Se manifiesta una incertidumbre normativa en el campo a tratar, especialmente deficientes en lo que a los nudos se refiere.

Las uniones mixtas mediante pernos conectores se encuentran entre dos materiales diferentes. Cada material ha sido ampliamente estudiado e investigado hasta alcanzar un nivel de normalización muy elevado. Nos encontramos frente a dos normativas que corresponden al hormigón y al acero, ambas desarrolladas mediante un proceso continuo y continuado de actualización. La normativa de cada material se ha desarrollado de manera independiente, por lo que se pueden explicar las diferencias en las bases de cálculo, criterios de diseño y diferentes metodologías de abordar los diferentes aspectos de proyecto y verificación, así como de puesta en obra. Al tratarse de unas normativas de gran consistencia, se aporta la ventaja fundamental de poder partir de unas normas de proyecto concisas. Su aplicación es especialmente útil en los casos o elementos donde ambos materiales trabajan conjuntamente.

Por el contrario, la posibilidad de uso de una normativa o guía para el trabajo de colaboración entre ambos materiales es limitada: no existe en el CTE el equivalente al Eurocódigo 4, y éste no incluye referencias suficientes a las uniones mixtas como en el presente trabajo.

La motivación que impulsa el desarrollo de la presente Tesis es doble:

- Por una parte se considera novedoso y de gran utilidad el planteamiento de centrar la atención sobre las uniones estructurales. La concepción y ejecución de uniones en edificación generalmente suele limitarse al proceso constructivo y en menor medida a su implicación estructural. El diseño y cálculo suele resultar, en el mejor de los casos, delegado al contratista encargado, en el caso de estructuras de hormigón, o al taller de ejecución, en el caso de que la estructura sea metálica.
- Por otra parte se considera innovadora la presente investigación debido a que centra su atención en los pernos conectores tipo Kōco y Nelson. Nos encontramos ante unos elementos altamente fiables y de uso en actual expansión, dado su buen comportamiento mecánico. Desde su aparición en la década de 1930 ha cubierto un amplio abanico de usos muy diferentes. La adaptación planteada en esta investigación para su incorporación en uniones principales de estructuras de edificación, se considera innovadora, adecuada y, como en el desarrollo de la presente tesis se demuestra, altamente eficaz.

La imagen 2 refleja la sencillez de ejecución que suponen los pernos conectores en las uniones mixtas de edificación. Si se compara la aplicación de pernos conectores con la imagen 1 se puede contrastar, de un simple golpe de vista, la enorme simplificación que resulta. Desde este momento, incluso el ojo más inexperto acierta a valorar el enorme esfuerzo empleado en la ejecución de las crucetas de UPN frente a la ejecución de las uniones mediante pernos. Cabe añadir su directa adaptación a pilares formados por perfiles tipo HEB, cada vez más utilizados en sustitución de los UPN en cajón. La aplicación de uniones convencionales, como la formada por UPN, no resulta inmediata en perfiles tipo HEB, pero la complejidad de su ejecución es asumible.

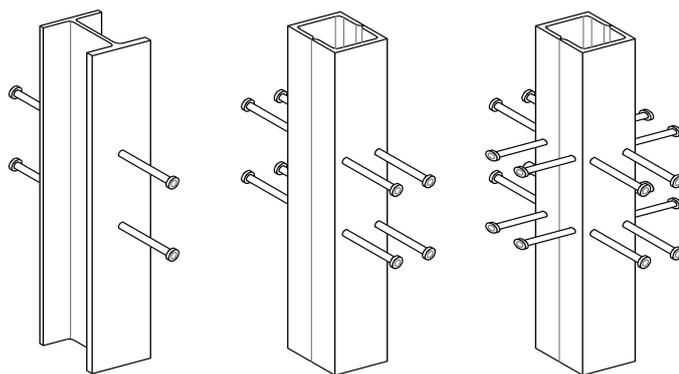


Figura 2: Posibilidades de las uniones con la incorporación de pernos conectores.

A lo largo de la presente Tesis se continuarán exponiendo las novedades y ventajas que ofrecen las uniones mediante pernos conectores, acompañadas de las demostraciones teóricas y experimentales oportunas en cada proceso.

1.2. Alcance de la investigación

El principal objeto de esta investigación demostrar la posibilidad de incorporar las uniones mixtas mediante pernos conectores al campo de la ejecución habitual de estructuras. Para poder lograr tal ambiciosa aportación al mundo de las estructuras en edificación, se debe alcanzar previamente un claro conocimiento sobre el funcionamiento mecánico de las uniones

mixtas pilar metálico-forjado o viga de hormigón. La principal aportación de este trabajo se centra en el medio de conexión: los pernos conectadores. Estos elementos, a pesar de ser habituales en la ejecución de vigas mixtas, pilares mixtos, forjados mixtos con chapa colaborante, etc. únicamente se han aplicado de forma esporádica en nudos pilar-forjado por los profesionales que llevan colaborando en el ámbito de la formación académica en estructuras metálicas en la ETSAM desde 2003 y en el que participan los directores de esta tesis. Los precedentes de utilización de estas uniones se han realizado sin respaldo experimental con contraste externo previo.

El propósito final de la presente Tesis Doctoral consiste en la obtención de un método de cálculo y dimensionado que avale el uso de los pernos conectores en las uniones mixtas, acotado al campo de las estructuras de edificación. Para llevar a buen fin dicho propósito se establece el planteamiento inicial estructurado por objetivos, que se describe a continuación.

1.3. Objetivos

Como objetivos previos indispensables para llegar a incorporar estas uniones en la práctica diaria de ejecución de estructuras se incluyen los desarrollos de las investigaciones, tanto teórica-analítica como práctica-experimental. Se abordan estas investigaciones mediante un planteamiento dual, de tal forma que se desarrollan paralela y simultáneamente:

- Se pretende investigar teóricamente el comportamiento mecánico de esta nueva unión, con la intención de obtener un método de análisis y comprobación analítica, comparable a los desarrollados para el resto de uniones.
- Para poder incorporar los resultados obtenidos analíticamente al bagaje del campo de la teoría de estructuras, no cabe duda de la necesidad de obtención de datos realistas, que permitan su contraste y verificación, y que permitan enmarcar y validar los métodos analíticos. Por ello, se ha realizado la investigación experimental, donde se reúnen los ensayos realizados en el laboratorio y la posterior interpretación de sus resultados. En los ensayos se busca estudiar el comportamiento de un nudo tipo de una estructura de edificación, para lo cual se reproducen modelos clásicos de subestructura de un pórtico regular.

Con el desarrollo de las anteriores investigaciones se espera poder corroborar así el funcionamiento mecánico esperado de los nuevos nudos planteados y llegar a respaldar los análisis teóricos.

Como resultado final del proceso se espera obtener un proceso constructivo que permita el uso de las uniones, orientado a su ejecución realista en el campo de la construcción actual.

Del mismo modo, se planteará un modelo de cálculo y validación que sea capaz de reflejar de modo seguro el funcionamiento mecánico de las uniones mediante pernos. El modelo propuesto debe estar respaldado por la normativa en la medida de lo posible, objetivo difícilmente alcanzable en este momento dada la incertidumbre normativa existente en cuestión de uniones mixtas. Por ello, las indicaciones que se propongan podrán servir a modo de indicación para su posterior incorporación en la normativa de las estructuras mixtas en edificación.

Para asegurar la posibilidad de la aplicación real de una nueva técnica constructiva es preciso contar con procedimientos de seguridad y control. Dada la necesidad de contar con métodos no destructivos y considerada la responsabilidad de las uniones propuestas, se pretende aportar un procedimiento de inspección adecuado y fiable.

2. Propuesta de unión entre pilares metálicos y vigas de hormigón mediante pernos conectores

2.1. Objetivos

Los pernos conectores han sido objeto de múltiples investigaciones desde la década de 1950. Dichas investigaciones han aportado una gran cantidad de formulaciones teóricas para

la estimación de la resistencia mecánica de los pernos embebidos en hormigón.

Al plantear la posibilidad de una unión estructural principal, constituida por pernos conectores y con la función de conectar elementos horizontales de hormigón armado con pilares metálicos, surgen cuestiones de diseño y cálculo que deben ser abordadas. Para ello se plantean los siguientes objetivos.

- Establecer el campo de aplicación óptimo para las uniones mixtas mediante pernos conectores
- Plantear el/los métodos de análisis global de la estructuras en las que se utilicen las uniones mediante pernos conectores
- Estudiar las distintas configuraciones posibles de uniones mediante pernos y las variables que intervienen en la transmisión de las solicitaciones
- Realizar una campaña de ensayos experimentales
- Obtener unos modelos teóricos de cálculo respaldados experimentalmente

2.2. *Planteamiento*

Se han planteado dos modos de caracterización de los nudos mediante pernos conectores con objeto de estudiar los parámetros fundamentales como la rigidez, ductilidad y resistencia de las uniones. Estos dos procedimientos se desarrollan de modo paralelo y conforman las dos líneas complementarias de investigación: teórica-analítica y práctica-experimental.

2.2.1. *Teórico-Analítico*

Consiste en la realización de distintos modelos de cálculo que permitan una predicción segura del comportamiento mecánico de la unión. Estos modelos se utilizarán en primer lugar para el estudio de las diferentes configuraciones posibles, para el diseño de las probetas de ensayo y finalmente para la propuesta de un modelo de cálculo para las uniones planteadas.

En esta línea de investigación se utilizarán los distintos procedimientos de caracterización analítica. Para el desarrollo de este apartado se toman como base los trabajos de Nethercot D. et al. y Virdi K. sobre los distintos métodos de predicción numérica. En estas investigaciones se pueden encontrar gran variedad de modelos mecánicos lineales y no lineales; modelos de cálculo contruidos mediante elementos finitos; análisis del comportamiento teórico *Momento-Curvatura*; y métodos de cálculo simplificados.

2.2.2. *Práctico-Experimental*

Se trata del proceso esencial para la realización de esta Tesis debido a que los resultados que se obtengan en los ensayos experimentales serán los que finalmente verifiquen la resistencia y el comportamiento mecánico general de las uniones. La obtención de resultados experimentales permitirán validar los modelos teóricos de predicción.

Dados los medios físicos y materiales necesarios para la realización de ensayos de estructuras de edificación a tamaño real, se pretende economizar al máximo el número y el tipo de ensayos experimentales. Por ello, en algunos casos se propone utilizar resultados experimentales ya publicados.

2.3. *Campo de aplicación*

Las uniones mixtas mediante pernos conectores se proponen para un ámbito concreto de las estructuras en edificación. En particular se destina su aplicación a las estructuras de vivienda de pórticos arriostrados, formados por pilares metálicos y forjados o vigas de hormigón armado.

Por tratarse del uso de vivienda se puede considerar que las uniones se emplearán en las tipologías habituales de vigas planas de hormigón armado, de luces entre 4,5 y 7,5m, sobre

las que apoyan forjados convencionales de luces comprendidas entre 3 y 6m. Asimismo, y manteniéndonos en el ámbito de las tipologías estructurales arquitectónicas más extendidas, se tratará de edificaciones de baja y media altura, hasta unas 10 plantas. De este modo, los efectos de estabilidad a viento no interfieren de forma apreciable y se confían a elementos específicos ajenos a los aquí considerados. El esquema general de la constitución de los nudos planteados se puede observar en la figura 3.

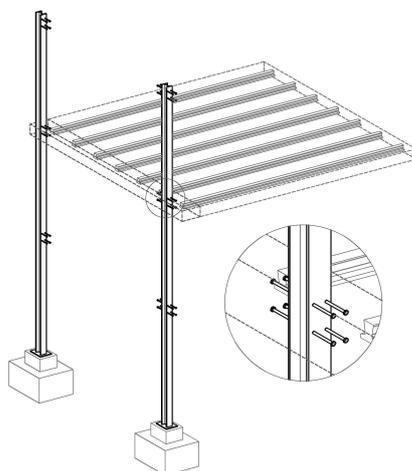


Figura 3: Esquema general de aplicación de pilares metálicos con uniones mediante pernos conectores

Una de las ventajas que aportan las uniones objeto de esta Tesis es la posibilidad de prefabricación. Así, las uniones de los diferentes forjados de un mismo pilar se pueden fabricar en taller. Mediante este sistema de industrialización las soldaduras se ejecutan en condiciones óptimas y los pilares se transportan sin dificultades dadas las dimensiones y geometría de las uniones (en secciones de pilares de hasta 12m). El sistema propuesto aporta varias ventajas a las uniones mixtas actuales, entre las que se encuentran:

- Se evita la necesidad de ejecutar soldaduras en obra
- Se incorpora la industrialización de los pilares y nudos sin perjudicar el transporte a obra
- Se agilizan los tiempos de ejecución

2.4. Propuesta de unión entre pilares metálicos y losas o vigas de hormigón armado mediante pernos conectores

La configuración de unión propuesta para las uniones ubicadas en pilares extremos se representa en la figura 4. Esta configuración de unión se compone por los pernos, por un cerco envolvente de refuerzo A_c y por dos horquillas de atado A_h , una superior y otra inferior.

Los pernos conectores deben cumplir con los criterios establecidos anteriormente y su dimensionado se realizará de acuerdo al método desarrollado.

El cerco de refuerzo debe envolver al grupo de pernos y su montaje debe realizarse sin efectuar ninguna soldadura. Este cerco tiene la finalidad de garantizar un estado tensional similar en las distintas filas de pernos y de aumentar la resistencia del hormigón. Su efectividad ha sido comprobada experimentalmente.

Su geometría se determinará de acuerdo a los radios de curvatura establecidos por la EHE. La posición del cerco se determina en función de su distancia de separación con el perfil metálico y en función del armado de la viga, de modo que se atravesase el plano teórico de rotura del fallo del hormigón posterior a la fila superior de pernos. Este modo de fallo se

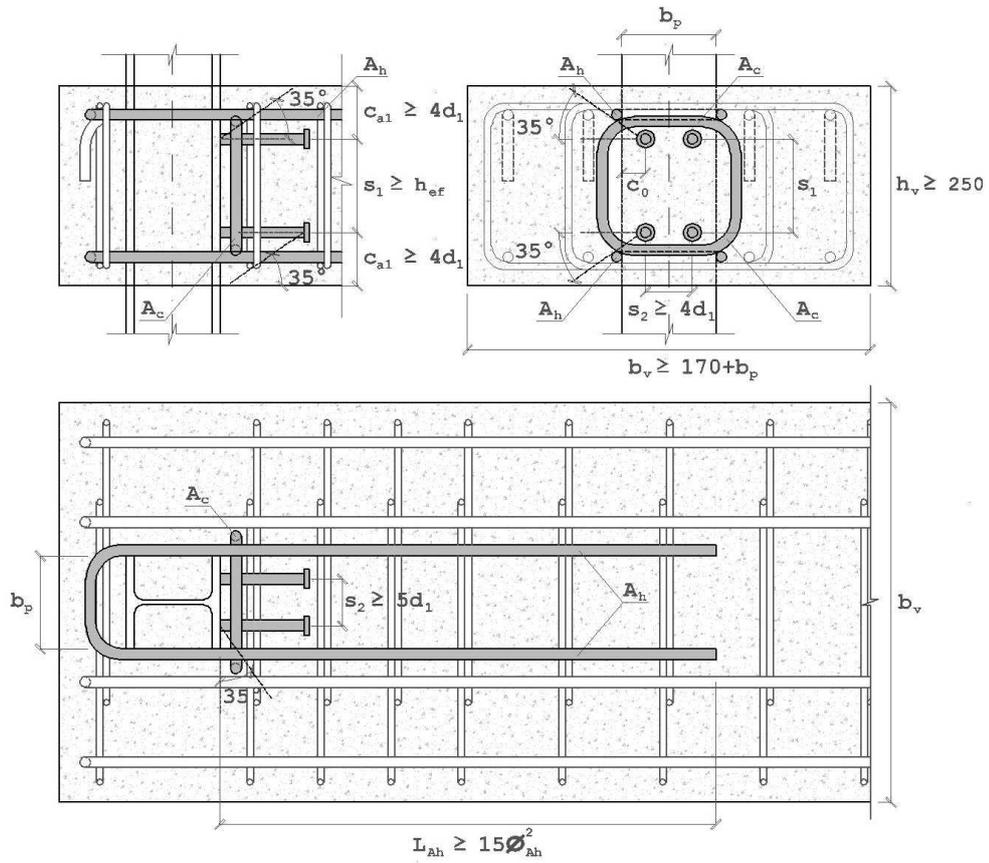


Figura 4: Propuesta de configuración para uniones de pilar en extremo

constituye por una inclinación de 35° respecto al eje de los pernos (figura 4). El dimensionado mínimo del cerco de refuerzo se establece en $\phi_{Ac,min} \geq 12mm$.

Las horquillas de atado se deben disponer para que no interfieran con la armadura de la viga, de modo que su posición resulte lo más próxima posible a las caras superior e inferior de la viga de hormigón y al perfil metálico. La función de estas horquillas es doble. Por un lado se destinan a resistir los pequeños momentos flectores por los que se pueda ver afectada la unión. Por otro lado tienen la función de aumentar la resistencia del hormigón al asumir los esfuerzos horizontales producidos por la biela de compresión por la que se transmite la sollicitación de cortante.

En el diseño de la unión se debe asegurar que la horquilla superior atraviesa el plano teórico de rotura del fallo del hormigón posterior a la fila superior de pernos. Del mismo modo, la horquilla inferior debe atravesar el plano teórico de rotura del fallo del hormigón anterior.

El dimensionado mínimo de las horquillas de atado será de $\phi_{Ah,min} \geq 12mm$. La longitud mínima de anclaje de la horquilla se establece de acuerdo al apartado 66.5.2 de la EHE. Para el cálculo de la longitud de anclaje se toma el mínimo de $L_{Ah} \geq 15 \cdot \phi_{Ah}^2$ considerado desde la cara de transmisión del pilar. La longitud total mínima del anclaje en U se establece en función del límite elástico de la armadura mediante $L_{Ah} \geq f_{yk} \cdot \phi_{Ah}^2 / 20$.

La configuración de unión propuesta para las uniones ubicadas en pilares interiores se representa en la figura 5. Esta configuración de unión se compone por los pernos, por un cerco envolvente de refuerzo A_c en cada cara de transmisión de cortante y por cuatro armados longitudinales A_h , dos superiores y dos inferiores.

Se puede observar que existen muy pocas diferencias entre las configuraciones de ambos tipos de uniones. En la configuración de unión en pilar interior, el cerco envolvente de refuerzo

tiene el mismo objetivo, disposición y requisitos mínimos que los expuestos para la unión de pilar en extremo. Del mismo modo, las armaduras horizontales realizan el papel de las horquillas de anclaje descritas en el apartado anterior.

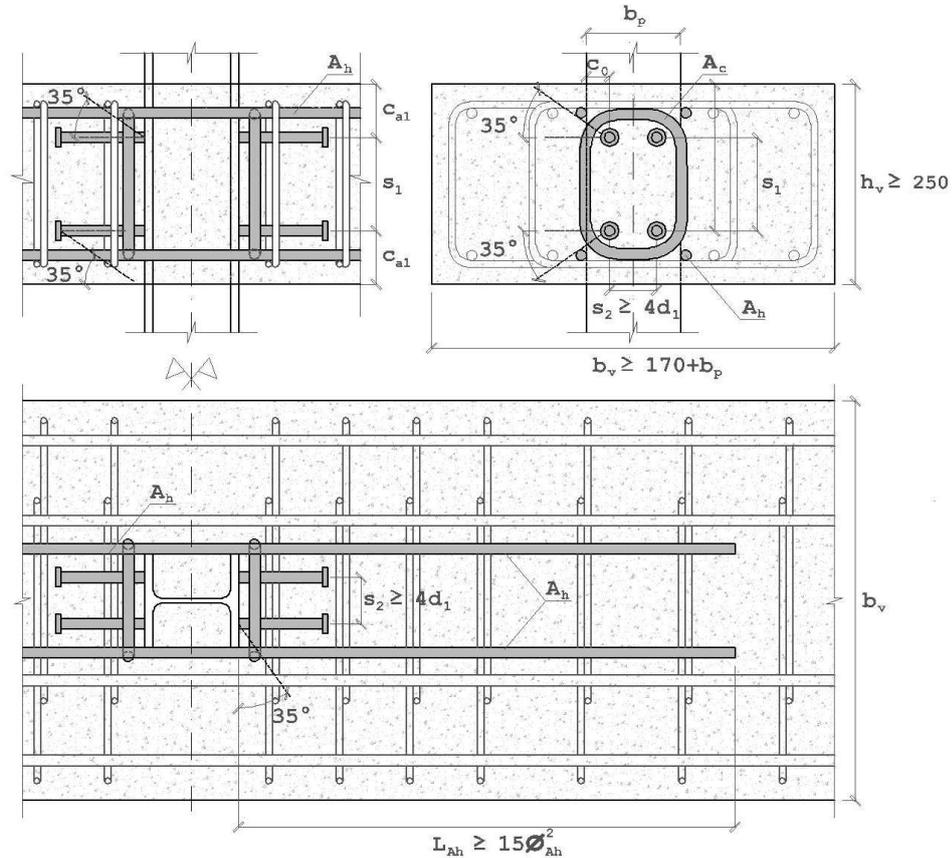


Figura 5: Propuesta de configuración para uniones de pilar interior

2.5. Evaluación de las uniones propuestas

Para rematar la evaluación de las uniones investigadas mediante pernos conectores se lleva a cabo una comparación con las soluciones de unión mixta en edificación. La comparación se ha centrado en las uniones de crucetas mediante UPN por ser las más habituales en las estructuras mixtas de edificación en la actualidad.

Las uniones mixtas mediante perfiles UPN tienen una gran ventaja resistente frente a las constituidas por pernos conectores. La mayor longitud de sus perfiles pueden participar en la resistencia frente al punzonamiento de la unión a través de la viga de hormigón hasta determinados perímetros críticos. En cambio, en las uniones mixtas mediante pernos conectores no existe esta opción y el fenómeno del punzonamiento debe ser resistido íntegramente por el armado de la viga o losa de hormigón armado.

En cambio, las uniones mediante UPN presentan grades desventajas entre las que se destacan la dificultad de ejecución, seguridad de sus soldaduras y transporte a obra:

- Si las soldaduras entre el pilar y los UPN se realizan en taller, que sería lo deseable, se dificulta su transporte hasta la obra.
- Si por el contrario su ejecución se realiza en obra, como viene siendo habitual, disminuye la calidad de las soldaduras y resulta costosa su comprobación.

En la figura 6 se puede observar una representación de ambas uniones.

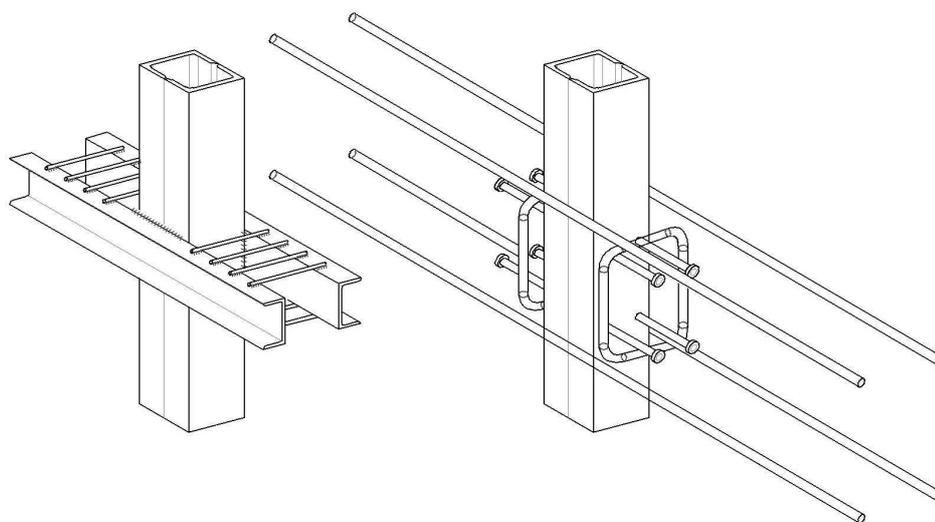


Figura 6: Comparación entre unión mediante perfiles UPN y unión mediante pernos conectores

A partir de los parámetros establecidos se ha llevado a cabo una comparación cuantitativa del proceso de ejecución de cada una de las uniones, en la que se ha calculado el peso de cada unión, las soldaduras, los tiempos de ejecución y los costes finales.

El resultado de esta comparación muestra que las uniones mediante UPN, que son las uniones mixtas más utilizadas en la actualidad, suponen 7,8 veces más soldaduras y 6,1 veces más de tiempo de ejecución que las uniones mixtas mediante pernos conectores. Además suponen un peso 1,69 veces mayor. Cabe destacar que más del 85 % del peso de las uniones mixtas mediante pernos conectores corresponde al perfil metálico que realiza la función de pilar. Como valor final de comparación y como clara ventaja de las uniones mixtas mediante pernos conectores se destaca que, para resistir de modo seguro unas mismas acciones de uso de vivienda, las uniones mixtas mediante perfiles UPN suponen un valor aproximado de ejecución de más del doble respecto al de las uniones investigadas.

3. Propuesta de método de inspección de pernos conectores

3.1. Introducción

Con la intención de complementar la unión mixta propuesta en el capítulo anterior se ha realizado un segundo estudio sobre los procedimientos de inspección y control de los pernos conectores. Dados los rigurosos controles de calidad a los que son sometidos los pernos tras su fabricación, parece razonable centrar el problema de la inspección en sus soldaduras. El trabajo que se presenta a continuación ha sido publicado a modo de artículo de investigación bajo el título *Non-destructive assessment of welded headed studs by acoustic test*.

Los pernos conectores aportan múltiples ventajas en la construcción, entre las que se encuentra el elevado margen de seguridad que ofrecen sus soldaduras ejecutadas mediante arco eléctrico, su elevada resistencia, la precisión y rapidez de montaje, etc. Estas soldaduras, aunque ampliamente fiables, son difícilmente comprobables mediante ensayos no destructivos. Aparte de la inspección visual, que aporta gran información sobre la calidad de ejecución de la soldadura, el resto de ensayos no destructivos (líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonidos, radiografías, etc.) resultan inviables en estos elementos. Los ensayos destructivos no son en absoluto recomendables en las uniones mixtas propuestas debido al reducido número de pernos que las constituyen y a la gran responsabilidad que tienen en la seguridad global de la estructura.

3.2. *Objetivos*

Dadas las dificultades detectadas para la ejecución de los métodos de ensayo habituales, sus inconvenientes y especialmente debido al defecto de soldadura que tuvo lugar en la campaña de ensayos destructivos realizados en el marco de esta Tesis, se plantea la búsqueda de una alternativa a los métodos tradicionales de comprobación de soldaduras.

3.3. *Planteamiento*

Se propone un nuevo método de inspección de soldaduras especialmente orientado a los pernos en estructuras de edificación, pero también extrapolable a otro tipo de soldaduras y piezas. La idea original es de Jaime Cervera y nació de su recuerdo de la infancia de *oír* desde el tren cómo se comprobaban los ejes de rodadura de los vagones de ferrocarril antes de partir de la estación. Efectivamente se trata de una de las clásicas técnicas de comprobación del estado de piezas metálicas por métodos acústicos. Consiste en un procedimiento bastante rudimentario basado en el análisis mediante “un oído fino” del sonido emitido por el elemento a evaluar tras ser golpeado. Era utilizado antiguamente para la comprobación de los ejes de rodadura de vagones de ferrocarril y similares.

Por otro lado, es conocido tradicionalmente entre los soldadores especializados el uso de la combinación visual y acústica durante el proceso de soldeo, en provecho de ejecución y evaluación de la misma. Aparte de los ensayos no destructivos expuestos anteriormente, comienza a abrirse paso de nuevo la utilización de las señales acústicas para la detección de discontinuidades. Aunque no se ha aplicado directamente a la inspección de soldaduras, recientes investigaciones señalan una relación directa entre la ejecución de soldaduras y el espectro acústico que se produce en el proceso. Mediante el análisis de esta relación se ha logrado evaluar la estabilidad a lo largo del proceso de soldeo.

3.4. *Campo de aplicación*

La investigación realizada sobre las soldaduras y las posibilidades de inspección de los conectores se ha orientado a la comprobación de pernos conectores tipo Nelson, Köco o similar, y se ha enfocado especialmente a las uniones propuestas en el capítulo anterior. Las conclusiones obtenidas son comunes a la mayor parte de los conectores estándar de la construcción mixta, pese a que la aplicación del método de inspección propuesto se encuentra enfocado directamente a piezas mixtas de reducido número de pernos. Para los casos en que el número de pernos es considerable o en los que la responsabilidad estructural de los mismos es reducida, puede ser válido el procedimiento de comprobación estándar mediante ensayos destructivos convencionales.

3.5. *Investigación analítica*

Tal como se ha expuesto anteriormente, el sonido producido por una pieza se puede identificar analíticamente mediante su frecuencia de vibración. El proceso de cálculo se resume en la obtención de los modos propios de vibración de un perno conector.

3.5.1. *Modelos numéricos*

Determinar los modos propios de vibración de una pieza con una geometría compleja no resulta sencillo de forma manual. Si se pretende obtener la frecuencia de vibración de un perno aislado con un error razonable, se debe considerar la geometría completa, incluida la cabeza y las coacciones a las que se encuentra sometido. Por ello se ha decidido realizar un cálculo modal con elementos finitos mediante el programa informático *ANSYS* [?]. Se ha estudiado analíticamente un gran número de pernos conectores con diferentes longitudes y diámetros. Entre todos ellos, los cálculos definitivos se han centrado en los pernos de dimensiones $L = 100\text{mm}$ y $\phi = 10\text{mm}$, que posteriormente han sido ensayados de forma experimental en el laboratorio para permitir su posterior comparación.

En el análisis modal se ha considerado la geometría detallada del perno en tres dimensiones y se ha considerado la condición de empotramiento perfecto en su base.

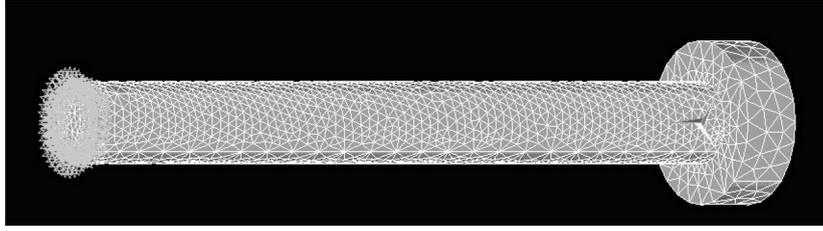


Figura 7: Modelización mediante Ansys de un perno conector $100\phi 10mm$

3.5.2. Modelización de soldaduras defectuosas

Una de las principales ventajas de la aplicación de los programas informáticos de elementos finitos en el cálculo de las frecuencias propias de vibración es la sencillez para variar las condiciones de contorno una vez modelizada la geometría. Del mismo modo que el cálculo manual es muy laborioso para piezas de geometría compleja, el análisis se complica al considerar el sólido en 3-D y resulta especialmente difícil incorporar las “condiciones adicionales” que puedan simular los defectos en las soldaduras.

En la Tesis se han expuesto los distintos defectos de soldaduras que se pueden desarrollar en los pernos conectores. La intención del método de inspección alternativo que se plantea en este capítulo se basa en la detección de dichos defectos a través de las variaciones que éstos producen en la frecuencia de vibración de los pernos. Una vez analizados los distintos fallos de soldadura y los correspondientes efectos que producen en el perno, se agrupan los distintos defectos posibles en dos grupos:

- Defectos de falta de penetración, falta de fusión y porosidad.

Todos ellos se traducen en la presencia de “huecos” en la superficie de contacto entre la base del perno con el perfil. Esta heterogeneidad se traduce en la reducción parcial o total de la conexión entre los elementos de dicha zona, lo que implica una discontinuidad de los estados tensionales entre los puntos separados por dichos “huecos”. Por ello parece razonable la modelización de estos defectos mediante la incorporación de una discontinuidad adecuada en las tensiones entre determinados puntos de la superficie de la soldadura.

Para su modelización se pretende eliminar la continuidad de tensiones en ciertos puntos de la superficie entre el perno y la placa base, superficie que contiene las coacciones externas de apoyo en la modelización realizada hasta el momento. Por ello estos defectos se pueden modelizar suprimiendo las coacciones externas en ciertos nodos, de manera que se simulan los “huecos” en la superficie de contacto.

La diferencia entre estos tipos de defectos reside en la ubicación de los “huecos” y su tamaño. Mientras que en la falta de penetración y de fusión aparece generalmente una única discontinuidad ubicada en el centro de la superficie y el grado de afección depende del tamaño de la misma. El efecto que produce el defecto de porosidad depende del número de discontinuidades y el tamaño y ubicación de las mismas.

- Defecto de presencia de impurezas

Este defecto implica igualmente una reducción en la resistencia de la soldadura, pero supone una mayor dificultad en la modelización de la discontinuidad. El efecto que produce este fallo depende de la naturaleza de las impurezas y de su tamaño, y cabe señalar la incertidumbre sobre la ubicación de las mismas.

Dada la naturaleza de los distintos defectos de soldadura que se pretenden modelizar parece razonable realizar una misma aproximación que abarque la totalidad de los defectos. Para llevar a cabo la simulación de estos fallos de soldadura en un primer análisis se ha reducido el número de nodos coaccionados de forma aleatoria. Mediante este procedimiento se ha obtenido una reducción de la frecuencia propia de vibración donde, tras numerosos análisis,

se ha observado que dicha reducción se encuentra estrechamente ligada al número de nodos desvinculados y en menor medida a la ubicación de los mismos.

En un segundo análisis se plantea establecer un criterio para el procedimiento de desvinculación de los nodos, de manera que suponga una aproximación razonable para todos los defectos posibles que se pueden desarrollar en las soldaduras de los pernos. Se ha procedido a la reducción gradual de coacciones en los nodos pertenecientes a la superficie de la soldadura. Para ello se ha establecido un patrón regular en el proceso de la eliminación de coacciones, procediendo de forma anular desde el centro hacia el exterior, como se puede observar en la figura 8. Se ha establecido este criterio por la regularidad que supone y debido a que la mayoría de los defectos comunes en estas soldaduras se ubican en el centro y la variación del grado de afección depende de su tamaño. Es cierto que mediante este criterio la propuesta de inspección se encuentra más cercana a los defectos de falta de penetración y de fusión que a la porosidad y presencia de impurezas, pero más adelante se observará que predice razonablemente todos los tipos de defectos. Esto se explica porque, como se ha mencionado anteriormente, la reducción que se produce en la frecuencia de vibración depende en mayor medida del número total de puntos afectados que de la ubicación de los mismos.

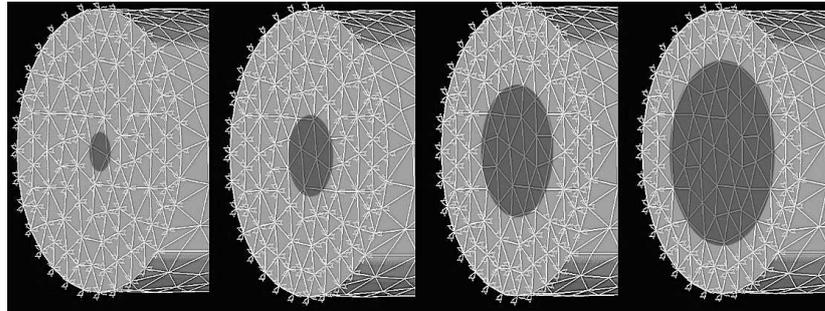


Figura 8: Reducción de condición de empotramiento por anillos de nodos

Mediante este procedimiento resulta sencillo modelizar los defectos de soldadura con diferentes grados de afección.

3.6. Ensayos realizados

La ejecución de los métodos estándar de inspección no destructiva de soldaduras (líquidos penetrantes, radiografías, ultrasonidos, etc.) es inviable o insuficiente en los pernos, bien por las dimensiones de la maquinaria necesaria para su correcto procedimiento, o bien por su incapacidad en la detección de imperfecciones internas. Estos procedimientos estándar de comprobación pueden llegar, en el mejor de los casos, a aportar la misma información que la inspección visual. La ejecución de los ensayos destructivos convencionales de pernos también es inviable para los elementos formados por un reducido número de conectores.

Con el fin de confirmar la hipótesis de poder inspeccionar el estado, tanto interno como externo, de las soldaduras mediante su ensayo acústico se han planteado la ejecución de los siguientes ensayos:

- Inspección visual
- Ensayo acústico
- Ensayo de doblado
- Ensayo de golpeo
- Ensayo de tracción
- Ensayo de cortante

3.7. Ensayo acústico

Este ensayo se plantea con el fin de corroborar experimentalmente si se produce una reducción en la frecuencia de vibración de los pernos conectores cuando éstos tienen algún defecto en su soldadura. En la documentación estudiada no se ha encontrado ninguna propuesta de inspección de piezas ni soldaduras mediante su espectro acústico, aunque si se ha obtenido

una anécdota en el artículo *Thirty Years of Fast Fourier Transform (FFT) Analyzers* donde el autor afirma que su padre era capaz de detectar fisuras en los railes de trenes mediante la aplicación de golpes de martillo. En la investigación analítica previa se concluye que teóricamente sí se produce esta reducción. El presente ensayo tiene como objetivo principal detectar dicha reducción de frecuencia y ser capaz de identificar inequívocamente la presencia de defectos. De este modo la medición acústica se podría utilizar como una nueva herramienta de ensayo no destructivo de soldaduras.

3.7.1. Instrumentación y método de ensayo

No se dispone de ninguna guía ni protocolo que ayude a orientar el procedimiento de ensayo debido a que se trata de un método novedoso. Por tanto, se trata de establecer unas pautas razonables que permitan realizar las mediciones oportunas con la suficiente precisión.

El procedimiento del ensayo se puede observar en la figura 9. Las frecuencias propias de vibración conllevan asociadas un tono específico por lo que, en principio, cualquier aparato de medida de frecuencias o tonos sería válido, siempre que se cuente con el rango adecuado de frecuencias que abarca las propias de la pieza a inspeccionar y la suficiente precisión.

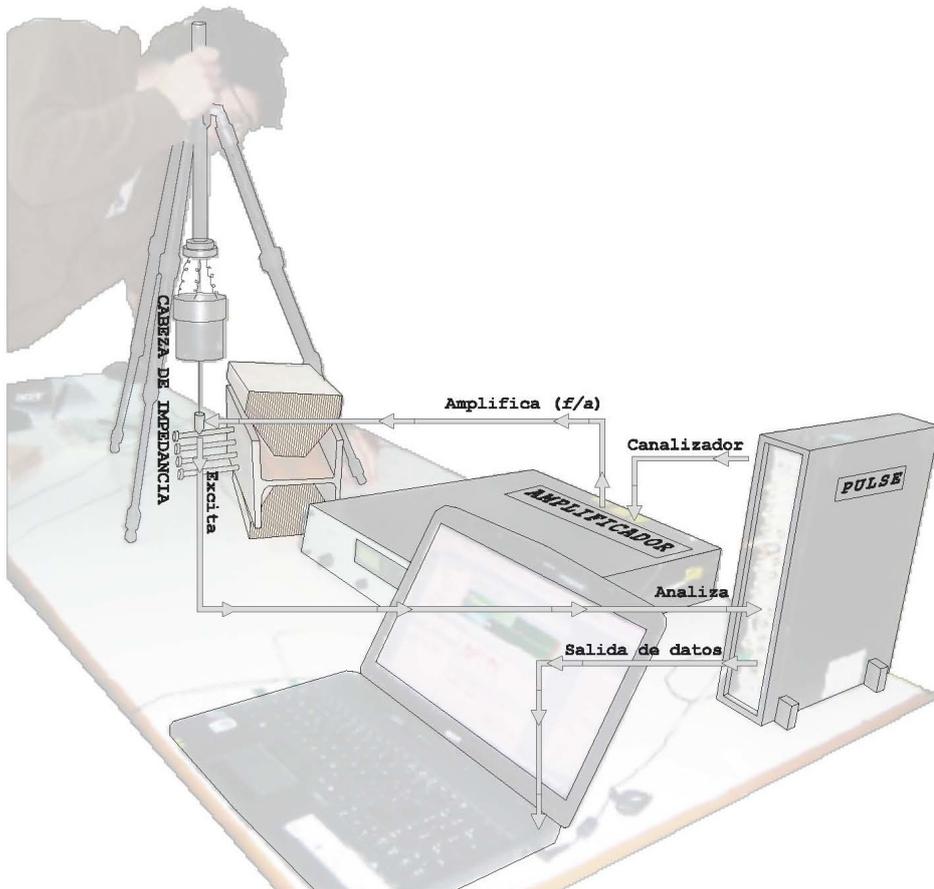


Figura 9: Esquema de ensayo acústico. Obtención de frecuencia propia.

La medida acústica se realizó en el punto medio del fuste de cada perno. Para asegurar la correcta ejecución del ensayo éste se realizó por triplicado calibrando la posición de la cabeza de impedancia al inicio de cada medición. Teóricamente los valores obtenidos en distintas mediciones de un mismo elemento en un mismo punto deben coincidir, dado que la frecuencia acústica de un elemento depende de su geometría, su rigidez, el punto de medida y la dirección de excitación. Por ello se opta por considerar como “error de medición” los casos en que los valores de las tres mediciones no coinciden. Para evitar que estos posibles “errores de medición”

dificulten la interpretación de los resultados se consideró razonable proceder del siguiente modo:

- En los casos en que un único valor difiere del resto se puede desechar dicho valor de medición, considerando únicamente los dos resultados iguales.
- En los casos en que los tres valores difieren pero se encuentran muy próximos entre sí se puede tomar el valor medio obtenido de las tres mediciones.
- En los casos en que los tres valores difieren considerablemente, se supone un error en el procedimiento y se repite la medición. Cabe destacar que esta situación no se produjo en ninguna de las 28 probetas ensayadas.

3.8. Evaluación del método planteado

Los métodos no destructivos que se utilizan actualmente para la inspección de soldaduras han demostrado ser inviables o insuficientes para las soldaduras de las uniones propuestas en esta Tesis. Dada la gran responsabilidad de los pernos conectores en la seguridad global de la estructura, se ha considerado que la presente debe abordar alternativas a los procedimientos de inspección y control de las soldaduras. La investigación realizada se centra en las soldaduras de los pernos tipo Köco, Nelson o similar, y propone un nuevo método de inspección basado en la acústica.

Como punto de partida se han tomado investigaciones, como la de L. Piotrowski et al., que muestran la utilización de señales acústicas en la detección de discontinuidades. Dicha aplicación no se ha llegado a utilizar en el campo de la inspección hasta el momento, aunque sí que se ha explotado para el seguimiento de la ejecución del soldeo automatizado (H. Gu et al. y S. M. C. Bohemen et al. utilizan el espectro acústico producido durante la fusión para valorar la estabilidad de la ejecución). La importancia del sentido visual y especialmente el auditivo durante la ejecución de soldaduras ha sido corroborado por soldadores profesionales. Por ello se ha planteado un nuevo método de inspección basado en la acústica.

Para una primera investigación analítica se han llevado a cabo una serie de modelizaciones de pernos con distintos defectos. Con los análisis numéricos se ha obtenido una reducción de la frecuencia de vibración de los pernos en función de la gravedad de los defectos de la soldadura.

Este fenómeno teórico que relaciona la frecuencia de vibración con la calidad de su soldadura ha sido contrastado con los ensayos de laboratorio. Se ha obtenido de modo teórico y experimental una clara relación entre las frecuencias de vibración de los pernos y la calidad de la soldadura de los mismos, por lo que queda demostrada la viabilidad del método propuesto. Cabe destacar que se han llegado a obtener reducciones de frecuencias de hasta un tono de variación, desde un Do y $Do\sharp$ de la quinta escala en soldaduras correctas hasta un tono muy próximo al Si de la cuarta escala en soldaduras gravemente afectadas por los defectos. La importancia de los resultados obtenidos es la capacidad de medición y registro mediante un proceso de inspección sencillo, rápido y mínimamente invasivo.

Por último se han comparado los resultados obtenidos mediante los ensayos habituales actualmente en pernos conectores, con la calidad de las soldaduras. Como resultado se puede concluir de modo resumido que se encuentra una falta de relación *Resultado-Calidad* generalizada en todos ellos, a excepción de la inspección visual, por lo que no se consideran adecuados para la inspección de pernos conectores en los tipos de uniones presentados en la Tesis. De los resultados obtenidos en los diferentes ensayos habituales actualmente se destaca:

- El ensayo de doblado, pese a tratarse del más utilizado a pie de obra en edificación, ha demostrado ser totalmente inseguro. Se trata de un método por el cual soldaduras gravemente defectuosas pueden superar el ensayo y en cambio soldaduras con leves defectos no lo superan.

- El ensayo de golpeo, además de los inconvenientes intrínsecos de su destructividad, ha demostrado ser inseguro y desaconsejado por su incapacidad de detección de defectos internos. Resulta eficaz para los defectos externos, pero éstos son sencillamente detectables con menor agresividad mediante la inspección visual.
- El ensayo de tracción demuestra ser, además de la obvia destructividad, ineficiente en la detección de defectos internos.
- La inspección visual destaca entre los ensayos convencionales en pernos conectores ya que demuestra una alta efectividad de detección, aunque limitada a los errores externos. Por ello la inspección visual resulta insuficiente, ya que se ha observado que un gran porcentaje de los defectos habituales en pernos conectores (falta de penetración, porosidad, impurezas, etc.) quedan ocultos en el interior de la soldadura. Por ello, aunque insuficiente, se ha considerado razonable plantear la inspección visual como método complementario al ensayo por inspección acústica propuesto. Junto con su alta efectividad para errores externos se presentan las ventajas de mínima agresividad y bajo coste.

Con la presente investigación se han alcanzado claramente los principales objetivos que se plantearon en su comienzo. Se ha obtenido un método de inspección de soldaduras viable tanto en laboratorio como a “pie de obra”. Dicho método ha partido del antiguo modo rudimentario de comprobación de piezas por su golpeo y análisis del sonido producido mediante un “oído fino”. A partir de este método se han incorporado las herramientas tecnológicas actuales, con las que se ha logrado:

- Obtener exactitud concreta. Se ha eliminado la componente humana, el necesario “oído fino” del inspector. De este modo se suprime la subjetividad del individuo evaluador del sonido. Dado que se obtiene el valor concreto de la frecuencia en la medición, se puede evaluar incluso el grado de defecto de una soldadura.
- Eliminar la limitación del rango audible de frecuencia. Como consecuencia inmediata de la incorporación de la tecnología en la medición, la limitación al rango audible humano ha desaparecido.
- Se facilita la ejecución en obra. Se sustituye el rudimentario “golpeo” por un pulse-excitador. Con la ayuda del pulse se puede aplicar en cada perno el mismo rango completo de aceleración y registrar su frecuencia de respuesta.

Como resultado de esta investigación se ha redactado la *propuesta de un método de inspección* donde, a modo de normativa, se han establecido unas pautas con las que realizar una inspección de las soldaduras mediante la acústica. Se trata de una aportación a modo de normativa, con la única intención de proponer una primera orientación sobre un posible alternativo a los métodos de inspección actuales.

4. Conclusiones sobre el trabajo de investigación

Al final de los capítulos 3 y 4 que componen la Tesis se han expuesto con detalle los resultados referentes a cada uno de los aspectos que han sido objeto de estudio. No obstante, en este capítulo se presenta un resumen de las conclusiones consideradas más relevantes.

4.1. Conclusiones de la investigación sobre uniones forjado-pilar realizadas mediante pernos

En la bibliografía consultada no se ha encontrado ningún estudio sistemático sobre este diseño específico de uniones entre losas o vigas de hormigón y soportes metálicos (realizadas

mediante pernos "stud"), por lo que todas las conclusiones de esta investigación son estrictamente innovadoras.

Se han estudiado tres modelos analíticos simplificados que han permitido identificar las principales variables que intervienen y obtener las distribuciones teóricas de esfuerzos.

Se han realizado dos modelos bidimensionales de elementos finitos mediante COFE para estudiar la propagación de la fractura del hormigón y obtener la resistencia de las uniones formadas por un único perno.

Se han realizado cuatro modelos tridimensionales por ANSYS para estudiar la influencia de la armadura de la viga, la fisuración del hormigón y la resistencia de las uniones formadas por dos pernos.

Finalmente se han estudiado mediante ANSYS modelos tridimensionales completos de una unión formada por cuatro pernos, en los que se ha introducido detalladamente la armadura de la viga y la geometría del pilar metálico.

Los resultados analíticos así obtenidos han permitido establecer las primeras pautas de diseño y han puesto de manifiesto la importancia de algunos factores, como pueden ser las armaduras del hormigón y la influencia del rozamiento.

Se han ensayado en laboratorio veintiún uniones de variada casuística dentro del tipo de diseño objeto de análisis, imponiendo muy diversas condiciones para la transmisión de esfuerzos. Este programa de ensayos se ha implementado parcialmente en el Departamento de Mecánica del Sólido de la Universidad de Cantabria y el resto en el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja del CSIC, con financiación de APTA, pero siempre con diseño propio de las uniones ensayadas y de todos los aspectos, instrumentación y supervisión de los ensayos.

Catorce casos corresponden a uniones ubicadas en pilares de extremo de viga. Este grupo de ensayos ha proporcionado resultados sobre el efecto de la adherencia superficial, la distribución de esfuerzos entre distintas filas de pernos y el comportamiento resistente frente a los distintos modos de fallo. En cinco de estas catorce probetas se han introducido momentos estáticamente determinados.

Siete de los veintiún ensayos corresponden a uniones ubicadas en pilar interior. Esta familia de ensayos ha aportado interesantes conclusiones sobre el efecto del rozamiento. Cinco de estas uniones se han ensayado bajo sollicitaciones de cortante puro y las dos restantes han sido sometidas a esfuerzos simultáneos de cortante y de momento para estudiar la interacción entre ambos esfuerzos.

Los resultados de este amplio programa de análisis experimental han permitido detallar las configuraciones apropiadas de este tipo de unión, corroborar el excelente comportamiento mecánico de éstas y validar los métodos de cálculo propuestos para su dimensionado y comprobación.

Los resultados experimentales han permitido confirmar los modos de rotura previstos analíticamente, tanto por el método CCD como por los análisis mediante elementos finitos. Sin embargo, los resultados experimentales han demostrado en general una resistencia de las uniones considerablemente superior a las estimadas analíticamente, principalmente debido al efecto positivo de las armaduras de refuerzo y a la transmisión de una fracción sustancial del esfuerzo cortante por rozamiento: de los ensayos de uniones en pilar interior se ha inferido que en los casos ensayados se ha producido una transmisión de cortante por rozamiento que aumenta la resistencia de la unión, al menos, entre un 161 % y 530 %.

No obstante, se ha considerado oportuno acotar razonablemente la componente de rozamiento en la formulación práctica de verificación resistente recomendada para este tipo de uniones, plasmada en el conjunto de reglas enumeradas en esta Tesis. Llegar a concluir que dichas reglas pueden conceptuarse como apropiadas para el rango típico de esfuerzos en estructuras de edificación para uso de vivienda y similares, sería la principal conclusión de índole práctica de la investigación realizada.

4.2. Conclusiones de la investigación sobre métodos de inspección

Una parte significativa de esta Tesis se ha dedicado al estudio y validación de un método de inspección rigurosamente no destructivo para pernos "stud". Este método es especialmente aplicable al caso de las uniones, cuyo número de conectadores es relativamente reducido. En estos casos, del posible perjuicio de uno solo de los pernos, causado por las habituales pruebas de doblado, podrían presumirse afecciones problemáticas. Este procedimiento innovador puede utilizarse para testar el 100 % de los pernos, reservándose el ensayo de doblado como prueba de contraste para una fracción limitada de ellos. El ensayo de doblado se encuentra normalizado en *Structural Welding Code*. Se ha realizado un cálculo manual de la frecuencia de vibración de un perno, modelizado de modo simplificado como un cilindro continuo y homogéneo. Se ha analizado un modelo tridimensional más detallado mediante ANSYS por elementos finitos, con el fin de obtener una mayor aproximación de la frecuencia propia de vibración. Posteriormente se han estudiado seis modelos como el anterior, incluyendo diferentes grados de defecto en su soldadura. Los resultados analíticos han demostrado una reducción de la frecuencia de vibración de los pernos en función de la gravedad de los defectos internos modelizados.

Se han medido experimentalmente las frecuencias de vibración de un total de 28 probetas de pernos conectores. Todas las probetas han sido sometidas a una inspección visual y posteriormente han sido evaluadas mediante los distintos ensayos destructivos o semi destructivos habituales. Es relevante mencionar que la inspección ultrasónica, que podría ser un método idóneo de detección de defectos en la soldadura, es difícilmente implementable en este caso por la particular geometría y accesibilidad de los elementos dentro del conjunto de la unión. Ocho de ellos han sido comprobados mediante el ensayo de doblado; dos de ellos mediante el ensayo de golpeo; cuatro por tracción; y los catorce restantes han sido ensayados a cortante en las uniones mixtas objeto de esta Tesis.

Este programa de ensayos se ha implementado en el Departamento de Mecánica del Sólido y en el de Física Aplicada, ambos de la ETSAM de la Universidad Politécnica de Madrid, con financiación de APTA, pero siempre con diseño propio de las probetas ensayadas y de todos los aspectos, instrumentación y supervisión de los ensayos.

Los resultados de los ensayos destructivos han mostrado una inapropiada correlación *Resultado-Calidad* generalizada en todos ellos, a excepción de la inspección visual. Los ensayos de doblado, de golpeo y de tracción han resultado ocasionalmente inseguros, al haber sido superados por ciertas probetas con defectos de soldadura. Por otra parte, tal como se ha señalado ya anteriormente, pueden plantearse dudas fundadas acerca de su posible idoneidad en este caso, debido al reducido número de pernos que componen las uniones.

Se han inspeccionado las superficies de rotura de los pernos y se ha cuantificado el grado de defecto de cada una de las soldaduras. Se han comparado las mediciones acústicas realizadas con el grado de defecto de las soldaduras y se ha demostrado, tanto analíticamente como de modo experimental, que se produce una reducción de la frecuencia de vibración de los pernos en el rango audible que claramente es función de la gravedad de los defectos de la soldadura. La apropiada correlación de ambas magnitudes valida la posibilidad de utilizar la medición acústica como alternativa a los métodos actuales de inspección de soldaduras de conectadores "stud", preferiblemente con contraste parcial con otro método de ensayo complementario, pero ello sólo para prevenir posibles recelos derivados de la obvia originalidad del procedimiento.

4.3. Conclusiones finales

Los aspectos más destacados del trabajo realizado en esta Tesis se pueden resumir en las siguientes conclusiones:

1. La unión propuesta en esta Tesis ha demostrado experimentalmente su aptitud resistente para el rango máximo esperable de esfuerzos en estructuras de edificación con uso de vivienda y similares, con menos de la mitad de coste y cerca de un 16 % del tiempo de ejecución que el que requieren las uniones mixtas más habituales en edificación (las formadas por “cruceas” de UPN).
2. El método de cálculo propuesto es capaz de estimar de modo seguro la capacidad resistente de las uniones. Este método incluye el efecto del rozamiento, limitado por razones de seguridad al 95 % percentil más desfavorable de los resultados experimentales, y la influencia que suponen las armaduras. Únicamente se han considerado los cercos específicos de refuerzo propios de las configuraciones de unión propuestas, sin contabilizar la resistencia que aportan las propias armaduras de la viga de hormigón.
3. El método de inspección acústica que se propone para determinar la calidad de las soldaduras ha demostrado experimentalmente una mayor fiabilidad que los ensayos destructivos o semidestructivos habituales, mediante un proceso sencillo, económico, rápido y mínimamente invasivo.

Por todo ello, se considera que este trabajo respalda la utilización de los pernos conectores en las uniones losa-pilar para el rango de esfuerzos típico en las estructuras de edificación para uso de vivienda y similares, lo que supone una importante innovación en los procesos constructivos disponibles para dicha tipología..

4.4. Aportaciones al estado del conocimiento

Como aportaciones principales del trabajo realizado en esta Tesis se destacan:

- **a.** Dos configuraciones de unión entre pilares metálicos y vigas o losas de hormigón armado mediante pernos conectores, una para pilares de extremo y otra para pilares interiores.

En la actualidad no se encuentra documentada ninguna tipología de unión viga-pilar constituida mediante pernos conectores. Respecto a las soluciones de nudos utilizados habitualmente, las uniones propuestas aportan las ventajas de mayor sencillez de ejecución, facilidad de transporte, reducción de costes y posibilidad de prefabricación.

- **b.** Un método de cálculo, dimensionado y validación de las uniones.

La seguridad del método de cálculo propuesto ha sido validado con ensayos experimentales a escala real y su elaboración se ha basado en la normativa estructural española y americana.

- **c.** Un método de inspección para los pernos con el que poder verificar, incluso en obra, el control y la seguridad de las soldaduras.

Esta propuesta incorpora de modo innovador la utilización de las señales acústicas de los pernos para verificar la calidad de las soldaduras. El método de inspección propuesto es económico, absolutamente no destructivo y, respecto a los métodos habituales de comprobación en la actualidad, ha demostrado una mayor sencillez y fiabilidad.