

ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE FORJADOS MIXTOS MADERA-HORMIGÓN Y SU SIMULACIÓN INFOGRAFICA POR EL MEF

Comparative study on the performance of timber-concrete composite floors and its infographic simulation by the FEM.

Alfonso Basterra* y Noemí Calle*, Arquitectos.

Enrique Relea Gangas**, Ingeniero Agrónomo.

Grupo de Investigación en Estructuras y Tecnología de la Madera de la Universidad de Valladolid.

*Departamento de Construcción, Estructuras e Instalaciones. ETS Arquitectura.

** Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. ETS Ingenierías Agrarias.

RESUMEN

En la ponencia siguiente se estudia el refuerzo de estructuras de madera mediante una solera de hormigón, unidos entre sí mediante conexiones metálicas. Para conocer el comportamiento conjunto de ambos materiales es esencial el deslizamiento de las partes ante la flexión.

La solución numérica del problema no está consensuada en el estado del conocimiento actual, proponiéndose diversos sistemas simplificados. El estudio comparativo que se presenta ha permitido elaborar unas hojas de cálculo que facilitan el dimensionado y análisis comparativo de los casos más frecuentes.

Desde la experimentación práctica, la cantidad de variables posibles es tanta que la organización de una campaña de ensayos representativa de cada caso posible resulta inviable por su complejidad y coste económico. Por ello se ha sustituido por la simulación infográfica del problema, utilizando el Método de los Elementos Finitos. Este permite introducir variables esenciales como la anisotropía, y la no linealidad en la respuesta mecánica, características de los materiales que intervienen.

SYNOPSIS

The following paper studies the reinforcement of old timber structures using a concrete plate, connected by metallic joints. In order to know the bending performance of the new composite material, the sliding of parts is essential.

The problem's numerical solution is not established by consensus in the current state of art, with several authors proposing many different simplified systems. The comparative study presented has allowed developing a spreadsheet that determines and analyses comparatively the most frequent cases.

From the practical experimentation point of view, the amount of possible variables is so big that the organization of a representative set of tests for each possible case becomes unfeasible due to its complexity and economic cost. For that reason, experimental tests have been replaced by their info-graphic simulation, using a Finite Element Method based code. It allows entering essential variables, as are anisotropy and nonlinearity, which are materials' characteristics taking part in the mechanical behaviour.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo forma parte de una investigación más amplia llevada a cabo por un grupo multidisciplinar de investigación centrado en el diagnóstico y análisis de estructuras de madera históricas, que propone, como uno de sus objetivos, fomentar una práctica mas

conservadora en la rehabilitación actual. Con este fin, se fijó el interés en el refuerzo de forjados de viguetas de madera ya existentes sin cambiar su tipología estructural original. Las causas más frecuentes de esta necesidad son:

- Minoración de la resistencia debida a la pérdida de sección que provoca la degradación del material.
- Acentuadas deformaciones y vibraciones.
- Adaptación a las nuevas normativas (acústica, de incendios, etc.)
- Adaptación a los cambios de uso de las edificaciones, que generalmente conllevan un aumento de la carga.

En España, la madera, como material estructural, se encuentra huérfana de norma básica de referencia, como la han tenido, en sus sucesivas versiones, otros materiales estructurales alternativos como el acero, el hormigón e incluso la fábrica de ladrillo. La bibliografía alternativa tiene dificultades evidentes de aplicación práctica, por tratarse o bien de normas extranjeras o tratados más o menos antiguos, cuando no completamente obsoletos. Esta situación, unida al papel francamente marginal de la madera como material estructural en los planes de estudio de la mayor parte de las titulaciones universitarias relacionadas (arquitectura, ingeniería de montes, arquitectura técnica, etc.), lleva, con una enorme frecuencia, a la poco reflexiva, por no decir desorientada, eliminación del material estructural leñoso original, y su sustitución por alternativas como el acero o el hormigón.

La solución estudiada se basa en el mantenimiento del forjado original, incluso en situación parcialmente degradada, incorporando una fina solera de hormigón armado en la parte superior y uniendo ambos sistemas entre sí mediante un adecuado sistema de conexión. Esta práctica constructiva dota al conjunto de la mayor resistencia y rigidez deseadas.

Esta técnica ha sido ampliamente empleada, no muy acertadamente, sin ningún tipo de unión entre ambos materiales. Ambas partes trabajaban independientemente una de otra, sin apenas mejora en sus prestaciones estructurales. En estas condiciones, además, el hormigón incrementaba el peso propio del sistema, de forma muy significativa en forjados con desniveles importantes, en no pocas ocasiones con resultados incluso peores que el de partida. Por el contrario, la incorporación de un sistema de unión permite entender el suelo como un conjunto de vigas mixtas de madera-hormigón, cuya sección en T, ahora sí, mejora considerablemente el comportamiento del conjunto.

En un principio su utilización se basaba en un puro empirismo de carácter experimental, no existiendo ningún método de cálculo que permitiera una valoración cuantitativa de su funcionamiento. Desde finales de los años 70, numerosas han sido las investigaciones teóricas y prácticas realizadas para llegar a conocer el comportamiento de los forjados mixtos madera-hormigón.

Dicha práctica podría ser una solución válida para el problema planteado en un número elevado de casos, sin embargo el hecho de no estar más extendida puede ser debido a la falta de una normativa clara y sencilla que facilite su diseño de forma segura. Debido a esto, el objetivo principal hacia el que se enfoca el presente trabajo es el planteamiento de una mejora en el método de cálculo para el diseño de forjados mixtos madera-hormigón, centrándonos en los casos reales más usuales.

En una primera etapa de trabajo se ha desarrollado un compendio de lo ya analizado por otros autores sobre el tema, desde el punto de vista analítico por un lado y experimental por otro. En una segunda fase, en curso de realización actualmente, se propone el estudio del comportamiento de forjados mixtos madera-hormigón con la utilización del Método de los

Elementos Finitos. El empleo del MEF permite una simulación infográfica del sistema constructivo así como la variación de forma sencilla y económica de los numerosos parámetros que influyen en el proceso.

2. ESTUDIO ANALÍTICO

En un primer enfrentamiento con el tema, desde el punto de vista analítico, nos encontramos esencialmente con dos variantes para el cálculo y diseño de forjados mixtos madera-hormigón. Por un lado, el Eurocódigo 5 fundamentado en los distintos trabajos de investigación que Ceccotti (1995) realiza sobre el tema, y en el que a su vez se basan la mayoría de las referencias encontradas. Por otro, la formulación propuesta por Turrini et al. (1983) que, de la misma manera permite el cálculo de casos sencillos de forjados mixtos. Ambas proponen, de forma numérica, una valoración de la resistencia y rigidez del conjunto pero con resultados ligeramente distintos en algunos casos y, como se verá, muy distintos en otros.

El comportamiento mecánico del conjunto radica en la eficacia de la conexión entre las viguetas de madera y la solera de hormigón, realizada a base de elementos tales como tornillos, clavos, pasadores, etc., generalmente de forma discontinua¹. Bajo flexión cada componente tiende a deslizarse respecto al otro, la sección no se mantiene plana bajo carga y la teoría clásica de la flexión en vigas no es válida. Sin embargo, sí podemos aplicarla a cada una de las partes por separado. El comportamiento de los conectores ante esta situación es denominado *semi-rigido*².

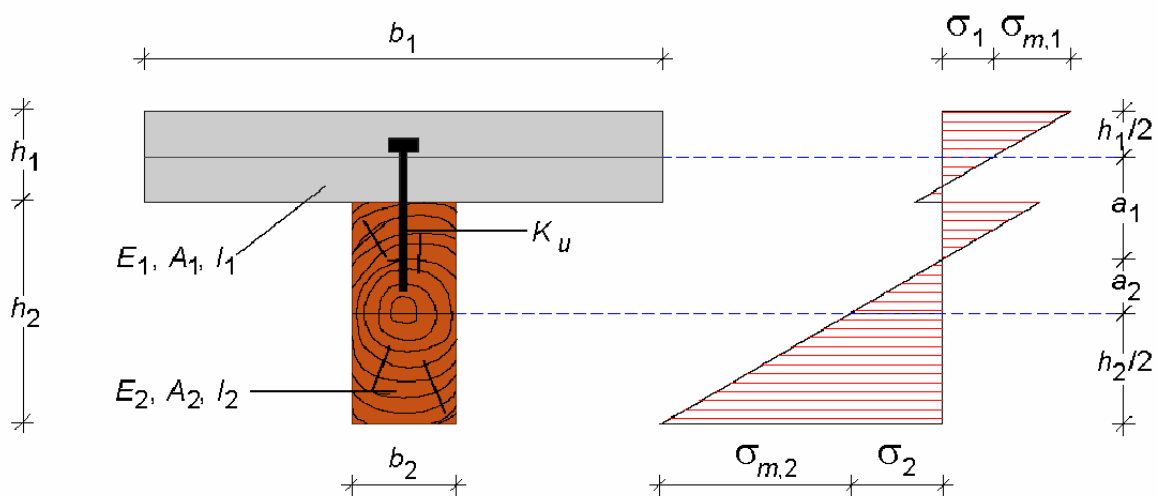


Figura 1. Esquema de la sección mixta y sus tensiones en flexión.

Los dos métodos de cálculo analizados siguen una similar formulación a la hora de realizar las comprobaciones necesarias para cada uno de los elementos que intervienen en el conjunto (hormigón, madera, conectores). Ambos plantean la viga mixta madera-hormigón como elemento estructural fundamental del forjado. Ambos basan el análisis en el comportamiento de una pieza en T de madera-hormigón, como una situación intermedia

¹ Existen algunas variantes experimentales y comerciales de conexión continua, generalmente basadas en placas metálicas de conexión en modalidades más o menos complejas, que por su singularidad quedan fuera de este estudio.

² Una perfecta conexión, viga pegada, sería una conexión rígida.

entre una conexión infinitamente rígida y la sección sin ningún tipo de unión entre sus partes. Igualmente, ambos utilizan en sus formulaciones parámetros para simular el comportamiento *semi-rígido* de la conexión, con el mismo nombre, aunque la forma de obtener sus valores, como se verá, es diferente.

2.1. Coeficiente de desplazamiento de la madera (K)

Se trata del más importante de los parámetros y el más estudiado desde diferentes metodologías. Su valor es conseguido a través de ensayos, normalizados en la UNE EN 26891:1992, pero, lógicamente, la consecución de una fórmula que permita su valoración es indispensable.

Distintos autores han querido dar una solución al problema con mayor o menor acierto. Los dos casos que en este apartado se estudian proponen:

- Eurocódigo 5. Propone, en función del tipo de elemento de unión, para secciones de madera-madera, el valor siguiente para el coeficiente de desplazamiento de la madera:

$$\frac{\rho_m^{1.5} \cdot d}{25}$$

y propone tomar el doble de dicho valor –sin justificarlo (!)– cuando se trate de secciones madera-hormigón.

- Turrini et al. (1983) de manera más rigurosa y basándose en ensayos experimentales, propone como valor:

$$K_{ser} = 0,08 \cdot d \cdot E_2$$

2.2. Coeficiente de desplazamiento unitario (k)

Se define como el cociente entre el coeficiente de desplazamiento de la madera (K) y la separación existente entre los conectores (s).

$$k = \frac{K}{s}$$

Esta separación esta condicionada por el valor del esfuerzo cortante a lo largo de la viga, que en el caso de viga biapoyada, uno de los más usuales en la práctica, toma sus valores máximos en los extremos y es nulo en el centro. Esto conduce a una mayor distancia entre conectores en el centro de la viga y menor en los extremos. El tener en cuenta en la formulación planteada los distintos valores que este parámetro toma, genera otra diferencia entre los métodos analizados.

- Eurocódigo 5. Propone considerar un valor de separación eficaz entre conectores:

$$s_{ef} = 0,75 \cdot s_{min} + 0,25 \cdot s_{max}$$

Así al calcular el *módulo de desplazamiento unitario*, k, se obtiene la expresión:

$$k = \frac{K}{s_{ef}} = \frac{K}{0,75 \cdot s_{min} + 0,25 \cdot s_{max}}$$

- Turrini et al. (1983). No considera una separación eficaz sino que hace una media entre los valores del coeficiente de desplazamiento unitario calculado para cada separación:

$$k = \frac{\left(\frac{K}{s_{\min}} + \frac{K}{s_{\max}} \right)}{2}$$

2.3. Rigidez eficaz.

La sección en T está compuesta por dos materiales con módulos de elasticidad diferentes, por lo que se trabaja con rigideces a flexión en lugar de inercias. Pero, como ya se ha dicho anteriormente, el cálculo de la sección conjunta no es directo ya que no se puede considerar una conexión perfecta de la madera con el hormigón. Hay que establecer un grado de conexión y en este punto los dos planteamientos vuelven a diferir.

- Eurocódigo 5. Penaliza la rigidez de la parte del hormigón con un coeficiente γ , para introducir en el cálculo el hecho de que la conexión entre ambos materiales no es perfectamente rígida sino que existe un desplazamiento entre ellos. Se busca un valor γ entre $\gamma=0$ (sin conexión entre las partes) y $\gamma=1$ (conexión máxima). Estudia la sección entera y le asigna una *rigidez eficaz*:

$$(EI)_{\text{ef}} = E_1 \cdot I_1 + \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + E_2 \cdot I_2 + E_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2$$

Los términos marcados son aquellos en los que ha influido la corrección por la no perfecta conexión entre las partes que conforman la viga.

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_1 \cdot A_1}{k_1 \cdot L^2}} \quad a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_2)}{2 \cdot (\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2)} \quad a_1 = \frac{h_2}{2} - a_2$$

- Turrini et al. (1983). Penaliza la rigidez total con el factor Φ :

$$(EI)_{\text{ef}} = \Phi \cdot (E_1 \cdot I_1 + E_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 + E_2 \cdot I_2 + E_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2)$$

$$\Phi = \frac{\gamma + 15 \cdot \rho^{2/3} \cdot \phi_0}{\gamma + 15 \cdot \rho^{2/3}} \quad \rho = \frac{A_2 \cdot E_2}{A_1 \cdot E_1} \quad \gamma = 1000 \cdot \frac{k}{E_2} \quad \phi_0 = \frac{I_0}{I_{00}}$$

Inercia de la sección sin conexión entre las parte $I_0 = I_1 + I_2 \frac{E_2}{E_1}$

Inercia de la sección con conexión máxima $I_{00} = I_1 + A_1 a_1^2 + I_2 \frac{E_2}{E_1} + A_2 a_2^2 \frac{E_2}{E_1}$

Tras esta comparación entre los parámetros que se emplean en cada método, se completa el estudio comparado con el cálculo de varios casos prácticos. Para ello se aplican las formulaciones propuestas por ambos autores en una hoja de cálculo y, a modo de ejemplo, se obtienen los siguientes resultados:

Pieza			Madera			Conector		Hormigón		
ancho (cm)	canto (cm)	LUZ (m)	$f_{m,k}$	$E_{0,med}$	ρ_{med}	\varnothing (mm)	AEH	f_k	E	fluencia CP
15	25	4	18	9.000	380	10	500	25	27.264	2,4
W =	1.563 cm ³		k_{cc} =	1	11	s_{max} (cm)	20	b (cm)	h (cm)	fluencia CV
l =	19.531 cm ²		k_h =	1,00	2	s_{min} (cm)	12	50	4	1,4
			s_{ef} (cm)				14			

N_h	$f_{m,d}$	$f_{t,0,d}$	k_{mod}	$k_{def}(F)$	D.C.
1,3	8,31	5,08	0,6	0,6	PERM.
	11,08	6,77	0,8	0,25	MEDIA

CARGAS	Superficial	Intereje	Lineal	
Carga permanente	2,50 kN/m ²	0,5	1,25 kN/ml	38%
Carga variable	4,00 kN/m ²		2,00 kN/ml	62%

	E.L.U.	E.L.S.	E.L.U.(C/F)	E.L.S.(C/F)	Eurocódigo
K_{ser}	5.926	5.926	5.926	5.926	5.926
	11.250	11.250	8.134	7.031	9.000
ν	0,14	0,19	0,24	0,34	0,31
a_2	26,75	34,06	23,45	29,78	30,00
a_1	118,25	110,94	121,55	115,22	115,00
(EI) _{ef}	3,14E+12	3,50E+12	2,04E+12	2,03E+12	2,61E+12

	CP		CV
$E_{1,ef}$	9.807,21	8018,84	11360,02
$E_{2,ef}$	6.507,59	5625,00	7200,00

ESFUERZOS CARACTERÍSTICOS →		C.P.	C.V.	C.P.	C.V.
COMB. 1	1,35 CP			3,38 kN.m	3,38 kN
COMB. 2	1,35 CP	1,5 CV		9,38 kN.m	9,38 kN

ESFUERZOS DE CALCULO →		$M_{d,max}$	$Q_{d,max}$

E.L.U.	N_h	1,35 N/mm ²	$N_{0,d}$	0,72	N_{max}		$N_{m,1}$	1,63 N/mm ²	$N_{m,d}$	3,36	F_v	3.235 N
	N_{MAX}	2,98 < 16,67	I_m	0,41	<	<						
	N_{MIN}	< 16,67			1,231	R_d	6.861 N					
	TRACCION	0,28 < 1,197			CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE					
		Hormigon		Madera		Conector						

E.L.U.(F)	N_h	1,32 N/mm ²	$N_{0,d}$	0,70	N_{max}		$N_{m,1}$	0,90 N/mm ²	$N_{m,d}$	3,74	F_v	3.157 N
	N_{MAX}	2,22 < 16,67	I_m	0,44	<	<						
	N_{MIN}	0,41 < 16,67			1,231	R_d	6.861 N					
		Hormigon		Madera		Conector						

E.L.S.	$f = 0,095 \cdot q$	C.P.	C.V.	CP+CV	
Flechas (mm)	1,19	1,91	3,10		
		1/2098	1/1291		% vano
		L/300	L/200		% admisible
		CUMPLE	CUMPLE		

E.L.S.(Fluencia)	$f = 0,164 \cdot q$	CP	C.V.	CP+CV	
Flechas (mm)	2,05	2,55	4,60		
		1/1567	1/869		% vano
		L/300	L/200		% admisible
		CUMPLE	CUMPLE		

Figura 2. Tablas de cálculo

2.4. Discusión

Los resultados obtenidos arrojan las siguientes conclusiones parciales:

Estado Límite Último.

En el estudio de estados *límites últimos en estado inicial* los valores obtenidos de tensiones en el hormigón y el índice de agotamiento de la madera son muy parecidos. El valor de las fuerzas de los conectores difiere un poco más, teniendo en cuenta los también diferentes valores de comparación en ambos casos.

Al introducir el efecto de la fluencia para *estados límites últimos*, siguiendo los dos métodos se obtienen conclusiones iguales al caso anterior: los valores de tensión unitaria del hormigón e índices de agotamiento de la madera son bastante parecidos mientras que los conectores analizados por ambos métodos difieren en mayor medida.

Estado Límite de Servicio. Deformación.

Al analizar la deformación a *corto plazo*, se obtuvieron valores muy semejantes de rigidez eficaz y, lógicamente, flechas instantáneas muy similares.

Por último, al estudiar el *largo plazo* en la deformación, es decir, al aplicar la fluencia al método de Turrini et al. (1983) (no se proponía en el cálculo original), se obtienen valores que difieren mucho de los realizados según el Eurocódigo 5. Este es el apartado en el que los dos métodos más se alejan en sus resultados.

En definitiva, ambos planteamientos siguen un proceso de cálculo similar y es en la incorporación de los parámetros determinantes del comportamiento semi-rígido de la conexión donde radica la mayor o menor rigurosidad del método. La elección del más exacto y cercano al comportamiento real del conjunto exigiría la realización de ensayos reales y su contraste con los resultados teóricos obtenidos.

El estudio de cada uno de los parámetros que intervienen en el proceso, definidos en el apartado anterior, ofrece por tanto tres diferentes ramas de investigación hacia las que podría ser encaminado el presente trabajo. A saber:

- Una formulación más acertada para el coeficiente de desplazamiento de la madera.
- Influencia de la separación entre conectores en el comportamiento global.
- Desarrollo numérico más exacto para la valoración de la rigidez del conjunto.

Optamos por la primera de las opciones y centraremos el trabajo en la valoración del coeficiente de desplazamiento de la madera, parámetro considerado fundamental en el proceso.

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Al enfrentarnos al tema desde el punto de vista de la experimentación nos encontramos dos variantes de ensayos en los que basar el conocimiento de los distintos parámetros que intervienen en el proceso anteriormente descrito. Por un lado puede realizarse un ensayo a cortante, esquematizado en la figura adjunta (figura 3) y normalizado, como ya se ha dicho anteriormente, en la UNE EN 26891. De él se obtiene una gráfica fuerza-desplazamiento que permite valorar el coeficiente de desplazamiento de la madera. Por otro lado, de los ensayos de vigas de dimensiones comerciales sometidas a flexión³ pueden deducirse otros interesantes datos acerca de la influencia en el proceso de otros parámetros, como la separación de los conectores, el efecto de la fluencia, las singularidades de la madera, las rigideces relativas de ambos materiales, etc. Todo ello en la búsqueda del método analítico más acorde con la realidad.

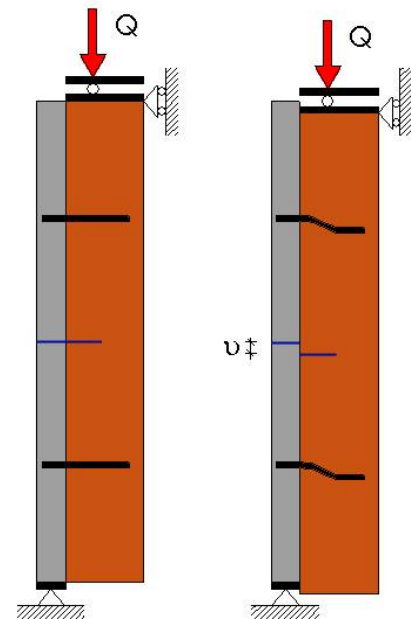


Figura 3. Esquema de ensayo.

Son muchos los autores que han utilizado ensayos de cortante en secciones mixtas de madera-hormigón, en la búsqueda de la mejor alternativa para dotar de mayor resistencia y rigidez a forjados de madera. La cantidad de variables en el ensayo son tantas como el

³ Este tipo de ensayos se han generalizado en la tecnología de la madera desde hace ya unos cuantos años, habiendo sustituido a las pruebas experimentales sobre probetas pequeñas y libres de defectos, que eran los normalizados hasta hace bien poco.

número de referencias encontradas por lo que, como metodología de trabajo, se realiza, al igual que en el apartado anterior, un análisis de lo publicado por otros autores sobre el tema, con el fin de plasmar una comparativa similar.

Como resultado de su estudio y análisis, se ha realizado, por un lado, una figura en la que se recogen los diferentes parámetros utilizados (figura 4) y permite una fácil identificación de las variantes propuestas en cada uno de los estudios analizados: utilización de hormigones aligerado, hormigón reforzado con fibras de acero, utilización de diferentes tipos de conectores más o menos elaborados y su diferente colocación. Por otro lado, se han dibujado en una única grafica fuerza-desplazamiento (figura 5) los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos, para, de forma sencilla, poder reconocer la influencia de cada una de las variantes propuestas sobre el comportamiento del conjunto.

THORSTEN FAUST (1999)					ENSAYO		ENTARIMADO interpuesto			
					Doble (Madera+Hormigón+Madera)		Sin entarimado Con entarimado 2cm			
MADERA		HORMIGÓN			CONECTORES					CARGA
TIPO	PROPIEDADES	TIPO	PROPIEDADES	MALLAZO	nº	ANGULO	DIÁMETRO ϕ	LONGITUD DE PENETRACION	MATERIAL	
S10 SM10	Humedad 12%	Hormigón aligerado	Modulo de elasticidad 12700 N/mm ²	NO	2 pares	45°	Tornillo tipo A 4,3 mm 6,1 mm	100mm	Acero	EN 26891
			Densidad 1400 Kg/m ³							

Figura 4. Variables que intervienen en el ensayo de cortante de una probeta de madera-hormigón.

La disparidad de los parámetros utilizados en cada referencia así como la de los resultados obtenidos, no arrojan resultados concluyentes. Únicamente podemos resaltar una clara sistematización en los procesos a la hora de llevar a cabo el ensayo de cortante para secciones mixtas.

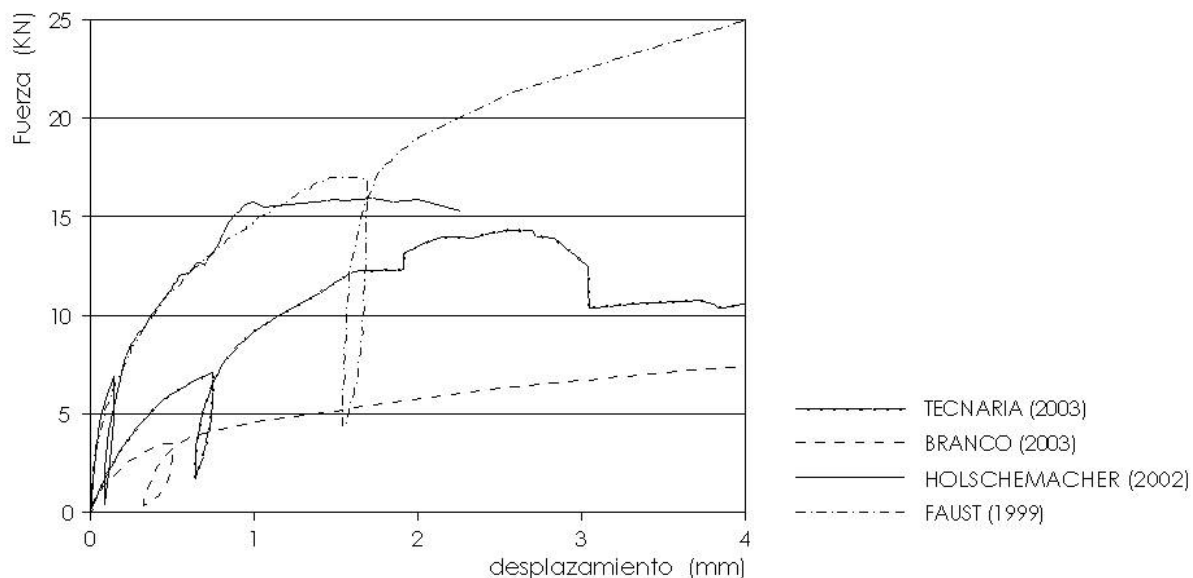


Figura 5. Gráfico comparativo de las gráficas fuerza-deformación.

Sin embargo, muy pocos, y de mayor interés para el presente trabajo, son los autores que llegan a plantearse la adecuación de lo obtenido mediante los ensayos a las formulaciones existentes, o los que llegan a proponer una expresión alternativa para el parámetro estudiado.

- A la opción del Eurocódigo 5, Ceccotti (1995) propone una alternativa, muy generalizada ya en la literatura técnica, para el valor del coeficiente de desplazamiento de la madera:

$$K_{ser} = 0,125 \cdot d \cdot E_2$$

- Por otro lado, Turrini (1983), realiza unos ensayos que, aunque un poco diferentes a la práctica general utilizada en la mayoría de las referencias (anterior a la UNE EN 26981), permiten deducir de manera similar otra fórmula distinta para el mismo parámetro:

$$K_{ser} = 0,08 \cdot d \cdot E_2$$

- La más reciente referencia encontrada es el trabajo de Branco (2003) que, tras realizar una serie de ensayos de cortante, plantea una comparativa de los resultados obtenidos con el valor numérico propuesto en el Eurocódigo 5 y los resultados de una nueva fórmula alternativa, parecida a la de Ceccotti (1995), planteada por él mismo:

$$K_{ser} = 0,15 \cdot d^{0,95} \cdot E_2^{0,9}$$

Tomando como base los resultados obtenidos por los tres autores⁴ que en los últimos años más han trabajado sobre el asunto, Branco (2003) plantea una tabla comparativa, con valores del coeficiente de desplazamiento de la madera según las tres opciones mencionadas en el párrafo anterior, para cada una de las referencias. Tras ella, se comenta la mejora que supone la fórmula planteada a la propuesta del Eurocódigo 5. Partiendo de dicha tabla se ha realizado una gráfica (figura 6) en la que, más intuitivamente, se puede observar, por un lado, la propuesta del Eurocódigo 5 y por otro la mayor exactitud de los valores obtenidos por la fórmula propuesta por Branco (2003), resaltando que dichos valores quedan fuera del lado de la seguridad. Además se han añadido a la comparativa, aplicadas al ensayo de Branco, las otras dos alternativas propuestas por Ceccotti (1995) y Turrini (1983).

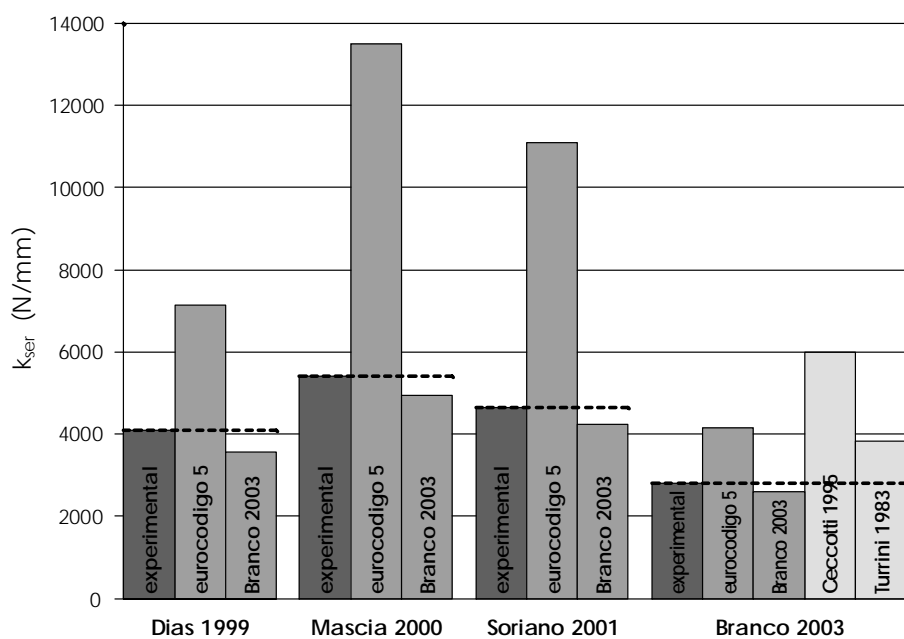


Figura 6. Tabla comparativa coeficiente de desplazamiento de la madera.

3.1. Discusión.

Dada la cantidad de variables que intervienen en la obtención de un valor unívoco para el coeficiente de desplazamiento de la madera en secciones mixtas madera-hormigón, la tendencia actual es que cada empresa que comercializa un determinado tipo de conector, generalmente de complejos diseños, facilita también el valor de dicho parámetro tras haber realizado su correspondiente ensayo de cortante.

A pesar de ello, sigue pendiente una formulación general válida para conexiones más sencillas de tipo clavija, como tirafondos, clavos, etc. más accesibles y generalizados en la práctica constructiva.

En la tabla comparativa propuesta (figura 6), en primer lugar, se corrobora la poca exactitud de la propuesta del Eurocódigo 5. La propuesta de Ceccotti (1995), la más generalizada y que actualmente sustituye a la anterior en la mayoría de la bibliografía, presenta un mayor grado de aproximación al comportamiento real, a pesar de no reflejarse en su aplicación al

⁴ Dias (1999), Mascia (2000) y Soriano (2001) referencias propuestas en Branco (2003).

ensayo de Branco. El hecho de que en este caso el valor del Eurocódigo sea más acertado que el propuesto por Ceccotti es debido a la utilización de hormigón aligerado, cuya menor densidad, influye únicamente en la primera, aproximando más el valor a la realidad. Aun así, los valores que de ella se obtienen siguen estando bastante lejos de los valores obtenidos en ensayos reales. De lo planteado por Branco (2003) se acepta la formulación propuesta como muy cercana al comportamiento real, pero no puede pasarse por alto que está fuera del margen de seguridad. La propuesta de Turrini (1983) a falta de un ensayo comparativo más amplio que lo ratifique, parece ser, de las propuestas más acertadas, aunque todavía muy mejorable.

4. AVANCE DE LA METODOLOGÍA

A la vista de los trabajos anteriores nuestro grupo de trabajo está llevando a cabo una aproximación práctica al problema, utilizando simultáneamente la simulación infográfica a través de un modelo informático por el Método de los Elementos Finitos (MEF) y la experimentación real sobre probetas de madera-hormigón.

Los programas informáticos basados en el MEF permiten simular de forma relativamente sencilla los comportamientos físicos más complejos; admiten la introducción de variables esenciales, como la anisotropía y la no linealidad en la respuesta mecánica, que son características de los materiales que intervienen en nuestro estudio.

Los ensayos prácticos se están realizando sobre probetas como las de la figura 10, realizadas con madera de coníferas, tirafondos de acero y hormigón de tipo convencional HA-25/B/25/1a (figuras 7 y 8). El ensayo hace trabajar a los conectores a cortante, obteniéndose datos relativos a las deformaciones y desplazamientos producidos.



Figuras 7 y 8. Probetas mixtas para ensayo a cortante.

El objetivo es obtener datos para poder validar cada una de las propuestas comparadas en los apartados anteriores de manera más rigurosa y que a su vez sirvan de apoyo para la simulación en el modelo infográfico que se describe a continuación.

Ante la dificultad y el coste económico y de tiempo que podría suponer realizar ensayos suficientes para el conocimiento a fondo del comportamiento de forjados mixtos madera-hormigón, con intervención de todas sus variables, se incorporó al estudio el Método de los

Elementos Finitos (MEF) como método de análisis⁵. La utilización de un programa informático basado en el MEF⁶, nos está permitiendo la simulación del comportamiento real de la sección mixta. Para acotar el estudio, y al igual que en apartados anteriores, el primer análisis se centra en el ensayo de cortante.

Se propone la simulación con un modelo de magnitudes y materiales similares a los de las probetas de madera-hormigón, que permita una comparación directa de los resultados obtenidos y una posterior validación del método.

En las primeras fases de validación del método propuesto, y aceptando algunas simplificaciones en diferentes etapas del proceso, se ha elaborado un modelo del que se obtuvo el resultado mostrado en la figura adjunta (figura 9).

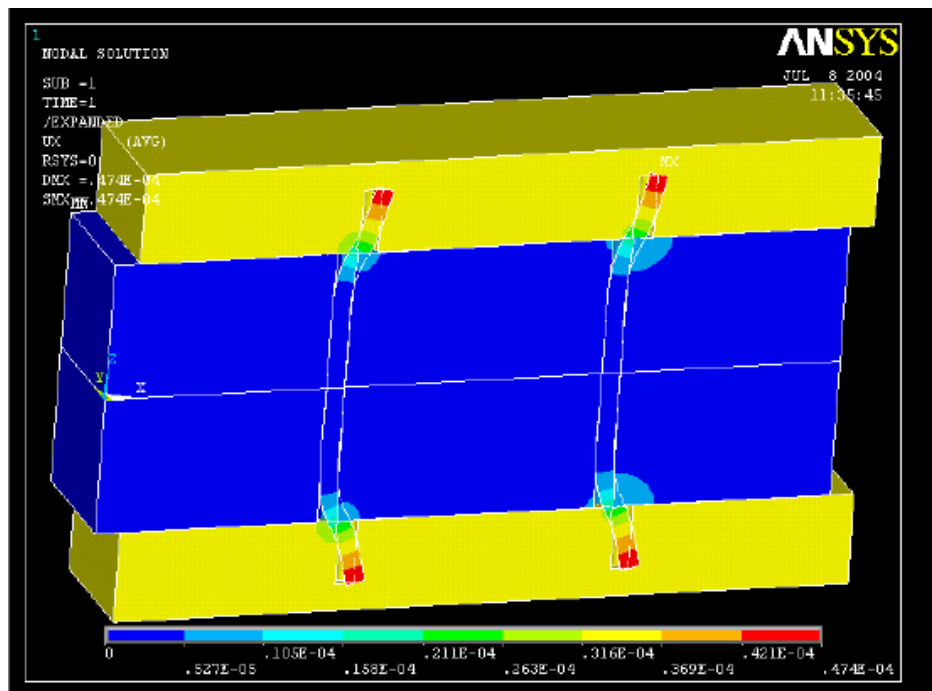


Figura 9. Resultado obtenidos por MEF

Las características elegidas para la simulación por medio del MEF fueron las siguientes:

- Planteamiento del problema “*structural*”.
- Método de solución “*h-Method*” que permite análisis no lineales, como es nuestro caso.
- El modelado se realizó a partir de elementos “*solid brick 8 nodos 185*”, con las dimensiones indicadas (figura 10,b).

⁵ Debemos especialmente al trabajo de Zienkewicz y Taylor (1.994) desde los años cincuenta, la formulación básica del método de análisis que hoy se utiliza tanto para simular el despegue de una nave espacial de su cohete propulsor en el espacio exterior, estudiar el flujo continuo hidráulico o eléctrico o la vibración virtual de las paredes protectoras de un reactor nuclear en caso de movimiento sísmico. Puesto que, como se ha escrito, el método de los elementos finitos supone en realidad una forma extraordinariamente potente de obtener un modelo matemático de la realidad.

⁶ En este trabajo se ha empleado el código ANSYS.

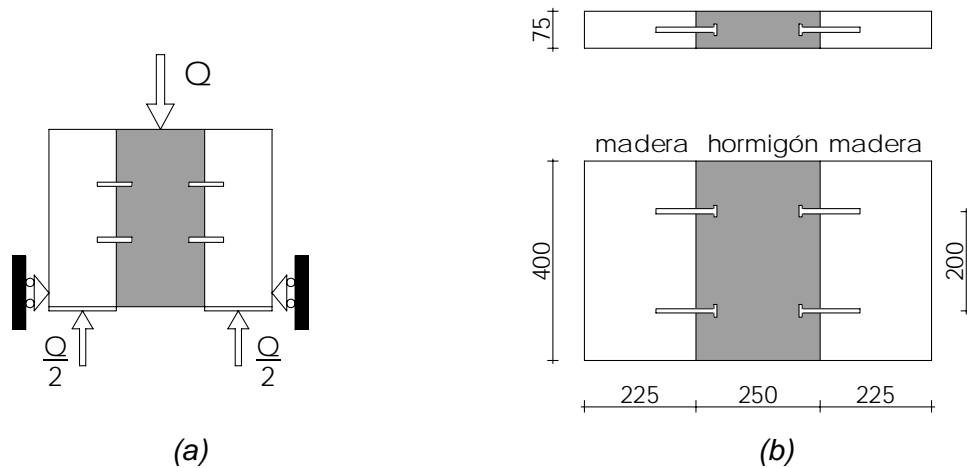


Figura 10. Ensayo de cortante realizado en el presente trabajo

- El comportamiento de los tres materiales que intervienen en el proceso (hormigón, madera y acero), por ser un primer tanteo y por simplificar, se consideró *lineal-elástico-isótropo* con sus respectivos valores de coeficiente de Poisson (ν) y módulo de elasticidad (E):

Hormigón	$E= 27.264 \text{ N/mm}^2$	$\nu = 0,20$
Madera	$E= 9.000 \text{ N/mm}^2$	$\nu = 0,25$
Acero.....	$E=210.000 \text{ N/mm}^2$	$\nu = 0,30$
- Como características de la malla destacar:
 - Forma tetraédrica de los elementos “*tetrahedral*”.
 - Tipo de malla libre “*free meshing*”.
 - Tamaño del elemento “*smart element sizing*” (recomendado para malla libre).

Las coacciones elegidas fueron las necesarias para un funcionamiento según el esquema indicado (figura 10a), similar a los ensayos reales realizados. El estudio se ha realizado para un cuarto de pieza teniendo en cuenta la simetría existente. Así, ante una carga aplicada instantánea ($Q=1$), no se tuvo en cuenta el efecto de la fluencia, se obtuvo un comportamiento no lineal del conjunto con un desplazamiento de las partes que componen el modelo, similar a la conducta real (figura 9).

Dada la posibilidad que ofrece el programa utilizado de introducir más parámetros y más cercanos a la realidad del proceso y para ajustar lo más posible el resultado a los ensayos reales realizados, la propuesta no se queda aquí. El procedimiento definitivo propone un más detallado modelado de la conexión, así como la introducción del comportamiento anisótropo de la madera, que se ha obviado en el primer modelo. Igualmente, se efectuará una extrapolación de los resultados de los ensayos a cortante a vigas de tamaño comercial.

No consideraremos en el presente estudio el efecto de la fluencia, aunque no se descarta como una interesante posibilidad para enfocar trabajos posteriores.

5. CONCLUSIONES

Ante el creciente interés por la intervención sobre estructuras de madera, de carácter monumental o no, y con el fin de potenciar una práctica más conservadora, se ha querido estudiar el cálculo numérico y las mejoras que aporta el refuerzo de estructuras de madera

mediante una fina solera de hormigón, unidos entre si mediante conexiones metálicas. Estamos convencidos de que esta técnica supone una alternativa eficiente –eficaz a coste mínimo– para mantener muchos de los forjados de madera ya existentes y adaptarlos a los nuevos requisitos y funcionalidades constructivas derivadas de nuevas normativas o de cambios de uso o rehabilitaciones.

Para conocer el comportamiento conjunto de ambos materiales es esencial el deslizamiento de los conectores que los unen. La manera de abordar el problema numéricamente no está consensuada en el estado del conocimiento actual, proponiéndose diversos sistemas simplificados. Su estudio comparativo ha permitido elaborar unas hojas de cálculo que permiten de forma sencilla el dimensionado de los casos más frecuentes que se suelen encontrar en la práctica real. Encontrar su mayor o menor acierto exige compararlos con ensayos reales.

Por ello, en segundo lugar se ha estudiado el tema desde la experimentación práctica, encontrando un similar disenso entre las referencias publicadas. Centrándonos en el considerado más relevante para el tema tratado, el coeficiente de desplazamiento de la madera, y tras analizar lo planteado sobre él por distintos autores, podemos decir que existe una sistematización en la obtención experimental de dicho parámetro, aunque no una clara definición numérica que permita su cálculo, y su posterior incorporación a una formulación global del sistema. Son varios los parámetros, que intervienen en el proceso de cálculo, pendientes de un estudio experimental que los defina de forma más exacta y el enfoque definitivo de este apartado queda supeditado al desarrollo numérico planteado anteriormente.

Muchos son los códigos informáticos que actualmente, basándose en métodos numéricos, como el de los elementos finitos, permiten simular de forma relativamente sencilla los comportamientos físicos más complejos. Admiten la introducción de variables esenciales, como la anisotropía y la no linealidad en la respuesta mecánica, que son características de los materiales que intervienen en nuestro estudio. Dada la cantidad de variables posibles a la hora de enfrentarse al parámetro estudiado, la organización de una campaña de ensayos representativa resulta inviable por su complejidad y coste económico. Ante ello, se propone como alternativa una simulación infográfica del problema mediante la utilización del Método de los Elementos Finitos.

Como apoyo a la metodología planteada, basada en el MEF, están siendo realizados unos ensayos de cortante. Con todo ello se pretende, no ya el planteamiento de una nueva formulación para la obtención del coeficiente de desplazamiento de la madera, sino un análisis que concluya en la valoración numérica más acertada de las propuestas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arriaga, F., Peraza, F., Esteban, M., et al. 2002. *Intervención en Estructuras de Madera*. A.I.T.I.M. Madrid.

Branco, Jorge Manuel 2003. *Comportamento das ligações tipo cavilha em estruturas mistas madeira-beato*. Universidade de Minho. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Civil.

Ceccotti, A. 1995. *Timber-concrete composite structures*. Lecture E13, Timber Engineering STEP 2. Universidad de Florencia.

- Ceccotti, A. 2003. *Composite Structures*. Timber Engineering, 21. Willey. Hoboken, USA.
- Dias, A. G. 1999. *Estruturas mistas madeira-betão*. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Gelfi, P., Giuriani, E. 1995. *Travi miste in legno-calcestruzzo con conectori a piolo*. II Workshop Italiano sulle Costruzioni Composte. Dip. Analisi e Progettazione Strutturale, Università di Napoli Federico II, Napoli, 22-23 Giugno 1995.
- Gelfi, P., Giuriani, E., Marini A. 1998. *Comportamento della connessione a piolo nelle travi miste in legno e calcestruzzo: modellazione teorica e confronti sperimentali*. III Workshop Italiano sulle Costruzioni Composte. Dipartimento Ingegneria Civile, Brescia.
- Klaus Holschemacher, Sven Klotz, Dirk Weiße 2002. *Application of Steel Fibre Reinforced Concrete for Timber-Concrete Composite Constructions*. LACER n°7.
- Mascia, N., Soriano, J. 2000. *Comportamento mecânico de ligações flexíveis em vigas mistas de concreto-madeira*. VII EBRAMEM (Madeiras e Estruturas de Madeira). S. Carlos, Brasil.
- Soriano, J., Mascia, N. 2001. *Mechanical Behavior of Flexible Connections in the Timber-Concrete Composite Beams*. Joints in Timber Structures. International RILEM. Symposium, Ed. By S. Aicher and H.-W. Reinhardt, Stuttgart, Germany, pp. 291-300.
- TECNARIA 2003. *Informe de las pruebas efectuadas en juntas mixtas madera-hormigon con conectores de perno y crampones*. Tecnaria, Italia.
- Thorsten Faust, Ricky Selle. 1999. *Properties of Composite Joints of Timber-LWAC Composite Structures*. LACER n°4.
- Turrini G., Piazza M. 1983. *Una tecnica di recupero statico dei solai in legno*. Revista técnica "Recuperare" n° 5, 6, 7. 1983.
- ZIENKIEWICZ, O.C. y TAYLOR, R.L. 1994. *El método de los elementos finitos*. 2 Vols. 4ª Edición. McGraw-Hill. Barcelona.
- UNE EN 26891:1992. Estructuras de madera. Uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos. Principios generales para la determinación de las características de resistencia y deslizamiento.
- Eurocódigo 5. EN 1995-1-1. Anexo B (Informativo). *Vigas compuestas con uniones mecánicas*.

TEXTOS DE LOS PIES DE FIGURAS

- Figura 1. Esquema de la sección mixta y sus tensiones en flexión.
- Figura 2. Hoja de cálculo basada en el método propuesto en el Eurocódigo 5.
- Figura 3. Esquema de ensayo a cortante.
- Figura 4. Variables que intervienen en el ensayo de cortante de una probeta de madera-hormigón.

- Figura 5. Gráfico comparativo de las gráficas fuerza–deformación.
Figura 6. Tabla comparativa del coeficiente de desplazamiento de la madera.
Figura 7. Probetas mixtas para ensayo.
Figura 8. “ “ “ “
Figura 9. Resultado obtenidos por MEF.
Figura 10.a Esquema del ensayo de cortante realizado en el presente trabajo.
Figura 10.b Dimensiones del ensayo.