

Eficacia estructural y energética de la madera como material de construcción

Francisco Arriaga
Dr. Arquitecto. AITIM
Profesor de Cálculo de Estructuras. U.P.M.

La simple comparación de los pesos propios de los sistemas constructivos tradicionales pesados (forjados de viguetas y hormigón armado) con los entramados ligeros de madera revela una diferencia abismal en relaciones resistencia/peso. La construcción ligera en madera tiene un peso propio de un orden siete veces inferior al sistema tradicional pesado. En un forjado pesado la estructura pesa casi lo mismo que la carga que resiste, mientras que en uno de madera su peso no suele llegar al 20% de la carga soportada. Aun resulta más sorprendente la eficacia energética de los sistemas constructivos de madera frente a otros materiales estructurales. En este artículo se recogen algunas noticias y escritos que apoyan firmemente estas ideas.

La madera material de futuro

Para fabricar el mismo peso de hormigón se precisa 4 veces más energía que para la madera; y esta relación sube a 60 en el caso del acero. En el elemento constructivo esta relación se atenúa, a veces, gracias al diseño estructural de cada material, pero en todo caso la madera da lugar a soluciones 10 veces más económicas en consumo de energía.

En la actualidad el precio de los productos no se corresponde con su costo energético global, sin embargo la optimización de los procesos puede cambiar en el futuro esta

relación.

I Congreso sobre Forjados

Este Congreso tuvo lugar el mes de octubre de 1995 en el Palacio de Congresos de Barcelona con el objetivo de recoger los avances que se han producido en los últimos años en el conocimiento de los procesos físicos y químicos, transformación de los materiales y nuevos conceptos de durabilidad y mantenimiento, resumiendo así la experien-

cia acumulada en los últimos 10 años para tratar de aventurar cuáles serán los caminos futuros en las estructuras horizontales. En el Congreso se desarrollaron 10 ponencias y 112 comunicaciones con una asistencia de 640 profesionales del sector.

En relación con las soluciones propuestas para el futuro hay especialistas que se pronuncian por las losas y forjados pesados, pero también hay un grupo numeroso de ponentes que apoyan el empleo de los forjados ligeros, especialmente el sistema de entramado ligero.

A continuación se recogen algunas de estas opiniones, extraídas del artículo «Luces y sombras de los forjados de España» aparecida en la Revista de la Construcción (nº 49-nov.95).

El arquitecto **Fruitós Mañá** se plantea si es realmente necesario recurrir a forjados tan pesados de la construcción tradicional. En su opinión, la evolución de los forjados, subsidiaria de la evolución de los sistemas estructurales, presenta fuertes contradicciones con las exigencias que está generando la cultura constructiva de finales del siglo XX.

Para Mañá, el problema fue generado por algo tan inconsistente como la aparición de la bovedilla prefabricada y la decisión de enyesar directamente los techos. Luego se decidiría que éstos tenían que participar en el arriostamiento del conjunto. Mañá propone una revisión a fondo de la situación actual, incluyendo la normativa pertinente.

Fruitós Mañá recuerda que, hacia los años 60, los clásicos forjados cerámicos tenían un canto que hoy produce sonrojo: no sobrepasaban los 15 cm. «Ahora en cambio se están empleando forjados que se acercan a los 400 kp/m² de peso propio con tendencia a aumentar y que necesitan una armadura importante. Más del 50% del peso se destina a autosustentar el forjado, sin acabar de resolver el problema de las elevadas flechas

diferidas que provocan la ruptura de tabiques».

Concluye que esta dinámica de hacer cada vez más pesados los forjados no sólo no resuelve los problemas estructurales, sino que los complica: Es como si la masa necesaria para estabilizar un edificio, que en la construcción histórica reposaba en los muros y se transmitía por compresión, la hubiésemos trasladado a los forjados, que la han de soportar trabajando a flexión». Mañà se pronuncia a favor de los forjados ligeros, a base de materiales de elevadas prestaciones, en los que, por capas, se vayan resolviendo los distintos problemas de resistencia y aislamiento.

José Ignacio Llorens Durán, arquitecto y profesor de la ETSAB, considera que la normativa que regula el diseño de los forjados, contempla un conjunto de requerimientos y prestaciones que obligan a utilizar soluciones convencionales, como es el caso de los forjados reticulares. Sin embargo, Llorens también cree que son elementos excesivamente pesados, incluso más que la carga a soportar, y que tienen los inconvenientes de no poderse modificar, además de presentar problemas de durabilidad, reciclabilidad y conservación.

Como quiera que no considera necesario ni conveniente que todos los forjados respondan a los citados requerimientos, Josep Ignasi Llorens propone asimismo la utilización de forjados ligeros - estos sí, reciclables y modificables- para las viviendas, utilizando por ejemplo los de viguetas de madera o chapa y tableros machihembrados. Pone como ejemplo algunas de las obras que ha realizado, junto con su socio Alfons Soldevila, profesor también de la Escuela de Arquitectura.

Para **Rafael Bellmunt**, director de Proyectos del ITEC y profesor de la ETSAB, el extraordinario peso de los forjados reticulares (350 kp para aguantar una sobrecarga de 300 Kp) provoca excesivas solicitaciones en los elementos estructurales y más carga en pilares y cimientos. En cuanto al proceso constructivo, por su carácter artesanal, no es precisamente el propio para entrar en el año 2000. El tener que encofrar totalmente cada planta con la falta de rapidez que esto conlleva (se necesita tiempo para que el hormigón endurezca antes de desencofrar), a los inconvenientes de cualquier sistema húmedo y a los problemas de transporte y elevación -a causa del volumen de hormigón necesario- Bellmunt añade la falta de rigidez en cuanto a las deformaciones, la incapacidad de alojar las instalaciones y los problemas de la durabilidad del hormigón armado.

El director de Proyectos del ITEC apuesta por los forjados que -cumpliendo las exigencias fundamentales de estabilidad,

resistencia y monolitismo- permitan el trabajo de un solo elemento en ambas direcciones, sustituyendo la función de las jácenas.

Aún reconociendo que esta tipología de forjado está fuera de normativa, destaca que permite una distribución arbitraria de los pilares y asegura que su buen comportamiento está avalado por la experiencia.

Ligeros y sencillos

Por ello, Bellmunt cree que los forjados del futuro deben ser: ligeros (con un peso propio de un 20% de la carga total), sencillos de concepción, autoportantes al máximo, industrializados, contruidos con un sistema seco, rígidos (para transmitir acciones horizontales y verticales con poca deformación), que permitan el paso de instalaciones, reparables, reciclables, duraderos (tanto o más que la propia vida del conjunto del edificio) y de buen mantenimiento. Este arquitecto está convencido de que en el futuro «seguramente las estructuras y con ellas los forjados variarán sustancialmente».

Materiales y energía

J.E Gordon, profesor de Ciencia de los Materiales en la Universidad de Reading (U.K.), es autor de un libro técnico sobre estructuras (*Structures: or why things don't fall down*. I. E. Gordon, New York, 1978) en el que describe de forma sencilla conceptos de elasticidad, resistencia de materiales y diseño estructural.

Gordon obtuvo, entre otras condecoraciones, la British Silver Medal de la Royal Aeronautical Society y la Griffith Medal del Materials Science Club. Son renombradas sus investigaciones sobre plásticos, cristales y desarrollos de nuevos materiales.

Es interesante libro tiene un capítulo final sobre el diseño estructural en el que trata la eficacia energética y estructural de los materiales. Sus conclusiones apoyan de forma sólida la clara competitividad de la madera, no sólo frente a los materiales tradicionales sino incluso frente a los de última generación.

A continuación se recoge una traducción de este apartado en el que presenta el problema con gran nitidez.

«El siglo veinte podrá ser conocido por la posteridad como la edad del acero y el hormigón». O también como la «edad de la fealdad» u otros nombres desagradables como la «edad del despilfarró». No sólo los ingenieros están obsesionados por el acero y el hormigón (y son bastante indiferentes al aspecto externo de las cosas) también los políticos y el hombre de la calle parecen haber sido infectados por la misma enfermedad. Esta puede haberse originado hace doscientos años con la Revolución Industrial

y el abaratamiento de la fundición -que condujo al abaratamiento del hierro- y, por tanto, a las máquinas de vapor pensadas para transformar esta fundición en energía mecánica barata y así sucesivamente hacia ciclos cada vez más intensivos de energía. De esta forma el hierro y el petróleo almacenan una gran cantidad de energía en un pequeño volumen. Las máquinas procesan una gran parte de esta energía muy rápidamente y dentro de un espacio reducido. Después transportan la energía en forma de electricidad o energía mecánica de forma concentrada. Nuestra tecnología contemporánea descansa en esta concentración de energía. Los materiales correspondientes a esta tecnología, acero, aluminio y hormigón, requieren asimismo una gran cantidad de energía para ser fabricados (ver tabla 1).

Debido a que estos materiales precisan tal cantidad de energía para su procesado, sólo pueden emplearse con rentabilidad dentro de una economía energéticamente intensiva. De esta forma no sólo estamos invirtiendo capital monetario en un dispositivo técnico; también estamos invirtiendo capital energético y, en ambos casos, es necesario asegurar un retorno rápido de la inversión.

A pesar del elevado costo y la creciente escasez de la energía, el camino hacia una energía intensiva aumenta en lugar de disminuir. Las máquinas más modernas, tales como las turbinas de gas, procesan más y más energía, de forma cada vez más virulenta, y en menos espacio. Los instrumentos avanzados requieren materiales avanzados y los más recientes materiales como las aleaciones a alta temperatura y los plásticos de fibra de carbono consumen ingentes cantidades de energía en su fabricación.

Lo más probable es que este proceder no pueda continuar por mucho más tiempo, ya que el sistema, considerado globalmente, depende por entero de fuentes de energía baratas y concentradas, como el petróleo.

Los organismos vivos pueden considerarse como un enorme sistema para la extracción de energía, pero no orientada hacia fuentes concentradas sino difusas para utilizar la energía con la máxima economía. Existen numerosos intentos tecnológicos para recoger la energía de las fuentes difusas, como el sol, el viento o el mar. Muchos de estos intentos están probablemente condenadas al fracaso a causa de la inversión de energía necesaria, por tener que utilizar sistemas de captación convencionales contruidos en acero u hormigón sin un retorno económico. Se necesita un enfoque bastante diferente del concepto global de «eficiencia». La naturaleza parece enfocar este problema en términos de su «inversión metabólica», y nosotros podemos hacer algo parecido.

No es sólo que los metales y el hormigón

precisen una gran cantidad de energía, por tonelada, para su fabricación (tabla 1), sino que además las estructuras con cargas ligeras o distribuidas, que son normalmente las requeridas por los sistemas de intensidad baja de energía, el peso de los dispositivos hechos con acero y hormigón es probablemente muy superior al que se tendría si se emplearan materiales más sensibles y civilizados.

Como podemos adivinar, la madera puede ser uno de estos materiales más eficientes en un sentido estrictamente estructural. En grandes luces y cargas ligeras, una estructura de madera resulta varias veces más ligera que una de acero u hormigón.

Una de las dificultades con las que se encontraban en el pasado respecto a la madera era que los árboles se tomaban demasiado tiempo para crecer y que el secado de la madera era lento y caro. Hoy esto ya no es un problema.

Probablemente el avance más importante en el campo de los materiales durante los últimos años haya sido el obtenido a través de la mejora genética que produce variedades de crecimiento rápido en maderas comerciales. Así, variedades del *Pinus radiata* (Weymouth pine) pueden, en condiciones favorables, incrementar su diámetro por encima de los 12 centímetros al año y apearse, como árbol maduro, en seis años. Existen, por tanto, buenas perspectivas para conseguir madera procedente de cosechas que crece en ciclos de tiempo breves. Prácticamente toda la energía necesaria para su crecimiento es aportada, gratuitamente, por el sol. Por otro lado, cuando la estructura de madera ha terminado su función, puede utilizarse como combustible recuperando la mayor parte de la energía que precisó para su crecimiento. Esto, desde luego, no ocurre con el acero o el hormigón.

La madera requería en el pasado procesos de secado en cámara largos y costosos, que consumían cantidades importantes de energía. Como resultado de investigaciones recientes, es posible hoy secar tablas de madera de coníferas en veinticuatro horas a un costo muy reducido. Estos avances suponen importantes desarrollos para la construcción y en relación con la situación energética mundial.

En el apéndice (al final del texto) se incluyen algunos análisis algebraicos sobre la eficiencia estructural de diferentes materiales para varias funciones y en términos de peso. El diseño de numerosas estructuras de alta tecnología, tales como las empleadas en los aviones, viene controlada por la relación E/d: es decir, por el «módulo de elasticidad específico» que gobierna el costo en peso de las limitaciones de las deformaciones (E = módulo de elasticidad; d = densidad).

Ocurre que, para la mayoría de los materiales tradicionales empleados en

Tabla 1: Energía aproximada necesaria para la fabricación de diversos materiales

Material	Energía necesaria para fabricar 1 Tn en Julios x 10 ⁹	Toneladas de petróleo equivalentes
Acero	60	1,5
Titanio	800	20
Aluminio	250	6
Vidrio	24	0,6
Ladrillo	6	0,15
Hormigón	4,0	0,1
Compuestos de fibra de carbono	4000	100
Madera (abeto)	1,0	0,025
Polietileno	45	1,1

NOTA. Estos valores son aproximados y sin duda discutibles; pero creo que se encuentran en un orden real. El valor dado para los compuestos de fibra de carbono es una estimación, pero esta estimación se basa en muchos años de experiencia en el desarrollo de fibras similares.

Tabla 2. Eficiencia de varios materiales para diversos usos.

Material	Módulo de elasticidad E MN/m ²	Densidad d g/cm ³	Eficiencia		
			E/d	E ^{0.5} /d	E ^{1/3} /d
Acero	210.000	7,8	25.000	190	7,5
Titanio	120.000	4,5	25.000	240	11,0
Aluminio	73.000	2,8	25.000	310	15,0
Magnesio	42.000	1,7	24.000	380	20,5
Vidrio	73.000	2,4	25.000	360	17,5
Ladrillo	21.000	3,0	7.000	150	9,0
Hormigón	15.000	2,5	6.000	160	10,0
Compuesto de fibra de carbono	200.000	2,0	100.000	700	29,0
Madera (abeto)	14.000	0,5	25.000	750	48,0

Tabla 3. Eficacia estructural de varios materiales en relación a la energía necesaria para su fabricación.

Energía necesaria para aportar una rigidez determinada en la estructura considerada globalmente (Caso I) / Energía necesaria para fabricar un panel con una determinada resistencia a compresión (Caso II).

Material	Caso I	Caso II
Acero	1	1
Titanio	13	9
Aluminio	4	2
Ladrillo	0,4	0,1
Hormigón	0,3	0,05
Madera	0,02	0,002
Compuesto de fibras de carbono	17	17

estructuras, molibdeno, acero, titanio, aluminio, magnesio y madera, el valor de E/d es prácticamente constante. Por este motivo, durante los últimos 15 ó 20 años, los gobiernos han gastado grandes sumas de dinero en el desarrollo de nuevos materiales basados en fibras exóticas como boro, carbono y carburo de silicio.

Este tipo de fibras pueden ser más o menos eficaces en la tecnología aeroespacial, pero lo que está claro es que no sólo son caros, sino que consumen grandes cantidades de energía para su fabricación. Por este motivo, su uso en el futuro será probablemente bastante limitado y, en mi opinión, no llegarán a constituirse en materiales populares.

El requisito para un control estricto y claro de las deformaciones queda, probablemente, reducido a uno sólo; sin embargo, como hemos visto anteriormente (en capítulos precedentes del mismo libro), la relación peso-coste-, y a menudo coste económico, de la resistencia ante cargas de compresión es normalmente muy elevado. La relación peso-coste de la resistencia de una carga de compresión en una columna viene condicionada, no por la relación E/d , sino por la de $E^{0.5}/d$. Y en el caso de un panel ésta viene condicionada por la relación $E^{1/3}/d$ (ver apéndice al final del texto). Estos requisitos se resumen en la tabla 2. Se puede comprobar la gran ventaja de los materiales de baja densidad. Así el acero queda en muy mal lugar comparado incluso con el ladrillo y el hormigón. Además, para muchas aplicaciones

ligeras, como los aviones o miembros artificiales, la madera es incluso mejor que los materiales de fibra de carbono, además de ser mucho más barata.

En la tabla 3 se resumen estas características espresadas en relación a su costo energético. Puede apreciarse, en dicha tabla, que la ventaja de los materiales tradicionales -madera, ladrillo y hormigón- es abrumadora. Uno se pregunta si la búsqueda de materiales basados en fibras exóticas está realmente justificada. Lo que resulta verdaderamente rentable para la mayoría de los propósitos de la vida no son las fibras de carbono, sino los agujeros. La naturaleza se dio cuenta de esto hace mucho tiempo cuando inventó la madera; y lo mismo hicieron los romanos cuando comenzaron a construir templos con recipientes de vino vacíos. Los agujeros son enormemente más baratos, tanto desde el punto de vista económico como energético, que cualquier material de alta rigidez que podamos concebir. Probablemente sería mejor gastar más tiempo y dinero en el desarrollo de materiales celulares o porosos y menos en fibras de boro o carbono».

Criterio energético para la comparación de los sistemas estructurales

Julius Natterer es el Director del Departamento de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne, Suiza

(EPFL). Este Departamento tiene tres secciones dedicadas, respectivamente, a la madera, al acero y al hormigón.

En la sección de madera trabajan cinco personas fijas de la Universidad más 12 personas de fuera a través de contratos con empresas.

Su actividad principal es la enseñanza en los campos de ingeniería civil, arquitectura e ingeniería rural. Además, se imparten cursos de postgrado con una duración de dos años (un año de estudio y otro de trabajo dirigido). En muchos casos los estudiantes de postgrado vienen de fuera del país.

Por último su actividad investigadora se dirige a los campos siguientes:

- Propiedades mecánicas de la madera para uso estructural.

- Métodos de ensayo no destructivos (son conocidos en este campo los trabajos de investigación y desarrollo de la técnica de ultrasonidos realizados por el Dr. Jean Luc Sandoz).

- Conectores.

- Sistemas estructurales mixtos. Recientemente han puesto en práctica un sistema de forjados mixtos de viguetas de madera y capa de compresión de hormigón en edificación de viviendas colectiva que parece bastante prometedor.

- Desarrollo de programas informáticos y sistemas expertos para el diseño de estructuras de madera.

- Peritajes en estructuras antiguas de

78 Estructuras

madera.

Dentro de la línea de trabajo que se apoya en las ventajas energéticas de la madera frente al resto de materiales, el profesor Natterer ha escrito un trabajo titulado «Energy criteria for timber structures» (aún no publicado). La figura 1, extraída del trabajo citado, resume, de forma gráfica, la energía consumida y la emisión de dióxido de carbono durante la fabricación de una viga biapoyada.

Se comparan cuatro materiales estructurales: aluminio, hormigón armado, acero y madera aserrada para el caso de una viga biapoyada de 7,5 m de luz, sometida a una carga permanente de 75 kg/m y a una sobrecarga de 300kg/m. El canto de la viga se limita en todos los materiales a un máximo de 300 mm, para que la pérdida de volumen habitable sea la misma en todos los casos.

En estas condiciones, el perfil de aluminio resulta el más ligero (5 kg/m) mientras que la viga de hormigón armado es la más pesada (216 kg/m). La madera alcanza un peso de 29 kg/m, superior al acero con 15 kg/m. Generalmente, al comparar la madera con el acero, el resultado es más ligero en el caso de la madera; en esta comparación el resultado es al contrario, debido a que el canto de la viga es el mismo para ambos materiales y está más en consonancia con los requerimientos del acero.

Finalmente, se observa en la gráfica que la solución en madera tiene un consumo energético y una emisión de dióxido de carbono 12 veces menor que la solución de acero, 15 veces menor que el hormigón y 52 veces menor que el aluminio.

Sin embargo, aun se puede seguir profundizando en la comparación, si se considera que para reponer la madera consumida en la fabricación de la viga es preciso el crecimiento de la misma cantidad de madera en el árbol; este proceso de crecimiento implica una transformación del dióxido de carbono de la atmósfera en madera, que arroja un balance positivo frente a los restantes materiales.

APÉNDICE

EFICACIA DE COLUMNAS Y PANELES SOMETIDOS A COMPRESIÓN

En una columna cuya esbeltez sea tal que el fallo se produzca por pandeo, la carga crítica o de Euler viene dada por la siguiente expresión:

$$P = \delta^2 EI / l^2$$

Siendo E, el módulo de elasticidad; I, el momento de inercia y l la longitud.

Suponiendo que la sección transversal de la pieza puede variar manteniéndose proporcional a una dimensión, t, puede escribirse:

$$I = A i^2 = k_1 t^4$$

siendo A, el área de la sección transversal; i, el radio de giro y k_1 una constante.

Si existen n columnas iguales, la carga total resistida es:

$$P = n \delta^2 EI / l^2$$

y por tanto

$$I = P l^2 / (\delta^2 n E) ; t^2 = k_2 P l^2 / (\delta^2 n E)^{0.5} \text{ siendo } k_2, \text{ constante}$$

El peso de estas n columnas será, W:

$$W = k_3 n t^2 l d = k_3 n l d P l^2 / (\delta^2 n E)^{0.5}$$

donde K_3 es una constante y d la densidad del material.

Luego $W = k_3 n^{0.5} l^2 d (P/E)^{0.5}$

Así, la eficacia de la estructura es: $\text{eficacia} = P/W = K_4 (1/n^{0.5}) (E^{0.5}/d) (P^{0.5}/l^2)$

El parámetro $(P^{0.5}/l^2)$ se denomina «coeficiente de carga» y depende únicamente de las dimensiones y carga de la estructura. El parámetro $(E^{0.5}/d)$ se denomina «eficacia del material» y depende sólo de las propiedades físicas y mecánicas del material.

Los argumentos anteriores se aplican a columnas cuyo espesor puede variar en dos dimensiones. En el caso de un panel la variación sólo puede darse en una dimensión.

Tomando el momento de inercia del panel por unidad de ancho, $I = k_1 t^3$, para n paneles:

$$I = P l^2 / (\delta^2 n E)$$

de donde

$$t^3 = k_2 P l^2 / (\delta^2 n E)$$

$$W = k_3 n t d l = k_3 n d l P l^2 / (\delta^2 n E)^{1/3}$$

$$W = k_3 \delta^{2/3} (d/E^{1/3})^{1/3} P^{1/3}$$

Y la eficacia: $\text{eficacia} = P/W = k_4 1/\delta^{2/3} (E^{1/3}/d)^{1/3} (P^{2/3}/l^{5/3})$.

Denominando a $(P^{2/3}/l^{5/3})$, «coeficiente de carga» y a $(E^{1/3}/d)$; «eficacia del material».