

SUJECCIÓN DE LA CARGA CON MADERA

Dimensionamiento de vigas de madera: vigas a compresión y a flexión

En el artículo “Cálculo de vigas longitudinales de madera para soporte de cargas concentradas en contenedores estándar” se definía el número, longitud y sección de las vigas longitudinales de madera que debían ser colocadas debajo de las cargas concentradas.

Este nuevo artículo pretende dar una orientación sobre el contenido del Código CTU en relación con los cálculos de sujeción en madera.

El CTU facilita los siguientes valores aplicables de resistencia de la madera:

	Resistencia a la compresión perpendicular a la veta	Resistencia a la compresión paralela a la veta	Resistencia a la flexión
Calidad baja	0,3 kN/cm ²	2,0 kN/cm ²	2,4 kN/cm ²
Calidad media	0,5 kN/cm ²	2,0 kN/cm ²	3,0 kN/cm ²

En la figura 1 se define la diferencia entre la compresión paralela y perpendicular a la veta de la madera (si pensamos en el tronco de un árbol y una de nuestras manos es el cielo y la otra la tierra, al apretarlas haríamos una compresión paralela a la veta, que es la que ofrece mayor resistencia).

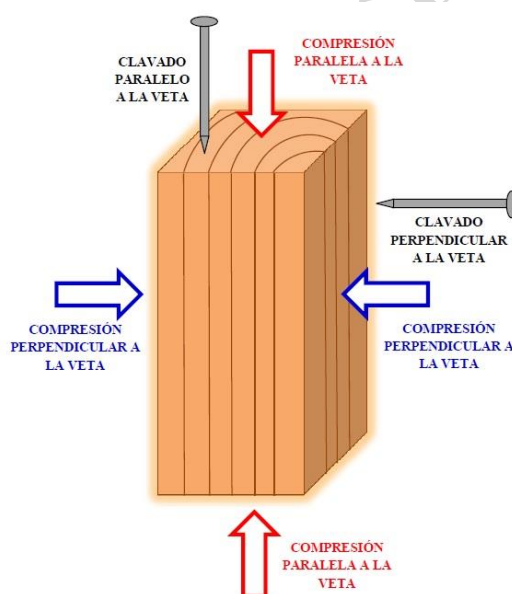


Figura 1. Compresión paralela y perpendicular a la veta.

Cálculo de vigas a compresión

El CTU simplemente indica el valor de resistencia de la madera, pero no facilita ningún cálculo. En este apartado intentaremos dar unas orientaciones al respecto.

En el cálculo de vigas de madera trabajando como puntal a compresión paralela a la veta (por ejemplo, las señaladas con un punto rojo en la figura 2), la fuerza de bloqueo se obtiene multiplicando la resistencia de compresión paralela ($\sigma = 2 \text{ kN/cm}^2$) por la sección (S) en cm².

Por ejemplo, un puntal de $S = 10 \text{ cm} \cdot 10 \text{ cm} = 100 \text{ cm}^2$ sería capaz de bloquear una fuerza F tal que,

$$F = \sigma \cdot S = 2 \text{ kN/cm}^2 \cdot 100 \text{ cm}^2 = 200 \text{ kN} = 200.000 \text{ N} = 20.000 \text{ daN (equivale a 20.000 kg fuerza)}.$$

Ahora bien, dependiendo de la longitud de ese puntal, la viga podría llegar a romper por pandeo. Si una viga es muy larga, al comprimirla puede comenzar a flexionar y llegar a romper por flexión, tal como se representa en la figura 3.



Figura 2. Sujeción con madera.

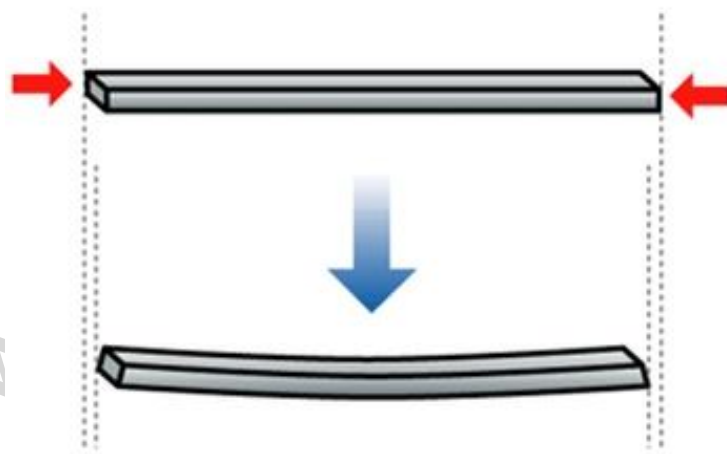


Figura 3. Pandeo por compresión.

Si se considera una viga de sección $w \times h$ donde “w” es el lado más corto y “h” el más largo de la sección, la fuerza crítica en kN a la que llegaría a romper esa viga por pandeo sería,

$$F_{\text{crítica pandeo}} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\text{mín}}}{L^2}$$

Donde E es el módulo de Young de la madera en kN/cm^2 , $I_{\text{mín}} = \frac{1}{12} \cdot h \cdot w^3$ el momento de inercia mínimo de la sección en cm^4 y L la longitud en cm.

La madera de estiba normalmente suele ser de coníferas (pino, abeto, etc.). En este tipo de madera, el módulo E puede variar entre 700 y 1.200 kN/cm² en función de la especie y calidad. Para llegar a una fórmula general siempre hay que partir de un supuesto y en este artículo se considerará un E de valor medio 950 kN/cm². De este modo, se obtendría la fórmula general.

$$F_{\text{crítica pandeo}} = \frac{781 \cdot h \cdot w^3}{L^2}$$

Para la misma sección de 10×10 cm la $F_{\text{crítica pandeo}}$ sería,

781 kN si L=100 cm

195 kN si L=200 cm

Dadas las dimensiones de los contenedores y teniendo en cuenta que se apuntala contra sus paredes, es difícil hacer apuntalamientos de más de 2 metros de longitud, con lo cual, en general podrá obviarse el problema del pandeo trabajando con secciones a partir de 10×10 cm. Si se trabaja con secciones menores, debe tenerse en cuenta el pandeo (en el Excel de ayuda hay una solapa que nos permite determinar si hay riesgo de pandeo).

Cálculo de vigas a flexión

El CTU indica como calcular las vigas que trabajan a flexión en el Apéndice 4 del Anexo 7. Para ello establece una fórmula general partiendo del supuesto de vigas apoyadas con carga repartida uniformemente en la longitud entre apoyos. La fórmula¹ a aplicar es la siguiente.

$$F_{\text{bloqueo}} = n \cdot \frac{h \cdot w^2}{28 \cdot L}$$

Donde la F_{bloqueo} se obtiene en kN introduciendo “n” como número de vigas, “L” como longitud entre apoyos de las vigas en metros y “h” y “w” en centímetros.

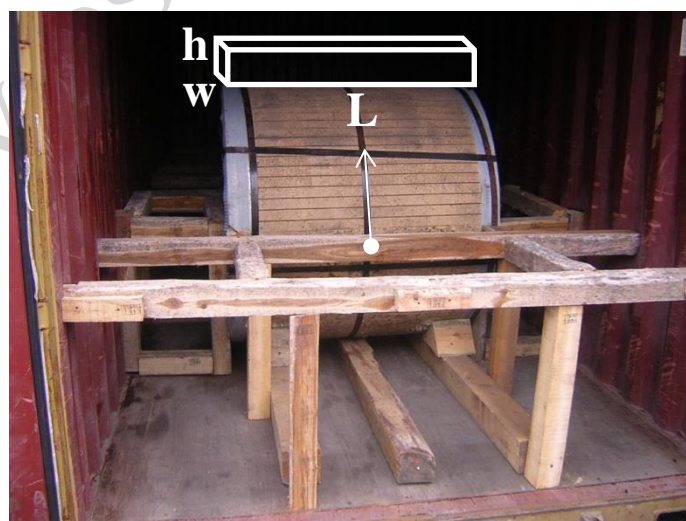


Figura 4. Vigas trabajando a flexión.

¹ El CTU no refleja los cálculos de obtención de la fórmula. El autor de este artículo ha comprobado que los cálculos son correctos bajo el supuesto de vigas apoyadas y carga uniformemente repartida. No obstante y en la práctica, no siempre se dará este supuesto de carga, con lo que la fórmula es una generalización que no recoge toda la casuística posible.

En la figura 3 se indican con un punto azul ejemplos de vigas trabajando a flexión y en la 4 se representan los parámetros de una de ellas (sección y longitud entre apoyos).

Soporte y unión de los puntales de compresión y vigas de bloqueo a flexión

Para que esos puntales que trabajan a compresión y esas vigas que trabajan a flexión se sostengan adecuadamente, son necesarias vigas de soporte o unión. Esas vigas de soporte o unión, que se representan como puntos verdes en la figura 2, son riostras, patas o bancos de apoyo que se unen con un clavado directo o elementos auxiliares de clavado como cuñas o escuadras metálicas o de madera.

El clavado más efectivo es el perpendicular a la veta (ver figura 1) y para que sea lo suficientemente robusto, los clavos deben penetrar al menos 4 cm en cada uno de los elementos a unir (obviamente, cuando las vigas a unir tienen secciones superiores a 4×4 cm).

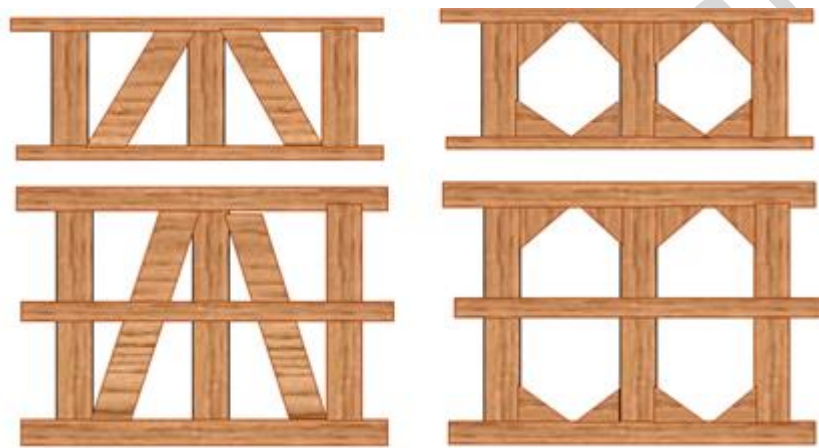


Figura 5. Unión de vigas de madera

En la figura 5 se representan diferentes uniones con riostras diagonales (izquierda) y escuadras (derecha). Lo importante de estas uniones es que en un movimiento de la carga sean lo suficientemente robustas para mantener las vigas principales trabajando a compresión o flexión según corresponda.

Archivo de Excel como soporte del cálculo

En el archivo adjunto se contempla un transporte intermodal en los 2 modos de transporte con mayores coeficientes de aceleración: carretera y mar zona C. Si se quiere hacer un cálculo para transporte unimodal por carretera o mar zona C, simplemente deben dejarse a valor “0” los coeficientes del modo excluido.

En el Excel, por comodidad, se usan vigas de sección $w \times h$ para todo (bloqueo por flexión, puntales y apoyos). La fuerza de bloqueo viene condicionada por la resistencia de las vigas de flexión, ya que los puntales van sobredimensionados a compresión.

También se incluye en el Excel un factor que no contempla el CTU, la resistencia de las paredes del contenedor. La longitud de las vigas de flexión sobre pared, que se define como L' en el Excel, debe estar acorde con la resistencia de la pared.

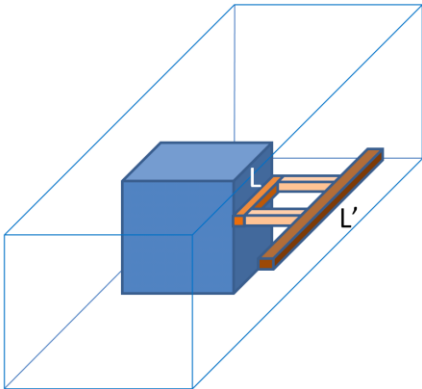
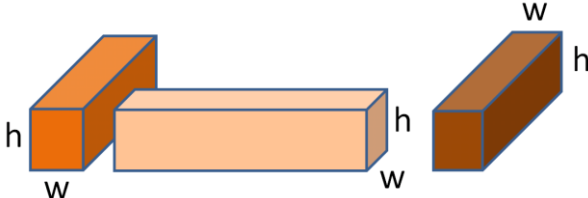
El Excel incluye además la posibilidad de trabajar con 2 puntales de apoyo o con 3 puntales de apoyo (que equivaldrían a 2 vigas a flexión con reparto uniforme de carga).

Ejemplo de cálculo:

Considérese que la bobina de la figura 4 pesa 17,5 toneladas, que su anchura y diámetro son 150 cm y que las vigas de la imagen son de 14×14 cm.

Datos						$F_{\text{bloqueo}} = n \cdot \frac{h \cdot w^2}{28 \cdot L} \text{ (kN) con 2 puntales}$					
h (cm)	w (cm)	L (m)	m (t)	n (nº vigas trans.)	n' (nº vigas puntal)	$F_{\text{bloqueo}} \text{ (kN)}$	$F_{\text{bloqueo necesario}} \text{ (kN)}$	"1" correcto / "0" insuficiente	$L' \text{ (m)}$		
10	11	1,50	7,50	1	2	28,81	25,75	1,00	1,50		
11	12	1,50	10,00	1	2	37,71	34,34	1,00	1,50		
12	13	1,50	12,50	1	2	48,29	42,92	1,00	1,52		
12	14	1,50	15,00	1	2	56,00	51,50	1,00	1,82		
14	14	1,50	17,50	1	2	65,33	60,09	1,00	2,13		
13	15	1,50	20,00	1	2	69,64	68,67	1,00	2,43		
15	15	1,50	22,50	1	2	80,36	77,25	1,00	2,74		
15	16	1,50	25,00	1	2	91,43	85,84	1,00	3,04		
16	16	1,50	27,50	1	2	97,52	94,42	1,00	3,35		

Longitud interior contenedor (m)	5,86	c_1	0,8	Mar C
Payload (t)	28,10	c_2	1,0	
Resistencia pared completa (kN)	165,40	c_3	0,5	Carretera
Coefficiente de rozamiento	0,45	c_4	1,0	

En el Excel se observa que vigas de 14×14 cm de sección serían suficientes para el bloqueo transversal. Del mismo modo, podría comprobarse que serían válidas para el bloqueo longitudinal.

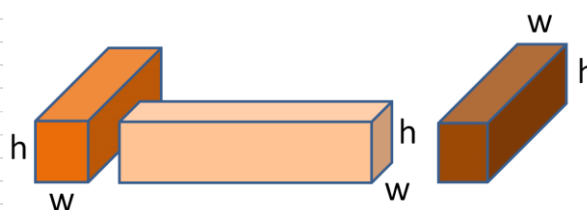
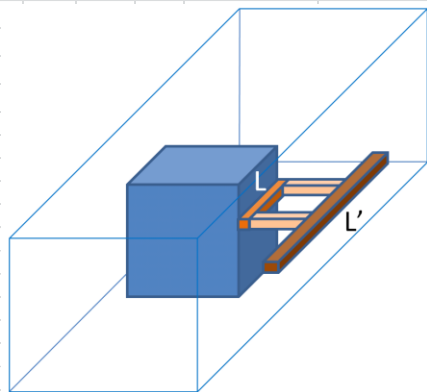
También se observa que la viga a flexión sobre la pared es ligeramente corta, ya que el diámetro (y por tanto L en la fórmula) son 150 cm y la longitud de apoyo necesaria en pared serían 213 cm.

Ahora bien, esa bobina viene forrada de madera, de modo que el apoyo de la misma sobre las vigas de soporte de cargas concentradas es madera-madera con coeficiente de rozamiento 0,45.

Supongamos ahora que es una bobina desnuda y por tanto el apoyo es acero sobre madera, entonces el coeficiente de rozamiento sería 0,30.

En ese caso, la sección necesaria sería de 15×16 cm y la longitud de apoyo sobre pared debería ser $L'=304$ cm, con lo que en ese caso la figura 4 no se correspondería con las necesidades reales de sujeción.

						$F_{\text{bloqueo}} = n \cdot \frac{h \cdot w^2}{28 \cdot L} \text{ (kN) con 2 puntales}$					
		Datos									
h (cm)	w (cm)	L (m)	m (t)	n (nº vigas trans.)	n' (nº vigas puntal)	F bloqueo (kN)	F bloqueo necesario (kN)	"1" correcto / "0" insuficiente		L' (m)	
10	11	1,50	7,50	1	2	28,81	36,79	0,00		1,50	
11	12	1,50	10,00	1	2	37,71	49,05	0,00		1,74	
12	13	1,50	12,50	1	2	48,29	61,31	0,00		2,17	
12	14	1,50	15,00	1	2	56,00	73,58	0,00		2,61	
15	16	1,50	17,50	1	2	91,43	85,84	1,00		3,04	
13	15	1,50	20,00	1	2	69,64	98,10	0,00		3,48	
15	15	1,50	22,50	1	2	80,36	110,36	0,00		3,91	
15	16	1,50	25,00	1	2	91,43	122,63	0,00		4,34	
16	16	1,50	27,50	1	2	97,52	134,89	0,00		4,78	
						Longitud interior contenedor (m)	5,86	c_f	0,8	Mar C	
						Payload (t)	28,10	c_p	1,0		
						Resistencia pared completa (kN)	165,40	c_r	0,5	Carretera	
						Coefficiente de rozamiento	0,3	c_z	1,0		



Cuando escribí el libro “*Estiba y trincaje de mercancías en contenedor*”, me centré más en la sujeción por amarre, mi método favorito de trincaje por su velocidad de ejecución y precisión en los cálculos². Con estos artículos he querido llenar un poco el vacío que existe en los cálculos con madera, imprescindible en determinados casos para una correcta sujeción de la carga.

Nota del autor:

Este artículo pretende únicamente servir de apoyo en el cálculo de sujeción con madera para las empresas cargadoras que diariamente se enfrentan con la necesidad de realizar estos cálculos y no cuentan con la ayuda de los fabricantes de contenedores ni de las líneas marítimas.

Los cálculos se basan en las fórmulas contenidas en el CTU y en algunas propuestas por el autor del artículo.

Ni el autor ni el iSEC se responsabilizan del uso del método, ya que pueden existir requerimientos específicos solicitados por los distintos operadores de transporte de contenedores en sus diferentes modos y países de tránsito. El método es una guía técnica y no un requerimiento legal.

² Una cadena de amarre o una cinta tejida de poliéster cuentan con cargas de rotura y trabajo certificadas por los fabricantes, de modo que el cálculo es fiable y preciso. La madera de estiba es un material heterogéneo y anisótropo cuyas propiedades varían según la dirección de aplicación de los esfuerzos, las especies, el contenido de humedad, etc. Esto dificulta la precisión en el cálculo y deja abiertas varias interpretaciones, en un informe pericial por ejemplo, de modo que es difícil objetivar un único resultado.