

Diseño y propiedades termo-acústicas de paneles prefabricados de fachada para edificios industriales

Design aspects and thermo-acoustic performance of precast concrete façades for industrial buildings

■■■■
Alfonso Barba-Pérez¹, Paula Villanueva-Llauradó¹, Jaime Fernández-Gómez¹ y Gregorio López-de-la-Osa²
Universidad Politécnica de Madrid. ETSICCP¹ y ETSEM² (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8486>

El hormigón prefabricado permite dotar a los elementos constructivos de elevadas prestaciones mecánicas al introducir el control de calidad y precisión propios de la fabricación industrial [1-6]. Algunos aspectos particulares de la prefabricación, y concretamente de paneles, pueden encontrarse en el material suplementario.

A diferencia de los elementos estructurales, donde las exigencias del proceso de fabricación son las más limitantes, en los cerramientos con paneles prefabricados el diseño está determinado por demandas arquitectónicas y por la física del edificio; entre dichas demandas se incluyen necesidades de modulación, aspecto, mantenimiento y limpieza, así como los requisitos de comportamiento frente a fuego y propiedades térmicas y acústicas.

Los espesores clásicos de los paneles fabricados en molde son 12, 16, 20 y 24 cm; pueden ser macizos o con aislamiento integrado, y se fabrican con dimensiones apropiadas para colocación horizontal o vertical con sujeciones de apoyo o cuelgue. El espesor condiciona (por criterios mecánicos) las dimensiones máximas de los paneles.

Recientemente se ha señalado la idoneidad de estos paneles para usos terciarios, en los que la máxima tasa de actividad interna suele coincidir en el tiempo con la máxima temperatura exterior, con vistas a un aprovechamiento de la inercia térmica aportada por el hormigón; esto, combinado con aislamientos térmicos por el exterior o en núcleos entre dos paredes de hormigón, permite reducir las necesidades de refrigeración en este tipo de edificios [4].

1. PRINCIPIOS DE DIMENSIONADO DE PANELES DE FACHADA

Los cerramientos de paneles prefabricados pueden ser de carga, actuar como muros diafragma o ser simplemente autoportantes, siendo este último tipo el más habitual en edificios industriales. Se consideran tres aspectos fundamentales a efectos de las propiedades mecánicas exigibles: la fase de fabricación (especialmente el desmoldado), el izado y colocación y el estado límite de servicio [5].

Las propiedades mecánicas de los paneles se ven afectadas por la presencia de aligeramientos, por lo que es importante conocer los criterios de dimensionado para poder realizar mejoras térmicas y acústicas sin reducir excesivamente la resistencia.

Con respecto a la fabricación, la situación más crítica es el desmoldado, momento en el que la resistencia es inferior a la de condiciones de servicio y en el que actúa la adhesión al molde, lo que suele obligar a realizar los cálculos para que el panel soporte 1.5 a 2 veces su peso propio. El izado y colocación pueden obligar a incrementar el espesor para soportar las cargas de flexión, en función del procedimiento utilizado, siendo común utilizar un coeficiente de mayoración de 1.25; puede aplicarse adicionalmente un pretensado parcial para evitar la fisuración durante la manipulación [5].

Con respecto al estado límite de servicio, debe limitarse la fisuración para mantener la apariencia estética, evitar la entrada de agentes agresivos y preservar las propiedades de salubridad, aislamiento térmico y acústico. Los espesores más habituales de paneles prefabricados se encuentran en el material suplementario.

2. RESISTENCIA A FUEGO Y PROPIEDADES TERMOACÚSTICAS

El marco regulador para la edificación en España es el Código Técnico de la Edifi-

cación (CTE), para los requisitos térmicos, acústicos y propiedades frente a fuego [7, 8, 10]. Sin embargo, en el caso de los edificios industriales puede ser preciso recurrir a normativa específica, en función de si el edificio tiene uso exclusivamente industrial (talleres, almacenes, naves para procesos industriales) o de si incluye oficinas y recintos que puedan ser considerados como habitables.

2.1. COMPORTAMIENTO EN CASO DE INCENDIO

La respuesta en caso de incendios ha sido tradicionalmente uno de los aspectos más restrictivos para los paneles prefabricados para edificios industriales, ya que el propio uso incrementa el riesgo de incendio. El Código Técnico de la Edificación, en el Documento Básico de Seguridad en Caso de Incendio [8] remite al Reglamento de seguridad contra el fuego en los establecimientos industriales (RD 2267/2004 [9]). El reglamento indica la integridad al paso de llamas y gases calientes (E), el aislamiento térmico (I) y, para elementos portantes, la capacidad portante (R), que deben cumplir los distintos elementos constructivos. Las fachadas solo tienen requerimientos de resistencia al fuego en el caso de paneles adyacentes a medianeras o límites entre establecimientos o sectores de incendios; en este caso, los paneles de fachada deben tener al menos la mitad de resistencia exigida a la propia medianera o separación de sectores en una franja de 1 a 2 m según el ángulo de acometida. En la Tabla 1 se incluyen los valores que serían exigibles a fachadas en este supuesto.

Por su parte, el boletín 74 de la fib [5] recomienda espesores mínimos de cerramientos y particiones para garantizar una resistencia a fuego suficiente; 80 mm para EI 60, 100 mm para EI 90, 120 mm para EI 120, 150 mm para EI 180 y 175 mm para EI 240. Cabe reseñar que las empresas de prefabricado suelen realizar ensayos específicos en laboratorios especializados para garantizar y certificar la EI de sus paneles.

	Sin función portante
Riesgo bajo	EI 60
Riesgo medio	EI 90
Riesgo alto	EI 120

Tabla 1: Resistencia mínima a fuego de fachadas acometidas por medianeras o muros colindantes

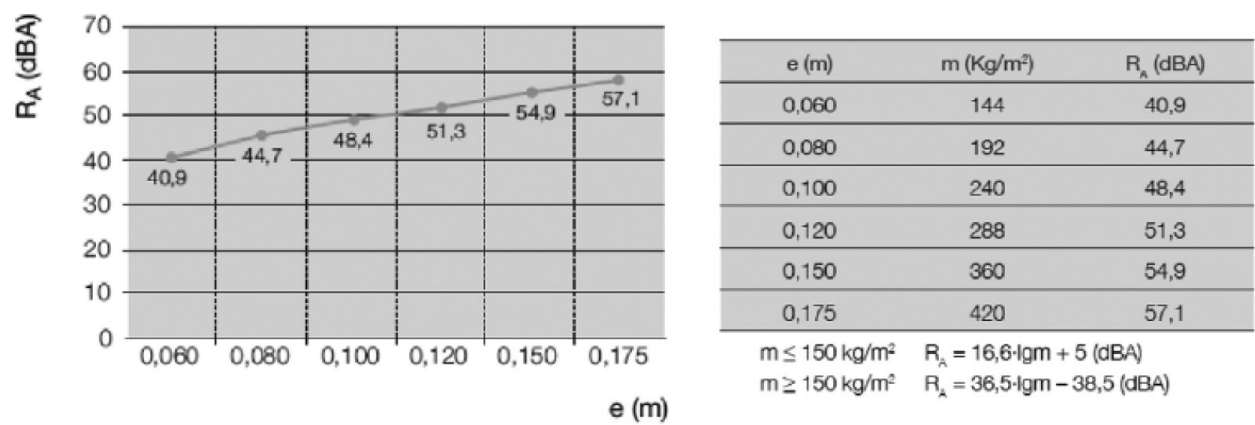


Fig. 1: Propiedades acústicas de paneles macizos. Figura por cortesía de Prehorkuisa

2.2. PROPIEDADES ACÚSTICAS

Las propiedades acústicas tienen dos aspectos principales: la transmisión de ruido al exterior y el aislamiento frente a la entrada de ruido. El CTE, en el Documento Básico de Protección contra el ruido [10] plantea que los edificios de uso industrial son recintos ruidosos y es más restrictivo con respecto a la transmisión del ruido generado al exterior y contaminación acústica. Debe precisarse, no obstante, que esto debería ser función de las posibles compartimentaciones y usos incluidos en un mismo edificio. Con respecto a las limitaciones de emisión de ruido al exterior, en función del área acústica, los recintos ruidosos quedan definidos como aquellos en los que hay una presión sonora estandarizada superior a 80 dBA; la Ley del Ruido (RD 1367/1007, [11]); para áreas con predominio de suelo industrial, la limitación es: índice de ruido día $L_d=75$ dBA e índice de ruido noche $L_n= 65$ dBA. Por tanto, la exigencia dependerá del ruido generado y del aislamiento acústico de los cerramientos para garantizar que la emisión no supera los índices de L_d y L_n normativos. El aislamiento acústico de los paneles de hormigón prefabricado está determinado principalmente por su masa, siendo mejor el comportamiento en paneles macizos que en aligerados. La Figura 1 muestra el creciente índice global de reducción acústica con el espesor en paneles macizos, para una densidad del hormigón de 2400 kg/m^3 .

2.3. PROPIEDADES TÉRMICAS

Las limitaciones de transmitancia térmica no se consideraban tradicionalmente en el diseño de los cerramientos de fachada, puesto que un importante número de edificios industriales no se consideran espacios acondicionados; sin embargo, dichas propiedades son cada vez más valoradas en el sector pudiendo un mismo

edificio albergar distintos usos (oficinas junto con almacenes o talleres) y para lograr mayor versatilidad.

El CTE DB-HE [7] excluye del obligado cumplimiento las zonas de talleres y procesos industriales de edificios industriales; sin embargo, las oficinas de estos mismos edificios se consideran espacios habitables, y deben cumplir con las exigencias correspondientes en función de la zona climática, del volumen total y del número de renovaciones de aire por hora requeridas.

Dada la amplia gama de posibilidades de trasdosados, en este trabajo se presentan únicamente las transmitancias térmicas correspondientes a los paneles, sin trasdosar. Debe tenerse en cuenta que, según el CTE DB-HE [7], la resistencia térmica total es la suma de las resistencias térmicas de los distintos elementos que constituyen un cerramiento, definiéndose la transmitancia térmica global (U) como la inversa del sumatorio de resistencias térmicas.

El cálculo de las propiedades térmicas de los paneles prefabricados se realiza, como el de cualquier cerramiento de fachada, evaluando la conductividad térmica y el espesor de cada capa que lo compone. El procedimiento está descrito en el CTE DB-HE [7] en el documento de apoyo DA-HE/1 de Cálculo de parámetros característicos de la envolvente, en su apartado 3: "Resistencia térmica total de un elemento de edificación constituido por capas homogéneas y heterogéneas". Se define la resistencia térmica total R_T [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$] de un elemento constituido por capas térmicamente homogéneas y heterogéneas paralelas a la superficie como la media aritmética de los valores límite superior e inferior de la resistencia, siendo R'_T el límite superior de la resistencia térmica y R''_T el límite inferior. Para grandes diferencias de transmitancia térmica

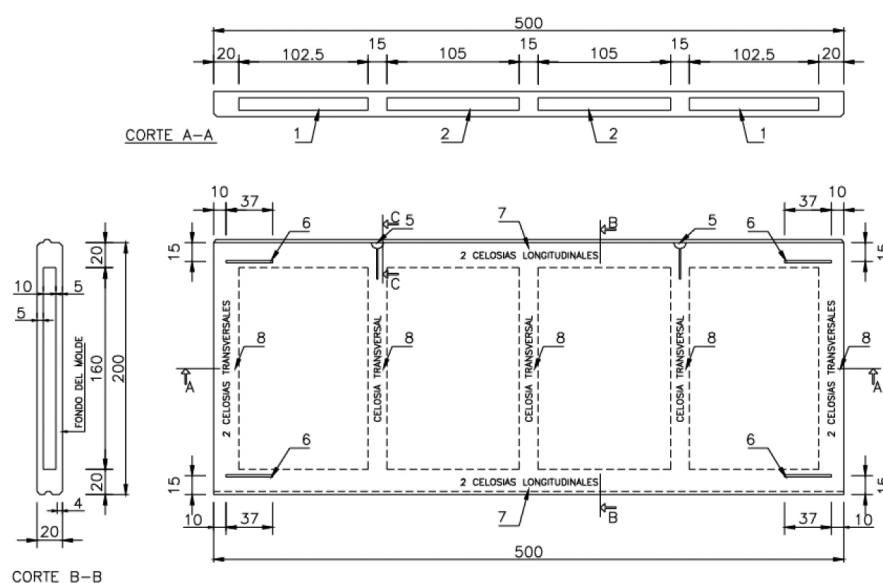
entre la resistencia de las zonas macizas y zonas aligeradas con aislamiento, es preciso tratar estos puntos como puentes térmicos y calcularlos con el DA-HE/3 "Puentes térmicos". Con esto se obtiene la resistencia térmica total.

Los paneles pueden ser macizos, aligerados (o aislados) o especiales. Los paneles macizos están constituidos por una única capa de hormigón, y su conductividad térmica es bastante elevada. Un valor habitual de conductividad térmica (λ) para hormigón de 2400 kg/m^3 es de $1.63 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [6].

Los paneles aligerados, generalmente conocidos como paneles sándwich, constan de una capa interior y una exterior de hormigón, y de un núcleo aislante. Pueden disponerse distintos aislantes en el núcleo, lo que afecta al comportamiento global del panel; los más utilizados son poliestireno expandido (EPS), poliestireno extruido (XPS), espuma rígida de poliuretano (PUR) y espuma rígida de poliisocianurato (PIR). En el material adicional se recoge información de estos aislantes.

En los paneles sándwich debe considerarse que la resistencia térmica total depende de los espesores de cada capa, del material aislante y del número y espesor de los nervios perimetrales e interiores del panel. En la Figura 2 se muestra la constitución de estos paneles.

Los nervios reducen la eficacia del aislante a nivel global, y han motivado la aparición de los denominados paneles "sin puente térmico" en los que los nervios se eliminan para pasar el aislante continuo, y la conexión entre capas se realiza mediante conectores. Debe señalarse, pese al nombre que reciben en el sector, que estos paneles no eliminan por completo los puentes térmicos, sino que presentan una rotura de puente térmico que debe tratarse como tal en los cálculos. En cualquier caso, la resistencia térmica de los paneles



que solo se ha prestado atención recientemente. Mientras que el valor límite de transmitancia de cerramientos de fachada para una zona climática D3 según el CTE DB-HE [7] son de $U = 0.66 \text{ W/m}^2\text{K}$, la resistencia térmica media aportada por los paneles más utilizados, los tipo sándwich de espesor 20 cm y EPS de 10 kg/m^3 , es de $U = 1.52 \text{ W/m}^2\text{K}$; esto es indicativo de que la mayoría de cerramientos usados en edificios industriales, si pasaran a un uso que requiriese cálculo como locales calefactados, tendrían solo un 43% de la resistencia térmica requerida.

Para un índice de ruido día $L_d = 75 \text{ dBA}$, el valor del aislamiento acústico a ruido aéreo para un edificio de uso administrativo de acuerdo al CTE DB-HR [10] sería de 42 dBA, con lo que todos los paneles de la tabla 2 cumplirían con los requisitos acústicos. Los valores correspondientes a EI son adecuados para el requisito de resistencia al fuego en medianeras.

4. OPTIMIZACIÓN DE PROPIEDADES Y RECOMENDACIONES DE DISEÑO

Actualmente, cuando se presenta el objetivo de mejorar el rendimiento térmico de los paneles de fachada, suele recurrirse a sistemas "sin puente térmico". Como se ha señalado, estos paneles presentan un deterioro de la resistencia mecánica. De cara a la optimización, cabe

señalar dos posibles alternativas: mantener los nervios de los paneles sándwich reduciendo su número y espesor, o utilizar núcleos más aislantes. En la actualidad, el mercado de los paneles prefabricados para fachadas en edificios industriales emplea generalmente EPS de baja densidad, pudiendo obtenerse mejores resultados con EPS de mayor densidad, XPS, PUR o PIR. Con XPS se consiguen, además, mejores prestaciones mecánicas [12], pudiendo llegar su resistencia a compresión hasta los 700 kPa frente a los 250 kPa del EPS. En el sector de la edificación industrial, la limitación más habitual para la elección del aislamiento térmico es el coste.

La Tabla 3 presenta valores típicos de los paneles de fachada prefabricados disponibles en el mercado (extraídos de documentación técnica de diversas empresas del sector), y unos valores optimizados (paneles optimizados, OPT) correspondientes al empleo de: un aislamiento térmico de mayores prestaciones (aislante mejorado, AM) tomando como referencia el EPS de $\lambda = 0.031 \text{ W/mK}$, un modelo alternativo de nervios reducidos (NR), y uno conjugando ambas vías de optimización (NR-AM). En el primer caso no se ven reducidas las condiciones mecánicas, por lo que se mantienen las longitudes máximas para cada espesor; en el segundo y tercer caso, la reducción parcial de macizados intermedios lleva a una limitación de las

longitudes máximas para no comprometer las condiciones mecánicas. Los valores optimizados se han calculado conforme al CTE DB-HE1 [7], incluyendo los puentes térmicos (DA DB-HE/3), con ayuda del programa de elementos finitos THERM (v.7.5.13.0) para la evaluación de los flujos de calor. Se han realizado los cálculos para paneles de $10 \times 2.4 \text{ m}$, de espesor total 20 cm con una capa aislante de 10 cm y de espesor total 24 cm con capa aislante de 14 cm; en el caso de los nervios reducidos se han considerado dos nervios interiores y un marco perimetral macizo.

En función de los resultados de la Tabla 3, puede concluirse que la elección de los paneles está determinada por diversos factores:

- a) La modulación de la fachada, que a su vez limitará las longitudes máximas para la máxima homogeneidad.
- b) El aislamiento término requerido (por la normativa o por los clientes).
- c) La transmisión acústica, que a su vez depende del uso del edificio, del entorno y de la proximidad de recintos de actividades.
- d) La resistencia al fuego. A tener en cuenta las soluciones de fachada junto a medianeras o sectorización de incendios.
- e) El presupuesto, que suele determinar la elección del tipo de panel.

Tipo	Masa (kN/m²)	L máx (m)	Tipo de aislante (densidad en kg/m³)	e de aislante (mm)	U (W/m²K)	Ra (dB)	EI (min)
12M	3.0	7.5	-	-	3.60	49	120
12A	2.6	7.0	EPS (10)	40	2.20	47	<90
16M	4.0	9.5	-	-	3.50	54	180
16A	3.3	9.0	EPS (10)	60	1.60	49	120
20M	5.0	12.0	-	-	3.20	57	240
20A	3.5	11.5	EPS (10)	100	1.54	53	120
20SPT	3.1	10.0	EPS (10)	60+30/80+20	0.70	49	90
20OPT(AM)	3.7	11.5	EPS (30)	100	1.41	54	120
20OPT(NR)	3.2	10.0	EPS (10)	100	1.04	49	120
20 OPT(NR-AM)	3.4	10.0	EPS (30)	100	0.94	52	120
24M	6.0	14.0	-	-	2.70	59	240
24A	4.0	13.0	EPS (10)	140	1.33	53	120
24SPT	3.6	12.0	EPS (10)	100+40/110+30	0.64	49	120
24OPT(AM)	4.2	13.0	EPS (30)	140	1.24	52	120
24OPT(NR)	3.7	10.0	EPS (10)	140	0.89	49	120
24 OPT(NR-AM)	3.9	10.0	EPS (30)	140	0.81	51	120
M: panel macizo; A: panel aligerado; SPT: sin puente térmico; OPT: optimizado; AM: aislante mejorado; NR: nervios reducidos. El número al comienzo de la designación corresponde al espesor del panel en cm.							

Tabla 3: Propiedades de paneles de fachada prefabricados

Tipo	Coste estimado por m ² respecto al panel 20A
12M	0.85
12A	0.80
16M	1.00
16A	0.90
20M	1.40
20A	1.00
20SPT	1.20
20OPT(AM)	1.10
20OPT(NR)	1.00
20OPT(NR-AM)	1.10
24M	1.65
24A	1.10
24SPT	1.45
24OPT(AM)	1.25
24OPT(NR)	1.10
24OPT(NR-AM)	1.25

Tabla 4: Datos económicos de paneles prefabricados

Queda evidenciado en la Tabla 3 que las propiedades de los paneles optimizados permiten mejorar ligeramente unas propiedades sin disminuir en lo posible otras, como en el caso del OPT(AM), o bien reduciendo la longitud máxima entre un 15% y un 30% a cambio de mejores propiedades térmicas respecto a los paneles aligerados, como en el caso del OPT(NR) y OPT(NR-AM).

La Tabla 4 recoge una comparativa económica de mercado, con precios de empresas del sector, de las distintas soluciones de paneles prefabricados (tomando como referencia un acabado de panel liso) para permitir la selección del tipo de panel más adecuado, en función de los valores económicos, de las prestaciones de los distintos paneles y de las longitudes exigidas en el proyecto. La referencia es el panel aligerado de 20 cm de espesor (20A) al que se ha dado un valor de comparación de 1, contrastado con las opciones recogidas en la Tabla 3.

Puede apreciarse en la Tabla 4 que las soluciones macizas y las soluciones "sin puente térmico" son las de mayor coste. Los paneles macizos, aunque tienen resistencia térmica limitada, ofrecen las máximas capacidades mecánicas y frente al fuego, siendo necesarios en algunos tipos particulares de estructuras.

Las soluciones "sin puente térmico" empiezan a popularizarse actualmente como consecuencia de la concienciación

creciente de ahorro energético. Las soluciones optimizadas propuestas son competitivas aportando mejoras respecto a paneles sándwich, por lo que constituyen soluciones viables desde distintos puntos de vista. Junto con las vías de optimización presentadas en este trabajo, existe una alternativa basada en el empleo de áridos ligeros con propiedades aislantes.

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado una visión general de los principales aspectos de diseño para paneles prefabricados de fachada en edificios industriales. Junto con los parámetros normativos, se han mostrado las tendencias actuales de fabricación de este tipo de paneles.

Analizando los factores que entran en juego en el comportamiento termoacústico y resistencia al fuego de los paneles, se han propuesto unos paneles teóricos optimizados, procurándose tres vías de optimización: la primera el uso de un núcleo aislante de más baja conductividad, la segunda en una mejora del ratio de macizados y la tercera una combinación de las dos anteriores. Estos sistemas optimizados (OPT) dan lugar a tres opciones en función de las propiedades mecánicas requeridas:

- El sistema con aislamiento mejorado, OPT(AM) permite mejorar ligeramente las prestaciones termoacústicas, conservando las propiedades mecánicas que condicionan la máxima longitud de los paneles.
- El sistema con nervios reducidos, OPT(NR) maximiza el aprovechamiento de las propiedades térmicas del aislamiento, dando lugar a una situación intermedia entre los paneles aligerados y los paneles "sin puente térmico". La principal mejora es en gasto: los paneles sin puente térmico tienen un precio medio de 1.2 veces el de los paneles con nervios reducidos para un espesor de 20 cm, y de 1.3 veces en el caso de espesor de 24cm.
- El sistema mixto OPT(NR-AM) es el que más incrementa la resistencia térmica del panel, sin importantes cambios de precio respecto a los OPT(AM).

PARA SABER MÁS

[1] Sánchez Amillategui, F.; González Pericot, C.; Curso de hormigón pretensado. Qualitas Ingeniería y Construcción. 2002

[2] Bachmann, H.; Steinle, A.; Precast Concrete Structures. Ernst & Sohn. 2011

[3] Grupo de trabajo 3/12 de ACHE. Hormigón

visto. Recomendaciones acerca del diseño y proceso constructivo. Monografía 28 de ACHE. 2016

[4] López Vidal, A.; Tenorio Ríos, J.A. Una característica no aprovechada en los elementos prefabricados de hormigón: la masa térmica. Cemento Hormigón, 2015, 970:36-41.

[5] Boletín 74, fib. Planning and design handbook on precast building structures. 2014

[6] Vaquero, J. et al., Edificación con prefabricados de hormigón. IECA. 1996

[7] Ministerio de Fomento. Código Técnico de la Edificación (CTE). Documento Básico de Ahorro Energético (DB-HE1). 2017

[8] Ministerio de Fomento. Código Técnico de la Edificación (CTE). Documento Básico de Seguridad en caso de incendio (DB-SI). 2017

[9] Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre. Reglamento de Seguridad contra incendio en los establecimientos industriales. 2004

[10] Ministerio de Fomento. Código Técnico de la Edificación (CTE). Documento Básico de Protección contra el ruido (DB-HR). 2017

[11] RD 1367/2007, de 19 de octubre. Ley del ruido. 2007

[12] Guía Técnica para la rehabilitación de la Envolvente Térmica de los Edificios. Soluciones de aislamiento con poliestireno expandido (EPS) Idae. 2008

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la documentación técnica aportada por Pretersa-Prenavis, Prefabricados Castelo, Prainsa y Prehorquisa.