

Generalidades

01.01. EL AISLAMIENTO EN LA INDUSTRIA

El aislamiento térmico se utiliza en la industria desde la iniciación de la era industrial, aunque el desarrollo se produjo a partir de la segunda década del siglo XX.

Las razones para la utilización del aislamiento térmico son, fundamentalmente:

- a) *Necesidades de proceso*, ya que deben evitarse transferencias térmicas que disfuncionen el proceso por diferencias de temperaturas no admisibles.
 - b) *Seguridad de las personas y bienes*. Si no existe aislamiento térmico suficiente, las temperaturas superficiales externas pueden ser elevadas y provocar lesiones y accidentes en las personas. En el límite, producir efectos de combustión e incendio en materiales combustibles próximos a estas superficies.
 - c) *El aislamiento térmico reduce las pérdidas energéticas*, de tal modo que éstas pueden llegar a ser un 2-3% de las pérdidas energéticas sin aislamiento.
Es con mucho el mejor método de ahorro de energía conocido, permitiendo la amortización del material aislante instalado en períodos de tiempo muy bajos, por ejemplo, algunas semanas.
 - d) *La reducción de la contaminación ambiental*. La mayor parte de la energía que se utiliza en los procesos térmicos procede de la transformación de un combustible por reacción exotérmica del mismo con el oxígeno ambiental.
La composición química de los combustibles, debido a su origen orgánico, es mayoritaria en carbono (C), con porcentajes variables de hidrógeno (H), oxígeno (O), azufre (S) y nitrógeno (N) entre otros. Por ello, el contaminante atmosférico más abundante que se produce es el dióxido de carbono (CO_2). En menores proporciones, dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), y monóxido de carbono (CO).
- d-1) *CO_2 y el efecto invernadero*
El dióxido de carbono es un gas incoloro e incombustible, representando el más alto porcentaje de efluentes atmosféricos en los procesos de combustión.

El volumen estimado de CO_2 que se arroja a la atmósfera en todo el planeta se evalúa en 20.000 millones de toneladas/año.

Una de las particularidades de este gas es que deja pasar a través de él radiaciones de baja longitud de onda del espectro solar. Sin embargo, es capaz de absorber buena parte de la energía calorífica de la irradiación de la Tierra, cuyas longitudes de onda son más altas. De este modo, se forma una capa casi impermeable a la evacuación del calor terrestre, provocando un aumento de la temperatura del planeta.

Este hecho es el conocido «efecto invernadero».

El nivel de emisiones de CO_2 a la atmósfera ha aumentado de un modo alarmante en la era industrial. Desde 1900 a 1985, la proporción de CO_2 en la atmósfera ha pasado de 290 a 348 ppm. Hacia el 2030-2050, se espera que el valor alcanzado sea el doble que a principios de nuestro siglo.

Los científicos estiman que lo anterior supondrá un aumento de la temperatura media global del planeta de 1,5 a 4,5 °C, cuyas consecuencias se prevén dramáticas.

Por otra parte, no sólo se está incrementando el nivel de CO_2 , sino que además se contribuye a agravar el problema por otras causas. Entre ellas, que las masas forestales, capaces de transformar el CO_2 en O_2 mediante la función clorofílica, están en recesión o en vías de desaparición en muchas regiones del planeta.

d-2) SO_2 y la lluvia ácida

El dióxido de azufre emitido a la atmósfera por las combustiones de algunas fuentes energéticas primarias (carbón, petróleo), es mucho menor en cantidad que el CO_2 , pero sus valores anuales globales son importantes y sus consecuencias también muy graves.

Además, el SO_2 es un gas indeseable desde el punto de vista sanitario. En el mundo, millones de personas deben soportar problemas respiratorios a causa del SO_2 .

Por otra parte, el SO_2 producido se difunde por la atmósfera y es arrastrado por los vientos. Mediante la humedad y la lluvia, se transforma sucesivamente en SO_3H_2 (ácido sulfuroso) y SO_4H_2 (ácido sulfúrico) diluidos, capaces de atacar los materiales con los que entre en contacto.

Constituye la llamada «lluvia ácida».

Uno de los aspectos más importantes de este fenómeno son las consecuencias de la «lluvia ácida» sobre las masas forestales y los cultivos. Las composiciones alcalinas de los terrenos desaparecen por el ataque, y los árboles enferman y mueren. Buena parte de los bosques de Europa central y del norte, así como de EE.UU. y otras regiones cercanas a centros industriales están en recesión por esta causa.

d-3) Aislamiento térmico para reducir la contaminación ambiental

Dado que consumo de energía y contaminación ambiental están unidos, se podría reducir la contaminación si se aplicara la conocida máxima: «La energía que menos contamina es la que no se consume».

Sin embargo, no parece posible una reducción drástica e indiscriminada del consumo energético, ya que esto afectaría gravemente a la economía y a la calidad de vida, especialmente en los países industrializados.

Sí parece posible y exigible buscar un compromiso aceptable entre el consumo de energía primaria y el rendimiento útil obtenido en los procesos térmicos alcanzando el posible para un «uso racional de la energía».

No se trata por tanto de no consumir energía, sino de consumirla mejor, mediante la adopción de técnicas que permitan gastar menos para el mismo fin.

Lo anterior supone un análisis muy preciso de todas las secuencias de los procesos, desde el punto de vista energético.

Todos los casos de procesos térmicos en espacios cerrados preconizan, como solución fundamental para reducir el consumo, la adopción de sistemas de aislamiento térmico, estudiados adecuadamente en calidad y espesor.

01.02. Lana de vidrio

PANORAMA HISTÓRICO

Desde la más lejana antigüedad, fenicios y egipcios ya sabían obtener hilos de vidrio, sumergiendo una varilla metálica en un crisol conteniendo vidrio en fusión y retirándola rápidamente. Estos hilos se utilizaban para decorar vasos de vidrio moldeados sobre formas de arcilla. Sin embargo, la primera comunicación sobre la lana de vidrio no aparece hasta el siglo XVIII, y se debe al físico y naturalista francés Antoine de Reamur (1713).

Bien entendido que en esta época no se trataba de lana de vidrio para aislamiento, sino para fines textiles. El tejido exige fibras muy finas, por lo que el fibrado del vidrio se abordó por el lado más difícil, y, por ello, no es de extrañar el fracaso consiguiente. Durante algún tiempo Venecia trató de perfeccionar los procedimientos de estirado; pero las fibras obtenidas, con un costo elevado, resultaban frágiles y los tejidos, faltos de flexibilidad.

En definitiva, hasta principios del siglo XX, la lana de vidrio fue una simple curiosidad.

En la Colombian Exposition de 1893 se presentó un traje enteramente tejido con hilos de vidrio.

Así pues, la fabricación de plumeros, mechas y fieltros de laboratorio eran las aplicaciones más aptas de la lana de vidrio.

No existen datos precisos que señalen el momento a partir del cual se desarrolla, paralelamente a estas aplicaciones tan particulares y limitadas, la utilización como aislamiento térmico. Sin embargo, parece que coincide con la aparición de un nuevo procedimiento de fibrado. El «algodón de vidrio» se obtenía dejando caer un hilo de vidrio fundido con un chorro de vapor. Así se lograba obtener gotas de vidrio prolongadas en una aguja fina. Este procedimiento deriva de la fabricación de la lana de escorias.

Las cualidades aislantes de estas fibras groseras no tardaron en ser advertidas. Mientras tanto, el aumento del desarrollo industrial impuso la necesidad creciente de los calorifugados.

A partir de este momento, los procedimientos de fibrado van a progresar rápidamente. Durante la guerra europea de 1914-1918, por razones del bloqueo, los alemanes continuaron activamente las investigaciones para reemplazar los aislantes tradicionales de los que carecían: corcho, amianto, tierra de diatomeas, etcétera.

En Francia la pionera en la lana de vidrio es la sociedad «La Seda de Vidrio», cuya fábrica estaba situada en Soissons; siendo destruida en 1940 por un bombardeo, concentrándose entonces la fabricación en la localidad de Ratigny, donde se produce una fibra corta y fina.

En España comienza la fabricación de la lana de vidrio en La Granja (Segovia), en el año 1942, por la sociedad EXPACO, S.A., y comercializada con la marca «VITROFIB».

En ese mismo año, el Laboratorio de Ensayos Técnicos (LET), de SAINT-GOBAIN, concibió un nuevo procedimiento que se bautizó con el nombre de TEL (de las iniciales LET invertidas).

El procedimiento TEL conjuga dos de las tres formas posibles de fibrado:

— Por centrifugación.

— Por fluido.

La puesta a punto se llevó a cabo en Ratigny, durante los años 1954 a 1956. SAINT-GOBAIN ha vendido la licencia de este procedimiento a la casi totalidad de los países productores de lana de vidrio.

En España se comienza la fabricación de la fibra TEL en el año 1963 por la Sociedad FIBRAS MINERALES, S.A., presentándose en el mercado con la marca «VITROFIB-TEL».

EL PROCEDIMIENTO «TEL» ISOVER SAINT-GOBAIN (fig. 1)

Composición del vidrio

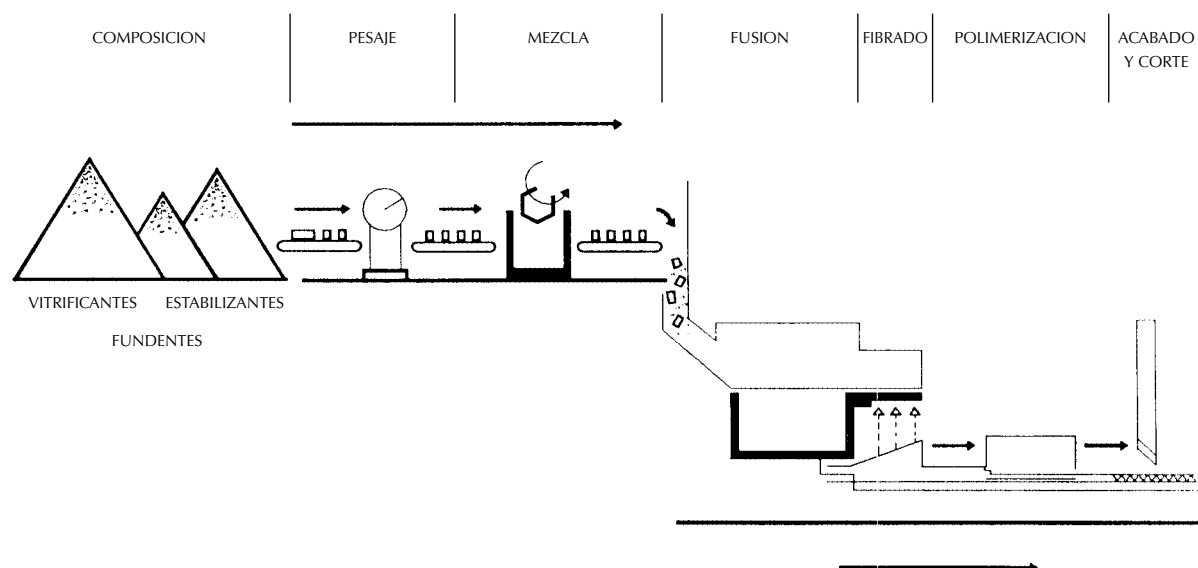
Se elabora partiendo de tres elementos principales:

- Un vitrificante, sílice en forma de arena.
- Un fundente, para conseguir que la temperatura de fusión sea más baja (carbonato de sodio y sulfato de sodio y potasio).
- Estabilizantes, principalmente carbonato de calcio y magnesio (dolomía), cuya misión es conferir al vidrio una elevada resistencia a la humedad, ya que presenta una gran superficie de ataque para los agentes exteriores.

Por otra parte, los límites de temperatura impuestos por la estabilidad de las aleaciones que componen los aparatos de fibrado obligan a trabajar el vidrio a temperaturas sensiblemente más bajas que los vidrios clásicos.

De aquí la necesidad de introducir en la composición elementos capaces de reducir la viscosidad.

Fig. 1. ESQUEMA DE FABRICACIÓN DE LA LANA DE VIDRIO «ISOVER»



Finalmente, como en vidriería clásica, se añade a la mezcla una cierta proporción de calcio finamente molido.

La elaboración de la mezcla exige unidades especiales: molido, secado eventual (para las arenas), almacenaje en silos, controles físico-químicos, pesadas exactas y mezcla perfectamente homogénea. Para obtener 840 kilos de vidrio fundido se necesita una tonelada de materia prima.

Fusión

La composición se introduce en un horno, que funciona con dos series de quemadores de inversión, o en un horno de quemadores transversales.

La producción de la lana de vidrio

El fibrado se realiza a través de los orificios de un «plato» perforado, soportado por un eje y dotado de un movimiento de rotación muy rápido.

Este aparato es alimentado con vidrio fundido, por un órgano de reparto, «panier», que recibe el vidrio fundido de la parte delantera del horno.

Después de este primer estirado mecánico, horizontal, debido a la fuerza centrífuga, las fibras se alargan verticalmente, por la acción mecánica y térmica de un quemador circular de llama rápida.

Varios factores permiten actuar sobre el diámetro de las fibras obtenidas:

- El número y diámetro de los orificios del «plato» para un caudal de vidrio fijo.
- El caudal de vidrio para un mismo plato.
- La viscosidad del vidrio.
- El régimen del quemador horizontal.

La dispersión alrededor de los diámetros medios es muy estrecha.

Elaboración de los productos

Después de la pulverización, ya sea de aceite mineral para los productos «blancos», ya de resinas para los productos «impregnados», las fibras caen sobre un tapiz metálico de aspiración.

Los productos «impregnados» pasan por una estufa, en la cual un circuito de aire caliente asegura la polimerización de la resina, que confiere rigidez a los productos.

La velocidad del tapiz de recepción varía en la proporción de 1 a 30, lo que permite obtener diferentes pesos de lana de vidrio por m² de producto.

PROPIEDADES DE LA LANA DE VIDRIO

Propiedades térmicas

Un material aislante se caracteriza por el valor de su conductividad térmica; su poder aislante es tanto más elevado cuanto más pequeña es su conductividad.

La lana de vidrio es un material compuesto. El fieltro, que se forma en la cadena, está constituido por fibras entrecruzadas desordenadamente, que impiden las corrientes de convección del aire. Es evidente que la conductividad térmica del fieltro será no una conductividad sólida real, sino una conductividad aparente y que será el balance de los efectos conjugados de varios procesos de cambios de calor, que vamos a tratar de analizar a continuación:

- a) El aire inmovilizado por la red de fibras, es un volumen proporcionalmente importante; por tanto, una parte de la transmisión de calor se hará por convección.
- b) Las fibras, en contacto unas con otras, permiten la transmisión de calor por conducción.
- c) Finalmente, las fibras intercambian energía entre sí, por radiación.

La relativa importancia de estas formas distintas de cambio de calor dependen, a igualdad de temperatura en el ambiente, de:

- El diámetro de las fibras.
- La densidad aparente del producto.

La conductividad térmica resulta, en la práctica, de la combinación de la transmisión gaseosa y de la radiación; siendo despreciables las otras dos.

El valor de dicha conductividad varía de 0,032 a 0,045 W/(m · K) (a 10 °C), para los productos ISOVER, de aplicación en la construcción.

Otras propiedades

Los productos fabricados son ligeros (de 10 a 110 kg/m³) y fáciles de cortar y de manejar.

La lana de vidrio es incombustible, inatacable por los agentes exteriores: aire, vapor de agua, ácidos (excepto de fluorhídrico) y bases no concentradas. El pH de la composición, 7 aproximadamente, asegura a la fibra una estabilidad total, incluso en medio húmedo y garantiza al usuario la no existencia de corrosión de los metales en contacto con ella.

Su débil calor específico permite puestas en régimen rápidas, en instalaciones intermitentes.

Por último, la «lucha contra el ruido» ha puesto de manifiesto las cualidades «acústicas» de la lana de vidrio.

Su elasticidad le permite ser el material que mejor se adapta a la técnica de los «suelos flotantes». Igualmente le permite mejorar sensiblemente el índice de aislamiento acústico en doubles tabiques.

Su elevado coeficiente de absorción justifica su empleo en la corrección acústica de locales (talleres, oficinas, etc.), y sobre todo en los casos más difíciles, como el revestimiento de paramentos en «cámaras sordas».

01.03. Lana de roca

INTRODUCCIÓN

Otro tipo de lana mineral es la denominada «lana de roca», elaborada a partir de rocas diabásicas (rocas basálticas), obteniéndose un producto de propiedades complementarias a la lana de vidrio. Es un producto especialmente indicado para los aislamientos térmicos en la industria (altas temperaturas).

FABRICACIÓN DE LA LANA DE ROCA

Componentes

El «caldo» utilizado en la fabricación de la lana de roca tiene unas características físico-químicas parecidas a los vidrios, estando compuestos por silicatos y óxidos metálicos.

La lana de roca se obtiene fibrando por centrifugación el material, controlando en el proceso los contenidos de sílice y de óxidos metálicos.

La composición química final que debe asegurar una gran estabilidad mecánica hasta 750 °C es:

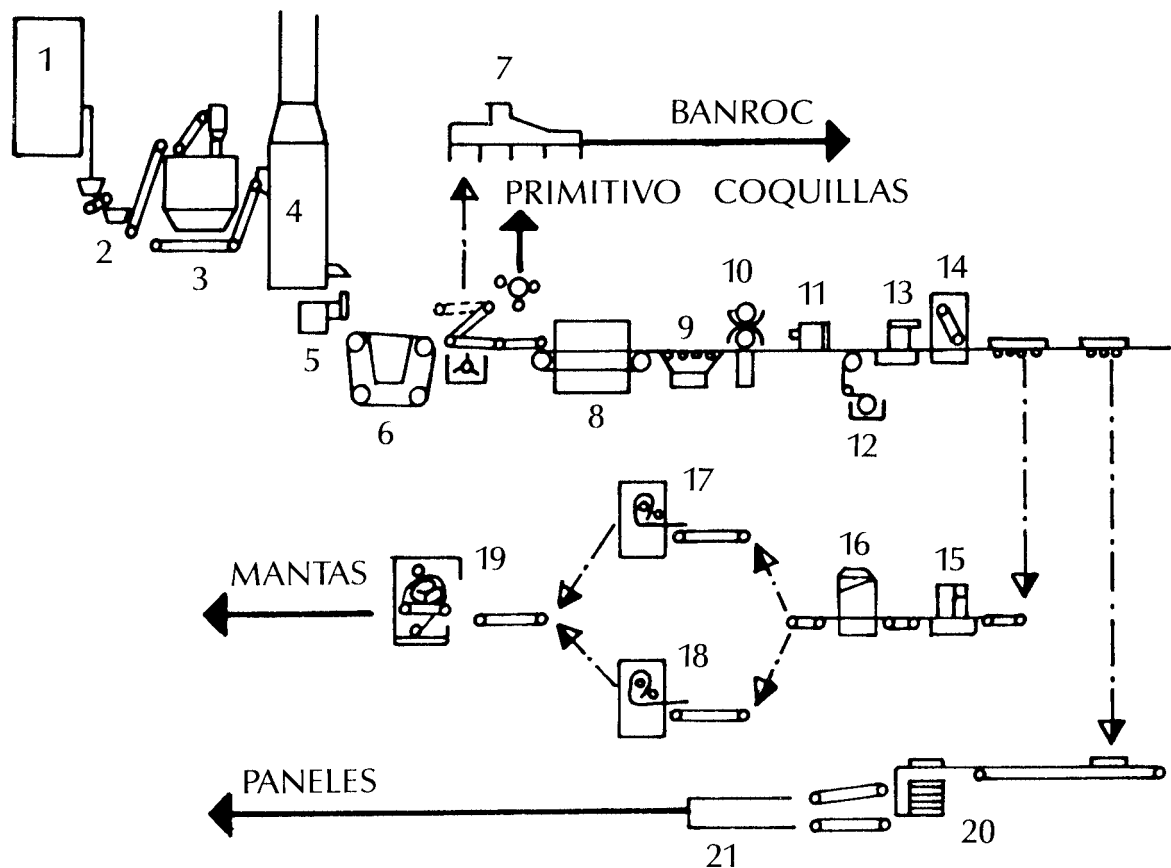
Materias primas	Materias primas encolado
Roca basáltica Grava Fosfato Mineral de hierro	Aceite de linaza Resina escórez Naftenato de manganeso Baquelita Aceite mineral

Fabricación

El cubilote es el aparato encargado de fundir la escoria, utilizando como combustible carbón de coque.

El chorro de fusión choca con el borde exterior de un rotor metálico, produciéndose el estirado mecánico y la aparición de fibras que tienen un diámetro medio de 4 micras (Fig. 2).

Fig. 2. ESQUEMA LÍNEA DE FABRICACIÓN DE LANA DE ROCA



- | | |
|---------------------------------|-------------------------|
| 1. Aparcamiento materias primas | 12. Foso revestimientos |
| 2. Separación finos | 13. Corte transversal |
| 3. Pesada | 14. Enrolladora |
| 4. Cubilote | 15. Máquina de coser |
| 6. Recepción | 16. Guillotina |
| 7. Embaladora Banroc | 17. Enrolladora n° 1 |
| 8. Estufa | 18. Enrolladora n° 2 |
| 9. Enfriadora | 19. Empaquetadora |
| 10. Corte longitudinal | 20. Apiladora |
| 11. Corte espesor | 21. Embalado |

Las fibras, una vez impregnadas con un encolado compuesto de aceite mineral y una resina, caen sobre un tapiz metálico en movimiento para pasar a una estufa en la que un circuito de aire caliente asegura la polimerización del encolado.

La variación de la velocidad del tapiz de recepción permite obtener diferentes densidades y espesores del material aislante (Fig. 2).

01.04. Materiales, propiedades y campo de aplicación

Definición: La calidad funcional de un material aislante depende de las propiedades del producto elegido y del montaje.

Dado que los materiales aislantes se definen como tales por una propiedad física que expresa la facilidad o dificultad con que el calor atraviesa el material —conductividad térmica— y que ésta es bastante parecida para toda la oferta, las diferencias en el resultado final son debidas a los distintos sistemas de montaje.

El montaje debe tener en cuenta el comportamiento del material a:

- Contracciones y dilataciones.
- Fuego.
- Acción de disolventes y agentes atmosféricos.
- Solicitaciones mecánicas.
- Temperatura (máxima de empleo).

En función de los distintos comportamientos, los materiales deberán montarse de forma que se minimicen los puentes térmicos.

Si un material tiene una variación dimensional entre el 5% y el 7% en volumen, deberá realizarse el montaje a través de machihembrado o la doble capa, evitando siempre la continuidad de las juntas.

Los materiales minerales, lana de vidrio y lana de roca, están compuestos por silicatos y óxidos metálicos, lo que explica que las variaciones dimensionales expresadas en tanto por ciento en volumen sean del 0% (ni siquiera como métodos dilatométricos muy sofisticados se consigue la medición).

El comportamiento al fuego exigirá el montaje de protecciones en obra o metálicos para evitar la combustión y destrucción del aislamiento. Los materiales minerales son incombustibles, pudiendo entonces dejarse vistos (p. ej., falsos techos decorativos).

La estructura química de los materiales minerales asegurará, además, que no se desprenderán gases tóxicos sometidos al fuego directo. Recuérdese que son las intoxicaciones las culpables de muertes en incendio, incluso de los bomberos que acuden al siniestro.

La temperatura máxima de utilización no está regulada como Norma UNE, pero como criterio se utiliza en el resto de Europa el siguiente:

«Temperatura máxima de empleo es aquella en la que el material alcanza una deformación del 5% del espesor bajo una carga uniforme constante de 1.000 Pa.»

A continuación aparece una tabla comparativa de temperaturas máximas de empleo de distintos materiales aislantes.

Minerales	Plásticos
LANA DE VIDRIO Con encolado, 250 °C Sin encolado, 500 °C	POLIESTIRENO Expandido, 70 °C Extrusionado, 85 °C
LANA DE ROCA Hasta 750 °C	POLIURETANO 100 °C
FIBRA CERAMICA Hasta 1.500 °C	

02.04. Espesor óptimo económico de aislamiento

02.04.01. INTRODUCCIÓN

Hasta el momento, todos los aspectos analizados se refieren a cálculos técnicos sobre los aislamientos.

La determinación de un espesor de aislamiento adecuado obedece en algunos casos a condiciones exclusivamente técnicas, como puede ser limitar la caída de temperatura de un fluido en una conducción o fijar la temperatura máxima superficial de un aislamiento por motivos de seguridad de los trabajadores.

Pero la mayor parte de las inversiones en aislamiento tienen un carácter económico: limitar las pérdidas de calor en recintos a temperaturas muy diferentes a las ambientales. Por ello es necesario introducir conceptos económicos en la elección adecuada del aislamiento, generalmente en la determinación del espesor.

El planteamiento teórico es sencillo:

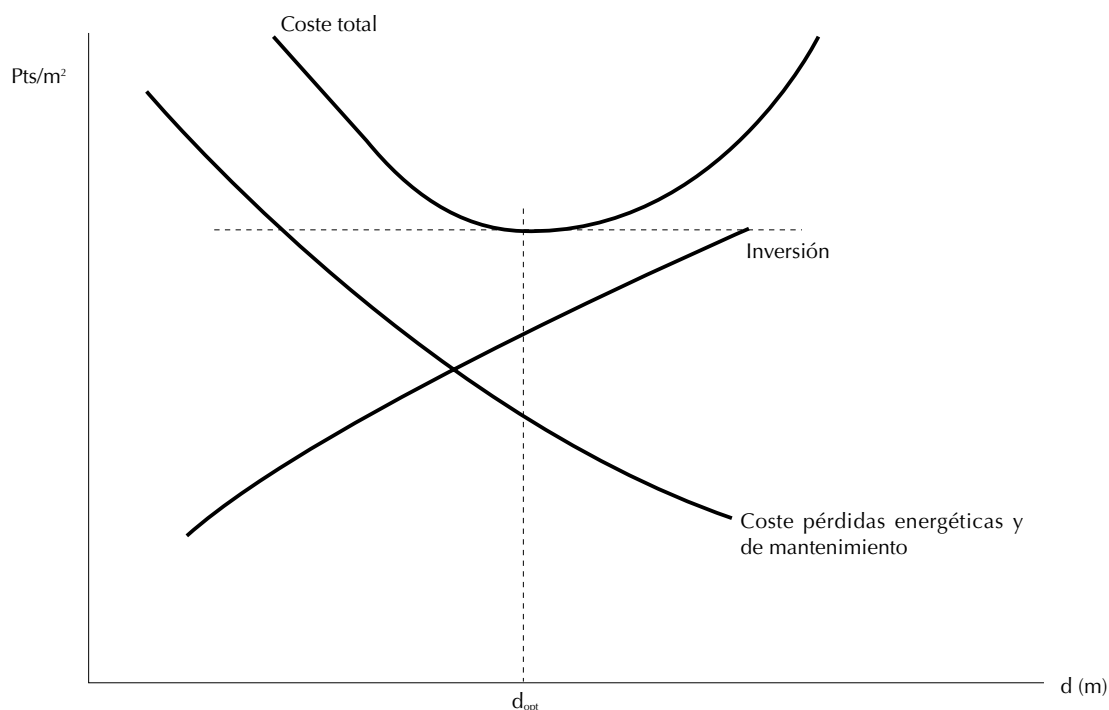
Las pérdidas de energía disminuyen con un aumento del espesor de aislamiento, de acuerdo con fórmulas conocidas.

El aumento del espesor de aislamiento supone incremento de la inversión para su compra e instalación, aunque esto no tiene unas leyes determinadas de crecimiento.

Existen además otros componentes del coste global como son los gastos de mantenimiento.

Representando gráficamente estos conceptos para la unidad específica (p.e. m^2 de superficie aislada) y para un período de tiempo previsto de amortización, se tendrá:

- Inversiones en función del espesor de aislamiento «d».
- Pérdidas energéticas + gastos de mantenimiento para el período considerado, en función también de «d».



El coste total empresarial será, para cada espesor de aislamiento, el resultado de los valores de ambas curvas.

El coste total será mínimo para un espesor determinado, precisamente el espesor óptimo económico « d_{opt} ».

02.04.02. MÉTODO GENERAL

El método de cálculo más utilizado en la CEE se basa en las aplicaciones del VALOR ACTUALIZADO NETO (VAN).

El procedimiento consiste en determinar, para cada inversión en aislamiento, el VALOR ACTUALIZADO NETO de los ahorros energéticos aportados y compararlo con los incrementos que supone la inversión.

Para determinar el VAN, se determina el coef. VAN o coeficiente multiplicador que actualiza los ahorros en el período total que se considere.

Se demuestra que el valor de dicho coeficiente es:

$$\text{Coef. VAN} = \frac{t(t^n - 1)}{t - 1}$$

siendo

$$t = \frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r}$$

donde:

b = Aumento previsible del coste de la energía en %.

r = Tasa de actualización neta en % (equivalente al interés bancario deducidos los impuestos y la inflación).

n = Número de años para los que se efectúa el estudio (horizonte económico).

Para un proyecto determinado, a cada espesor de aislamiento térmico « d_i » le corresponderán unas pérdidas energéticas específicas y un coste de inversión asociado.

A medida que aumenta el espesor, como ya se ha indicado, disminuyen las pérdidas energéticas y aumenta la inversión.

Si consideramos dos espesores consecutivos de aislamiento, la diferencia de pérdidas energéticas tendrá un valor económico que se actualiza con el coef. VAN para el período considerado. A su vez, existirá una diferencia de inversión de aislamiento.

Esto permite plantear la comparación:

$$\begin{array}{rcl} \text{INCREMENTO} & & > \\ \text{DE} & \times \text{Coef. VAN} & = \\ \text{AHORRO} & & < \end{array} \quad \text{INCREMENTO DE LA INVERSIÓN}$$

siendo:

INCREMENTO DE AHORRO: Valor pérdidas energéticas para « d_i » — Valor pérdidas para « d_{i+1} »

INCREMENTO DE INVERSIONES: Inversión para « d_{i+1} » — Inversión para « d_i »

Si el resultado de la inecuación es que el primer término es superior al segundo, indica que el incremento de ahorro es mayor que la inversión necesaria para obtenerlo. Por el contrario, si la inecuación indica que el incremento del ahorro obtenido requiere una inversión superior (primer término menor que el segundo) esta inversión no es rentable y debe disminuirse, es decir, reducir el espesor de aislamiento.

Es obvio que la situación óptima (espesor óptimo económico) es precisamente la del equilibrio, es decir, cuando el incremento del ahorro es igual al incremento de la inversión.

02.04.03. MÉTODO DE CÁLCULO DIRECTO

Como se indicaba en la Introducción, lo que se trata es de encontrar el valor mínimo del Coste Total:

$$\text{Coste Total } (d_i) = \text{Coste de Pérdidas de energía } (d_i) + \text{Inversión } (d_i)$$

Las pérdidas caloríficas, sobre todo de figuras geométricas conocidas, responde bien a las características de funciones continuas de espesor (d_i). Pero no ocurre lo mismo con las inversiones: normalmente éstas presentan saltos o discontinuidades con el espesor (p. ej.: espesores a partir de los que se necesitan dos piezas superpuestas y dos sujeciones). Por esto, las inversiones sólo pueden presentar el carácter de funciones continuas dentro de un campo de valores « d_i ».

Con estas consideraciones, es posible encontrar el espesor óptimo económico cuando se cumpla:

$$\frac{\partial \text{Coste}(d)}{\partial (d)} = 0$$

El caso más sencillo es el de las paredes planas o de gran radio de curvatura, para las cuales puede establecerse:

$$I(d) = I_0 + I'_0 \cdot d$$

en el que:

$I(d)$ = Inversión para el aislamiento de espesor « d » (€/m²)

I_0 = Valor constante de la inversión, independiente del espesor (€/m²)

I'_0 = Coeficiente variable de la inversión (€/m³)

la ecuación global del coste será:

$$\text{Coste}(d) = \frac{\theta_i - \theta_e}{\frac{1}{h_e} + \frac{d}{\lambda}} \cdot E \cdot (\text{VAN}) \cdot Z + I_0 + I'_0 \cdot d$$

donde:

- $\theta_i - \theta_e$ = Dif. de temperaturas interior y ambiente (K)
 h_e = Coeficiente superficial externo de transmisión de calor $W/(m^2 \cdot K)$
 λ = Conductividad térmica del aislante entre $\theta_i - \theta_e$ $W/(m \cdot K)$
 d = Espesor de aislamiento (m)
 E = Coste de la energía $€/ (W \cdot h)$
 (VAN) = Coef. VAN
 Z = N° de horas de funcionamiento al año (h).

el resultado de $\frac{\partial \text{Coste}(d)}{\partial (d)} = 0$ sería:

$$d = \sqrt{\frac{E \cdot \lambda \cdot Z \cdot (VAN) \cdot (\theta_i - \theta_e)}{I'_o}} - \frac{\lambda}{h_e} \quad (m)$$

NOTA: Para las lanas minerales (lanas de vidrio y lanas de roca), el término λ/h_e suele despreciarse ya que $\lambda \ll h_e$.

Cuando se trata de elementos curvos (cilindros o esferas), la complejidad de la expresión resultante no permite una formulación como en el caso de las paredes planas. En estos casos es más recomendable la utilización del método general.

Ejemplos

Ejemplo 1

Se trata de calcular el espesor óptimo económico para el aislamiento de las paredes planas de un reactor, utilizando una lana de roca ROCLAINE (Manta SPINTEX 342G-100).

Los datos de partida son:

- Temperatura interior = 400 °C
- Temperatura ambiente = 20 °C
- Coef. de conductividad medio entre 20 y 400 °C, $\lambda = 0,06 W/(m \cdot K)$
- Coeficiente superficial externo, $h_e = 12 W/(m^2 \cdot K)$
- Tiempo de funcionamiento de la instalación, $Z = 8.000$ (h/año)
- Coste de la energía: $1,28 \cdot 10^{-5} €/ (W \cdot h)$
- Inversión en aislamiento, $I = 40,26 + 186,31 \cdot d$ (€/m²) con $d(m)$ para $d > 0,05$ m.
- Número de años del estudio, $n = 10$ años.
- Incremento del coste de la energía en el período, $b = 3\%$ anual
- Interés anual del dinero, deducidos impuestos, 5%
- Tasa de inflación anual prevista, 3%

Se determinará el Coef. VAN en primer lugar:

$$t = \frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r}$$

con $b = 3\%$ y $r = 5-3 = 2\%$, resulta $t = 1,01$

luego:

$$\text{Coef. VAN} = \frac{t(t^n - 1)}{t - 1} \quad \text{con } n = 10, \text{ resulta}$$

Coef. VAN = 10,562

a) Método de cálculo general:

A continuación se deben determinar los valores de la TABLA adjunta, donde:

(1) ESPESOR DE AISLAMIENTO, $d(m)$

(2) PÉRDIDAS DE ENERGÍA para cada espesor de aislamiento y por unidad de superficie:

$$q = \frac{\theta_i - \theta_e}{\frac{1}{h_e} + \frac{d}{\lambda}} \quad (W/m^2)$$

(3) VALOR DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA, a partir de (2):

$$(2) \times E \times Z \quad (€/m^2 \cdot \text{año})$$

(4) VALOR ACTUALIZADO DE LAS PÉRDIDAS para todo el período, a partir de (3):

$$(3) \times \text{Coef. VAN} \quad (€/m^2)$$

(5) INCREMENTO DEL AHORRO entre dos espesores consecutivos, a partir de (4):

$$\text{Valor (4) para espesor } d_i - \text{Valor (4) para espesor } d_{i+1}$$

(6) INCREMENTO DE INVERSIÓN del aislamiento entre dos espesores consecutivos:

$$I_{i+1} - I_i \quad (€/m^2)$$

(7) Diferencias entre (5) y (6)

(5) – (6) (pts/m²), se calculará en la tabla hasta que esta diferencia sea 0 o el primer valor negativo posible.

Normalmente debido a que los espesores de aislamiento comercial varían de en 1 cm como mínimo, el espesor óptimo económico corresponderá al espesor que más se aproxime (positivo o negativo) a una diferencia 0.

En este ejemplo, el espesor buscado es 0,36 m.

TABLA

(1) ESPESOR de AISLAM. $d(m)$	(2) PÉRDIDAS de ENERGÍA (W/m^2)	(3) VALOR de (2) $€/m^2 \cdot \text{año}$	(4) VALOR de (3) en PERÍOD. ($€/m^2$)	(5) INCREM. de AHORRO ($€/m^2$)	(6) INCREM. de INVERSIONES ($€/m^2$)	(7) DIFERENCIA (5) – (6) ($€/m^2$)
0,050	407	41,88	442,31			
0,100	215	21,99	232,29	210,02	9,32	200,70
0,150	146	15,02	158,67	73,62	9,32	64,30
0,200	111	11,42	121,66	37,01	9,32	27,69
0,250	89	9,16	96,72	24,94	9,32	15,62
0,300	75	7,72	81,51	15,21	9,32	5,90
0,350	64,225	6,61	69,80	11,71	9,32	2,40
0,360	62,44	6,42	67,90	1,89	1,86	0,03
0,370	60,8	6,26	66,08	1,78	1,86	-0,08

b) Método de cálculo directo:

$$d = \sqrt{\frac{E \cdot \lambda \cdot Z \cdot (\text{VAN}) \cdot (\theta_i - \theta_e)}{I'}} - \frac{\lambda}{h_e} \quad (m)$$

$$d = \sqrt{\frac{0,06 \cdot 1,28 \cdot 10^{-5} \cdot 8000 \cdot 10,562 \cdot 380}{186,31}} - \frac{0,06}{12} = 0,365 - 0,005 = 0,36 \text{ m}$$

Ejemplo 2:

En este caso se trata de una tubería de proceso de la que se requiere calcular el espesor óptimo económico para un aislamiento en lana de vidrio ISOVER (COQUILLA ISOVER).

Los datos de partida son:

- Tubería de acero galvanizado de 4" (114 mm de diámetro)
- Temperatura interior = 200 °C
- Temperatura ambiente = 20 °C
- Coef. de conductividad medio entre 20 y 200 °C, $\lambda = 0,046 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
- Coeficiente superficial externo, $h_e = 12 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
- Inversión en aislamiento:

Para 40 mm de espesor 21,33 €/m

60 mm de espesor 28,84

80 mm de espesor 37,20

90 mm de espesor 41,46

100 mm de espesor 46,87

El resto de los datos necesarios, idénticos a los del ejemplo 1.

El método de cálculo será el mismo que el del ejemplo 1, Método General de cálculo, con algunas diferencias:

(2) PÉRDIDAS DE ENERGÍA en cada espesor del aislamiento, serán ahora:

$$q = \frac{\theta_i - \theta_e}{\frac{1}{\pi \cdot h_e \cdot D_e} + \frac{\ln \frac{D_e}{D_i}}{2\pi\lambda}} \quad (\text{W/m})$$

donde D_i = Diámetro interno del aislamiento 0,114 m

D_e = Diámetro externo del aislamiento = 0,114 + 2d

En este caso, las pérdidas de energía están referidas a metro lineal de tubería, lo mismo que las inversiones.

TABLA

(1) ESPESOR de AISLAM. d(m)	(2) PÉRDIDAS de ENERGÍA (W/m)	(3) VALOR de (2) €/m ² · año	(4) VALOR de (3) en PERÍOD. (€/m)	(5) INCREM. de AHORRO (€/m)	(6) INCREM. de INVERSIONES (€/m)	(7) DIFERENCIA (5) – (6) (€/m)
0,04	92	9,47	99,98			
0,05	70	7,21	76,11	23,87	7,51	16,35
0,08	58	5,97	63,03	13,08	8,35	4,72
0,09	54	5,55	58,68	4,36	4,27	0,09
0,10	51	5,25	55,42	3,26	5,40	-2,14

El espesor económico en este caso será 0,09 m.

02.03. Pérdidas suplementarias en instalaciones reales

En el cálculo de las pérdidas caloríficas de un conjunto de tuberías hay que considerar las pérdidas suplementarias que suponen los accesorios, tales como soportes, válvulas, bridas, etc.

Las pérdidas por estos suplementos se expresan cómodamente como longitudes suplementarias de tuberías.

A continuación se indican las estimaciones de «longitud equivalente», según la norma alemana V.D.I. 2055.

a) *Caso de válvulas, válvulas de compuerta y grifos desnudos y aislados* (en este caso no se tiene en cuenta el par de bridas correspondiente). Ver Tabla 2.

b) Paredes de bridas

Desnudas: Contar 1/3 de la válvula del mismo diámetro.

Aisladas: Añadirles sin suplemento alguno particular a las longitudes de las tuberías.

c) Soportes de las tuberías

En el interior: Añadir el 15% de las pérdidas calculadas sin accesorios.

En el exterior, sin viento: Añadir el 20% de las pérdidas calculadas sin accesorios.

En el exterior, con viento: Añadir el 25% de las pérdidas calculadas sin accesorios.

Tabla 2

Naturaleza del calorífugo		Ø Interior del tubo en mm	Longitud equivalente en m del tubo calorifugado por una temperatura de la tubería	
			100 °C	400 °C
LOCAL CERRADO	Desnudo	100	6	16
		500	9	25
	1/4 Desnudo	100	2,5	5,0
	3/4 Aislado			
	1/4 Desnudo	500	3,0	7,5
	3/4 Aislado			
	1/3 Desnudo	100	3,0	6,0
AL AIRE LIBRE	2/3 Aislado			
	1/3 Desnudo	500	4,0	10,0
	2/3 Aislado			
	Desnudo	100	15	22
		500	19	32
	1/4 Desnudo	100	4,5	6,0
	3/4 Aislado			
	1/4 Desnudo	500	6,0	8,5
	3/4 Aislado			
	1/3 Desnudo	100	6,0	8,0
	2/3 Aislado			
	1/3 Desnudo	500	7,0	11,0
	2/3 Aislado			

02.02. Aplicaciones especiales

02.02.01. Cambio de temperatura longitudinal en una tubería

Para obtener el valor exacto del cambio de temperatura de un fluido a lo largo de una tubería, se aplica la siguiente ecuación:

$$\theta_{im} - \theta_a = (\theta_{im} - \theta_a) \cdot e^{-\alpha l} \quad ^\circ\text{C}$$

donde

θ_{im} es la temperatura inicial del fluido, en $^\circ\text{C}$;

θ_{fm} es la temperatura final del fluido, en $^\circ\text{C}$;

θ_a es la temperatura ambiente, en $^\circ\text{C}$;

l es la longitud de la tubería en m.

donde α es:

$$\alpha = \frac{U_l \cdot 3,6}{\dot{m} \cdot c_p} \text{ m}^{-1}$$

siendo

U_l la transmisión térmica lineal, en $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

$\dot{m}$ flujo másico medio, en kg/h

c_p calor específico presión constante, en $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Como en la práctica el cambio de temperatura aceptable es normalmente pequeño, se aplica la siguiente ecuación para un cálculo aproximado:

$$\Delta\theta = \frac{q_l \cdot l \cdot 3,6}{\dot{m} \cdot c_p} \quad ^\circ\text{C}$$

donde

$\Delta\theta$ es el cambio de temperatura longitudinal en °C

q_l es la densidad lineal de flujo de calor en W/m.

q_l se puede calcular sólo en el caso de que se conozca la temperatura media del fluido, lo que supone que $\Delta\theta$ debe ser conocida, para lo que es preciso utilizar un método de cálculo iterativo partiendo de un valor $\Delta\theta$ estimado. Es preciso repetir el procedimiento iterativo tantas veces como sea necesario hasta que la variación de $\Delta\theta$ sea aceptable.

Ejemplo. Cálculo de la caída de temperatura de una tubería de vapor caliente.

Condiciones de contorno:

temperatura inicial:	$\theta_{im} = 250 \text{ °C}$
presión media:	$p = 1\,000\,000 \text{ Pa}$
flujo de masa medio:	$\dot{m} = 45\,000 \text{ kg/h}$
calor específico:	$c_p = 2,233 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$
temperatura del aire exterior:	$\theta_a = -10 \text{ °C}$
diámetro de la tubería:	$D_i = 0,40 \text{ m}$
longitud de la tubería:	$l = 2\,500 \text{ m}$
espesor de aislamiento de lana de roca	
manta SPINTEX 613-40:	$d = 0,12 \text{ m}$
conductividad térmica del aislamiento entre 250 °C y 25 °C	$\lambda = 0,061 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$

Los coeficientes superficiales interior y exterior se desprecian en este ejemplo. Esto proporciona una densidad lineal del flujo de calor:

$$q_l = \frac{2 \pi \lambda}{\ln D_e/D_i} (\theta_{si} - \theta_{sc}), \text{ resultando: } q_l = 182,82 \text{ W/m}$$

Este valor se incrementa en 20% por montaje, resultando $q_l = 219,4 \text{ W/m}$, lo que proporciona una caída de temperatura longitudinal de aproximadamente:

$$\Delta\theta = \frac{219,4 \cdot 2500 \cdot 3,6}{45000 \cdot 2,233} = 19,64 \text{ °C}$$

La caída de temperatura se calcula con más exactitud utilizando la ecuación de la temperatura final:

$$\theta_{im} = -10 + (250 + 10) \cdot \exp(-2,92 \cdot 10^{-5} \cdot 2500) = 231,7 \text{ °C}$$

Por tanto, la caída exacta de temperatura es $250 - 231,7 = 18,3 \text{ °C}$.

NOTA: El cálculo exacto de α es:

$$\alpha = \frac{U_l \cdot 3,6}{\dot{m} \cdot c_p} = \frac{\frac{2 \cdot 0,061 \cdot \pi}{0,47} \cdot 3,6}{45000 \cdot 2,23} = 2,92 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$$

02.02.02. Cambio de temperatura y tiempo de enfriamiento en acumuladores y depósitos.

El tiempo de enfriamiento para un cambio de temperatura determinado viene dado por:

$$t_v = \frac{(\theta_{im} - \theta_a) \cdot (m \cdot c_p) \cdot \ln \frac{(\theta_{im} - \theta_a)}{(\theta_{im} - \theta_a)}}{q \cdot 3,6 \cdot A} \quad h$$

donde

$$q = \frac{(\theta_{im} - \theta_a)}{\frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_e}} \quad W/m^2$$

para

θ_{im} es la temperatura final media del líquido, °C

θ_{im} es la temperatura inicial media del líquido, en °C

θ_a es la temperatura ambiente, en °C

U_l es la transmisión térmica lineal, en W/(m · K)

q es la densidad del flujo de calor en W/m²

A es la superficie del acumulador o depósito en m²

l longitud de la tubería

m es la masa del contenido en kg

t_v es el tiempo de enfriamiento en horas

c_p es la capacidad calorífica del fluido en kJ/(kg · K) (calor específico).

Para un depósito esférico, $q \cdot A$ es reemplazado por la tasa de flujo de calor Φ_{sph} (W).

El cálculo exacto de la caída de temperatura en función del tiempo se formula de acuerdo a la siguiente ecuación, similar al cambio de temperatura longitudinal en una tubería variando l por t y α por α' :

$$(\theta_{im} - \theta_a) = (\theta_{im} - \theta_a) \cdot e^{-\alpha' \cdot t} \quad K$$

donde

$$\alpha'_s = \frac{U_l \cdot A \cdot 3,6}{m \cdot c_p}, \text{ para superficies planas o cilíndricas con } D > 1$$

$$\alpha'_l = \frac{U_l \cdot l \cdot 3,6}{m \cdot c_p}, \text{ para tuberías con fluido en reposo}$$

La caída de temperatura con el tiempo puede calcularse aproximadamente con las ecuaciones respectivas:

$$\Delta\theta_s = \frac{q \cdot A}{m \cdot c_p} \cdot t \cdot 3,6 \quad ^\circ C$$

$$\Delta\theta_l = \frac{q \cdot l}{m \cdot c_p} \cdot t \cdot 3,6 \quad ^\circ C$$

02.02.03. Cálculo del tiempo de enfriamiento y congelación de líquidos en reposo

Es imposible prevenir la congelación de un líquido en una tubería, aunque esté aislada, durante una unidad de tiempo arbitrariamente largo.

Tan pronto como el líquido (normalmente agua) en la tubería es estacionario, el proceso de enfriamiento comienza.

La densidad de flujo de calor q_l de un líquido estacionario es determinada por la energía almacenada en el líquido $c_{pw}m_w$ y en el material de la tubería $c_{pp}m_p$, así como por la entalpía requerida para transformar agua en hielo.

Si $c_{pp}m_p \ll c_{pw}m_w$ entonces $c_{pp}m_p$ puede ser ignorado.

El tiempo hasta el comienzo de la congelación se calcula de acuerdo a la siguiente expresión.

$$t_v = \frac{(\theta_{im} - \theta_a) \cdot (m_p \cdot c_{pp} + m_w \cdot c_{pw}) \cdot \ln \frac{(\theta_{im} - \theta_a)}{(\theta_{im} - \theta_a)}}{q_{wp} \cdot 3,6 \cdot l} h$$

donde

$$q_{wp} = \frac{\pi \cdot (\theta_{im} - \theta_a)}{\frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{D_e}{D_i} + \frac{1}{h_e \cdot D_e}} W/m$$

para

l es la longitud de la tubería en m

θ_{im} es la temperatura final media del líquido, °C

θ_{im} es la temperatura inicial media del líquido, en °C;

θ_a es la temperatura ambiente, en °C;

m_w es la masa de agua en kg

m_{pp} es la masa de la tubería en kg

c_p es la capacidad calorífica en kJ/(kg · K).

Si se establece una comparación entre tuberías aisladas y no aisladas, la influencia del coeficiente superficial de la tubería no aislada debe ser tomada en consideración. La densidad de flujo de calor de la tubería no aislada es dada por:

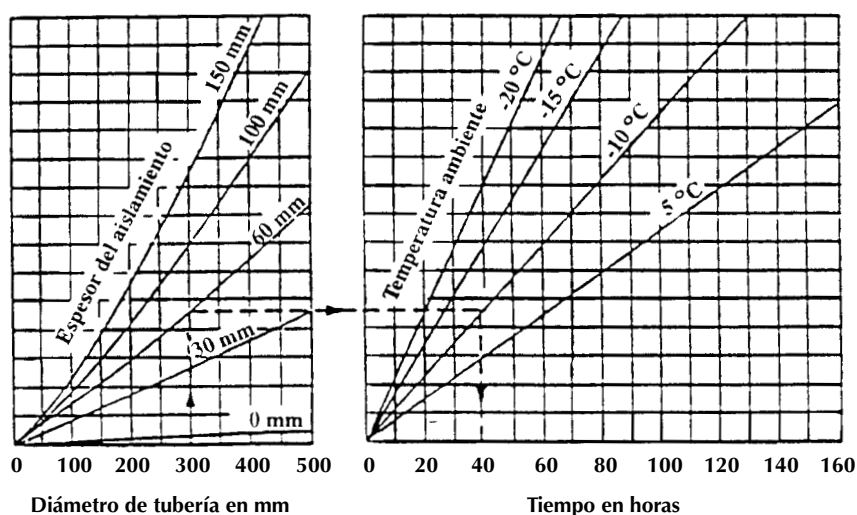
$$q_1 = h_e \cdot (\theta_{im} - \theta_a) \cdot \pi \cdot D_e$$

Como una aproximación el tiempo de enfriamiento viene dado por:

$$t_v = \frac{(\theta_{im} - \theta_{im}) \cdot (m_p \cdot c_{pp} + m_w \cdot c_{pw})}{q_{wp} \cdot 3,6 \cdot l} h$$

En tuberías aisladas, la resistencia térmica superficial exterior será despreciable para el cálculo de q . Puede utilizarse como método aproximado el método indicado en el Diagrama 2.

Diagrama 2: Determinación de los tiempos de enfriamiento de 5 °C a 0 °C



El máximo tiempo permitido de agua en tuberías de diferente diámetro y con distintos espesores de aislamiento para evitar la congelación del agua en una tubería. Temperatura inicial del agua = 5 °C, velocidad del aire = 5 m/s, $\lambda = 0,040 W/(m \cdot K)$, $h_e = 20 W/(m^2 \cdot K)$.

El tiempo de congelación es función del flujo de calor y del diámetro de la tubería. Viene dado por:

$$T_{fr} = \frac{f}{100} \cdot \frac{\rho_{ice} \cdot \pi \cdot D_i^2 \cdot h_{fr}}{q_{fr} \cdot 3,6 \cdot 4} \quad h$$

siendo una tubería aislada: $(-\theta_a)$

$$q_{fr} = \frac{\pi \cdot (-\theta_a)}{\frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{D_e}{D_i}} \quad W/m$$

donde

f es el porcentaje de agua transformado en hielo;

D_i es el diámetro de la tubería, en m;

h_{fr} es la entalpía específica (calor latente de congelación del agua) = 334 kJ/kg;

ρ_{ice} es la densidad de hielo a 0 °C = 920 kg/m³.

El porcentaje de agua transformado en hielo debe determinarse según las exigencias, por ejemplo, 25% ($f = 25$).

Ejemplo

Determinación del tiempo de enfriamiento hasta 0 °C y de congelación parcial del agua (25% del volumen).

Condiciones de contorno:

diámetro interior de la tubería:	$D_{ip} = 0,10 \text{ m}$
diámetro del aislamiento interior:	$D_i = 0,1079 \text{ m}$
temperatura del agua al comienzo del enfriamiento:	$\theta_{im} = +10 \text{ °C}$
temperatura ambiental:	$\theta_a = -10 \text{ °C}$
espesor del aislamiento:	$d = 0,100 \text{ m}$
conductividad térmica de la coquilla de vidrio ISOVER:	$\lambda = 0,03 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
calor del agua:	$m_w \cdot c_{pw} = 38,28 \text{ kJ/K}$
calor latente de congelación:	$h_{fr} = 334 \text{ kJ/kg}$
calor específico del agua:	$c_{pw} = 4,2 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$
densidad del hielo:	$\rho_{ice} = 920 \text{ kg/m}^3$

Se calcula el flujo de calor, despreciando el coeficiente superficial h_e .

$$q_{fr} = \frac{\pi \cdot 20}{\frac{1}{2 \cdot 0,03} \cdot \ln \frac{0,3079}{0,1079}} = 3,59 \text{ W/m}$$

El correspondiente tiempo de enfriamiento hasta el punto de congelación:

(Suponemos longitud de tubería de 1 m. Despreciamos $m_p \cdot c_{pp}$)

$$t_v = \frac{10 \cdot 38,28 \cdot \ln \frac{20}{10}}{3,59 \cdot 3,6} = 20,52 \text{ h}$$

Para el cálculo del tiempo de congelación debe obtenerse primero el valor del flujo de calor que en este caso: $q_{fr} = 1,8 \text{ W/m}$.

Luego:

$$t_{fr} = \frac{25}{100} \cdot \frac{920\pi \cdot (0,100)^2 \cdot 334}{1,8 \cdot 3,6 \cdot 4} = 93,1 \text{ h}$$

02.02.04. Tuberías enterradas

Tuberías enterradas con o sin aislamiento térmico ya sea en canales o directamente en el suelo.

El flujo térmico por metro lineal de una tubería enterrada se calcula con:

$$q_{l,E} = \frac{\theta_i - \theta_{sE}}{R_i + R_E} \text{ W/m}$$

donde

θ_i es la temperatura media en °C;

θ_{sE} es la temperatura superficial en °C del terreno;

R_E es la resistencia térmica en $(\text{m} \cdot \text{K})/\text{W}$ para una tubería en suelo homogéneo;

λ_E es la conductividad térmica del suelo en $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

h_E es la distancia entre el centro de la tubería y la superficie en m.

R_i es la resistencia térmica en $(\text{m} \cdot \text{K})/\text{W}$ para la tubería enterrada y aislada.

La resistencia térmica para el suelo (véase figura 9) se calcula de acuerdo con la ecuación.

$$R_E = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_E} \cdot \text{arcosh} \frac{2 \cdot h_E}{D_i} (\text{m} \cdot \text{K})/\text{W}$$

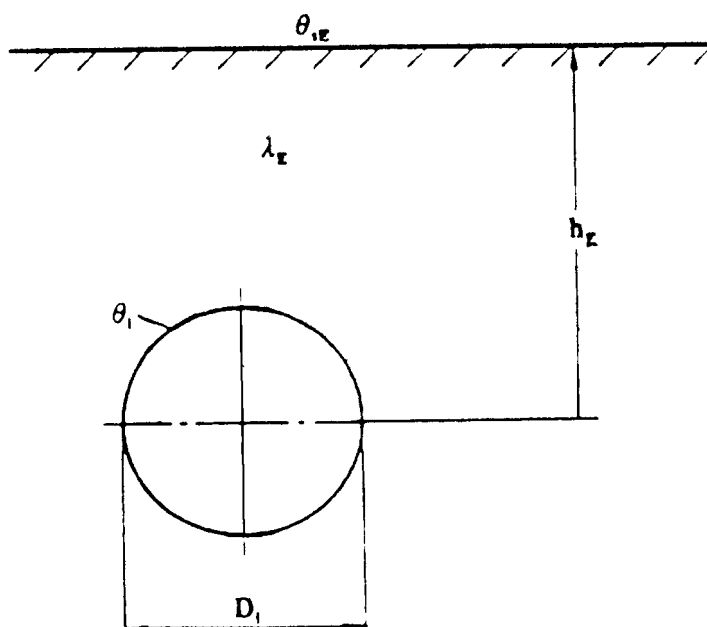


Fig. 9. Tubería enterrada sin aislamiento

La ecuación anterior se simplifica para $h_E/D_i > 2$

$$R_E = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_E} \cdot \ln \frac{4 \cdot h_E}{D_i} \quad (\text{m} \cdot \text{K})/\text{W}$$

Para tuberías enterradas con capas de aislamiento de acuerdo con la figura 10, la resistencia térmica se calcula de acuerdo con la ecuación

$$R_i = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{\lambda_j} \cdot \ln \frac{D_{ej}}{D_{ij}} \right) \quad (\text{m} \cdot \text{K})/\text{W}$$

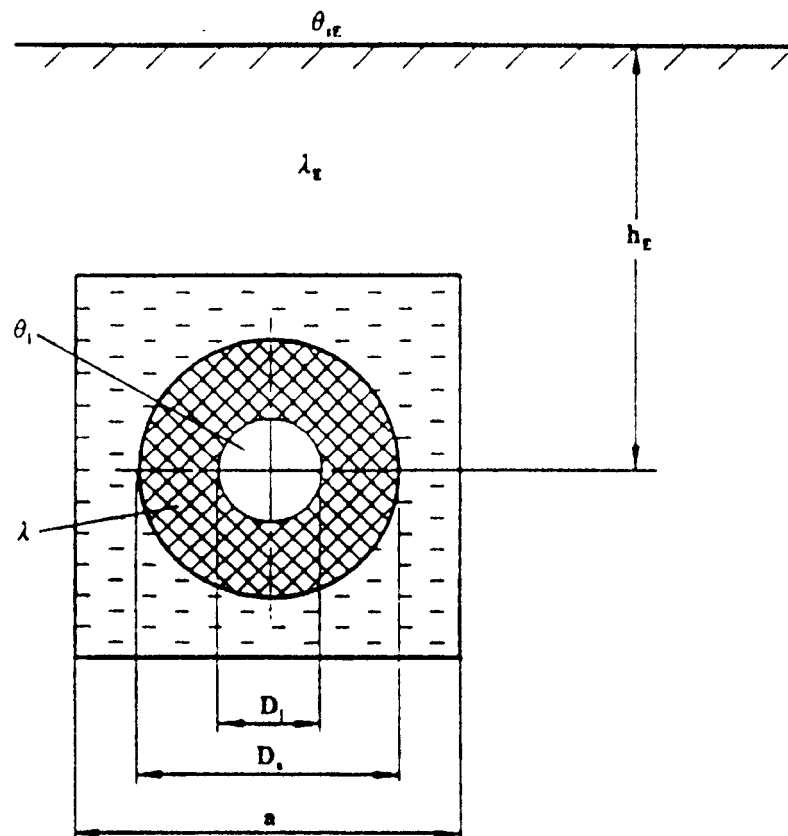


Fig. 10. Tubería enterrada compuesta de varias capas, por ejemplo de un material aislante y revestimiento asentada en un área preparada (por ejemplo arena) de sección cuadrada

La sección transversal de la capa exterior con una longitud equivalente (a) se toma en consideración con un diámetro equivalente.

$$D_n = 1,073 \cdot a \quad \text{en m}$$

El diámetro interior D_i es idéntico a D_o (donde $j = 1$). La resistencia térmica del terreno R_E resulta en este caso

$$R_E = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_E} \operatorname{arcosh} \frac{2 \cdot h_E}{D_n} \quad (\text{m} \cdot \text{K})/\text{W}$$

Existen métodos de cálculo para la determinación de la cantidad de flujo de calor y la temperatura del terreno para otras tuberías adyacentes.

En el caso de tuberías revestidas utilizadas normalmente, adyacentes entre sí, si $\lambda_i \ll \lambda_E$, normalmente es suficiente el cálculo como aproximación inicial, ya que los efectos mutuos pueden despreciarse.

Aislamiento térmico

02.01. Transmisión del calor

Cuando dos cuerpos se encuentran a temperaturas diferentes, se produce un flujo del cuerpo más caliente al más frío, hasta que se alcanza el equilibrio térmico.

El cambio de calor se produce de tres formas:

a) Por conducción

En este caso el calor se transmite de molécula a molécula sin cambio aparente de materia, por lo que esta forma de cambio de calor interesa esencialmente a los sólidos.

La elevación de temperatura aumenta la excitación de las partículas más elementales de la materia, transmitiéndose dicha excitación a las más próximas de su entorno y con ello su energía calorífica, continuándose el proceso en el cuerpo en cuestión de la zona más caliente a la más fría.

Por lógica se comprende que cuanto más denso, compacto y pesado es un cuerpo, más próximas están las moléculas entre sí y, por tanto, el cambio se realiza con mayor facilidad.

b) Por convección

Esta forma de propagación es propia de los fluidos (líquidos y gases).

Las moléculas en contacto con un cuerpo a temperatura más alta «A» se calientan, disminuyendo su densidad y desplazándose por gravedad. Si a su vez entran en contacto con un cuerpo más frío «B», ceden calor, aumentando su densidad y desplazándose en sentido contrario, formándose así un ciclo de convección.

c) Por radiación

La radiación está constituida por ondas electromagnéticas de diferentes longitudes. Mientras las dos formas de transmisión anteriores (conducción y convección) necesitan de un soporte material; la transmisión por radiación puede realizarse en el vacío.

Todos los cuerpos, incluso a temperaturas bajas, emiten calor por radiación y la cantidad de calor irradiado aumenta cuando se eleva la temperatura del cuerpo.

Por ello, cuando un cuerpo se encuentra en presencia de otro más caliente, absorbe más energía de la que emite y viceversa, siendo la cantidad transmitida la diferencia entre la emitida por ambos.

TABLA DE UNIDADES Y SÍMBOLOS

Símbolo	Cantidades físicas	Unidad
Φ	Cantidad de flujo de calor	W
q	Densidad de flujo de calor	W/m ²
q_l	Densidad lineal de flujo de calor	W/m
T	Temperatura absoluta	K
θ	Temperatura centígrado	°C
$\Delta\theta$	Diferencia de temperatura	°C
θ_d	Temperatura de rocío	°C
λ	Conductividad térmica	W/(m · K)
h	Coeficiente superficial de transmisión de calor	W/(m ² · K)
R	Resistencia térmica	(m ² · K)/W
R_l	Resistencia térmica lineal	(m · K)/W
R_{le}	Resistencia térmica superficial lineal	(m · K)/W
R_s	Resistencia superficial de transmisión de calor	(m ² · K)/W
U	Transmitancia térmica	W/(m ² · K)
U_l	Transmitancia térmica lineal	W/(m · K)
U_{sph}	Transmitancia térmica de la esfera	W/K
c_p	Calor específico a presión constante	kJ/(kg · K)
d	Espesor	m
D	Diámetro	m
a_r	Factor de temperatura	K ³
C_r	Coeficiente de radiación	W/(m ² · K ⁴)
ε	Emisividad	—
σ	Constante de Stefan Boltzman	W/(m ² · K ⁴)
H	Altura	m
l	Longitud	m
C'	Parámetro de espesor	m
P	Perímetro	m
A	Área	m ²
V	Volumen	m ³
v	Velocidad	m/s

02.01.01. Transmisión del calor por conducción en régimen estacionario

La conducción de calor normalmente describe la transmisión de calor a través de las moléculas en sólidos, líquidos y gases producido por un gradiente de temperatura.

En el cálculo se supone que el gradiente de temperatura existe en una sola dirección, y que la temperatura es constante en planos perpendiculares a ella.

La densidad de flujo de calor q para una pared en una dirección x perpendicular a su cara, viene dada por:

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \text{ W/m}^2$$

a) Para una pared plana de espesor « d »:

$$q = \frac{\lambda}{d} \cdot (\theta_{si} - \theta_{se}) \text{ W/m}^2$$

o bien:

$$q = \frac{(\theta_{si} - \theta_{se})}{R} \text{ W/m}^2$$

donde

λ es la conductividad térmica del material en $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

d es el espesor de la pared en m ;

θ_{si} es la temperatura de la superficie interior, en $^{\circ}\text{C}$;

θ_{se} es la temperatura de la superficie exterior, en $^{\circ}\text{C}$;

R es la resistencia térmica de la pared en $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$.

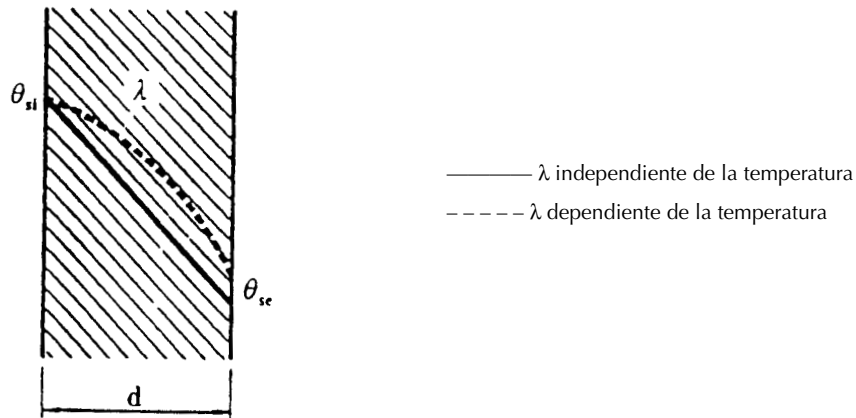


Fig. 1. Distribución de la temperatura en una pared de una sola capa.

Para una pared multicapa:

$$q = \frac{(\theta_{si} - \theta_{se})}{R'} \text{ W/m}^2$$

donde R' es la resistencia térmica de la pared multicapa:

$$R' = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_j} \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

NOTA – La prima indica que se refiere a una pared multicapa.

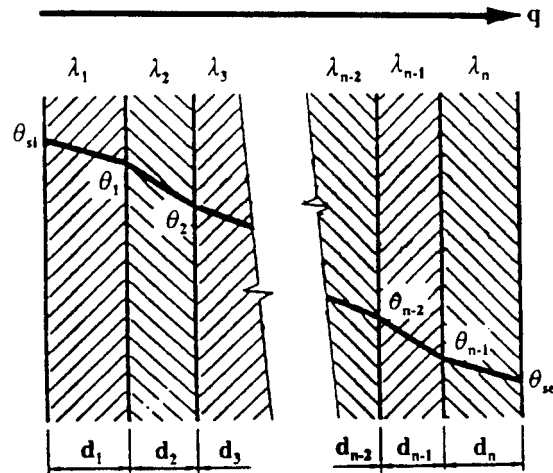


Fig. 2. Distribución de temperatura en una pared plana multicapa

b) La densidad lineal de flujo de calor q_l a través de una pared cilíndrica hueca de una sola capa es:

$$q_l = \frac{(\theta_{si} - \theta_{se})}{R_l} \text{ W/m}$$

donde R_l es la resistencia térmica lineal de una sola capa cilíndrica hueca, dada por:

$$R_l = \frac{\ln \frac{D_e}{D_i}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \text{ (m} \cdot \text{K)/W}$$

donde

D_e es el diámetro exterior de la capa;

D_i es el diámetro interior de la capa.

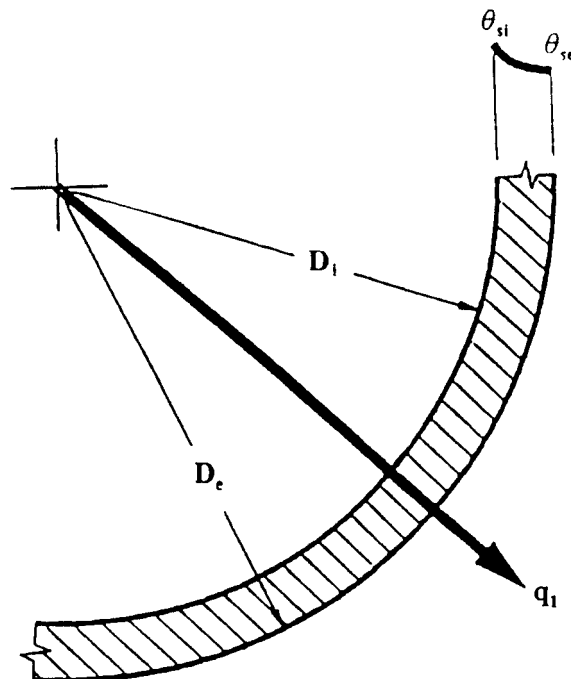


Fig. 3. Distribución de la temperatura en un elemento de forma cilíndrica y una sola capa

Para elementos cilíndricos multicapa:

$$q_l = \frac{(\theta_{si} - \theta_{se})}{R'_l} W/m$$

donde

$$R'_l = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{\lambda_j} \cdot \ln \frac{D_{ej}}{D_{ij}} \right) (m \cdot K)/W$$

con $D_1 = D_i$ y $D_n = D_e$

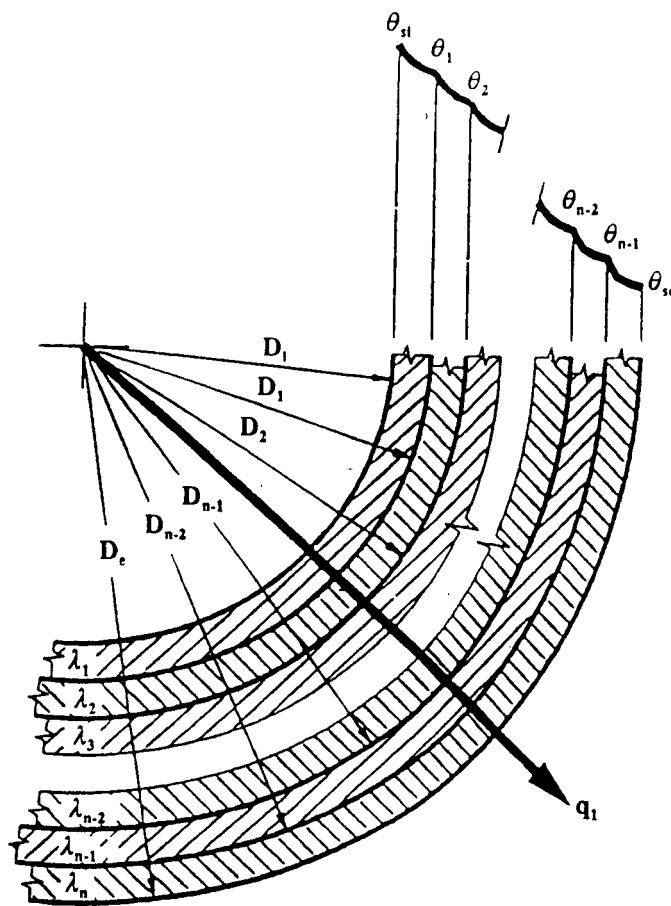


Fig. 4. Distribución de la temperatura en un elemento cilíndrico multicapa

c) La cantidad de flujo de calor a través de un elemento esférico de una sola capa es:

$$\Phi = \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{R_{sph}} W$$

donde R_{sph} es la resistencia térmica de una sola capa esférica en K/W y viene dado por:

$$R_{sph} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \left(\frac{1}{D_i} - \frac{1}{D_e} \right) K/W$$

donde

D_e es el diámetro exterior de la capa;

D_i es el diámetro interior de la capa.

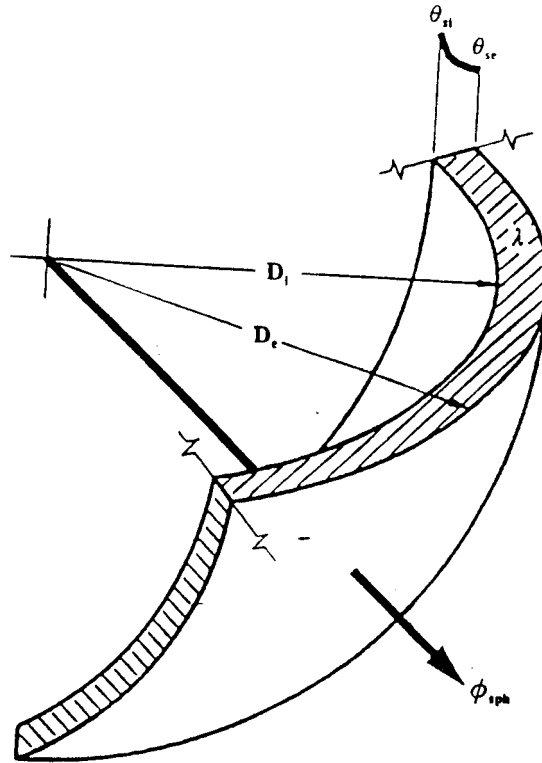


Fig. 5. Distribución de la temperatura en un elemento esférico de una sola capa

El flujo de calor para unas formas esféricas multicapa es:

$$\Phi = \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{R'_{sph}} W$$

donde

$$R'_{sph} = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j} \cdot \left(\frac{1}{D_{j-1}} - \frac{1}{D_j} \right) K/W$$

con $D_1 = D_i$ y $D_n = D_e$

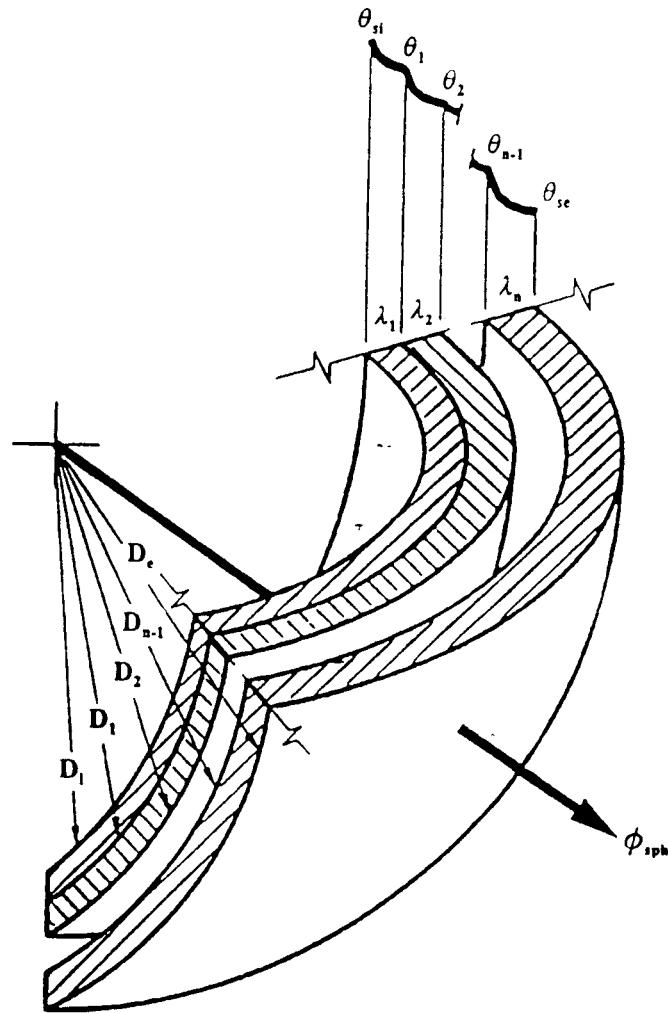


Fig. 6. Distribución de la temperatura en un elemento esférico multicapa

NOTA: El flujo de calor a través de la pared de un conducto con sección rectangular viene dado por:

$$q_d = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_d} \text{ W/m}$$

La resistencia térmica de la pared de tal conducto puede calcularse de forma aproximada mediante la fórmula:

$$R_d = \frac{2 \cdot d}{\lambda \cdot (P_e + P_i)} \text{ (m} \cdot \text{K)/W}$$

donde

P_i es el perímetro interior del conducto;

P_e es el perímetro exterior del conducto;

d es el espesor de la capa aislante.

$$P_e = P_i + (8 \cdot d)$$

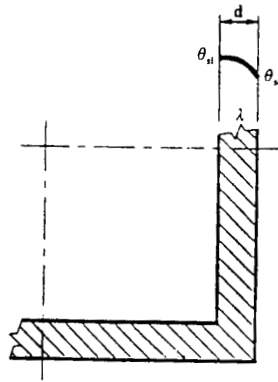


Fig. 7. Distribución de la temperatura en la pared de un conducto rectangular

02.01.02. Transmisión superficial del calor

En las instalaciones, las superficies sólidas mantienen una transferencia de calor con el medio fluido en contacto, donde se mezclan las formas convectivas y radiativas, especialmente cuando el medio fluido es gaseoso, especialmente el aire ambiente.

Por ello es necesario el estudio conjunto de ambos tipos de transferencias.

El coeficiente superficial de transmisión de calor h en $W/(m^2 \cdot K)$ se define como la cantidad de flujo de calor que pasa a través de una superficie en estado estacionario, dividida por la diferencia de temperatura entre dicha superficie y su entorno.

En el caso de instalaciones, existen dos tipos de coeficiente superficial según se trate de la cara interna h_i o la externa h_e .

En general, el coeficiente superficial de transmisión de calor viene dado por:

$$h = h_r + h_{cv} \quad W/(m^2 \cdot K)$$

donde

h_r es la parte radiativa del coeficiente superficial de transmisión de calor;

h_{cv} es la parte convectiva del coeficiente superficial de transmisión de calor.

02.01.02.01. Parte radiativa del coeficiente de superficie, h_r

El coeficiente superficial debido a radiación, h_r depende de la temperatura, del acabado superficial del material y de su emisividad. La emisividad se define como la relación entre el coeficiente de radiación C_r de la superficie y el coeficiente de radiación constante del cuerpo negro.

h_r está dado por:

$$h_r = a_r \cdot C_r \quad W/(m^2 \cdot K)$$

a_r es el factor temperatura. Está dado por:

$$a_r = \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2} \quad K^3$$

y puede ser aproximada hasta una diferencia de temperatura de 200 K por:

$$a_r \approx 4 \cdot (T_{av})^3 \cdot K^3$$

donde T_{av} es $0,5 \cdot (T_{superficial} + T_{ambiente})$ o superficial de una superficie radiante en la vecindad en K.

C_r es el coeficiente de radiación, en $W/(m^2 \cdot K^4)$

C_r está dado por:

$$C_r = \varepsilon \cdot \sigma$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

Superficie	ε	C_r $W/(m^2 \cdot K^4)$
aluminio brillante	0,05	$0,28 \cdot 10^{-8}$
aluminio oxidado	0,13	$0,74 \cdot 10^{-8}$
chapa de metal galvanizado, limpio	0,26	$1,47 \cdot 10^{-8}$
chapa de metal galvanizado, sucio	0,44	$2,49 \cdot 10^{-8}$
acero austenítico	0,15	$0,85 \cdot 10^{-8}$
plancha de aluminio-zinc	0,18	$1,02 \cdot 10^{-8}$
superficies no metálicas	0,94	$5,33 \cdot 10^{-8}$

02.01.02.02. Coeficiente superficial debido a convección, h_{cv} .

Este factor es dependiente de varios factores, tales como la velocidad del aire, la orientación de la superficie, el tipo de material, la diferencia de temperatura, etc.

Diferentes ecuaciones se utilizan en distintos países y no existen medios matemáticos exactos para seleccionar una ecuación inequívoca, por lo que los resultados pueden variar.

Para la parte convectiva, debe hacerse una distinción entre el coeficiente de superficie en el interior de los edificios y entre los que están al aire abierto.

Para tuberías y depósitos existe una diferencia entre el coeficiente interno, h_i y el coeficiente externo, h_e .

a) Interior de los edificios

En el interior de edificios, h_{cv} puede ser calculado para paredes planas verticales y tuberías verticales para convección laminar libre ($H^3 \cdot \Delta\theta \leq 10 \text{ m}^3 \cdot \text{K}$) por:

$$h_{cv} = 1,32 \sqrt[4]{\frac{\Delta\theta}{H}} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (a)$$

donde:

$\Delta\theta = (\theta_{se} - \theta_a)$ en K.

θ_{se} es la temperatura de la superficie de la pared, en K.

θ_a es la temperatura del aire ambiente dentro del edificio, en K.

H es la altura de la pared o el diámetro de la tubería, en m.

Para paredes planas verticales, tuberías verticales y en aproximación para grandes esferas dentro de edificios, la parte convectiva, h_{cv} para convección libre turbulenta ($H^3 \cdot \Delta\theta \geq 10 \text{ m}^3 \cdot \text{K}$) viene dada por:

$$h_{cv} = 1,74 \sqrt[3]{\Delta\theta} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (b)$$

Para tuberías horizontales dentro de los edificios, h_{cv} está dado por:

- flujo laminar ($D^3 \cdot \Delta\theta \leq 10 \text{ m}^3 \cdot \text{K}$)

$$h_{cv} = 1,25 \sqrt[4]{\frac{\Delta\theta}{D_e}} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (c)$$

- flujo turbulento ($D^3 \cdot \Delta\theta \geq 10 \text{ m}^3 \cdot \text{K}$)

$$h_{cv} = 1,21 \sqrt[3]{\Delta\theta} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (d)$$

Para el caso de superficies planas horizontales en el interior de edificios este coeficiente no es importante para la mayoría de los propósitos prácticos.

Todas las ecuaciones de la parte convectiva del coeficiente térmico de la superficie externa dentro de edificios es aplicable para situaciones con diferencias de temperatura entre superficie y aire menores de 100°C .

NOTA: Para conductos cilíndricos con un diámetro menor de $0,25 \text{ m}$, la parte convectiva del coeficiente externo puede ser calculado en buena aproximación por la ecuación (c).

Para mayores diámetros, por ejemplo $D_e > 0,25 \text{ m}$ la ecuación para paredes planas, (a) puede aplicarse. La exactitud respectiva es de 5% para diámetros mayores de $0,4 \text{ m}$ y 10% para diámetros $0,25 < D_e < 0,4 \text{ m}$. La ecuación (a) también se usa para conductos con sección rectangular, con una anchura y altura de similar magnitud.

b) Exterior de edificios

Para paredes planas verticales en el exterior de los edificios y por aproximación para grandes esferas, la parte convectiva, h_{cv} del coeficiente superficial está dado por:

- flujo laminar ($v \cdot H \leq 8 \text{ m}^2/\text{s}$)

$$h_{cv} = 3,96 \sqrt{\frac{v}{H}} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (e)$$

- flujo turbulento ($v \cdot H \geq 8 \text{ m}^2/\text{s}$)

$$h_{cv} = 5,76 \sqrt[5]{\frac{v^4}{H}} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (f)$$

Para tuberías horizontales y verticales que están en el exterior de edificios, se aplican las siguientes expresiones:

- flujo laminar ($v \cdot D_e \leq 8,55 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)

$$h_{cv} = \frac{8,1 \cdot 10^{-3}}{D_e} + 3,14 \sqrt{\frac{v}{D_e}} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (g)$$

- flujo turbulento ($v \cdot D_e \geq 8,55 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)

$$h_{cv} = 8,9 \frac{v^{0,9}}{D_e^{0,1}} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (h)$$

donde:

D_e es el diámetro exterior del aislamiento, en m.

v es la velocidad del viento, en m/s.

NOTA: Para el cálculo de la temperatura superficial, las expresiones (a) y (b) debieran ser usadas para la pared y la tubería en lugar de las fórmulas (e) y (h) cuando no está establecida la presencia de aire.

Para paredes horizontales en superficies al exterior, en caso de flujo laminar se aplicaría la ecuación (e) y la (f) en caso de flujo turbulento.

Para los líquidos en el interior de tuberías y depósitos, los coeficientes superficiales alcanzan valores muy elevados, en general superiores a $2.000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Lo mismo sucede con el vapor de agua saturado.

02.01.02.03. Aproximación para el cálculo de h_e

Para cálculos aproximados las siguientes ecuaciones para el coeficiente exterior, h_e en el interior de edificios pueden aplicarse.

Para tuberías horizontales:

$$h_e = C_A + 0,5 \Delta\theta \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Para tuberías verticales y paredes:

$$h_e = C_B + 0,09 \Delta\theta \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

usando los coeficientes de la siguientes tabla:

Superficie	C_A	C_B
aluminio brillante	2,5	2,7
aluminio oxidado	3,1	3,3
chapa de metal galvanizado, limpio	4,0	4,2
chapa de metal galvanizado, sucio	5,3	5,5
acero austenítico	3,2	3,4
plancha de aluminio-zinc	3,4	3,6
superficies no metálicas	8,5	8,7

Las anteriores ecuaciones son aplicables para tuberías horizontales en el rango de $D_e = 0,35 \text{ m}$ hasta 1 m y para tuberías verticales de todos los diámetros.

02.01.02.04. Resistencia térmica superficial R_{se}

La resistencia térmica superficial R_{se} es la inversa del coeficiente superficial h .

Para paredes planas, la resistencia térmica superficial $R_{se} (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ es:

$$R_{se} = \frac{1}{h_e} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Para paredes cilíndricas, la resistencia térmica superficial lineal R_{se} viene dada por:

$$R_{se} = \frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_e} \quad (\text{m} \cdot \text{K})/\text{W}$$

Para paredes esféricas, la resistencia térmica R_{sph} es:

$$R_{sphe} = \frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_e^2} \quad \text{K}/\text{W}$$

02.01.03. Transmitancia térmica.

La transmitancia térmica de una pared plana, U , es la cantidad de flujo de calor que en estado estacionario pasa por unidad de área, dividida por la diferencia de temperatura en los

alrededores de ambas caras de la pared. Análogas expresiones tendrían paredes cilíndricas y esféricas según:

$$U = \frac{q}{\theta_i - \theta_a} \quad W/(m^2 \cdot K) \quad U_l = \frac{q_l}{\theta_i - \theta_a} \quad W/(m \cdot K) \quad U_{sph} = \frac{q}{\theta_i - \theta_a} \quad W/K$$

Para paredes planas, la transmitancia térmica U puede calcularse:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + R + \frac{1}{h_e} = R_{si} + R + R_{se} \quad (m^2 \cdot K)/W$$

Para paredes cilíndricas, la transmitancia térmica lineal U_l puede calcularse:

$$\frac{1}{U_l} = \frac{1}{h_i \cdot \pi \cdot D_i} + R_l + \frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_e} = R_{li} + R_l + R_{le} \quad (m \cdot K)/W$$

Para paredes esféricas, la transmisión térmica U_{sph} viene dada por:

$$\frac{1}{U_{sph}} = \frac{1}{h_i \cdot \pi \cdot D_i^2} + R_{sph} + \frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot D_e^2} \quad K/W$$

Como se ha indicado antes, el valor de h_i es muy elevado, por lo que la resistencia superficial de líquidos en el interior de depósitos y tuberías R_{si} es pequeña y se puede despreciar. Para la resistencia superficial exterior R_{se} , se aplican las ecuaciones indicadas. Para conductos de aire es necesario considerar también el coeficiente superficial interior.

La inversa de la transmitancia térmica U es la resistencia térmica R_T para paredes planas y la resistencia térmica total lineal R_{Ti} para paredes cilíndricas y $R_{T sph}$ para paredes esféricas.

02.01.04. Distribución de temperaturas. Temperaturas superficiales.

02.01.04.01. Temperaturas intermedias. La ecuación general que nos da la pérdida de calor en un elemento multicapa puede escribirse de la siguiente forma general:

$$q = \frac{\theta_i - \theta_a}{R_T} \quad W/m^2$$

donde

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots R_n + R_{se} \quad (m^2 \cdot K)/W$$

$R_1, R_2 \dots$ son las resistencias térmicas de cada capa individual; R_{si}, R_{se} son las resistencias térmicas superficiales de las superficies interior y exterior.

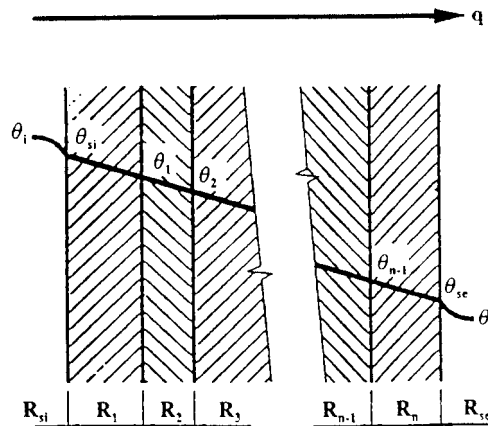


Fig. 8. Distribución de la temperatura en una pared plana multicapa, mostrando la dependencia lineal de la resistencia térmica superficial y las resistencias térmicas de cada capa independiente.

La relación entre la resistencia de cada capa o de la resistencia superficial respecto a la resistencia total dará una medida de la caída de temperatura en cada capa o superficie (K).

Para la obtención de los valores de R_1 , R_2 , R_{si} , R_{se} y R_T véanse las fórmulas anteriores.

$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{R_1}{R_T} \cdot (\theta_i - \theta_a)$$

$$\theta_i - \theta_{si} = \frac{R_{si}}{R_T} \cdot (\theta_i - \theta_a)$$

$$\theta_2 - \theta_3 = \frac{R_2}{R_T} \cdot (\theta_i - \theta_a)$$

$$\theta_{se} - \theta_a = \frac{R_{se}}{R_T} \cdot (\theta_i - \theta_a)$$

02.01.04.02. Temperatura superficial

Dado que no es posible conocer todos los parámetros que entran en juego, resulta difícil garantizar la temperatura superficial.

El cálculo de la temperatura superficial se usa normalmente para determinar un valor límite de la temperatura de la instalación por razones de seguridad.

El cálculo teórico puede variar en la práctica por distintas condiciones. Éstas pueden ser: la temperatura ambiente, el movimiento del aire, el estado de la superficie del aislamiento, el efecto radiativo de los cuerpos adyacentes, condiciones meteorológicas, ...

Para la obtención de la temperatura superficial partimos de la fórmula anterior; despreciando la R_{si} , como se ha indicado antes:

$$\theta_{se} = \theta_a + \frac{R_{se}}{R_T} (\theta_i - \theta_a) \text{ } ^\circ\text{C}$$

y al sustituir los valores de R_{se} y R_T , para una sola capa de aislante:

Paredes planas:

$$\theta_{se} = \theta_a + \frac{(\theta_i - \theta_a)}{\frac{h_e \cdot d}{\lambda} + 1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Paredes cilíndricas:

$$\theta_{se} = \theta_a + \frac{(\theta_i - \theta_a)}{\frac{h_e D_e}{2\lambda} \ln \frac{D_e}{D_i} + 1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

El diagrama nº 1 adjunto permite calcular directamente el espesor del aislamiento que resulta para una misma temperatura superficial, en una pared plana y en paredes cilíndricas de diversos diámetros y considerando el resto de condiciones iguales. Esto supone que el valor de la conductividad térmica, λ , debe ser igual en ambos tipos de aislante en el intervalo de temperaturas de trabajo para cada caso.

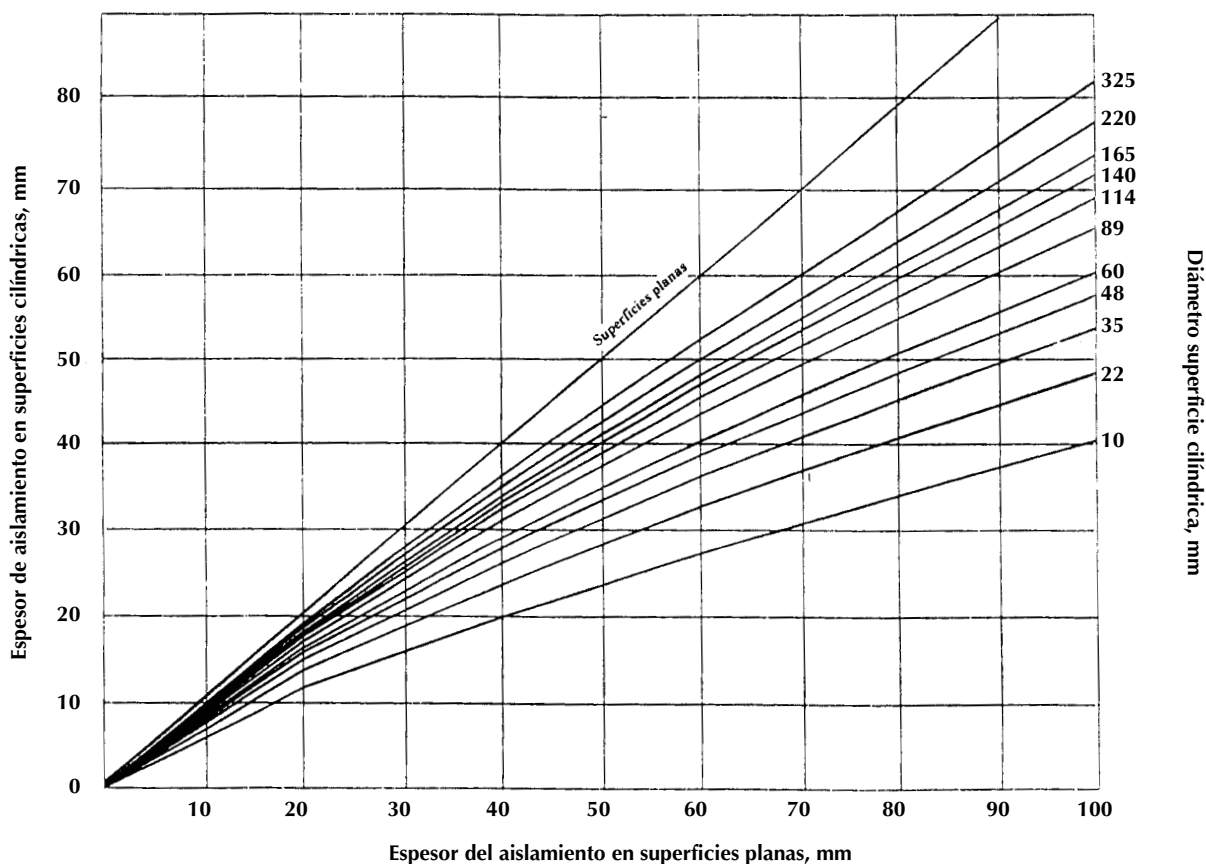


Diagrama 1: Espesores equivalentes entre paredes planas y cilíndricas.

A partir de la expresión para una tubería cilíndrica se obtiene a partir del diámetro y de un parámetro C' , entrando en el diagrama 2, el espesor de aislamiento para una tubería fijando la densidad del flujo de calor o la temperatura superficial de la misma.

Comentar que en esta fórmula se toma un valor constante de la conductividad térmica cuando esta es variable, y que por ello es una aproximación al comportamiento real.

Fijando el flujo de calor al exterior, q , en W/m^2 , resulta la siguiente expresión:

$$C'' = 2 \cdot \lambda \left[\left(\frac{(\theta_{im} - \theta_a)}{q} \right) - \frac{1}{h_e} \right]$$

donde $C'' = D_e \cdot \ln \frac{D_e}{D_i}$

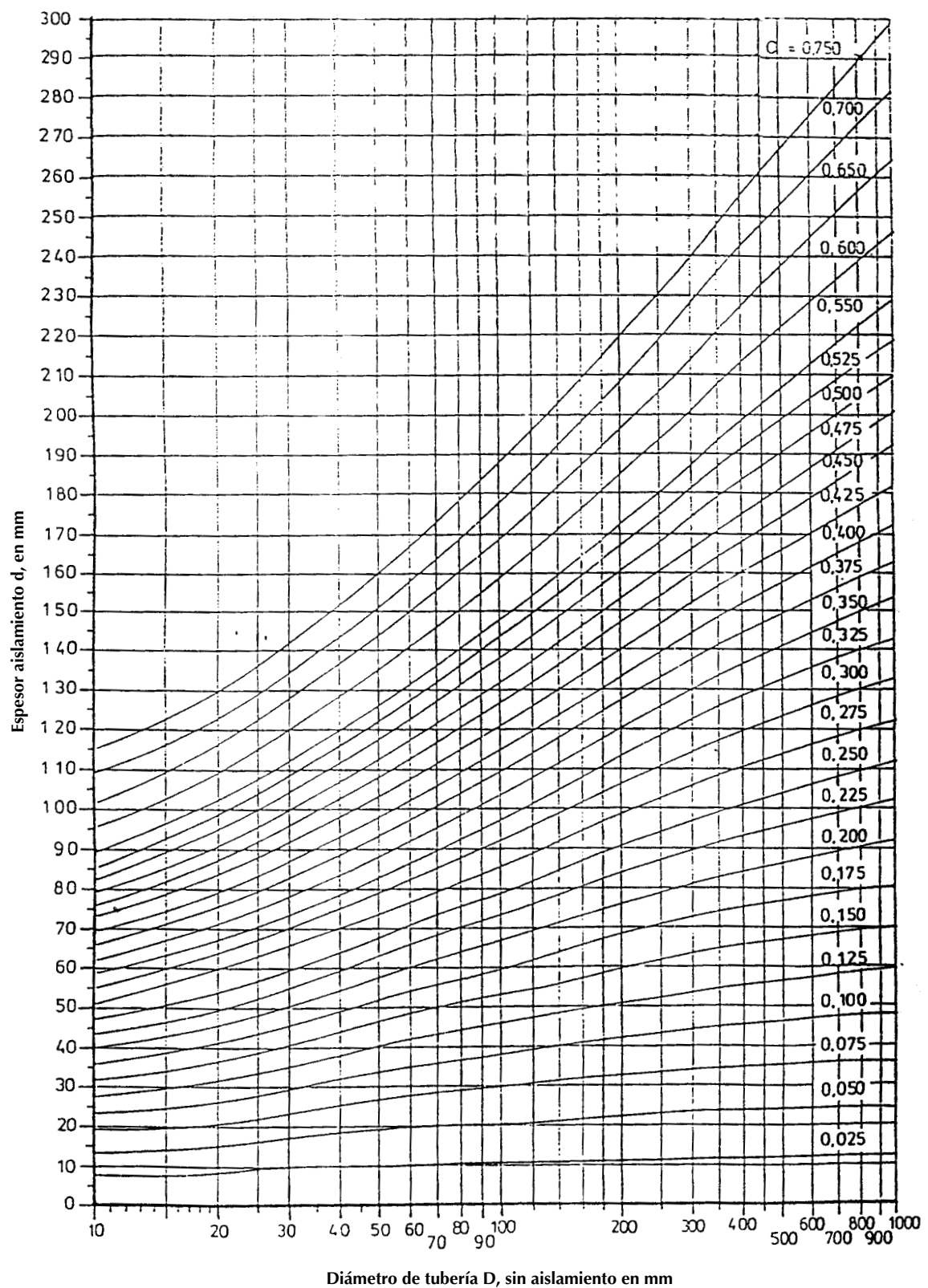
Análoga expresión se tiene si se fija la temperatura superficial externa, obteniendo:

$$C'' = \frac{2 \cdot \lambda}{h_e} \cdot \left[\left(\frac{(\theta_{im} - \theta_a)}{\theta_{se} - \theta_a} \right) - 1 \right]$$

donde $C'' = D_e \cdot \ln \frac{D_e}{D_i}$

Con las anteriores expresiones y en función del diámetro sin aislamiento de la tubería en mm obtenemos el espesor de aislamiento en mm.

Diagrama 2. Determinación del espesor de aislamiento de una tubería para una densidad de flujo de calor determinado o para una temperatura superficial fija.



Ejemplos de aplicación

a) Cálculo de espesores de aislamiento necesarios para una pared de doble capa de un horno

Para este ejemplo se dan las siguientes condiciones de contorno:

temperatura interior	$\theta_i = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$
temperatura exterior	$\theta_a = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
altura de la pared	$H = 4\text{ m}$
máxima densidad de flujo de calor	$q = 300\text{ W/m}^2$
coeficiente de radiación de la chapa galvanizada	$C_r = 1,47 \cdot 10^{-8}\text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$

Se asume que el aislamiento consta de los siguientes materiales:

1.^a capa: fibra de lana cerámica.

2.^a capa: panel de lana de roca (BX SPINTEX 643-100), con chapa galvanizada de revestimiento externo.

La temperatura intermedia entre las capas de aislamiento: $\theta_i = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$

Sin considerar el coeficiente superficial interior, el espesor de aislamiento de la primera capa de lana

cerámica se puede hallar con la ecuación $q = \frac{\lambda_i}{d_i} \cdot (\theta_i - \theta_i)$ con una conductividad térmica de $\lambda_i = 0,20\text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ a $\theta_{av} = \frac{850 + 650}{2} = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$d_i = 0,20 \cdot \frac{850 - 650}{300} = 0,133\text{ m}$$

Para calcular el espesor de la segunda capa de lana de roca, el coeficiente superficial h_{se} se calcula de la ecuación $h_r = a_r \cdot C_r$ estimando una temperatura superficial exterior $\theta_{se} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$a_r = \frac{(333)^4 - (293)^4}{333 - 293} = 1,23 \cdot 10^8\text{ K}^3$$

h_r viene dado por

$$h_r = 1,23 \cdot 10^8 \cdot 1,47 \cdot 10^{-8} = 1,81\text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Para calcular el término convectivo hay que establecer inicialmente si el flujo es laminar o turbulento.

Para ello se calcula el valor del término

$$H^3 \cdot \Delta\theta = 4^3 \cdot (60 - 20) = 2.560 \geq 10\text{ m}^3 \cdot \text{K}$$

con lo que tenemos flujo turbulento. Aplicamos entonces la ecuación:

$$h_{cv} = 1,74 \sqrt[3]{\Delta\theta} = 1,74 \sqrt[3]{40} = 5,95\text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

dando un coeficiente superficial exterior total:

$$h_e = 7,76\text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

La conductividad térmica del BX SPINTEX 643-100 entre $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ es $\lambda_2 = 0,109\text{ W/(m} \cdot \text{K)}$.

Para el cálculo del espesor del aislamiento de la segunda capa, se utiliza la ecuación:

$$q = \frac{(\theta_i - \theta_a)}{\frac{d_2}{\lambda} + \frac{1}{h_e}}\text{ W/m}^2$$

El aislamiento necesario d_2 viene dado por una simple transformación matemática:

$$d_2 = 0,109 \cdot \left(\frac{650 - 20}{300} - \frac{1}{7,76} \right) = 0,215 \text{ m}$$

El cálculo debe comprobarse con la densidad del índice de flujo de calor que resulta de aplicar este espesor:

$$q = \frac{850 - 20}{\frac{0,133}{0,20} + \frac{0,215}{0,109} + \frac{1}{7,76}} = 300 \text{ W/m}^2$$

El cálculo de la distribución de temperatura daría $\theta_1 = 649,5 \text{ }^\circ\text{C}$ y una temperatura superficial exterior de $\theta_{se} = 58,66 \text{ }^\circ\text{C}$, que está en concordancia con la hipótesis inicial.

b) Cantidad de flujo de calor y temperatura superficial de una tubería aislada

Para una tubería horizontal aislada de suministro de aire caliente con un revestimiento metálico, se debe calcular la densidad del flujo de calor y la temperatura superficial exterior.

Condiciones de contorno:

temperatura media (aire):	$\theta_1 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$
temperatura del aire exterior:	$\theta_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
diámetro de la tubería:	$D_i = 0,324 \text{ m}$
espesor de aislamiento (manta de lana de roca, SPINTEX 342G-70):	$d = 0,200 \text{ m}$
conductividad térmica del aislamiento entre $300 \text{ }^\circ\text{C}$ y $30 \text{ }^\circ\text{C}$	$\lambda = 0,052 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
coeficiente de radiación del revestimiento metálico del aislamiento:	$C_r = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$

Se calcula el coeficiente superficial exterior h_e con una temperatura superficial estimada de $\theta_{se} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

Para calcular el h_{cv} se establece inicialmente si el flujo es laminar o turbulento.

Para ello comprobamos si:

$$D^3 \cdot \Delta\theta = 0,724^3 \cdot 10 = 4,05 \leq 10 \text{ m}^3 \cdot \text{K}$$

entonces estamos trabajando en régimen laminar. Con los datos del problema tenemos que:

$$h_{cv} = 1,25 \sqrt[4]{\frac{\Delta\theta}{D_e}} = 1,25 \sqrt[4]{\frac{10}{0,724}} = 2,41 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$h_r = \frac{303^4 - 293^4}{303 - 293} \cdot 2,5 \cdot 10^{-8} = 2,64 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

luego

$$h_e = 2,41 + 2,64 = 5,04 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

No se considera el coeficiente superficial interior. La densidad lineal de flujo de calor se calcula entonces de acuerdo con las ecuaciones indicadas en el apartado 02.01.03.

$$q_1 = \frac{\pi \cdot (300 - 20)}{\frac{1}{2 \cdot 0,052} \cdot \ln \frac{0,724}{0,324} + \frac{1}{5,04 \cdot 0,724}} = 109,9 \text{ W/m}$$

La temperatura superficial exterior se halla entonces con la ecuación:

$$\theta_{se} = \theta_a + \frac{\theta_i - \theta_a}{\frac{h_e D_e}{2\lambda} \ln \frac{D_e}{D_i} + 1}$$

resultando:

$$\theta_{se} = 20 + \frac{300 - 20}{\frac{5,04 \cdot 0,724}{2 \cdot 0,052} \ln \frac{0,724}{0,324} + 1} = 29,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

que se admite como aceptable frente al término 30 °C estimado.

02.01.05. Prevención de condensación superficial

En instalaciones con temperatura superficial inferior a la de rocío del ambiente, se produce condensación.

El cálculo de un espesor de aislamiento adecuado permite que esta temperatura superficial sea igual o superior a la de rocío, lo que evitará las condensaciones.

Además de los datos para el cálculo de la temperatura superficial, necesitamos el de la humedad relativa del aire ambiente, que a veces no es conocida o sólo puede estimarse. Cuanto más elevada es la humedad relativa, más difícil es obtener un valor preciso, por lo que las fluctuaciones de humedad o de temperatura superficial son determinantes.

Mediante la Tabla 1 obtenemos la temperatura de rocío θ_d , que al sustituir, nos deja como incógnita el espesor d para superficies planas:

$$d \geq \frac{\lambda}{h_e} \cdot \frac{\theta_d - \theta_i}{\theta_a - \theta_d} \text{ m}$$

Para paredes cilíndricas el espesor ($D_e = D_i + 2d$) aparece dentro y fuera del logaritmo, por lo que es necesario emplear un sistema iterativo

$$\frac{D_e}{2} \ln \frac{D_e}{D_i} \geq \frac{\lambda (\theta_d - \theta_i)}{h_e (\theta_a - \theta_d)}$$

o bien recurrir a la tabla n.º 1 ya citada.

Tabla 1

Diferencia de temperatura admisible entre la superficie y el aire ambiente, para diferentes humedades relativas

Temperatura del aire ambiente °C	Humedades relativas de aire en %													
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
-20	—	10,4	9,1	8,0	7,0	6,0	5,2	4,5	3,7	2,9	2,3	1,7	1,1	0,5
-15	12,3	10,8	9,6	8,3	7,3	6,4	5,4	4,6	3,8	3,1	2,5	1,8	1,2	0,6
-10	12,9	11,3	9,9	8,7	7,6	6,6	5,7	4,8	3,9	3,2	2,5	1,8	1,2	0,6
-5	13,4	11,7	10,3	9,0	7,9	6,8	5,8	5,0	4,1	3,3	2,6	1,9	1,2	0,6
0	13,9	12,2	10,7	9,3	8,1	7,1	6,0	5,1	4,2	3,5	2,7	1,9	1,3	0,7
2	14,3	12,6	11,0	9,7	8,5	7,4	6,4	5,4	4,6	3,8	3,0	2,2	1,5	0,7
4	14,7	13,0	11,4	10,1	8,9	7,7	6,7	5,8	4,9	4,0	3,1	2,3	1,5	0,7
6	15,1	13,4	11,8	10,4	9,2	8,1	7,0	6,1	5,1	4,1	3,2	2,3	1,5	0,7
8	15,6	13,8	12,2	10,8	9,6	8,4	7,3	6,2	5,1	4,2	3,2	2,3	1,5	0,8
10	16,0	14,2	12,6	11,2	10,0	8,6	7,4	6,3	5,2	4,2	3,3	2,4	1,6	0,8
12	16,5	14,6	13,0	11,6	10,1	8,8	7,5	6,3	5,3	4,3	3,3	2,4	1,6	0,8
14	16,9	15,1	13,4	11,7	10,3	8,9	7,6	6,5	5,4	4,3	3,4	2,5	1,6	0,8
16	17,4	15,5	13,6	11,9	10,4	9,0	7,8	6,6	5,4	4,4	3,5	2,5	1,7	0,8
18	17,8	15,7	13,8	12,1	10,6	9,2	7,9	6,7	5,6	4,5	3,5	2,6	1,7	0,8
20	18,1	15,9	14,0	12,3	10,7	9,3	8,0	6,8	5,6	4,6	3,6	2,6	1,7	0,8
22	18,4	16,1	14,2	12,5	10,9	9,5	8,1	6,9	5,7	4,7	3,6	2,6	1,7	0,8
24	18,6	16,4	14,4	12,6	11,1	9,6	8,2	7,0	5,8	4,7	3,7	2,7	1,8	0,8
26	18,9	16,6	14,7	12,8	11,2	9,7	8,4	7,1	5,9	4,8	3,7	2,7	1,8	0,9
28	19,2	16,9	14,9	13,0	11,4	9,9	8,5	7,2	6,0	4,9	3,8	2,8	1,8	0,9
30	19,5	17,1	15,1	13,2	11,6	10,1	8,6	7,3	6,1	5,0	3,8	2,8	1,8	0,9
35	20,2	17,7	15,7	13,7	12,0	10,4	9,0	7,6	6,3	5,1	4,0	2,9	1,9	0,9
40	20,9	18,4	16,1	14,2	12,4	10,8	9,3	7,9	6,5	5,3	4,1	3,0	2,0	1,0
45	21,6	19,0	16,7	14,7	12,8	11,2	9,6	8,1	6,8	5,5	4,3	3,1	2,1	1,0
50	22,3	19,7	17,3	15,2	13,3	11,6	9,9	8,4	7,0	5,7	4,4	3,2	2,1	1,0

Ejemplo: A una temperatura ambiente de 20 °C y 70% de humedad relativa, la temperatura superficial mínima permitida o temperatura de rocío $\theta_d = 20 - 5,6 = 14,4$ °C

Ejemplo de aplicación

Prevención de la condensación superficial. Espesor de aislamiento requerido para evitar la condensación

Condiciones de contorno:

Temperatura interior:

$$\theta_i = -20 \text{ °C}$$

Temperatura ambiente:

$$\theta_a = 20 \text{ °C}$$

Diámetro de la tubería sin aislamiento (3 1/2"): $D_i = 0,1 \text{ m}$

$$D_i = 0,1 \text{ m}$$

Humedad relativa del ambiente:

$$\Phi = 75\%$$

Conductividad térmica de la coquilla de lana de vidrio Isover entre 20 °C y -20 °C

$$\lambda = 0,029 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

La Tabla 1 da una diferencia máxima de 4,6 °C, por lo que la temperatura de rocío es de $\theta_d = 15,4$ °C

El coeficiente superficial de transmisión de calor lo estimamos en:

$$h_e = 9 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Aplicando la fórmula del espesor de la superficie plana, tendremos:

$$d \geq \frac{0,029}{9} \cdot \frac{15,4 - (-20)}{4,6} = 0,025 \text{ m}$$

y para la tubería de 3 1/2" del Diagrama 1 obtenemos un valor de aproximadamente 25 mm de espesor (en este caso se elegiría coquilla de 30 mm de espesor que es el menor espesor comercial de este producto).

02.05. Técnicas generales de montaje del aislamiento

1. INTRODUCCIÓN

El aislamiento térmico trata de reducir las elevadas pérdidas térmicas a través del cerramiento de los equipos, depósitos y tuberías, etc, que debido a las sollicitaciones mecánicas y, o, a las elevadas temperaturas, se construyen de materiales metálicos con elevadas conductividades térmicas.

La reducción del flujo de calor aportada por el aislamiento, supone en primer lugar un ahorro importante en la partida correspondiente al costo energético, pero también posibilita el correcto desarrollo de los diferentes procesos industriales.

Otra parte importante a considerar como consecuencia de la reducción de las fugas térmicas, es el control de temperatura de la superficie exterior (cara fría), que puede suponer un riesgo para las personas (quemaduras), así como evitar su incidencia sobre la temperatura ambiente, cuando los equipos se sitúan en locales con presencia de personas (mantenimiento u otra actividad).

SAINT-GOBAIN CRISTALERÍA ha desarrollado un software gratuito específico denominado **Induver** para la definición del producto y espesor a emplear en cada caso.

Los materiales aislantes para esta aplicación, se presentan en forma de mantas o fieltros y en forma de paneles flexibles o semirrígidos, eligiendo en cada caso el más idóneo de acuerdo con la temperatura de trabajo y su mejor adaptabilidad para el montaje, en función de las características geométricas y dimensiones de los equipos.

Gama de productos estándar para esta aplicación:

Productos ISOVER

- Paneles: PI-156 y PI-256.
- Mantas o fieltros: fieltro TELISOL
- Productos ROCLAINÉ
- Paneles: BX Spintex-613-40, BX Spintex-623-70, BX Spintex-643-100 y Spintex HP-353-144
- Mantas o fieltros: Spintex 322-G-70, Spintex 342-G-100 y Spintex 342-G-125

Hay un elemento común que habría de tenerse en cuenta en todo tipo de montaje de aislamiento sobre chapa metálica: La preparación de la superficie a aislar. Ésta ha de estar, en la medida de lo posible, libre de humedades y de partículas sueltas provenientes del montaje (rebabas, restos de soldadura, tierra, etc.). Si se tratara de superficies de acero inoxidable, es conveniente también hacer que se aplique previamente un tratamiento anticorrosión adecuado, cuidando especialmente las bridas o zonas donde se prevea una interrupción del aislamiento y haya posibilidad de presencia de agua o humedades.

Se comentan a continuación los principales sistemas de montaje de las lanas minerales en las instalaciones industriales.

2. AISLAMIENTO TÉRMICO DE DEPÓSITOS DE ALMACENAMIENTO

Los tanques de almacenamiento se pueden aislar de diferentes maneras. Los sistemas más corrientes para el aislamiento de las envolventes son:

- a) Aislamiento con pernos
- b) Aislamiento con aros distanciadores

Para el aislamiento de envolventes de tanques con pernos hay que realizar el replanteo y colocación adecuado de los mismos.

Si la superficie de los tanques es metálica, los pernos se sujetan a la superficie del mismo mediante soldadura (figura 1a), si la superficie es de hormigón habrá que utilizar los sistemas de fijación que se consideren más adecuados para este tipo de material y características del tanque. (figura 1b).



Figura 1a: Aislamiento de la pared de un tanque metálico.



Figura 1b: Aislamiento de la pared de un tanque fabricado en hormigón.

Figura 1

La lana mineral se clavará en los mencionados pernos, colocando, si fuera necesario para asegurar el contacto del aislamiento con el depósito, una arandela metálica a presión. La chapa ondulada de recubrimiento se clavará igualmente en dichos pernos, asegurándose por medio de una tuerca y contratuerca y sus correspondientes arandelas. (Figura 1)

Las juntas verticales de la chapa de recubrimiento se solaparán una onda y las horizontales como mínimo cinco centímetros, siempre a favor de aguas. En aquellos sitios donde se prevea que vaya a combatir mucho el viento es conveniente, o bien aumentar estos criterios mínimos o usar masillas o juntas estancas adecuadas.

El sistema de aislamiento de envoltorio de tanques con aros distanciadores solamente se diferencia del anterior en que el soporte del aislamiento es una pletina metálica perimetral fijada a una patilla del mismo material y de longitud igual al espesor del aislamiento.

Esta patilla se fija a la superficie del tanque y se asegura por medio de un tornillo a la envoltorio, intercalando entre ambos elementos una pieza de cartón de lana cerámica de espesor adecuado según la temperatura.

La lana mineral se alojará entre los aros distanciadores y se asegurará mediante alambre galvanizado colocado en zigzag.

Finalmente se coloca la chapa ondulada de recubrimiento sujeta a los distanciadores por medio de tornillos autorroscantes con su correspondiente arandelas de plástico o teflón, según la temperatura de la superficie del tanque. (Fig. 2)

El aislamiento del techo de los tanques se realiza, en ambos casos, de forma muy parecida.

Se deberán soldar inicialmente, en sentido radial y en circunferencias concéntricas, unos distanciadores fabricados con pletinas metálicas de longitud igual al espesor del

aislamiento que se prevea colocar. Sobre los distanciadores se colocarán unas piezas en lana cerámica para evitar el puente térmico, y sobre éstas se apoyará un perfil U que servirá de soporte de la chapa de recubrimiento y dará al conjunto una resistencia al paso de personas. (Fig. 3)

La lana mineral se colocará entre los distanciadores, y el recubrimiento –siempre de chapa lisa– se atornillará a los mencionados distanciadores.

Las juntas de las chapas de recubrimiento se bordonearán convenientemente y se sellarán con una masilla adecuada para evitar la penetración del agua de la lluvia en el aislamiento.

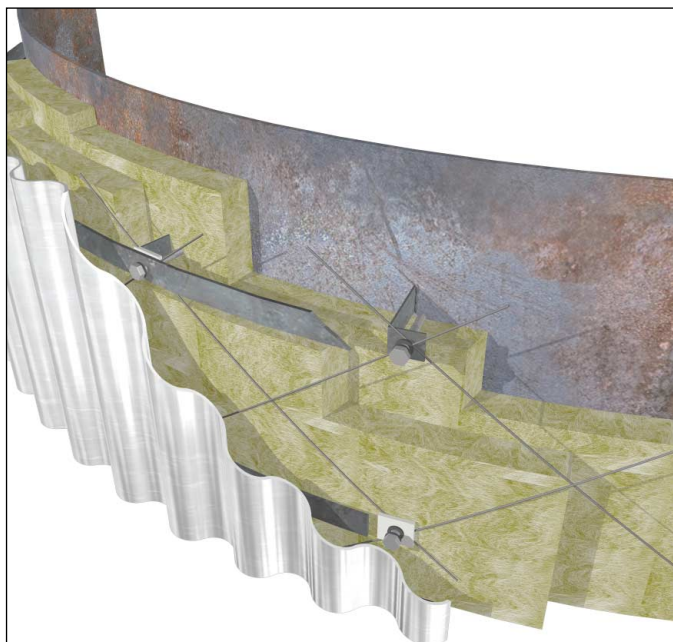


Figura 2: Aislamiento de la pared de un tanque con aros distanciadores.

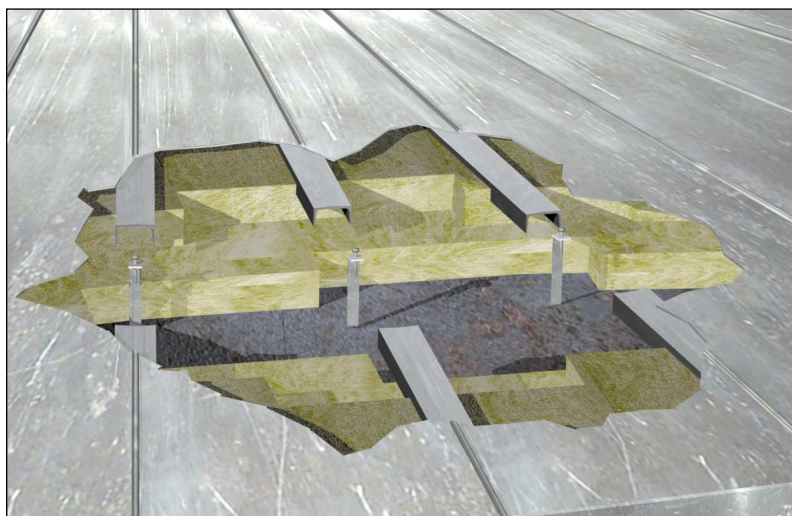


Figura 3: Aislamiento del techo de un tanque

3. AISLAMIENTO TÉRMICO DE EQUIPOS

Se considera como equipos aquellos elementos con paredes, techos y fondos, cuyas superficies pueden presentarse planas, curvas o irregulares, y cuya función puede ser la producción de vapor (generadores de vapor), toda clase de procesos industriales para producción de diferentes productos (destilación, etc.), en instalaciones de secado de productos orgánicos e inorgánicos, en equipos para almacenamiento, etc.

3.1.Montaje del material aislante

Aislamiento en forma de paneles se aplica preferentemente en equipos con superficies planas, o bien superficies curvas de gran radio de curvatura.

Se sueldan al cerramiento varillas de acero convenientemente distanciadas.

Los paneles se "pinchan" en las varillas y coincidiendo con cada capa se colocan arandelas de retención galvanizadas o "cobreadas". En función de las dimensiones del equipo y para superficies curvas, puede asegurarse la fijación del aislamiento mediante un fleje provisto de sistema de tensado.

A partir de una temperatura superior a 200 °C, el aislamiento debe colocarse en dos o más capas, a "cubrejuntas".

Aislamiento en forma de fieltros o mantas para equipos de pequeñas dimensiones especialmente con la superficie curva, se colocan directamente uniendo los bordes de la malla metálica mediante "cosido" con alambre de acero galvanizado o inoxidable (cuando se requiera).

Para equipos de mayores dimensiones, se sueldan al cerramiento varillas de acero distanciadas adecuadamente, clavando en ellas las mantas y colocando arandelas de retención galvanizadas o "cobreadas", coincidiendo con cada una de las capas.

A partir de una temperatura superior a 200 °C, el aislamiento debe colocarse en dos o más capas, a "cubrejuntas".

Para colocar el recubrimiento de protección exterior se sueldan pletinas en Z de acero (distanciadores) al cerramiento del equipo, cuyas dimensiones y distribución dependerán del espesor de aislamiento previsto y solicitaciones mecánicas (viento).

A las pletinas se fijan llantas de acero, mediante tornillos auto-roscantes, o de rosca métrica con tuercas auto-blocantes.

Entre las pletinas y llantas, se intercala una junta de material aislante rígido para reducir el "puente térmico", especialmente para temperaturas superiores a 100 °C. Un material aislante idóneo para esta aplicación, es el panel rígido de lana cerámica tipo Keranap en espesores de 3 a 9 mm, según la temperatura de trabajo del equipo.

Cuando por las características del equipo no puedan realizarse soldaduras, para la fijación del aislamiento y revestimiento, se colocan "collares" contruidos con pletinas de acero al carbono o inoxidable, con los extremos plegados y perforados para fijarlos y tensarlos, mediante tornillos de rosca métrica y tuercas auto-blocantes. Los "collares" o "zunchos" incorporan mediante soldadura varillas preferiblemente

roscadas que atraviesan el material aislante y, posteriormente se fijan las llantas mediante doble tuerca y arandela metálica, que permita intercalar la junta aislante para reducir el "puente térmico".

También puede incorporarse la junta de material aislante, entre el cerramiento del equipo y el "collar" o "zuncho".

El revestimiento exterior de chapa de aluminio, acero galvanizado o lacado, o inoxidable, se fija a las llantas mediante tornillos auto-taladrantes. Coincidiendo con las juntas, las chapas se presentan "bordoneadas", para evitar la penetración del agua de lluvia al aislamiento.

En equipos con faldones, patas, etc., se deberá prolongar sobre éstos el aislamiento en una longitud mínima de cuatro veces el espesor requerido en cada caso.



Figura 4: Aislamiento del registro de un tanque.

Si se necesitaran aislar las puertas de inspección, registros, bocas de hombre, bridas ciegas, etc., se hará del tipo desmontable, por medio de cajas metálicas divididas en dos o más partes, que incorporan el aislamiento en su interior. Estas cajas se fijan con cierres rápidos de presión para facilitar su apertura en operaciones de mantenimiento. (Fig. 4)

3.2. Espesores mínimos de aislamiento

En la tabla 5 se indican los espesores aconsejables de aplicación utilizando productos ISOVER, en función de las temperaturas de trabajo más usuales y del rendimiento óptimo del material aislante

Dichos productos pueden aplicarse a temperaturas superiores a las de los márgenes establecidos en la Tabla, como se especifica en las fichas técnicas correspondientes.

TEMPERATURA DE TRABAJO EQUIPO (°C)	ESPESOR AISLAMIENTO (mm)	MATERIAL AISLANTE	
		PANELES	MANTAS
100 150	70 90	PI-156	Telisol
200 250 300	110 120 140	PI-256	

Tabla 5: espesores aconsejables para productos ISOVER

En la tabla 6 se indican los espesores aconsejables de aplicación utilizando productos ROCLAINE, en función de las temperaturas de trabajo más usuales y del rendimiento óptimo del material aislante. Dichos productos pueden aplicarse a temperaturas superiores a las de los márgenes establecidos en la Tabla, como se especifica en las fichas técnicas correspondientes.

TEMPERATURA DE TRABAJO EQUIPO (°C)	ESPESOR AISLAMIENTO (mm)	MATERIAL AISLANTE	
		PANELES	MANTAS
100 150 200	70 90 110	BX SP-613-40	SP 322-G-70
250 300	120 140	BX SP-632-70	
350 400 450	160 180 200	BX SP-643-100	SP 342-G-100
500 550	220 240	SP HP-353-144	SP 342-G-125

Tabla 6: espesores aconsejables para productos ROCLAINE

En cualquier caso, el cálculo del espesor debe ser establecido cuidadosamente en función de determinados parámetros, tales como el tipo de revestimiento, las temperaturas exteriores, las velocidades de los vientos, etc.

Como se indicaba al inicio de este capítulo, SAINT GOBAIN CRISTALERÍA dispone de un software gratuito, específico para el cálculo de los espesores con el nombre de **Induver**.

3.3. Pérdidas globales de equipos

La valoración de las pérdidas globales es compleja y en todo caso depende de varios factores a destacar:

- De la correcta instalación del material aislante (especialmente cuando se aplica en una sola capa, debiendo cuidar las juntas entre paneles o mantas).

- b) De la protección de los "puentes térmicos", en el sistema de fijación de la chapa de revestimiento.
- c) De la temperatura de trabajo del equipo. A medida que aumenta la temperatura, deben considerarse en mayor medida los puntos a) y b).

En todo caso y en función de la temperatura (considerando una correcta instalación), los valores que se calculen en cada caso deben incrementarse entre un 10% y un 30 %.

3.4. Espesor rentable o económicos del aislamiento

Dicho espesor corresponde al valor mínimo de la suma de dos partidas:

Partida 1. Gasto del aislamiento o calorifugado constituido por el costo del material aislante, de los sistemas de fijación del mismo, del revestimiento o protección y su sistema de fijación, incluido el costo de la puesta en obra y montaje (valor que se incrementa al aumentar el espesor de aislamiento), y del correspondiente a los gastos de amortización.

Partida 2. Gasto correspondiente al coste de la energía como consecuencia de las pérdidas térmicas producidas en los cerramientos del equipo, valor que se reduce a medida que aumenta el espesor del aislamiento.

4. Aislamiento térmico de tuberías

Aislamiento térmico de tuberías (en general de sección circular) o conductos (sección cuadrada o rectangular) para transporte de fluidos en estado líquido, gas o vapor.

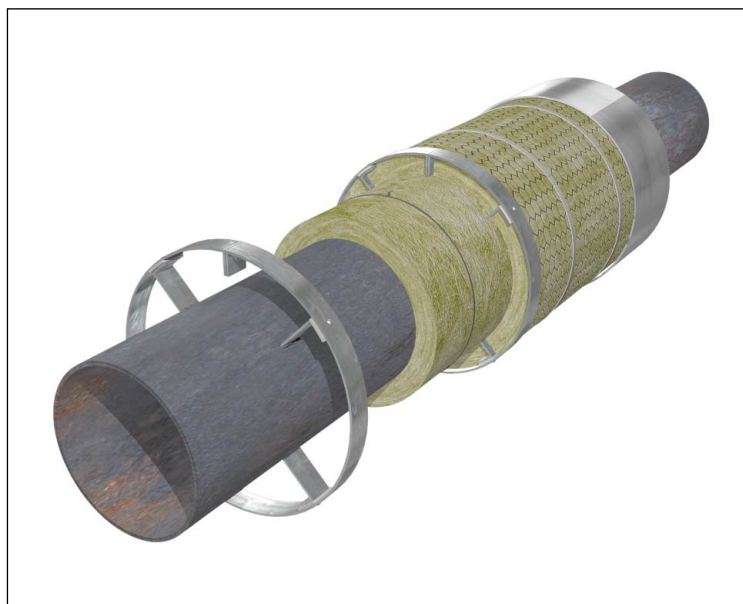


Figura 7: Aislamiento de una tubería con coquilla y manta de lana de roca.

4.a. Aislamiento en forma Coquillas

El corte practicado longitudinalmente en la generatriz, facilita la colocación de las coquillas, asegurando su fijación con una lazada de alambre de acero dulce galvanizado.

La temperatura del fluido y el diámetro de la tubería, permiten la posibilidad de colocar las Coquillas a doble capa.

A partir de una temperatura superior a 200 °C, el aislamiento debe colocarse en dos o más capas a "cubrejuntas", bien utilizando dos Coquillas o una Coquilla y una o más mantas. (figura 7).

4.b. Aislamiento en forma de fieltros o mantas

Se corta la manta en una dimensión igual a "diámetro exterior tubería + doble del espesor de la manta" y se coloca sobre la tubería, "cosiendo" los bordes de la manta por la malla, con alambre de acero dulce galvanizado.

Para tuberías con un diámetro superior a 250 mm, debe reforzarse la fijación de la manta mediante lazadas de alambre, o flejes de acero galvanizado con sistema de tensado.

A partir de una temperatura superior a 200 °C, el aislamiento debe colocarse en dos o más capas, a "cubrejuntas".

4.c. Colocación del revestimiento exterior (protección del aislamiento)

Para el revestimiento del aislamiento puede utilizarse chapa de aluminio de espesor según diámetro, chapa galvanizada o lacada y chapa de acero inoxidable.

Para diámetros de hasta $500 \div 600$ mm, la chapa de revestimiento se "ata" en las juntas longitudinales y transversales, mediante tornillos de rosca chapa, presentándose los bordes de junta transversal y uno de los bordes de junta longitudinal "bordoneados".

Para diámetros superiores, se fija una llanta de acero de 40×3 mm. tensada mediante tuercas auto-blo-cantes intercalando una junta aislante con la tubería (fieltro de lana cerámica tipo Pyronap de $3 \div 6$ mm según temperatura de trabajo), que incorpora distanciadores en Z de 40×3 mm, soldados a la llanta. Sobre los distanciadores se fija una llanta exterior de 40×3 mm, que sirve de soporte y fijación de la chapa de revestimiento.

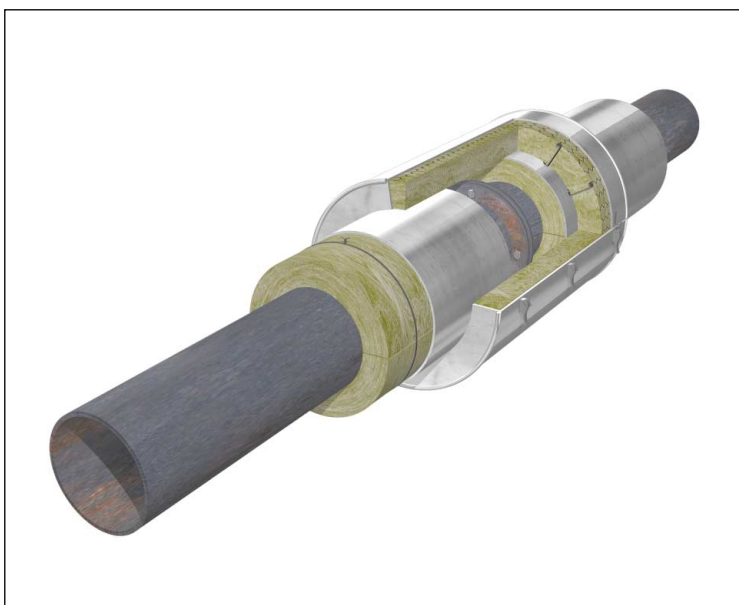


Figura 8: Aislamiento desmontable de una brida

4.d. Caso particular de tuberías de acompañamiento

Se reviste la tubería principal y las de acompañamiento con una malla electro-soldada galvanizada o inoxidable, "cosiendo" en las juntas con alambre de acero galvanizado o inoxidable.

Como aislamiento se utiliza manta o fieltro SP (SPINTEX), cosiendo los bordes longitudinales y transversales, con alambre galvanizado y reforzando con lazadas de alambre o flejes provistos de sistema de tensado.

Para grandes diámetros de la tubería principal, se colocan flejes de 40×3 mm tensándolos y soldando los extremos, sobre los que se fija la chapa de revestimiento exterior con tornillos de rosca chapa.

4.e. Bridas y válvulas

Para el aislamiento de bridas y válvulas, se utiliza un encapsulado desmontable dividido en dos mitades, construido con chapa de aluminio de 0,8 mm. y perfiles en U de refuerzo de acero galvanizado o aluminio, revistiéndolo por la cara interior con manta SP, la cual se fija mediante piezas en Z y pletinas. (figura 8).

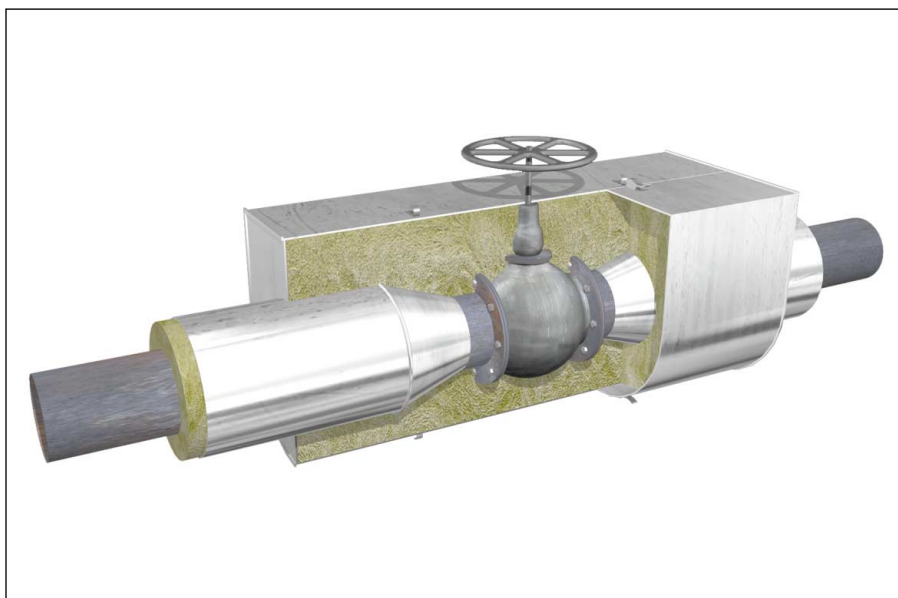


Figura 9: Aislamiento desmontable de una válvula

En las juntas transversales y longitudinales, así como en la junta con el calorifugado de la tubería, se intercala un fieltro de lana cerámica tipo Pyronap. Ambas piezas del "encapsulado", se fijan mediante cuatro cierres de presión. (figura 9)

4.f. Codos

Cuando se trate de tuberías aisladas con coquillas de lana mineral, los codos se calorifugarán cortando las coquillas en segmentos ajustables y afianzando cada segmento mediante una lazada de alambre. (Fig. 10).

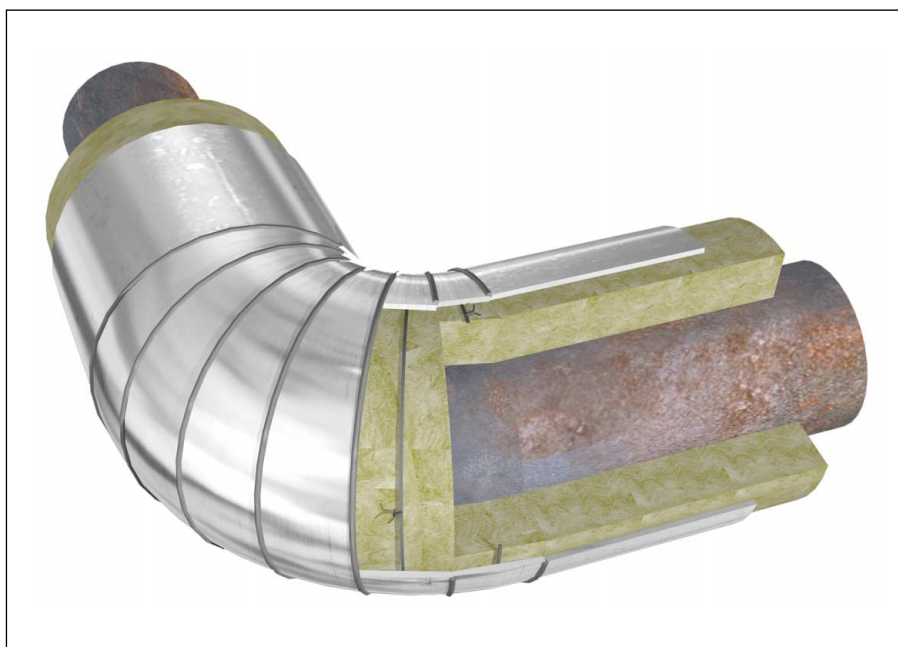


Figura 10: Aislamiento de un codo con coquilla.

En el caso de tuberías aisladas con mantas de lana mineral se debe realizar el aislamiento mediante piezas debidamente cortadas de las mantas por medio de plantillas y fijando firmemente el conjunto mediante el entrelazado de la malla de la manta con los tramos contiguos.

El recubrimiento exterior se realizará mediante segmentos de chapa engatillados entre sí. Estos segmentos se prefabricarán en taller y se montarán en obra.

4.g. Aislamiento de frío

Estos montajes se diferencian primordialmente de los anteriores en la constitución de una barrera de vapor eficiente.

Existen en el mercado diversos productos que garantizan esta barrera perfecta de vapor. Los hay incluso autoadhesivos, que permiten la colocación directa sin intervención de masillas, cintas, etc.

Todas las otras operaciones son iguales a las descritas anteriormente para, si bien ha de tenerse la precaución estricta de no perforar la barrera de vapor de la envolvente con los tornillos, remaches, etc., ya que el aislamiento depende, en su totalidad, del perfecto funcionamiento de la barrera de vapor colocada.

4.1. Espesores óptimos de aislamiento

En la tabla 11 se indican los espesores aconsejables de aplicación utilizando productos ISOVER, en función de las temperaturas de trabajo más usuales, diámetro de la tubería y del rendimiento óptimo del material aislante.

Dichos productos pueden aplicarse a temperaturas superiores a las de los márgenes establecidos en la Tabla, como se especifica en las fichas técnicas correspondientes.

TEMPERATURA °C	100	150	200	250	300
DIÁMETRO TUBERÍA	ESPEORES DE AISLAMIENTO (mm)				
1"	30	30	40	40	50
1 1/2"	30	30	40	50	60
2"	30	40	40	50	60
2 1/2"	40	40	50	60	70
3"	40	50	50	60	70
4"	40	50	60	70	80
6"	50	60	70	80	90
8"	50	60	70	80	90
10"	60	70	80	90	90
12"	60	70	80	90	110
14"	60	70	80	100	110
16"	60	70	90	100	120
18"	60	80	90	100	120
20"	70	80	90	110	120
22"	70	80	100	110	130
24"	70	80	100	110	130

Figura 11: Espesores mínimos aconsejados para tuberías aisladas con productos de lana de vidrio ISOVER.

En la figura 12 se indican los espesores aconsejables de aplicación utilizando productos ROCLAINE, en función de las temperaturas de trabajo más usuales, diámetro de la tubería y del rendimiento óptimo del material aislante.

Dichos productos pueden aplicarse a temperaturas superiores a las de los márgenes establecidos en la Tabla, como se especifica en las fichas técnicas correspondientes.

TEMPERATURA °C	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
DIÁMETRO TUBERÍA	ESPEORES DE AISLAMIENTO (mm)									
1"	30	30	40	40	50	60	60	70	80	90
1 1/2"	30	30	40	50	60	60	70	70	80	90
2"	30	40	40	50	60	70	80	80	90	100
2 1/2"	40	40	50	60	70	70	80	90	100	110
3"	40	50	50	60	70	70	80	90	110	120
4"	40	50	60	70	80	80	90	100	120	130
6"	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
8"	50	60	70	80	90	110	120	130	140	160
10"	60	70	80	90	90	110	120	130	150	170
12"	60	70	80	90	110	120	130	140	160	180
14"	60	70	80	100	110	120	140	150	170	180
16"	60	70	90	100	120	120	140	150	170	190
18"	60	80	90	100	120	130	140	160	170	190
20"	70	80	90	110	120	130	150	160	180	200
22"	70	80	100	110	130	140	150	170	180	200
24"	70	80	100	110	130	140	150	180	190	210
Producto	Coquilla ROCLAINE(*) Manta SP 322-G-70				Coquilla ROCLAINE(*) Manta SP 342-G-100			Coquilla ROCLAINE(*) Manta SP 342-G-125		

(*) Diámetro nominal hasta 10". Espesor de 30 a 80 mm.

Figura 12: Espesores mínimos aconsejados para tuberías aisladas con productos de lana de roca ROCLAINE.

5. DETALLES DE MONTAJES DE AISLAMIENTO EN LA INDUSTRIA:

Se describen a continuación distintos montajes entre los más usuales en el aislamiento industrial (tuberías y equipos). Estos montajes están avalados por largos años de experiencia de empresas profesionales, que son las únicas que pueden garantizar la resolución de los múltiples casos, figuras y problemas que de hecho se dan en una instalación industrial.

5.1. Aislamiento de tuberías

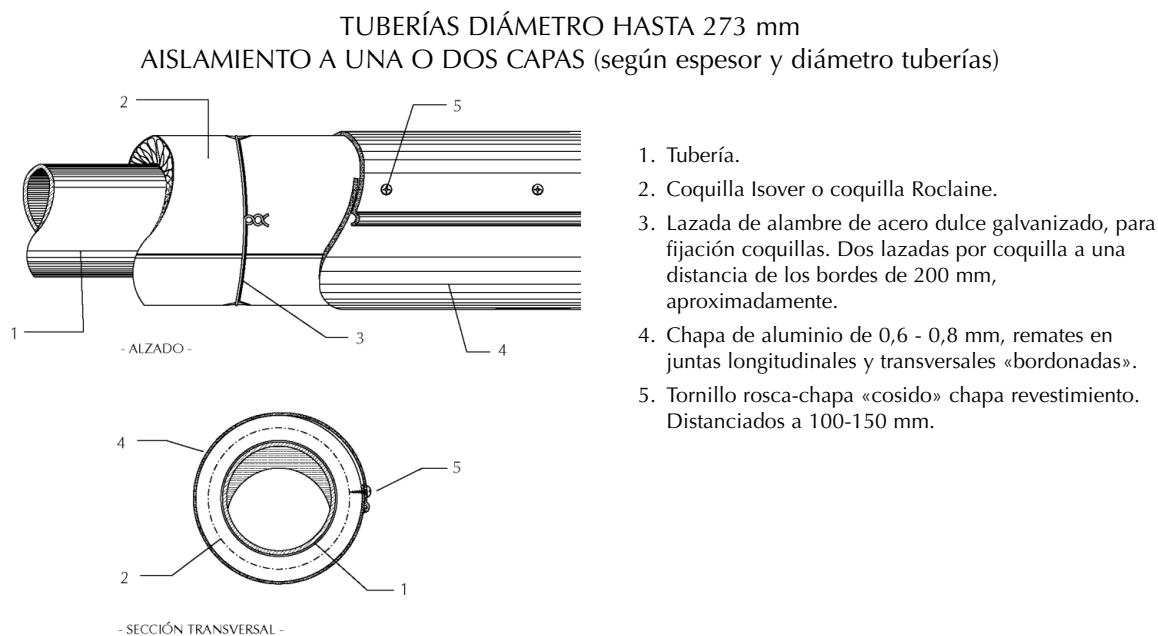


Figura A: Aislamiento de una tubería.

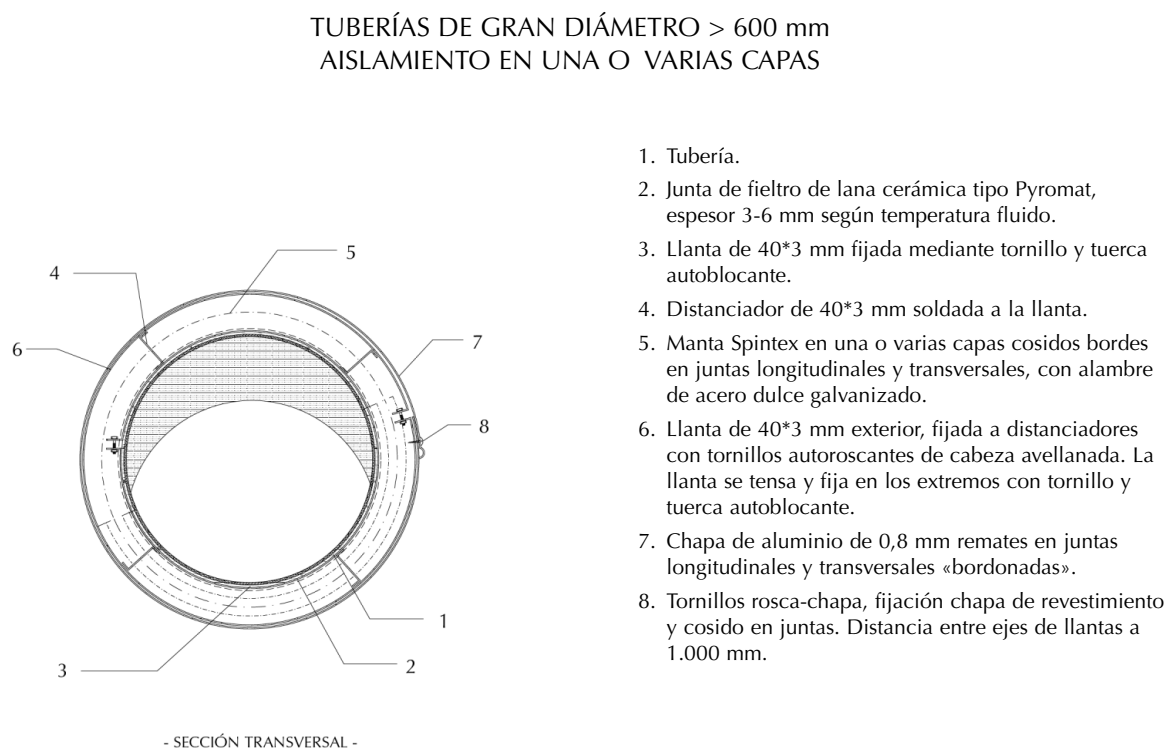
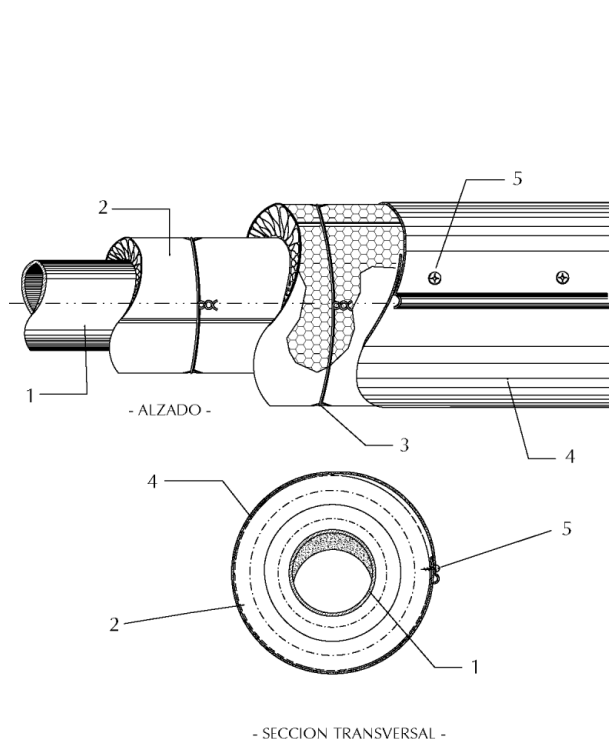


Figura B: Aislamiento de una tubería de mediano diámetro.

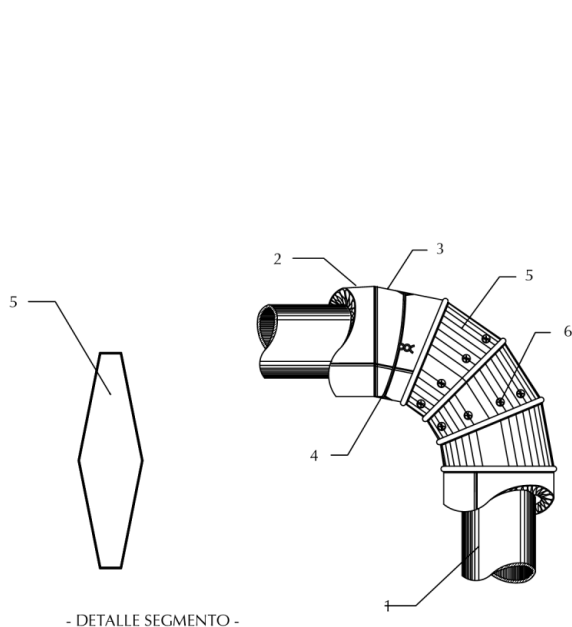
TUBERÍAS DIÁMETRO HASTA 500 - 600 mm AISLAMIENTO A UNA O DOS CAPAS



1. Tubería.
2. Junta de fieltro de lana cerámica tipo Pyromat, espesor 3-6 mm según temperatura fluido.
3. Llanta de 40*3 mm fijada mediante tornillo y tuerca autoblocante.
4. Distanciador de 40*3 mm soldada a la llanta.
5. Manta Spintex en una o varias capas cosidos bordes en juntas longitudinales y transversales, con alambre de acero dulce galvanizado.
6. Llanta de 40*3 mm exterior, fijada a distanciadores con tornillos autoroscantes de cabeza avellanada. La llanta se tensa y fija en los extremos con tornillo y tuerca autoblocante.
7. Chapa de aluminio de 0,8 mm remates en juntas longitudinales y transversales «bordonadas».
8. Tornillos rosca-chapa, fijación chapa de revestimiento y cosido en juntas. Distancia entre ejes de llantas a 1.000 mm.

Figura C: Aislamiento de tubería con doble capa de aislamiento.

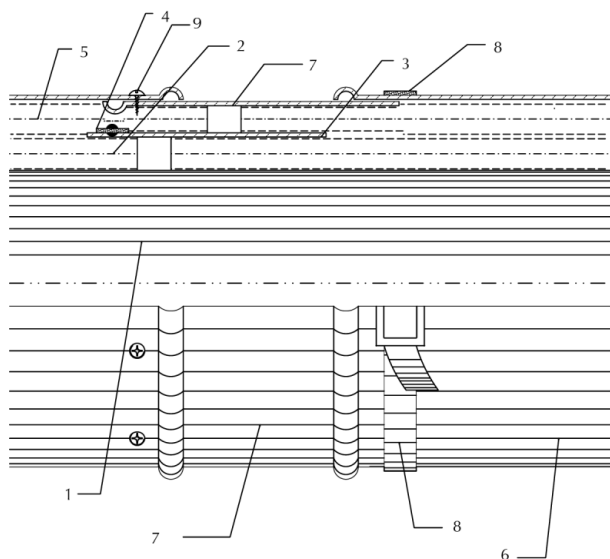
AISLAMIENTO EN CODOS



1. Tubería.
2. Coquilla Isover o coquilla Roclaine, o manta Telisol o Spintex, en una o varias capas.
3. Coquilla o manta, cortadas en segmentos (hexágonos), según curvatura tubería.
4. Lazada de alambre de acero dulce galvanizado fijación segmentos de coquillas y refuerzo segmentos de manta.
5. Chapa de aluminio de 0,6-0,8 mm cortada en segmentos (hexágonos) según curvatura tubería, «bordonada» en su perímetro.
6. Tornillos rosca-chapa para «cosido» chapa de revestimiento (segmentos) en juntas longitudinales y transversales.

Figura D: Aislamiento de codo.

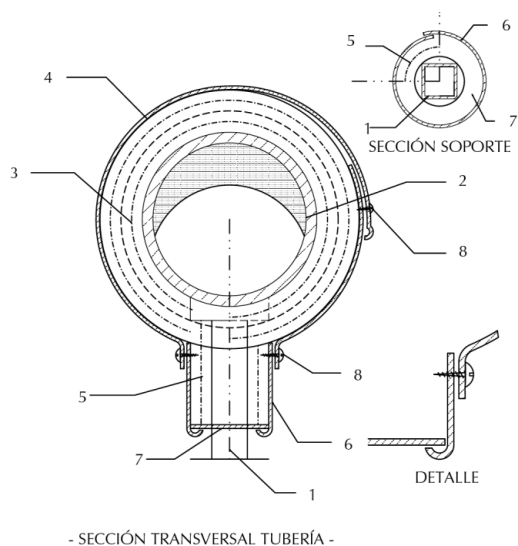
JUNTA DE DILATACIÓN DE AISLAMIENTO Y REVESTIMIENTO



1. Tubería.
2. Coquilla o manta capa o capas «interiores».
3. Anillo de chapa de aluminio, cubrición junta dilatación en capas «interiores».
4. Fleje tensado sobre anillo de chapa y fijado a la misma, con tornillos o remaches.
5. Coquilla o manta, capa exterior.
6. Chapa de aluminio revestimiento exterior bordonado.
7. Anillo chapa de aluminio «bordonada» en un extremo cubrición junta dilatación en capa exterior.
8. Fleje tensado sobre chapa de revestimiento exterior.
9. Tornillos rosca chapa fijación anillo junta dilatación.

Figura E: Aislamiento de junta de dilatación de una tubería.

REMATE AISLAMIENTO Y REVESTIMIENTO EN SOPORTE TUBERÍAS



1. Soporte tubería.
2. Tubería.
3. Coquilla Isover o Roclaine o manta Telisol, o Spintex en una o varias capas.
4. Chapa de aluminio de 0,6-0,8 mm remates en juntas longitudinales y transversales «bordonados».
5. Coquilla Isover o Roclaine o mantas Telisol o Spintex, una capa (aislamiento soporte).
6. Chapa de aluminio de 0,6-0,8 mm revestimiento aislamiento soporte. Remate inferior bordonado a 90°.
7. Chapa de aluminio remate aislamiento en soporte (corona).
8. Tornillos rosca chapa fijación y cosido chapa de revestimiento en tuberías y soporte.

Figura F: Aislamiento de soportes y remates de tubería.

TUBERÍAS DE ACOMPAÑAMIENTO

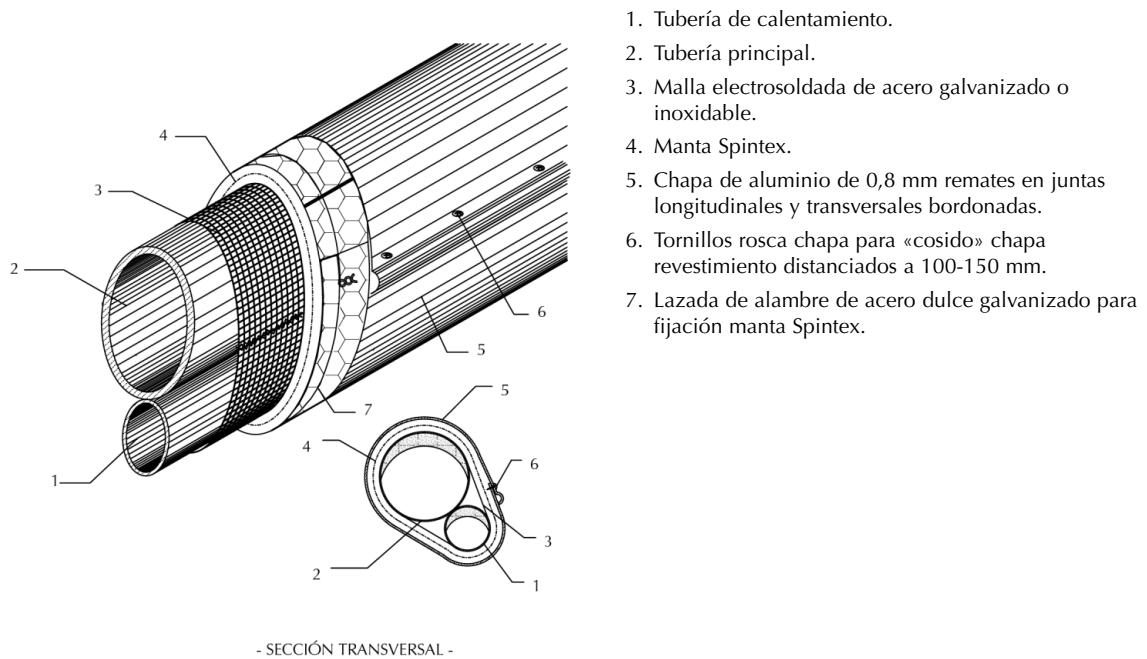


Figura G: Aislamiento de una tubería de acompañamiento.

AISLAMIENTO DE BRIDAS, ENCAPSULADO

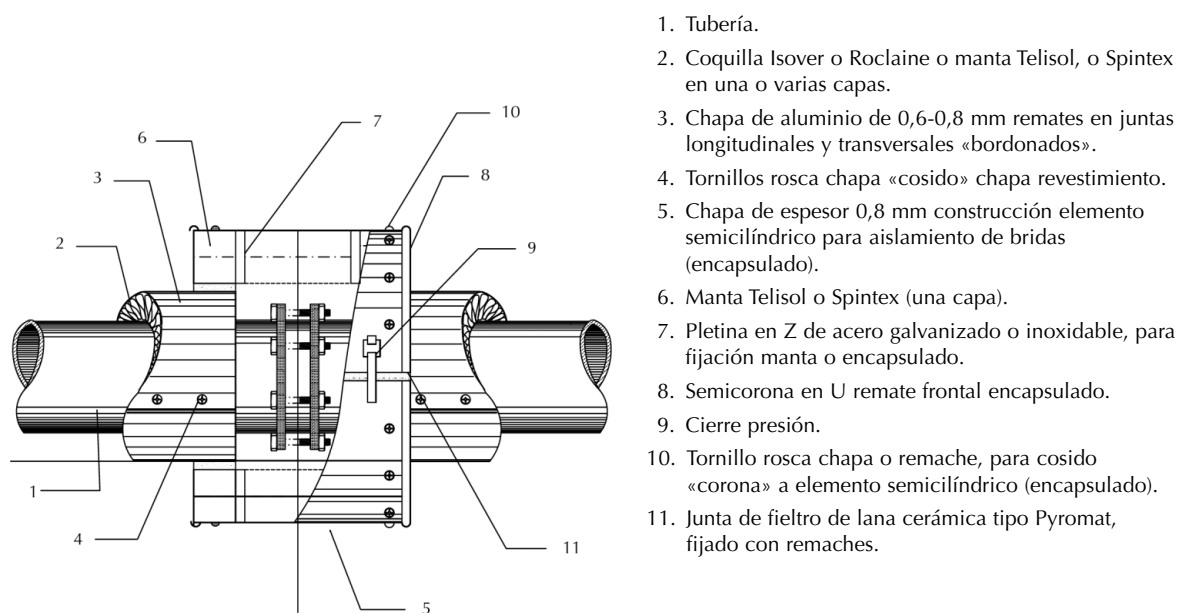
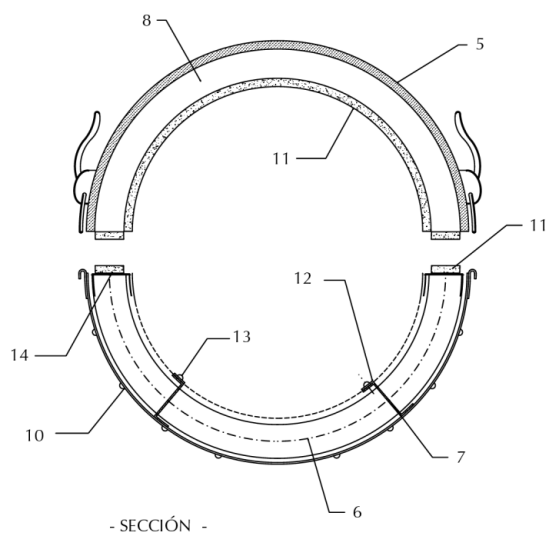


Figura H: Aislamiento de brida por encapsulado.

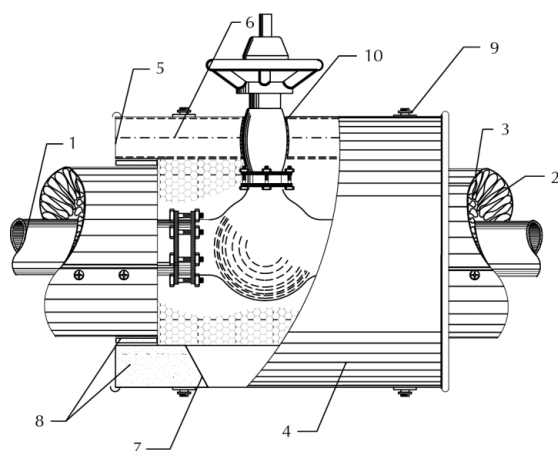
AISLAMIENTO DE BRIDAS ENCAPSULADO



5. Chapa de aluminio de 0,6-0,8 mm borde frontal «bordonado».
6. Manta Telisol, o manta Spintex.
7. Pletina en Z de acero galvanizado o inoxidable, para fijación manta a «encapsulado».
8. Semicorona de chapa de aluminio de 0,8 mm (remate frontal), conformado en U.
10. Tornillo rosca chapa o remache fijación generatriz o semicorona.
11. Filtro de lana cerámica tipo Pyronat en juntas longitudinales y frontales, fijado con remaches.
12. Pletina plana de acero galvanizado o inoxidable, sujección manta, fijada a las pletinas en Z.
13. Remache fijación pletinas.
14. Perfil de acero galvanizado o aluminio en U (remate longitudinal encapsulado).

Figura I: Encapsulado de brida-sección.

AISLAMIENTO DE VÁLVULAS, ENCAPSULADO



1. Tubería.
2. Coquilla Isover o Roclaine o manta Telisol, o Spintex en una o varias capas.
3. Chapa de aluminio de 0,6-0,8 mm remates en juntas longitudinales y transversales «bordonados».
4. Chapa de aluminio de espesor 0,8 mm, construcción elementos encapsulado.
5. Remate frontal de elementos «encapsulado», de chapa de aluminio de 0,8 mm.
6. Manta Telisol, o Spintex (una capa).
7. Pieza en U de aluminio (remate lateral elementos, «encapsulado»).
8. Junta de fieltro de lana cerámica tipo Pyromap, fijado con remaches.
9. Cierre presión.
10. Cordón de lana cerámica, fijado con pegamento específico.

Figura J: Aislamiento de válvula por encapsulado.

AISLAMIENTO DE VÁLVULAS ENCAPSULADO

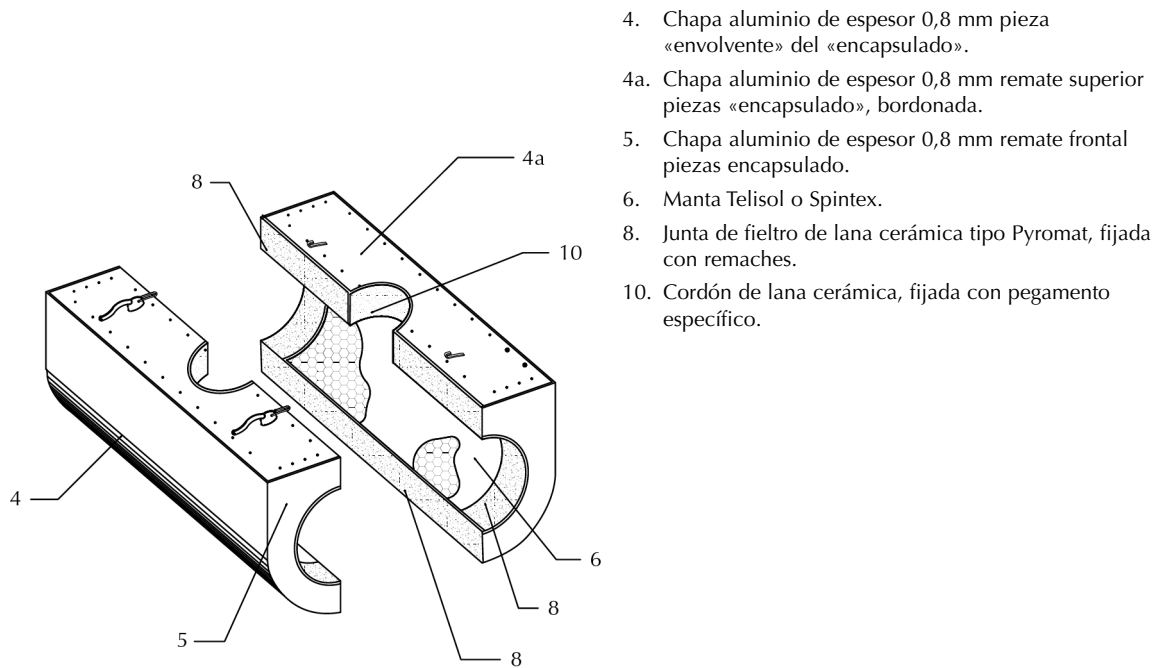


Figura K: Detalle de encapsulado de válvula.

AISLAMIENTO DE VÁLVULAS ENCAPSULADO

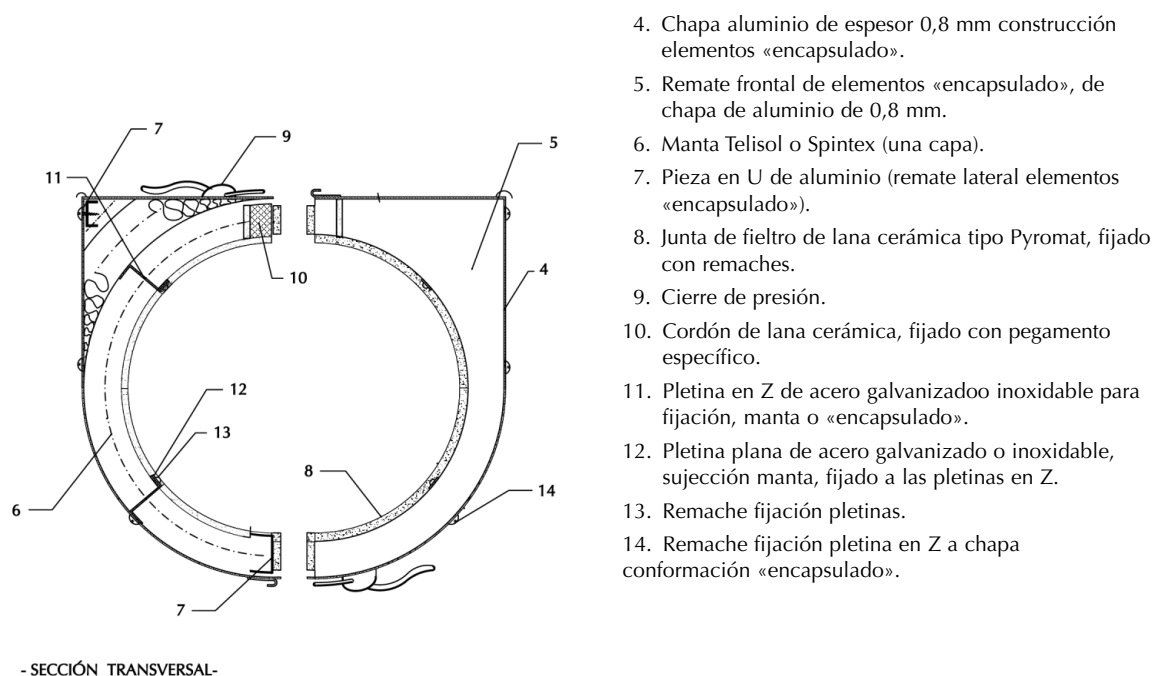
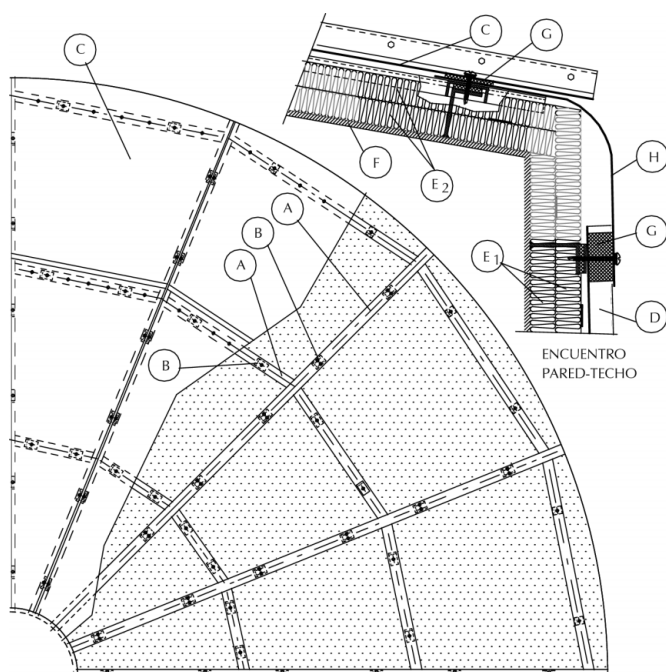


Figura L: Sección del encapsulado de válvula.

5.2. Aislamiento de equipos

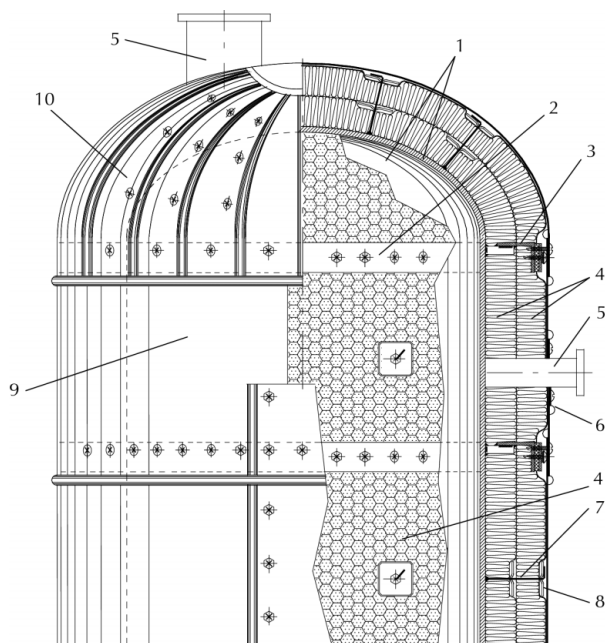
AISLAMIENTO TÉRMICO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO (TECHO TANQUE)



- A. Llantas soporte revestimiento.
- B. Distanciadores (soporte llantas).
- C. Chapa revestimiento techo.
- D. Chapa (ondulada) revestimiento pared.
- E1. Aislamiento pared tanque (mantas o paneles «Roclaine» tipo Spintex).
- E2. Aislamiento techo tanque (paneles BX Spintex).
- F. Techo tanque.
- G. Junta de estanqueidad (cierre de ondas).
- H. Pieza de borde en ángulo encuentro del alero con paramento vertical.

Figura M: Aislamiento de paredes y techo de un tanque.

AISLAMIENTO DE FONDO Y PARED (MEDIA - ALTA TEMPERATURA)

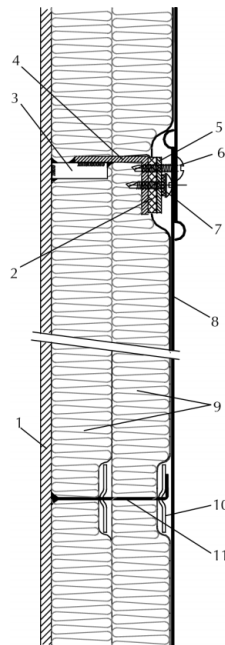


ALZADO Y SECCION VERTICAL

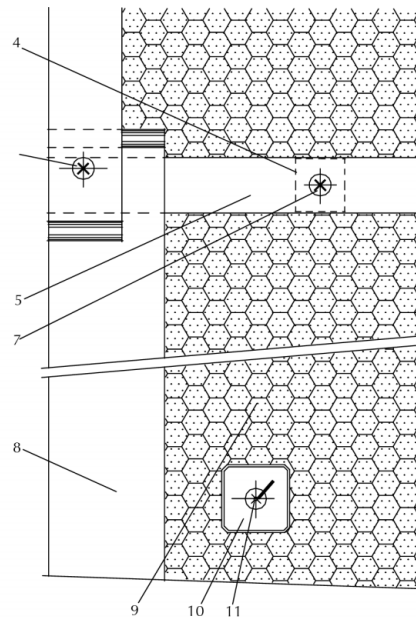
- 1. Pared equipo.
- 2. Lanta de acero galvanizado, soporte de la chapa de revestimiento exterior.
- 3. Distanciador. Pletina en -L- de acero soldado a la pared del equipo.
- 4. Manta «Roclaine» tipo Spintex 322-G-70, 342-G-100 o 342-G-125.
- 5. Tubuladoras.
- 6. Remate chapa aluminio, en tubuladora.
- 7. Varilla de acero de diámetro 3 mm soldada a la pared del equipo, para fijación aislamiento.
- 8. Arandela de retención «cobreada».
- 9. Chapa de aluminio de espesor 0,8 mm «bordonada».
- 10. Chapa de aluminio «gajos» «bordonada» (protección fondo equipo).

Figura N: Aislamiento de fondo y pared de un tanque.

AISLAMIENTO DE PARED (MEDIA - ALTA TEMPERATURA)



SECCION VERTICAL



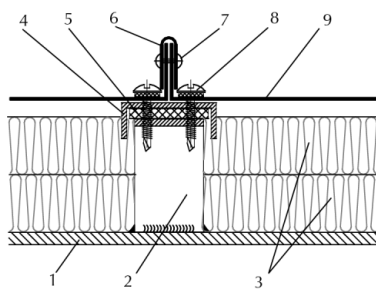
VISTA FRONTAL

1. Pared equipo.
2. Panel de lana cerámica rígido (junta) tipo keranap de espesor 3-6 mm.
3. Armadura soporte (pletina de acero) soldada a pared.
4. Distanciador (pletina en -L-) de acero.
5. Llanta de acero galvanizado de 50 x 3 mm, soporte chapa de revestimiento.
6. Tornillo rosca chapa, fijación chapa de revestimiento.
7. Tornillo autorroscante de acero inoxidable, cabeza alomada, fijación llanta.
8. Chapa de aluminio de 0,8 mm «borbonada».
9. Manta «Roclaine» tipo Spintex 322-G-100 o 342-G-125.
10. Arandela de retención «cobreada».
11. Varilla de acero de diámetro 3 mm soldada a la chapa del equipo, para fijación aislamiento.

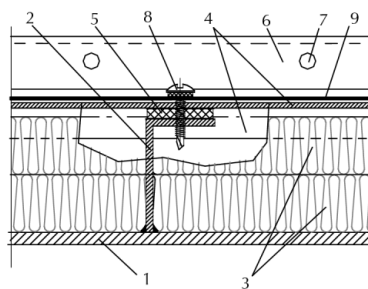
Figura Ñ: Detalle aislamiento en pared.

AISLAMIENTO TÉRMICO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO (TECHO TANQUE)

JUNTAS REVESTIMIENTO SIGUIENDO LA PENDIENTE

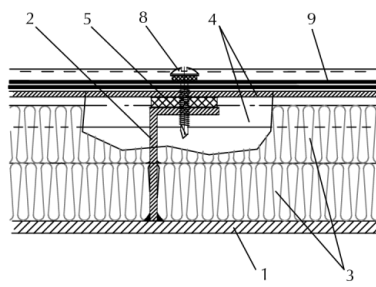


SECCION TRANSVERSAL

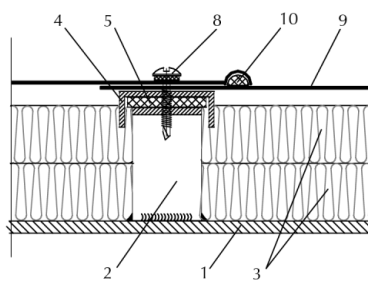


SECCION LONGITUDINAL

JUNTAS REVESTIMIENTO TRANSVERSALES A LA PENDIENTE



SECCION LONGITUDINAL



SECCION TRANSVERSAL

1. Techo tanque.
2. Distanciadores de sección 50 x 3 mm soporte revestimiento.
3. Paneles «Roclaine» tipo BX Spintex 623-G-70 o BX Spintex 643-100.
4. Llanta de acero galvanizado de 10 x 50 x 3 mm, soporte revestimiento.
5. Banda o tira de panel rígido de lana cerámica tipo keranap de espesor 3 mm.
6. Caperuza de chapa de aluminio de 0,5-0,8 mm.
7. Remache fijación caperuza.
8. Tornillo autotaladrante de acero inoxidable, cabeza alomada con arandela de estanqueidad.
9. Chapa de aluminio de 0,8 mm (protección aislamiento).
10. Cordón de masilla de silicona.

Figura O: Detalles del aislamiento del techo de un tanque.

AISLAMIENTO TÉRMICO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO

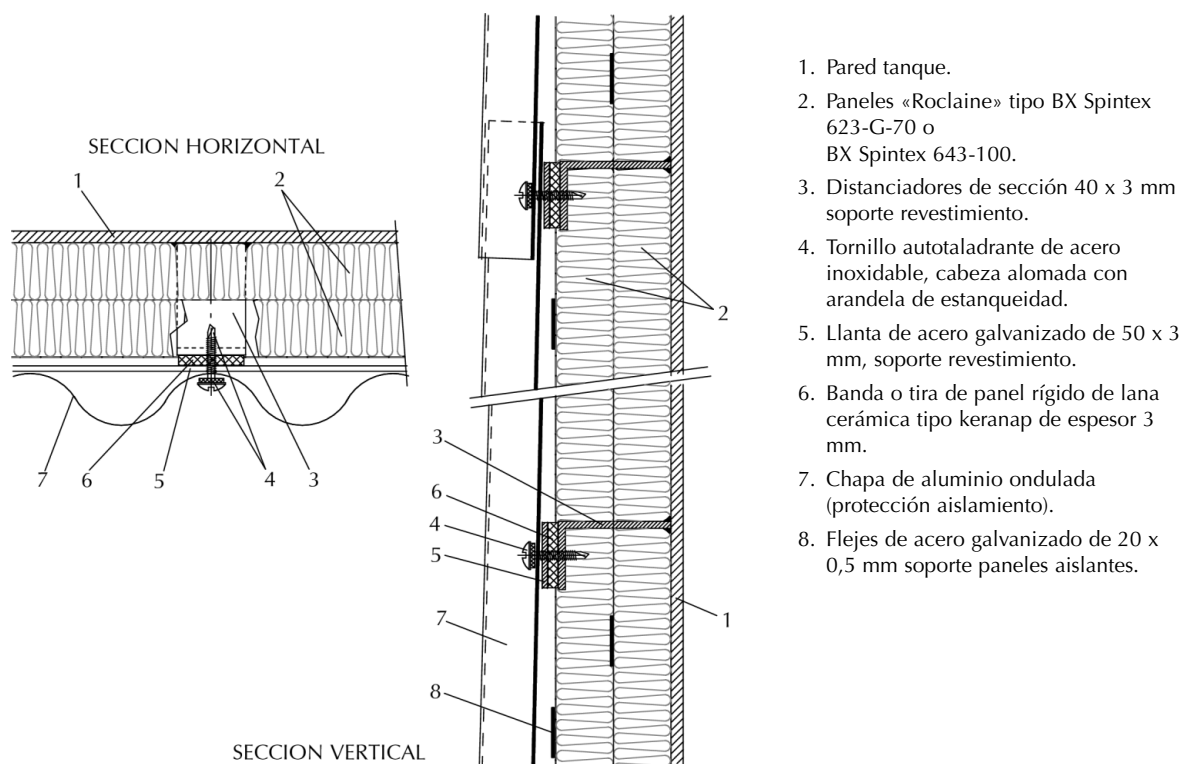


Figura P: Detalle aislamiento de una pared de un tanque.

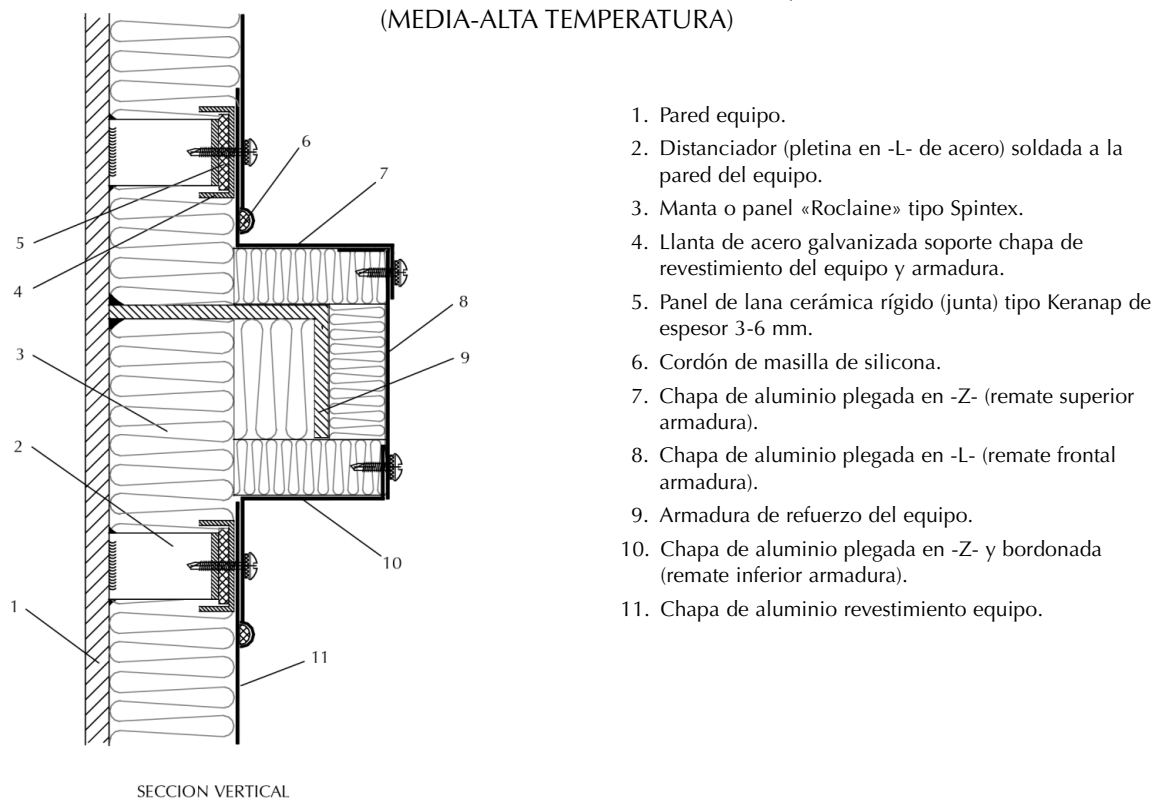
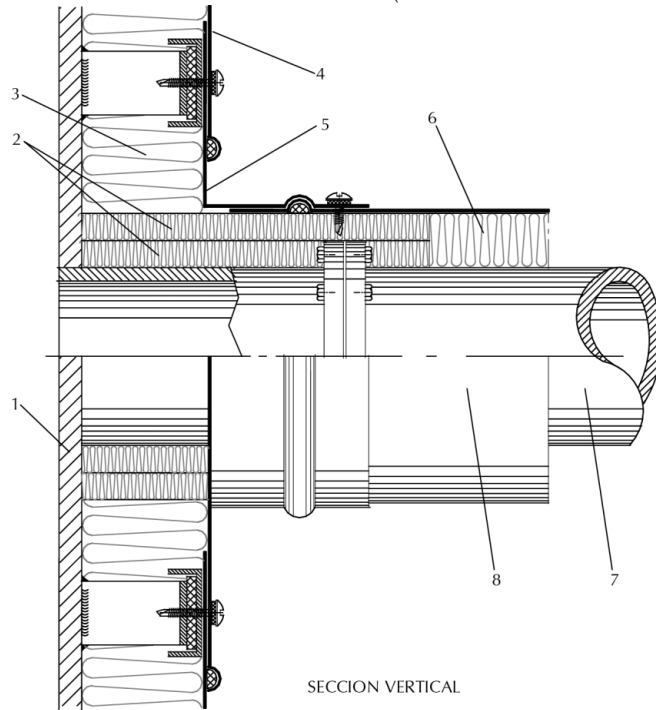
AISLAMIENTO ARMADURA DE REFUERZO EQUIPOS
(MEDIA-ALTA TEMPERATURA)

Figura Q: Detalle aislamiento de armadura y refuerzos de equipos.

AISLAMIENTO EN ARRANQUE DE TUBERÍA (MEDIA-ALTA TEMPERATURA)



1. Pared equipo.
2. Manta Spintex o Coquillas Roclaine (dos o más capas).
3. Manta o panel «Roclaine» tipo Spintex.
4. Chapa de aluminio (revestimiento pared equipo).
5. Corona de remate pared equipo - tubería de chapa de aluminio bordonada.
6. Manta Spintex o Coquilla Roclaine.
7. Tubería.
8. Chapa de aluminio (revestimiento tubería).

Figura R: Detalle aislamiento en arranque de tubería.

03.04. Cubiertas tipo DECK

Se utiliza este sistema en cubiertas metálicas no transitables con pendientes del 1 al 5%. Este sistema puede incorporar una barrera de vapor en locales de alta humedad (en la mayoría de los casos es suficiente la constituida por la chapa metálica), y un aislamiento térmico y acústico, constituido por paneles rígidos de lana de roca tipo PANEL CUBIERTA, sobre el cual se coloca una lámina impermeabilizante, para terminar con una última lámina impermeabilizante auto-protegida o capa de gravilla.

Esta es una solución válida para cubiertas planas industriales, situadas en cualquiera de las zonas climáticas contempladas en la Norma Básica de Edificación-Condiciones Térmicas (NBE - CT-79).

El PANEL CUBIERTA aislante se sitúa sobre la chapa perfilada, fijándolo mecánicamente con un número de fijaciones a base de tornillos auto-taladrantes y arandelas nervadas de acero galvanizado, en función de la exposición de la cubierta o las características climáticas (vientos sobre todo) de la zona.

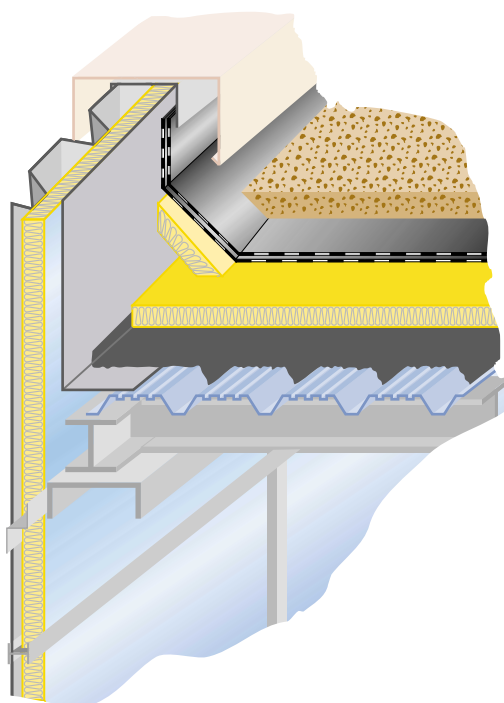
Sobre los paneles aislantes, se aplica una lámina impermeabilizante con adhesivo de betún elastómero y sobre ésta una segunda lámina auto-protegida, fijada sobre la primera con soplete. Esta segunda lámina puede ser sustituida por una capa de gravilla de un espesor no inferior a 5 cm.

En el caso de utilizar el PANEL CUBIERTA SOLDABLE (que incorporan un complejo termo-fusible), se coloca una única lámina auto-protegida fijada con soplete. Si el acabado se quiere realizar con gravilla, se fija previamente al PANEL CUBIERTA SOLDABLE una lámina de betún elastómero con acabado de polietileno. La gravilla se aplica sobre la lámina previo riego con betún elastómero.

En el encuentro con el cerramiento vertical (peto), se refuerza la impermeabilización utilizando doble capa de lámina y se coloca un babero de chapa.

En desagües, se refuerza igualmente la impermeabilización aplicando doble lámina en el remate del sumidero.

El PANEL CUBIERTA se presenta sin ningún tipo de revestimiento y el PANEL CUBIERTA SOLDABLE con un complejo de oxiasfalto armado con un velo de vidrio y polipropileno termo-fusible. Ambos tipos se fabrican en densidades de 150 kg/m² y 175 kg/m².



03.04.01. AISLAMIENTO TÉRMICO

La resistencia térmica (R), es la que se opone al paso del calor y es el sumatorio de cada una de las resistencias térmicas de las diferentes capas que constituyen el cerramiento.

La resistencia térmica de un material aislante plano es el resultado de dividir el espesor del producto y su coeficiente de conductividad.

El coeficiente de transmisión térmica del cerramiento, es la inversa de la resistencia térmica total (RT) del mismo.

Las resistencias superficiales, se obtienen de la Tabla 2.1 del Anexo 2 de la NBE-CT-79. (figura 12)

Para el PANEL CUBIERTA, el coeficiente de conductividad para una temperatura media de 10 ° C, es de 0,037 W/m K.

AISLAMIENTO PANEL CUBIERTA ESPESOR (mm)	RESISTENCIA TÉRMICA m ² °C/W	COEFICIENTE DE TRANSMISION W/m ² °C
40	1,27	0,53
50	1,54	0,47
60	1,81	0,41
80	2,35	0,34

Figura 12: Coeficiente de transmisión térmica de una cubierta DECK.

03.04.02. COMPORTAMIENTO ACÚSTICO

El aislamiento a ruido aéreo normalizado (R), es el medido en Laboratorio siguiendo las prescripciones de la norma UNE 74.040 y se representa en dBA (curva de ponderación A).

La mejora aportada por el material aislante, depende de la resistencia de flujo específica (Rayl/cm), de acuerdo con la experiencia aportada por los ensayos de Laboratorio.

En la tabla 2 se recogen las condiciones acústicas del cerramiento, para diferentes espesores de aislamiento con panel CUBIERTA de densidad 150 Kg/m³ y para un espesor de la chapa perfilada de 0,9 mm. El espesor de la capa de gravilla es 5 cm. (figura 13)

AISLAMIENTO	MASA DEL CERRAMIENTO kg/m ²		AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO dBA	
	Sin gravilla	Con gravilla	Sin gravilla	Con gravilla
40	26	108	38	45
50	28	110	38	46
60	29	111	39	48
80	32	113	40	48

Figura 13: Aislamiento acústico a ruido aéreo de una cubierta DECK.

03.03. Cubiertas y paramentos verticales mediante sándwich prefabricados

Los paneles sándwich prefabricados son elementos autoportantes, constituidos por un núcleo aislante de elevada rigidez, y dos láminas metálicas exteriores que lo delimitan y confieren la resistencia mecánica que precisan.

La misión de estos paneles sándwich es constituir el cerramiento, exterior o interior de una edificación, ya sea de uso residencial, terciario o industrial.

Los paneles sándwich se conforman en frío, estando las dos láminas exteriores unidas mediante el núcleo central aislante formado por paneles o lamas de lana mineral (vidrio o roca).

Los paneles sándwich están minuciosamente estudiados para cubrir toda la gama de necesidades constructivas, aportando al mercado soluciones novedosas, modernas y eficaces.

Las ventajas que aportan al sistema clásico de cerramiento in situ son muy numerosas, si bien destacaremos como las más importantes su gran resistencia a la flexión y la facilidad y rapidez de montaje, sin olvidar un factor esencial de los paneles sándwich fabricados con núcleo de lana de roca: Su especial resistencia al fuego.

No son menos importantes las propiedades acústicas del panel sándwich prefabricado con núcleo de lana mineral, tanto como aislante acústico, evitando que los ruidos lo traspasen que como absorbente acústico, si la lámina interior está perforada, mejorando el confort interno del local o nave industrial.

Todas estas características hacen de los paneles sándwich prefabricados con núcleo de lana mineral un elemento indispensable en aquellas edificaciones industriales donde se precise de una cuidada ejecución y de una terminación garantizada, así como donde la acústica tenga una determinada relevancia (talleres e industrias, centrales energéticas, etc.).



Los paneles sándwich se componen de determinados elementos, tales como:

- **Láminas superficiales:**

Normalmente constituidas por chapas de acero con acabados y protecciones muy diversas, pueden ser también de otros materiales, tales cuales aluminio o cobre.

El espesor de la lámina perfilada exterior oscila entre 0,5 y 0,8 mm y la interior entre 0,5 a 0,6 mm.

Los factores climatológicos y medioambientales en general condicionan el tipo de acabado. Las chapas de acero galvanizado de los paneles sándwich pueden recubrirse con diferentes compuestos tales como poliéster, resinas o láminas plásticas.

- **El núcleo aislante interno.**

Está formado por lana mineral de vidrio o roca con diferentes espesores y densidades de 60 a 145 Kg/m³.

Las grecas de las chapas perfiladas pueden rellenarse con piezas trapezoidales lo que dota al conjunto de una estructura homogénea y equilibrada.

- **Láminas exteriores**

Normalmente constituidas por chapas de acero tratadas adecuadamente y con acabados y protecciones muy diversas, pueden ser también de otros materiales, tales cuales el aluminio o el cobre.

El espesor de la lámina perfilada exterior oscila entre 0,5 y 0,8 mm, de acuerdo con las especificaciones o el medio, y de 0,5 a 0,6 mm es de la chapa interior, igualmente perfilada.

- **El núcleo aislante interno**

Está formado por lana mineral con diferentes espesores y densidades de 60 a 145 kg/m³.

Los perfiles de las chapas perfiladas pueden llenarse de piezas trapezoidales o fresado del núcleo, lo que dota al conjunto de una estructura homogénea y equilibrada.

- **Acabados**

Los factores climatológicos y medioambientales en general condicionan el tipo de acabado. Las chapas de acero galvanizado de los paneles sándwich pueden recubrirse con diferentes compuestos:

- **Poliéster**

Pintura aplicada en una línea de coal-coating a partir de resinas de poliéster, pigmentos, sílice y disolventes, formando una capa de 25 micras. Esta protección proporciona una total resistencia a la corrosión y una excelente relación calidad-precio.

- **Resinas**

Recubrimiento a partir de resinas de fluoruro de carbono, fabricado por polimerización de monómeros de fluoruro de vinilideno. El espesor aplicado es de 40-70 micras.

Este acabado es idóneo para ambientes muy corrosivos, y es muy recomendable en situaciones de alta exigencia estética.

- **Láminas plásticas**

Aplicación por la cara exterior de una pintura de policloruro de vinilo, de espesor de 100-200 micras. Esta solución es aconsejable para ambientes corrosivos en general, especialmente para zonas marítimas. Esta lámina confiere al producto una gran resistencia a los agentes químicos y permitiendo una gran flexibilidad.

Como decíamos al inicio, los paneles sándwich aportan al proyecto sus mejores características, tanto en el proceso de construcción, como posteriormente de cara a la habitabilidad. Las principales ventajas a destacar son:

- **Facilidad de montaje**

La sencillez de montaje de los paneles sándwich con núcleo de lana mineral es el resultado de un cuidadoso y profundo estudio de los sistemas que intervienen en el proceso, en unión de alguno de los sistemas de fijación existentes en el mercado. La afortunada unión de estas técnicas hace que esta solución ofrezca un montaje más rápido que cualquier otra solución de cerramientos.

Los paneles sándwich pueden fabricarse en infinidad de formatos y en longitudes que pueden llegar hasta catorce metros, por lo que aportan una solidez y homogeneidad en una gran superficie, circunstancia muy difícil de obtener con sistemas tradicionales in situ.

— **Ecológicos**

El balance ecológico de un sistema se mide por el resultado de sumar a las unidades energéticas usadas para la fabricación de un elemento las que ahorra en su puesta en obra, referido a otro sistema comparable. En el caso de los paneles sándwich con núcleo de lana mineral a cada unidad energética consumida se le contrapone 25 unidades de ahorro en su colocación.

— **Estanqueidad**

Los paneles sándwich, tanto en las superficies de sus láminas como en sus uniones, son estancos al agua y al aire.

La lana mineral usada en la fabricación de los paneles sándwich no sufre contracciones ni dilataciones por efecto de la temperatura ni es hidrófuga y, consecuentemente, no absorbe ni retiene la humedad del ambiente.

— **Acústica**

La elasticidad de las lanas minerales y su estructura abierta dota a los paneles sándwich de una alta capacidad para absorber la energía que produce el ruido, y evitar el efecto de acoplamiento de ondas estacionarias entre capas.

Esta característica los diferencia de los contruidos con núcleos de aislantes rígidos, que transmiten con toda su integridad a través de él la energía acústica incidente en cualquiera de sus caras.

En aquellos casos en que se requiera un acondicionamiento acústico determinado pueden fabricarse paneles sándwich con su cara interna perforada. Las ondas sonoras penetran en el interior del material aislante convirtiéndose en energía cinética y en calor, por lo que quedan absorbidas eficientemente.

— **Resistencia y estabilidad al fuego**

Las lanas minerales son incombustibles.

Los paneles sándwich fabricados con lana mineral constituyen elementos con una gran resistencia al fuego, por lo que, además de no propagar la llama, actúan como cortafuegos o retardadores en caso de incendio.

Las lanas minerales permanecen inalterables hasta alcanzar muy altas temperaturas lo cual retarda las deformaciones en caso de incendio. La estanqueidad del sistema queda así garantizada por el montaje, evitando el avance rápido de las llamas.

— **Productos homologados y fabricados en serie**

Que garantiza una determinada composición ensayada y homologada y, consecuentemente, un determinado resultado de manera independiente de las circunstancias del montaje.

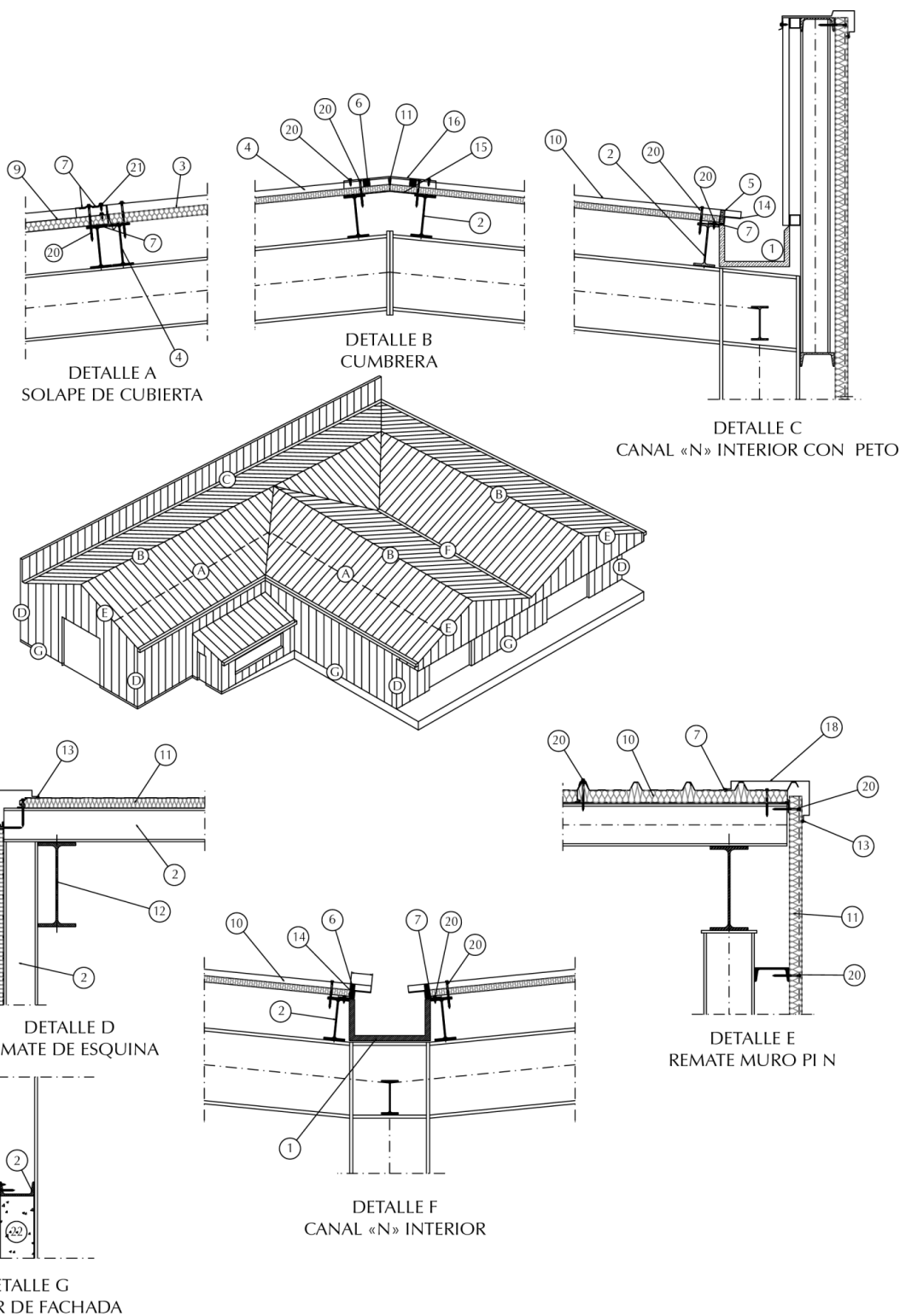
— **Salubridad**

Las lanas minerales son elementos inorgánicos e inertes y no favorecen el crecimiento de microorganismos ni insectos en su interior. Son imputrescibles y no constituyen aislamiento para roedores.

• **Sistemas**

Los paneles sándwich requieren una gran tecnología no sólo en su fabricación, precisa y muy tecnificada, sino en la solución de cada uno de los supuestos habituales o especiales con que nos podemos encontrar en la construcción de un edificio de cualquier naturaleza.

A continuación, de una manera sintetizada pero muy gráfica, describimos distintas soluciones de montajes que se dan frecuentemente en el montaje de una nave industrial.



1. Canalón doble aislamiento.
2. Correa de apoyo.
3. Cubierta con precorte solapa.
4. Doble correa.
5. Junta cierre de canto.
6. Junta de cumbrera.
7. Junta PVC de estanqueidad.
8. LDR de relleno.

9. Panel cubierta aguas abajo.
10. Panel de cubierta.
11. Panel fachada.
12. Pilar.
13. Remache fijación remate.
14. Remate cierre de canto.
15. Remate de cubierta interior.
16. Remate de cubierta troquelado.

17. Remate de esquina.
18. Remate de piñón.
19. Remate inferior de fachada.
20. Tornillo fijación.
21. Tornillo roscachapa.
22. Zócalo.

03.03.01. AISLAMIENTO TÉRMICO

Para el aislamiento de estos paneles se utilizan laminas de lana de roca ROCLAINÉ o de vidrio ISOVER en el interior de las dos hojas, previamente giradas noventa grados al objeto de aprovechar la mayor resistencia a la compresión y a la tracción transversal de los paneles.

Los nervios y grecas de los paneles se rellenan completamente en línea con el mismo producto aislante de alta densidad, utilizando piezas trapezoidales de lana de roca o de vidrio añadidas automáticamente durante el proceso.

La resistencia térmica global (R) que se obtiene con estos paneles sándwich prefabricados avalan su utilización y es el origen del gran auge que están teniendo en el mercado de las edificaciones industriales. (figura 8)

ESPESOR (mm)	PESO PANELES kg/m ²	R (m ² · K)/W
50	16,7	1,449
80	21,1	2,222
100	24,0	2,703

Figura 8: Coeficiente de transmisión térmica de un panel sándwich prefabricado aislado con un panel de lana de roca de 145 k/m³ de densidad.

03.03.02. COMPORTAMIENTO ACÚSTICO

Al igual que en todos los casos, es necesario distinguir claramente dos aspectos: la absorción acústica y el aislamiento acústico.

El incremento de la absorción acústica de un panel sándwich se consigue perforando la chapa interna un mínimo de un 22 % de su superficie.

Esta solución, aunque perjudica el valor del aislamiento acústico del panel, es muy útil en aquellos casos en que es necesario reducir los valores sonoros internos o la reverberación en locales situados generalmente en entornos no residenciales.

Los valores de absorción son muy elevados, a tenor de los espesores de lana mineral que suelen utilizarse (figura 9)

ESPESOR (mm)	ABSORCIÓN ACÚSTICA		
	NRC	α_w	α_s (11 Khz)
50	0,85	0,85	0,90

Figura 9: Absorción acústica de un panel sándwich prefabricado, con lana de roca.

Los valores de aislamiento acústico que se obtienen con los paneles sándwich aislados con lana mineral son ciertamente importantes, tal como corresponde a este tipo de soluciones constructivas formadas por dos hojas blandas a la flexión (ambas láminas de acero), con un alma interior de lana mineral (absorbente acústico y amortiguador elástico, simultáneamente).

En la figura 10 se presentan los resultados de aislamiento acústico los sándwich aislados con panel de lana de roca de densidad 145 k/m³ y espesores 50, 80 y 100 mm. Los resultados obtenidos en los ensayos, demuestran que el aislamiento aumenta con el espesor de lana de roca.

ESPESOR (mm)	AISLAMIENTO ACÚSTICO	
	R _a (dBA)	R _w (dB)
50	33	33,4
80	37	37,4
100	39,4	40,1

Figura 10: Aislamiento acústico de un panel sándwich prefabricado con lana de roca de 145 k/m³.

03.03.03. PROTECCIÓN CONTRA EL FUEGO

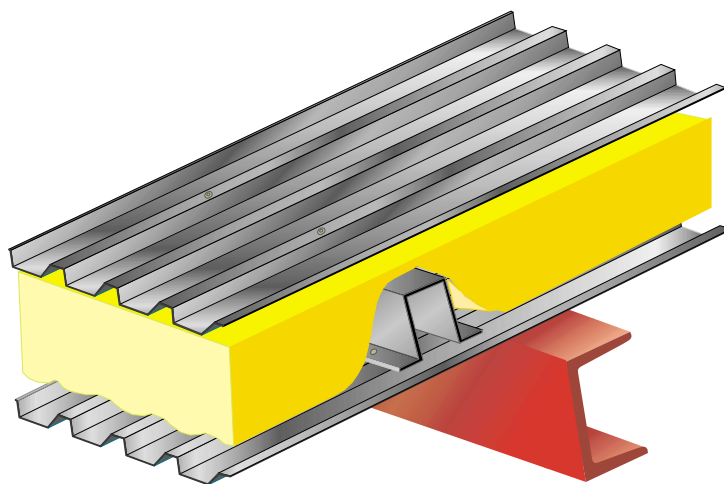
La doble lámina metálica de los cerramientos sándwich, el alma de lana de roca de alta densidad y los grandes formatos de estos paneles hacen que sus características de resistencia y estabilidad al fuego alcancen cotas muy elevadas e impensables para otros tipos de paneles sándwich con aislamientos de síntesis.

En la figura 19 se indican los valores RF y EF de un panel construido con un aislamiento de lana mineral de 145 k/m³.

ESPESOR (mm)	RF (minutos) RESITENCIA AL FUEGO	EF (minutos) ESTABILIDAD AL FUEGO
50	30	60
80	60	90
100	120	120

Figura 19 RF y EF de un panel sándwich prefabricado con lana de roca ROCLAINÉ de 145 k/m³.

03.02. CUBIERTAS Y CERRAMIENTOS VERTICALES MEDIANTE SÁNDWICH IN SITU



Cubierta inclinada constituida por dos hojas de chapa perfilada o grecada, entre las cuales se sitúa un aislamiento constituido por una manta de lana de vidrio ISOVER tipo IBR, IBR Velo o IBR Aluminio.

Solución válida para cerramientos de cubierta en edificios industriales, situados en cualquiera de las zonas climáticas contempladas en la Norma Básica de Edificación - Condiciones Térmicas (NBE - CT-79).

La hoja interior del sándwich se fija a la estructura, colocando sobre ella unos perfiles omegas o en Z transversales. Sobre estos perfiles se coloca la manta aislante y sobre ésta la chapa de acabado de espesor generalmente comprendido entre 0,6 y 1 mm.

Las omegas comprimen el aislamiento sobre la chapa exterior, reduciéndose de esta manera el puente térmico. La fijación mecánica del sándwich se realiza mediante tornillos auto roscantes o auto taladrantes que incorporan arandelas de estanqueidad.

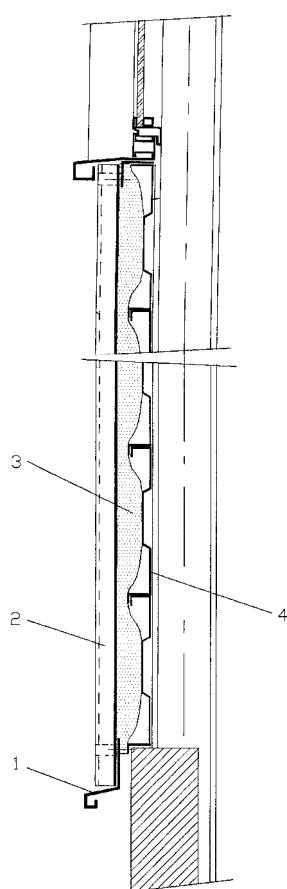
Los mantas IBR, IBR Velo e IBR Aluminio se apoyan sobre la chapa interior cubriendo las Omegas, con el revestimiento situado hacia abajo -cara caliente para el periodo de invierno-, que actuará como barrera de vapor.

La manta IBR se presenta revestida por una de sus caras con un soporte de papel kraft, la manta IBR Velo con un velo de fibra de vidrio y la manta IBR Aluminio con un soporte de papel kraft-aluminio. Los soportes de kraft y kraft-aluminio se fijan a la manta con oxiasfalto.

En los montajes de cerramientos verticales, además de esta flexibilidad para adaptarse a los refuerzos interiores del sándwich, se requiere que el producto aislante tenga una determinada resistencia a la tracción, al objeto de que no se produzcan descuelgues que, aunque inusuales, conviene tener en cuenta.

Para esta aplicación puede utilizarse la manta de lana de vidrio IBR Velo, que incorpora un velo de fibra de vidrio textil reforzado por una de sus caras, el cual asegura la integridad del producto colocado verticalmente.

Recientemente se ha desarrollado el producto en lana de vidrio denominado HIBRID, en el cual se ha sintetizado la experiencia y las necesidades del mercado. La lámina de poliéster que incorpora esta manta por una de sus caras, además de constituir una muy eficaz barrera de vapor, elimina de manera total, los eventuales problemas de descuelgues en montajes verticales (figura 1).



DETALLE DE LA VENTANA

- 1 Babero de protección.
- 2 Cerramiento exterior de chapa trapezoidal.
- 3 Aislamiento térmico de fachada fieltro Isover tipo Hibrid.
- 4 Cerramiento interior de chapa de acero prelacada, fijado al elemento estructural con tornillos autorroscantes.

Figura 1: Sándwich en paramento vertical

03.02.01. AISLAMIENTO TÉRMICO

La resistencia térmica (R), es la que se opone al paso del calor y es el sumatorio de cada una de resistencias térmicas de las diferentes capas que constituyen el cerramiento.

La resistencia térmica de un material aislante plano es el resultado de dividir el espesor del producto y su coeficiente de conductividad.

El coeficiente de transmisión térmica del cerramiento, es la inversa de la resistencia térmica total (R_T) del mismo.

Las resistencias superficiales, se obtienen de la Tabla 2.1 del Anexo 2 de la NBE-CT-79.

ANC	RESISTENCIA TÉRMICA	COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN
FIELTRO IBR ESPESOR mm	FIELTRO IBR ALUMINIO ESPESOR mm	W/m · °C
—	55	0,76 omegas de 50 mm
80	—	0,59 omegas de 70 mm
100	—	0,50 omegas de 90 mm

Figura 2: Aislamiento térmico de un cerramiento sándwich in situ.

03.02.02. COMPORTAMIENTO ACÚSTICO

Distinguiremos dos aspectos diferenciados de la acústica en las edificaciones industriales, el aislamiento y el acondicionamiento acústico.

En cuanto al aislamiento a ruido aéreo normalizado (R), éste es el medido en Laboratorio siguiendo las prescripciones de la norma UNE 74.040 y se representa en dBA.

El aislamiento a ruido aéreo depende de la masa de las hojas y de las características acústicas del material aislante, definidas por la resistencia de flujo específica (Rayl/cm) y la rigidez.

En la figura 3 se recogen las condiciones acústicas del cerramiento comprendido en la figura 1 de este capítulo, para los materiales aislante mencionados y para un espesor medio de las hojas (chapa perfilada) de 0,7 mm.

AISLAMIENTO	ESPESOR-AISLAMIENTO	MASA DEL CERRAMIENTO	AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO
	(mm)	kg/m ² (1)	dBA
IBR-Aluminio	55	12,5	≥ 38
IBR	80	12,5	≥ 40
IBR	100	12,5	≥ 42

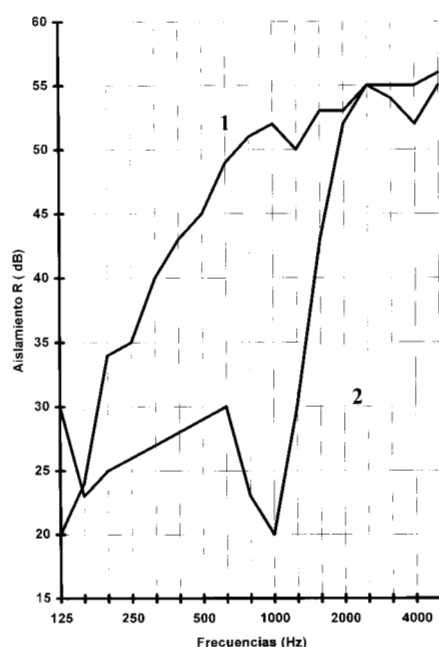
(1) Sin considerar armaduras

Figura 3: Aislamiento a ruido aéreo de un sándwich in situ.

En el caso de utilizar como aislante un material de síntesis de poro cerrado, tal cual el poliestireno expandido, extrusionado o poliuretano, el resultado acústico será pobre debido a la reducida absorción acústica y a la elevada rigidez de estos materiales.

Por el contrario, la utilización de aislamientos térmicos de lanas de vidrio permite una mejora notable en el valor del aislamiento acústico.

En la figura 4 puede observarse los resultados de aislamiento acústico de dos paneles sándwich con los elementos de chapa iguales (chapas de 1 mm de espesor), pero con almas de lana de vidrio (16 kg/m³) y de poliuretano (30 kg/m³), respectivamente. En este caso, el aislamiento acústico obtenido con sándwich aislado con poliuretano es muy reducido por debajo de la frecuencia crítica de la chapa, debido, tal cual ha quedado anteriormente dicho, a la elevada rigidez de las espumas, lo que supone un aislamiento global notablemente inferior al obtenido con el aislante absorbente.

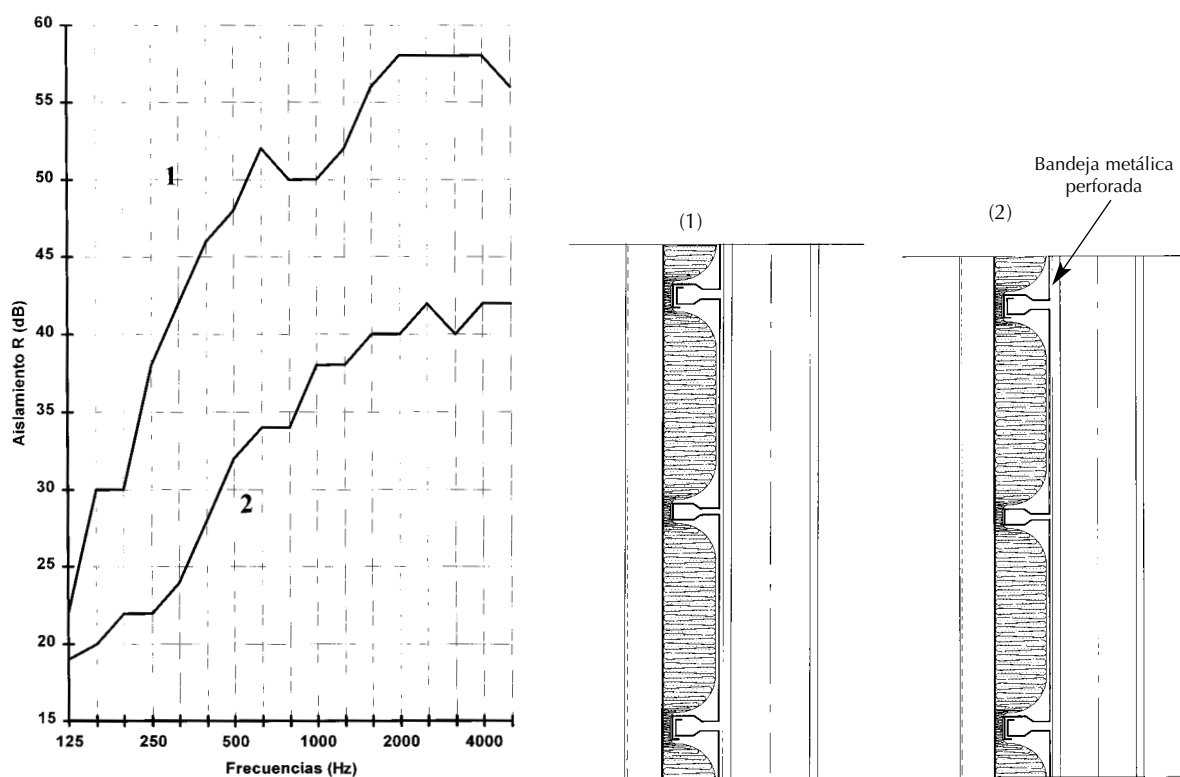


1. Sandwich chapa perfilada 2 x 1 mm
60 mm Acustiver R (16 kg/m³)
R_w = 44 dB
2. Sandwich chapa perfilada 2 x 1 mm
60 mm PUR (30 kg/m³)
R_w = 25 dB

Figura 4: Aislamiento acústico en Sándwich.

Para obtener mejoras en el acondicionamiento acústico de un panel sándwich a veces se recurre a realizar perforaciones en la hoja interna de chapa, aumentando de esta forma el coeficiente de absorción y reduciendo la reverberación. Sin embargo, esta solución es negativa para el aislamiento acústico total del panel, ya que la efectividad del aislamiento queda reducida principalmente a la de la hoja exterior del cerramiento.

En la figura 5 se presentan los resultados de aislamiento de dos sándwich iguales con ACUSTIVER-R (manta de lana de vidrio), pero con hoja interna lisa y perforada. Como se aprecia, la diferencia de aislamiento acústico es de 7 dB (A).

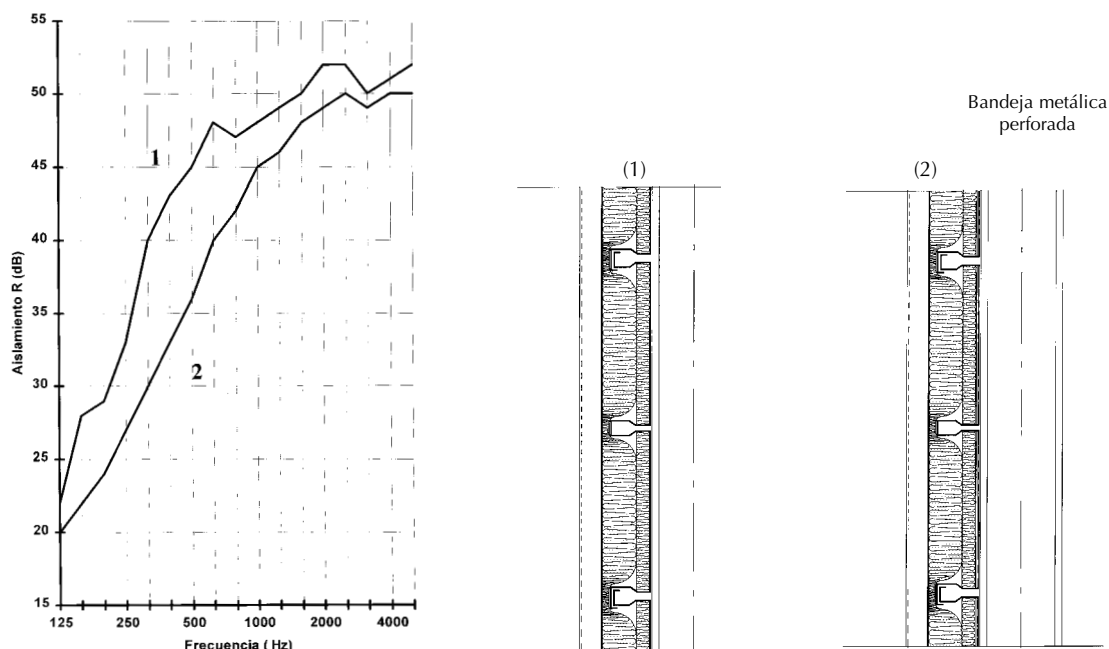


1. Sandwich chapa perfilada (0,75 mm)
Acustiver R 60 mm (16 kg/m³)
Bandeja metálica
Ra = 40 dB(A) Rw = 40 dB
2. Sandwich chapa perfilada (0,75 mm)
Acustiver R 60 mm (16 kg/m³)
Bandeja metálica perforada
Ra = 33 dB(A) Rw = 34 dB

Figura 5: Aislamiento diferencial entre cerramiento industrial con y sin perforaciones.

Puede incrementarse el valor del aislamiento acústico de un panel sándwich in situ con la chapa interior perforada, introduciendo una barrera de vapor en la cara caliente del aislante (cara interna).

Esta barrera equivale a reducir el efecto de las perforaciones, aunque no lo suficiente como para sustituir a la chapa lisa, debido a su menor masa superficial. Lógicamente, de esta manera también se reduce el valor del coeficiente de absorción del cerramiento (figura 6).



1. Sandwich chapa perfilada (0,75 mm)
Acustiver R (50 mm) (16 kg/m³)
Acustiver 160 (50 mm) (16 kg/m³)
Bandeja metálica
Ra = 43 dB(A) Rw = 45 dB
2. Sandwich chapa perfilada (0,75 mm)
Acustiver R (50 mm) (16 kg/m³)
Acustiver 160 (50 mm) (16 kg/m³)
Bandeja metálica perforada
Barrera vapor
Ra = 38 dB(A) Rw = 39 dB

Figura 6: Comparativo de aislamiento entre soluciones con y sin barrera de vapor.

Las mejores prestaciones posibles resultarán de aumentar la absorción acústica de la nave mediante techos acústicos o baffles suspendidos que tienen esa función, manteniendo el cerramiento sin perforaciones.

De una manera general, para aumentar los valores de aislamiento acústico de estos sistemas de sándwich in situ, las soluciones pasan por el incremento de las masas, es decir, el espesor de las chapas, o lo que es más habitual, aumentar el espesor del sándwich, lo que permite una mejora también del aislamiento térmico, reduciendo costes de energía térmica.

03.02.03. PROTECCIÓN CONTRA EL FUEGO

Conviene distinguir entre dos conceptos:

- La contribución de los materiales al desarrollo de un incendio:
Los productos de lana de vidrio son incombustibles y por tanto seguros para este tipo de edificaciones, en el sentido de no contribuir a la propagación del incendio. Se recomiendan los productos desnudos o revestidos con velo de vidrio.
- La resistencia de las soluciones constructivas al fuego:
Es necesario que el sándwich in situ sea fabricado con alma de lana de roca de alta densidad. Los valores de resistencia o estabilidad al fuego deberán venir avalados por un certificado de ensayo de laboratorio propio de cada solución constructiva.

Aislamiento de edificios industriales

03.01. SOLUCIONES DE AISLAMIENTO EN EDIFICIOS INDUSTRIALES

Estas edificaciones de estructuras metálica o de hormigón se caracterizan por utilizar cerramientos de chapa metálica, generalmente grecada con muy diversa geometría y acabado.

El aislamiento a utilizar en cada caso depende del sistema de cerramiento elegido, ya sea del tipo de montaje tradicional de cubierta simple, de sándwich in situ o también de sándwich prefabricado. Para cada montaje y solución existe uno o más productos de lana mineral con sus sistemas adaptados en cada caso, tanto para las cubiertas como para los paramentos.

Si bien en algunos casos los procesos de fabricación a que se dedican los edificios industriales determinan el tipo y cualidades del aislamiento a utilizar, en muchos de ellos la solicitud de aislamiento viene determinada por la actividad de las personas y maquinaria al cual están destinados, o incluso por el entorno en el cual están ubicados.

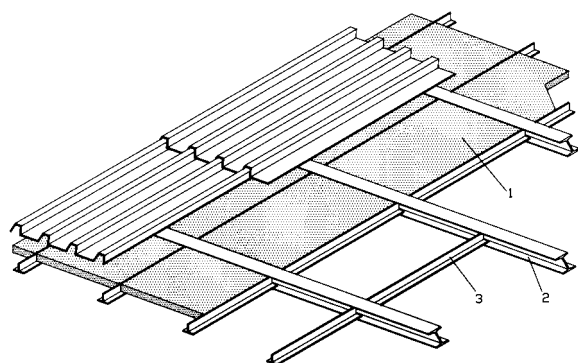
El aislamiento realizado con lana mineral viene a cumplir una triple función en estos edificios: reducción del costo energético necesario para la protección de las personas o instalaciones respecto de las inclemencias meteorológicas, acondicionamiento o aislamiento acústico de los locales y protección contra el fuego.

Se comentan a continuación las soluciones más comúnmente usadas para aislar estas edificaciones, tanto térmica como acústicamente, sin olvidar la protección contra incendios.

03.05. Aislamiento por el interior

El aislamiento de este sistema de cerramientos se realiza por medio de paneles de lana de vidrio situados entre correas o sobre perfilaría, bien siguiendo pendientes o en falso techo.

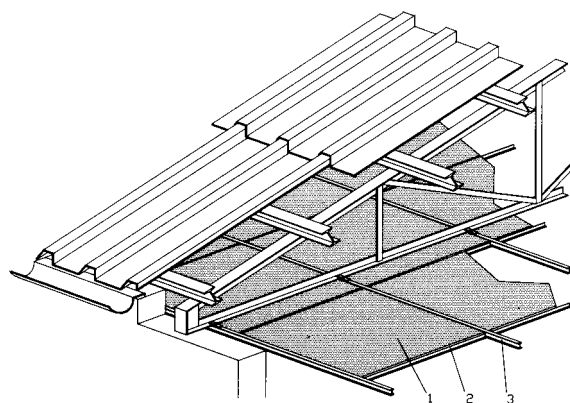
La colocación siguiendo pendientes (figura 14) se realiza normalmente aprovechando las correas existentes y con un perfil tapajuntas entre paneles adyacentes.



1. Panel rígido Isover tipo Alumisol apoyado en el ala inferior de las correas.
2. Correas -I- estructura de la cubierta.
3. Perfil metálico en -U- de tapajuntas apoyado en las correas.

Figura 14: Aislamiento siguiendo pendiente.

Si se desea colocar el aislamiento en forma de falso techo debido, por ejemplo, a la necesidad de crear un espacio (plenum) para situar instalaciones de aire acondicionado o porque se trate de una cubierta soportada por cerchas, el montaje es igualmente simple, bien aprovechando estas cerchas o con perfiles primarios fijados a aquellas y secundarios de separación (figura 15)



1. Panel rígido Isover tipo Alumisol.
2. Perfil -U- secundario galvanizado.
3. Estructura primaria perfil -I- galvanizado.

Nota: Esta solución exige una ventilación entre el aislamiento y la cubierta.

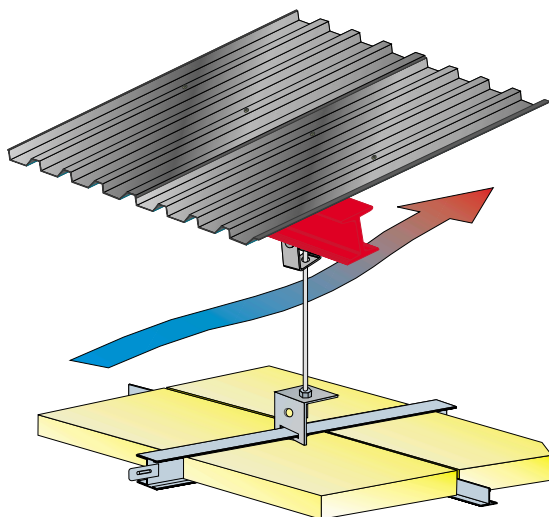
Figura 15: Aislamiento térmico en falso techo.

Los productos de lana de vidrio más comúnmente utilizados son los PANEL ALUMISOL, el PANEL DIN y el PANEL PA, que se apoyan sobre una armadura auto-resistente constituida por perfiles de acero galvanizado o lacado, en forma de H (primarios), en T invertida (secundarios) y en U (perfil de borde).

El PANEL ALUMISOL ofrece en su cara vista un revestimiento de aluminio-kraft. El PANEL DIN incorpora un film de PVC y el PANEL PA incorpora en su cara vista una película elástica. Los tres paneles son autoportantes.

Los tres productos, PANEL ALUMISOL, PANEL DIN y PANEL PA disponen del Certificado de Concesión del Derecho de Uso de la Marca AENOR.

Es una solución idónea para cubiertas inclinadas de edificaciones industriales, situadas en cualquiera de las zonas climáticas contempladas en la Norma Básica de Edificación - Condiciones Térmicas (NBE - CT-79).



La armadura se suspende de las correas de cubierta, mediante clips de fijación rápida o grapas metálicas fijadas a las alas de las mismas, varillas roscadas y pieza de cuelgue de los primarios.

Debe preverse la adecuada ventilación del espacio situado entre el falso techo y la cubierta. Para ello se facilita la entrada de aire mediante aberturas practicadas bajo el alero, y la salida se facilita elevando las piezas de remate en la cumbre. La ventilación puede favorecerse colocando en los faldones o cumbre, aireadores estáticos

03.05.01. AISLAMIENTO TÉRMICO

La resistencia térmica (R), es la que se opone al paso del calor y es el sumatorio de cada una de resistencias térmicas de las diferentes capas que constituyen el cerramiento.

La resistencia térmica de un material aislante plano es el resultado de dividir el espesor del producto y su coeficiente de conductividad.

El coeficiente de transmisión térmica del cerramiento, es la inversa de la resistencia térmica total (RT) del mismo.

Las resistencias superficiales, se obtienen de la Tabla 2.1 del Anexo 2 de la NBE-CT-79.

La resistencia térmica del material aislante, se obtiene partiendo de la conductividad térmica del mismo definido por la Marca AENOR o por el etiquetado CE y del espesor correspondiente.

Para los paneles ALUMISOL, DIN y PA, el coeficiente de conductividad para una temperatura media de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, es de $0,034\text{ W/m K}$.

En la figura 16, se recogen las condiciones térmicas del cerramiento de techo-cubierta, para los tipos de panel autoportante considerados y en función del espesor.

AISLAMIENTO		RESISTENCIA TÉRMICA DEL TECHO	COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN. CUBIERTA METÁLICA
ALUMISOL - Espesor mm	DIN o PA - Espesor mm	$\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C/W}$	$\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$
—	40	0,98	0,81
—	40	1,00	0,79
—	50	1,19	0,69
50	—	1,23	0,67

Figura 16: Resistencia térmica y coeficiente de transmisión de una cubierta con aislamiento en falso techo.

03.05.02. COMPORTAMIENTO ACÚSTICO

Las cualidades de aislamiento acústico de una cubierta simple con aislamiento por el interior vienen dadas por la naturaleza de la chapa, que es un elemento que tiene unas determinadas características y principalmente por las del aislamiento.

Las chapas de acabado, con espesores normales < 1 mm (0,63 y 0,75 mm normalmente), no pueden alcanzar por sí mismas valores importantes de aislamiento acústico, a pesar de tener frecuencias críticas elevadas. (12.000 ÷ 15.000 Hz)

El aislamiento a ruido aéreo normalizado (R), es el medido en Laboratorio siguiendo las prescripciones de la norma UNE 74.040 y se representa en dBA (curva de ponderación A).

El aislamiento a ruido aéreo puede obtenerse también aplicando el valor de la masa superficial (Ley de masa experimental), en las ecuaciones [1] y [2] del Apartado 3.2 del Anexo 3 de la NBE-CA-88.

En la figura 17 se recogen las condiciones acústicas del cerramiento, para los materiales aislantes considerados y para un espesor de la chapa perfilada de 0,8 mm.

AISLAMIENTO ALUMISOL, DIN o PA ESPESOR (mm)	MASA DEL CERRAMIENTO kg/m ² (1)	AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO dBA
40	10,0	≥ 28
50	10,5	≥ 28

(1) Valor aproximado sin considerar estructura de cubierta, ni elementos de suspensión.

Figura 17: Aislamiento a ruido aéreo de una cubierta in situ aislada con falsos techos.

Los productos aislantes de lana mineral (PANEL ALUMISOL, PANEL DIN y PANEL PA) tienen además importantes características como absorbentes acústicos, las cuales adquiere especial relevancia en aquellas edificaciones donde el proceso que se realiza en su interior precisa de una corrección del nivel sonoro.

De esta manera, con la utilización de estos paneles de lana mineral pueden lograrse, al mismo tiempo, dos objetivos importantes: aislar térmicamente y acondicionar acústicamente una edificación industrial. La figura 18 recoge los valores de absorción acústica de los anteriormente citados paneles.

PRODUCTOS	FRECUENCIA Hz	125	250	500	1.000	2.000	4.000
ALUMISOL	Espesor (mm) 50	0,40	0,68	0,46	0,43	0,24	0,16
PANEL DIN	Espesor (mm) 50	0,52	0,75	0,71	0,55	0,31	0,16
PANEL PA	Espesor (mm) 40	0,57	0,91	0,90	0,95	0,97	0,96

Figura 18: Coeficiente de absorción acústica α Sabine (α_s).

03.05.03. PROTECCIÓN CONTRA EL FUEGO

Una característica singular de los cerramientos aislados con lanas de vidrio es no-inflamabilidad. Esta característica por sí sola debería ser suficiente como para que el criterio de elección del aislamiento en una edificación industrial no suscitara ninguna duda sobre el material aislante a utilizar.

En un incendio no solamente tiene importancia la no-inflamabilidad de los productos, sino también su capacidad de soportar durante el mayor tiempo posible los efectos de las temperaturas muy elevadas que se producen (por encima de los 1.000 ° C), retrasar la extensión del mismo y, lo que es también muy importante, evitar la emisión de humos tóxicos.

Ningún producto de síntesis (poliuretano o poliestireno) es capaz de cumplir estos requerimientos mínimos exigidos. Sólo las lanas minerales, tales como la de vidrio, lo hacen en su totalidad y con la eficiencia requerida.

04.06. Aislamiento del sonido

El aislamiento del sonido consiste en impedir su propagación por medio de obstáculos reflectores. Como ya se indicó en el apartado 3.2 (Reflexión del sonido), siempre que se trata de lograr un gran factor de reflexión hay que interponer en el camino del sonido un medio cuya impedancia Z sea lo más diferente posible a la del medio que conduce el sonido; por tanto, es lógico tratar por un lado el aislamiento del sonido en el aire u otro medio gaseoso (baja impedancia) y, por otro, el aislamiento en sólidos (alta impedancia).

04.06.01. AISLAMIENTO DEL SONIDO TRANSMITIDO POR EL AIRE

El sonido transmitido por el aire es lo que normalmente se llama *ruido aéreo*, y así lo denominaremos en adelante.

Si colocamos una barrera entre dos locales para conseguir un aislamiento al ruido aéreo, la transmisión del ruido de un local a otro se puede realizar por distintos caminos; como se ve en la Fig. 13.

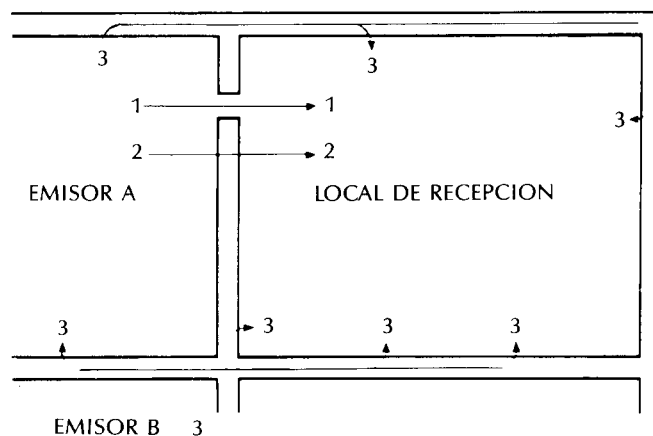


Fig. 13.

- a) Por vía directa 2, que se puede descomponer en dos causas principales.
 - La porosidad a través de fisuras e intersticios.
 - El efecto de diafragma, es decir, flexión bajo el efecto de la presión sonora, como en una membrana.
- b) Por vías indirectas, como conductos 1 y paredes adyacentes 3.

04.06.01.01. Medidas

Hay diversos índices normalizados para cuantificar el aislamiento al ruido aéreo. Veamos los más usados:

- *Aislamiento acústico* (D): Es la diferencia de niveles de presión acústica que existe entre el nivel acústico del local donde está la fuente (local emisor) y el del local donde se recibe el sonido (local receptor).

Se calcula mediante la expresión:

$$D = L_1 - L_2 \quad \text{dB}$$

Este valor puede corresponder a una sola frecuencia, a una banda de frecuencia o al espectro total de frecuencias.

- *Aislamiento acústico normalizado* (D_n): Es la diferencia de niveles de presión acústica entre el local emisor y el receptor; pero teniendo en cuenta la influencia que, sobre el nivel, ejerce la reverbera-

ción. En el local receptor, si existe una reverberación elevada, el valor del nivel acústico L_2 es mayor que el que cabría esperar debido al aislamiento producido por la pared, con lo que el aislamiento acústico se reduce. Lo contrario ocurrirá en el caso de elevada absorción: baja reverberación.

Para tener en cuenta esta incidencia, se efectúa una corrección de los resultados considerando que una habitación con un amueblamiento normal posee un tiempo de reverberación de 0,5 segundos, o, según otra normativa, un área de absorción equivalente de 10 m².

Por tanto, el aislamiento acústico normalizado, para una frecuencia determinada entre dos locales de una vivienda, se calcula mediante la expresión:

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{T}{0,5} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{10}{A} \quad \text{dB}$$

siendo:

T = Tiempo de reverberación del local receptor para la frecuencia considerada.

A = Área de absorción equivalente del local receptor para la frecuencia considerada.

— *Índice de debilitamiento acústico* (R): Este índice se utiliza generalmente para medidas en laboratorio (cámaras de transmisión) y se define como:

$$R = 10 \log \frac{W_1}{W_2} \quad \text{dB}$$

siendo W_1 y W_2 las potencias acústicas incidentes sobre la muestra y transmitida por ella. En el caso de campo acústico difuso, que es como se ensaya en el laboratorio, se puede evaluar por la fórmula:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad \text{dB}$$

siendo:

S = Superficie de la muestra a ensayar (m²).

A = Área de absorción equivalente de la sala de recepción (m²).

04.06.01.02. Aislamiento de paredes simples

Se entiende por pared simple la que no está formada por varias paredes independientes, es decir, no es necesario que sea una pared homogénea (de un solo material), sino que debe cumplir que los puntos situados sobre una misma normal no modifiquen su distancia mutua cuando la pared realice vibraciones.

Para obtener un buen aislamiento acústico, estas paredes se deben construir de acuerdo con los siguientes puntos:

- Suficientemente pesadas.
- Débilmente rígidas.
- Estancas de aire.

a) Ley de masa y de frecuencia

Para una pared simple, la ley de masa y frecuencia (Ley de Berger) indica que el aislamiento acústico es mayor cuanto mayor sea su masa superficial (masa por unidad de superficie), es decir, más *pesadas*, y también es mayor para frecuencias altas.

La expresión de esta ley es:

$$D = 20 \log \frac{\omega \cdot m}{2 \cdot Z} \quad \text{dB}$$

siendo, ω = Pulsación [$\omega=2\pi f$] (Hz).

m = Masa superficial (kg/m²).

Z = Impedancia acústica del aire (Rayls).

Esto, pasado a una gráfica normal o semilogarítmica, nos da el aislamiento acústico en función de la masa superficial, para una serie de frecuencias dadas.

Teóricamente, esta ley nos dice que doblando la masa se consigue una mejora de 6 dB en el aislamiento.

Esta ley es experimental, por tanto no es absoluta, sino aproximada, si bien se utiliza mucho para dar una primera idea del comportamiento acústico de una pared.

b) Aislamiento real de paredes simples

La ley de masas sólo se cumple en un intervalo de frecuencias que está determinado por dos frecuencias características de una pared real y en el entorno de los cuales no se cumple la ley de masas, con una reducción notable del aislamiento acústico.

- La frecuencia natural del sistema (f_0) como un todo, que depende de la masa de la pared y de las sujeciones perimetrales de la hoja.
- La frecuencia crítica o de coincidencia f_c , en la cual las ondas incidentes coinciden en frecuencia con las ondas longitudinales de flexión de la pared.

Esta frecuencia depende exclusivamente del material de la pared y de su espesor, según la expresión:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi \cdot d} \sqrt{\frac{12\rho}{E} (1 - \mu^2)}$$

donde:

c - Velocidad del sonido en el aire (m/seg).

d - Espesor de la pared (m).

ρ - Densidad del material de la pared (kg/m³).

μ - Coeficiente de Poisson.

E - Módulo de Young (N/m²).

En la Fig. 14 se indican los valores de las frecuencias críticas de los materiales más habituales en la edificación.

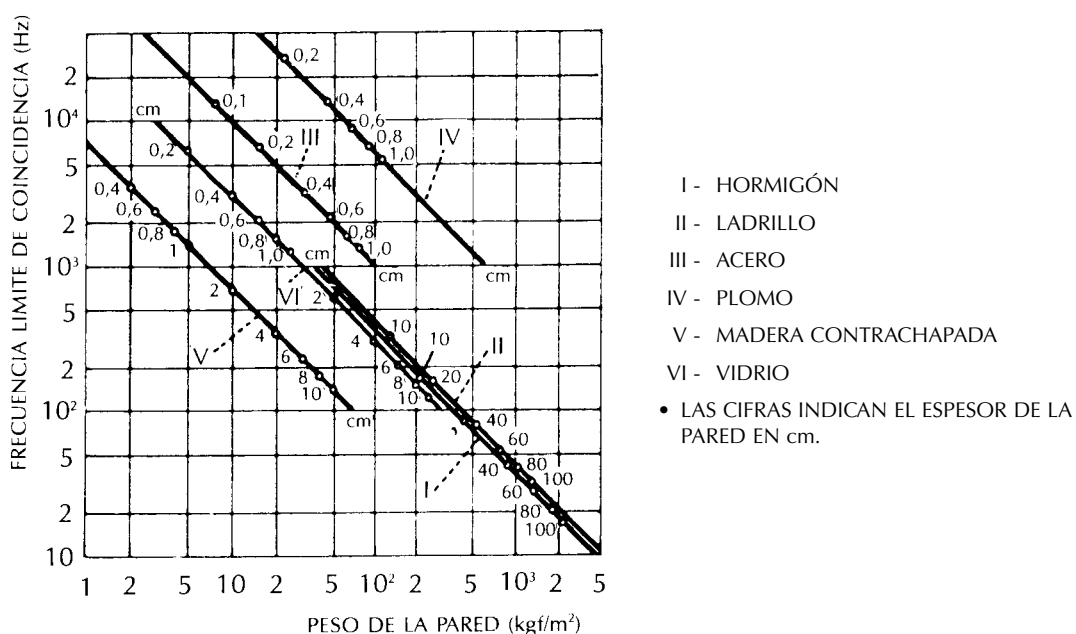


Fig. 14.

Se observa que existen tres zonas donde el aislamiento acústico está gobernado por diferentes factores, tal como se representan esquemáticamente en la Fig. 15.

- La zona de «dominio de la elasticidad» ($f < f_0$), que corresponde en general a muy bajas frecuencias y con un aislamiento descendente hasta « f_0 », donde es casi nulo.
- La zona de «dominio de la masa», que sí está gobernada por la ley de masas, caracterizada por $f_0 < f < f_c$ aproximadamente, donde:

$$R = 20 \log (m \cdot f) - 42 \quad (\text{dB})$$

- La zona de «dominio del amortiguamiento interno», que corresponde a $f > f_c$, en la cual el aislamiento baja de modo considerable hasta f_c y aumenta desde ese valor de un modo progresivo.

En esta zona, el factor que gobierna las variaciones del aislamiento es el amortiguamiento interno (η) del material, es decir, la capacidad del material para absorber energía de vibración a las ondas de flexión.

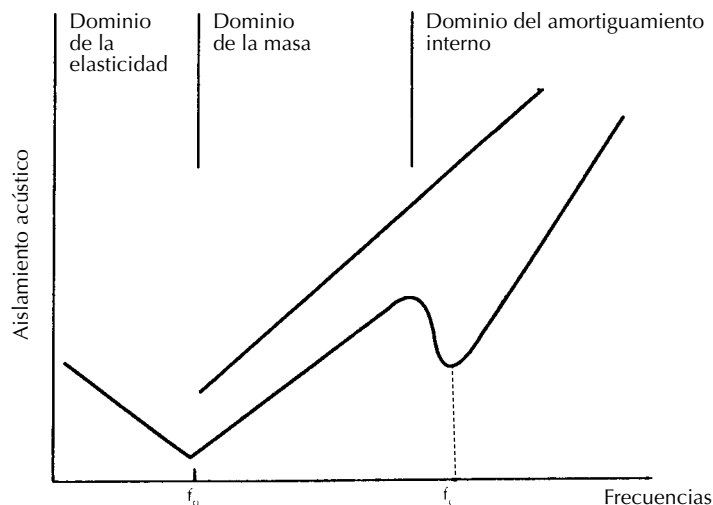


Fig. 15. Aislamiento acústico de una pared simple.

Toda esta problemática está bien estudiada para las paredes simples de obra que se utilizan en la Edificación, como se representa en la Fig. 16.

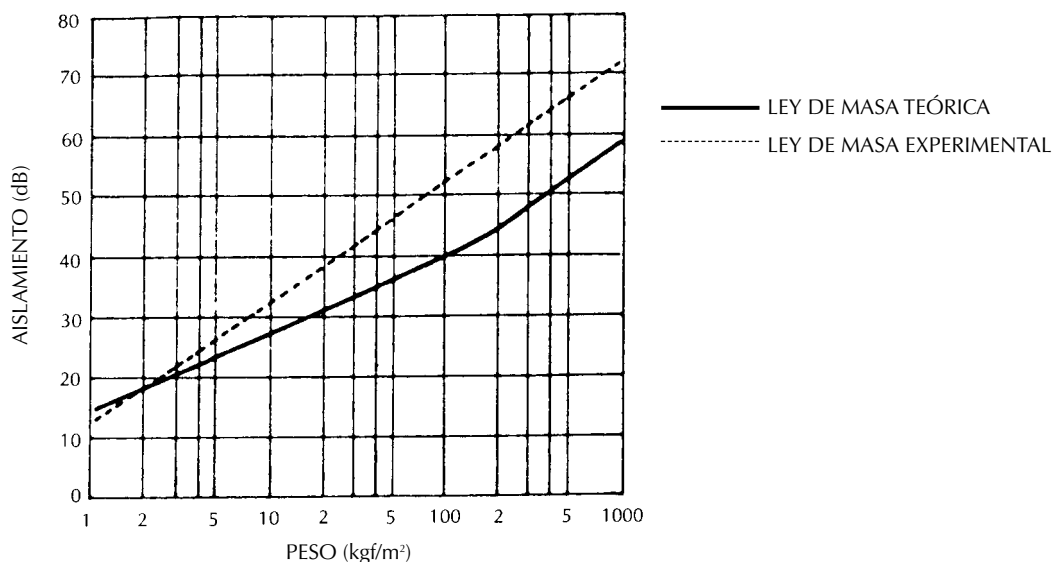


Fig. 16.

La curva de trazos indica el valor del aislamiento en función de la masa para la pared ficticia considerada (Ley de masa teórica).

Sin embargo, en la práctica, y de acuerdo con los ensayos realizados en laboratorio con distintos tipos de materiales, se ha podido comprobar que los resultados obtenidos son inferiores (curva llena).

Se observa que existe una diferencia notable en el aislamiento de 10-15 dB para pérdidas reales, entre la ley de masa teórica y las medidas reales, debido a los factores de influencia explicados.

NOTA: Importancia de la estanquidad

Los defectos en las juntas de albañilería, las rendijas en puertas y ventanas, las juntas de paneles prefabricados, etc., juegan un papel nefasto cara al aislamiento acústico, dando lugar a las «fugas acústicas» o «puentes acústicos» (por asimilarlos a los puentes térmicos). Estas fugas dejan pasar fundamentalmente las frecuencias agudas, con lo que el problema se agrava (recordar la sensibilidad del oído a dichas frecuencias).

03.06.01.03. Paredes múltiples

En el punto anterior se ha determinado el valor real del aislamiento acústico de una pared simple.

Si dicha pared de masa «m» la dividimos en dos hojas de masas $m_1 + m_2 = m$ y las separamos una distancia «d», el conjunto ofrece un aislamiento acústico superior al de la pared simple de masa equivalente.

Este hecho representa un paso importante en el aligeramiento de las soluciones constructivas para un mismo valor de aislamiento acústico. Además este aligeramiento puede ser muy notable con la utilización de materiales ligeros blandos a la flexión (es decir, de f_c elevada), como se verá más adelante.

El análisis del aislamiento, en este caso, nos lleva a la aparición de frecuencias en el entorno de las cuales existe una fuerte reducción del aislamiento. En este caso se trata de la «frecuencia natural del sistema» y de las «frecuencias de cavidad», que dan lugar a zonas dominadas por diversos factores de influencia.

- a) La frecuencia natural del sistema (f_0) se refiere a un conjunto de masas m_1 y m_2 , unidas por un resorte de rigidez K.

Este sistema de masa-muelle-masa, con la capacidad de vibrar, posee una frecuencia de resonancia propia que viene definida por la siguiente expresión:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K \frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2}} \quad \text{Hz}$$

donde:

K - Rigidez del medio separador (N/m^3).

m_1 y m_2 - Masas de los elementos (kg/m^2).

El medio separador puede estar constituido por aire, un material determinado o un sistema mecánico. Si el medio lo constituye el aire, la frecuencia de resonancia viene dada por la expresión:

$$f_0 = \frac{615}{\sqrt{d}} \sqrt{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}} \quad \text{Hz}$$

donde:

d - Espesor de la capa de aire (cm).

m_1 y m_2 - Masas superficiales, en kg/m^2 .

Esta frecuencia será tanto más baja cuanto mayores sean las masas y/o mayor la distancia entre ellas. Para esta frecuencia, el aislamiento acústico es muy bajo, prácticamente nulo; por tanto, se debe conseguir que esta frecuencia sea lo más baja posible, ya que la sensibilidad del oído disminuye al disminuir la frecuencia. Normalmente se busca que esta frecuencia esté por debajo del campo de medida (100 Hz).

Algunos estudios aconsejan que esta frecuencia sea menor de 75 Hz, y otros, más exigentes, recomiendan que sea menor de 60 Hz. Para estos dos casos, se obtienen las relaciones prácticas siguientes:

$$\text{— Para } f_0 < 75 \text{ Hz; } d > 67 \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \text{ cm}$$

$$\text{— Para } f_0 < 60 \text{ Hz; } d > 105 \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \text{ cm}$$

- b) La zona de «dominio de la elasticidad» ($f < f_0$), en que el comportamiento del sistema es idéntico al de una sola hoja de masa $m_t = m_1 + m_2$.

Precisamente para $f = f_0$, el aislamiento es casi nulo.

- c) La zona de «dominio de las masas» ($f_0 < f < f_{\text{cavidad}}$).

Para frecuencias superiores a la frecuencia de resonancia es donde realmente se aprecia la ventaja de la doble pared, ya que para una masa equivalente a la pared simple la mejora del aislamiento teórica alcanza los 18 dB al duplicar la frecuencia, en vez de 6 dB.

El nivel de aislamiento obtenido en esta zona de frecuencias a nivel teórico puede calcularse mediante la expresión siguiente:

$$R = 20 \log \frac{m_1 \cdot m_2 \cdot d}{2 \rho^2 c^3} \cdot \omega^3$$

donde:

m_1 y m_2 - Masas de elementos (kg/m^2).

d - Espesor de la capa de aire (m).

ω - Frecuencia angular $\omega = 2\pi f$ (Hz).

ρ - Densidad de aire (kg/m^3).

c - Velocidad del sonido en el aire (m/seg).

Este valor queda reducido en torno a las zonas en que las masas m_1 y m_2 , tengan sus frecuencias críticas o de coincidencia, ya que en esas frecuencias cada una de las hojas será muy transmisora del sonido.

La mejora del aislamiento se puede obtener con diversos procedimientos:

- Haciendo que ambas hojas, si son del mismo material, no sean iguales de espesor, para evitar el efecto de acoplamiento en una misma frecuencia crítica.
- Diseñando hojas de materiales diferentes, especialmente que uno de ellos sea blando a la flexión (cartón-yeso, chapa metálica...), para que al menos una de las hojas tenga una frecuencia crítica muy elevada (>3.000 Hz) donde el aislamiento ya es tan importante que no presenta influencias negativas apreciables.

Este es el caso de los trasdosados sobre cerramientos o divisorios de obra, con placas de cartón-yeso.

- El límite ideal es la disposición de ambas hojas con materiales blandos a la flexión. Este es el caso de la tabiquería de montaje en seco, con placas de cartón yeso.
- Los procedimientos anteriores se deben complementar con un elemento absorbente interno en el interior de la cámara de aire (p.e.: lana de vidrio).

El efecto de este elemento absorbente es conseguir un desacople de ambas hojas y una absorción de la energía acústica que se transmite de la hoja excitada por la vibración sonora, hacia la segunda.

- d) La zona de «dominio de las resonancias de cavidad», gobernada exclusivamente por la distancia « d ». En esta zona el aislamiento baja fuertemente en el entorno de cada:

$$d = n \cdot \frac{\lambda}{2} = n \cdot \frac{c}{2f}$$

representadas en Fig. 17

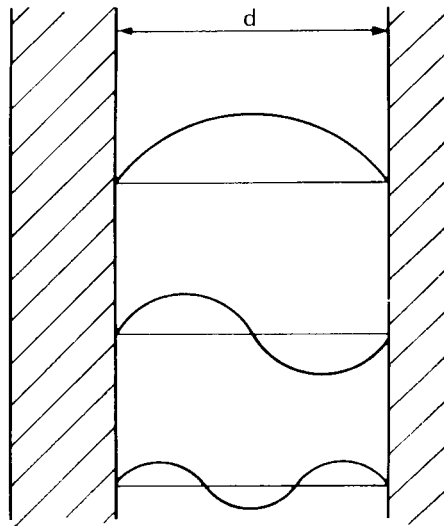


Fig. 17.

Siendo: c = Velocidad del sonido (m/s).

n = Número entero (1, 2, 3...).

d = Distancia en capas (m).

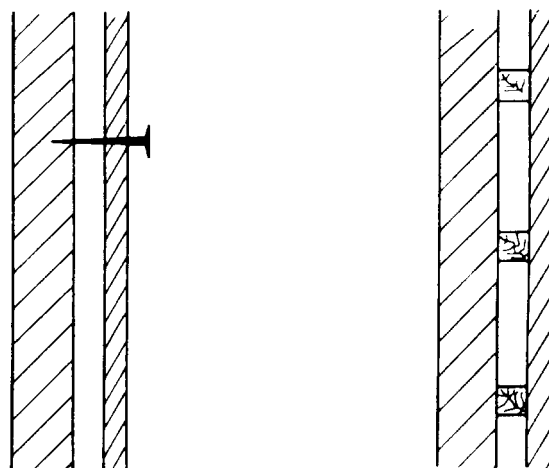
f = Frecuencia (Hz).

Para estas frecuencias, el sistema se comporta como una masa única $m_t = m_1 + m_2$, ya que ambas hojas se acoplan acústicamente, desapareciendo así el efecto aislante de la pared doble.

Sólo existe una solución general al problema: la presencia de elementos absorbentes en la cavidad (p.e.: lana de vidrio), amortiguará la fuerte caída del aislamiento, por absorción de buena parte de la energía de resonancia en la cavidad.

NOTA: Acoplamiento rígido entre elementos

Las capas de una pared múltiple no deben tener, a ser posible, ninguna unión rígida, ya que ésta provoca un cortocircuito acústico (puente fónico), que reduce el efecto de pared múltiple. En el caso límite, el aislamiento acústico sería el de una pared simple de peso equivalente al peso total.



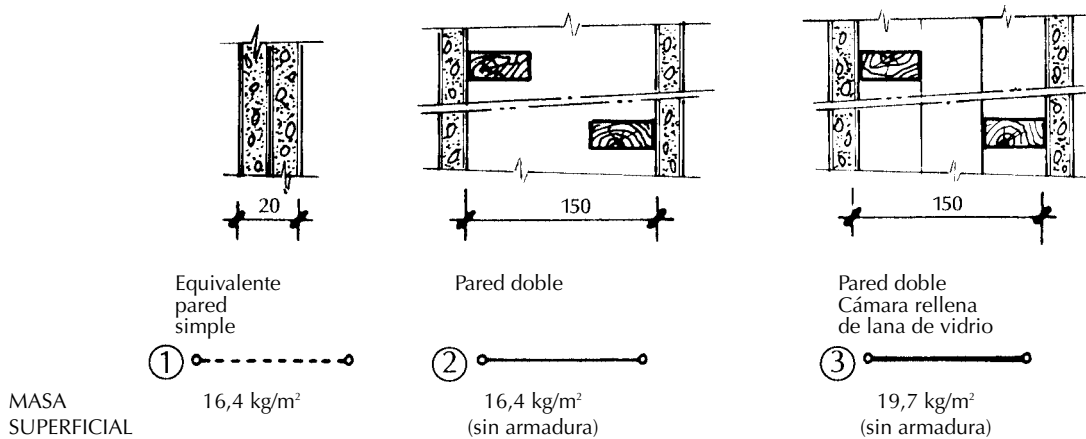
UNIONES RÍGIDAS A EVITAR

Fig. 18.

Si son inevitables tales puentes, como, por ejemplo, en las sujeciones laterales de las paredes, en los pasos inevitables de tuberías, etc., éstos deben ser relativamente blandos y ligeros para paredes pesadas, y pesados para paredes ligeras.

04.06.01.04. Ejemplo de aislamiento a ruido aéreo

Se presenta a continuación un ejemplo comparativo que resume las características de los aislamientos de paredes simples y dobles, según mediciones reales de laboratorio, resumidas en la Fig. 19.



- MATERIALES:
- Placa de cartón-yeso espesor 10 mm.
 - Listón de 100 · 55 mm.
 - Lana de vidrio espesor 150 mm.



Fig. 19. Aislamiento acústico o ruido aéreo de un paramento ligero.

La curva 1 corresponde a las dos placas cartón-yeso juntas, pero no solidariamente unidas, por lo que la frecuencia crítica del material es de 4.000 Hz, que correspondería a una sola hoja. No obstante, se observa un cierto acoplamiento caracterizado por la bajada de aislamiento a 2.000 Hz, que correspondería a la frecuencia crítica de la pared unitaria de espesor 20 mm.

La curva 2 presenta un bajo aislamiento a la frecuencia natural del sistema ($f_0 \cong 100$ Hz), además de algunos acoplamientos debido a los rigidizadores, así como la influencia de las resonancias en cavidad y la importante reducción del aislamiento a la frecuencia crítica de las hojas iguales a 4.000 Hz.

No obstante, el aislamiento global es superior al de la hoja simple.

La curva 3 corresponde al mismo montaje ensayado en 2, pero con adición de lana de vidrio en la cavidad. La curva 3 es sensiblemente parecida a la curva 2, pero con valores de aislamiento superiores.

Esto es debido al fuerte efecto de desacoplamiento de hojas y la absorción de la energía acústica en cámara. Ya en la frecuencia natural del sistema, la reducción de aislamiento es inferior y se amortiguan las caídas de aislamiento en torno a las frecuencias críticas y de cavidad.

04.06.02. AMORTIGUAMIENTO DEL RUIDO TRANSMITIDO POR VÍA SÓLIDA

Los ruidos que se generan en medios sólidos (impactos, vibraciones) se transmiten por esas vías, con la velocidad y amortiguamiento que tengan los diferentes medios, hasta pasar al estado de transmisión aérea cuando se hayan alcanzado las condiciones favorables de acoplamiento al aire (por ej. la vibración de una pared).

Cualquiera que sea el origen de la excitación del medio sólido, la única posibilidad de reducir la transmisión de la energía liberada es la desolidarización del medio sólido excitado respecto al resto de la estructura del edificio. Esto se consigue introduciendo materiales elásticos en la vía de transmisión. El principio está basado en la capacidad amortiguante del material elástico de actuar como muelle, por lo que es necesario siempre que el material o sistema a introducir trabaje dentro de su campo elástico.

Un sistema constituido por una masa, soportada por un elemento de características elásticas conocidas, tiene una frecuencia natural de vibración del sistema definida por (fig. 20):

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

siendo:

f_n =frecuencia natural, en Hz

K =rigidez del elemento elástico en kg/sg²

M =masa, en kg

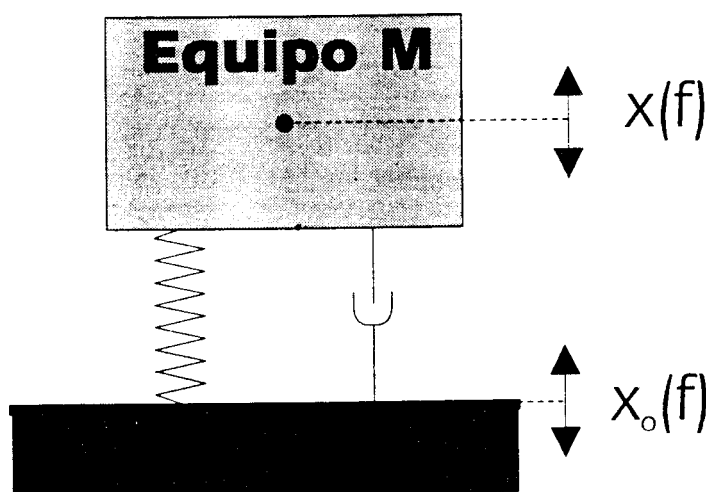


Fig. 20.

La rigidez del elemento elástico es la característica del elemento como muelle. Otra forma de establecer la frecuencia natural del sistema es la determinación de la deflexión estática de la capa elástica bajo la carga de la masa «M».

La expresión en este caso es:

$$f_n = \frac{15,7}{\sqrt{d}} \text{ Hz}$$

siendo «d», el valor de la deflexión estática en mm.

Si el sistema constituido por la masa «m» y el muelle de rigidez dinámica «k», se le somete a una excitación de frecuencia perturbadora « f_p », la transmisibilidad de la energía de excitación es:

$$T = \frac{1}{\left(\frac{f_p}{f_n}\right)^2 - 1}$$

siendo «T» la transmisibilidad de la energía de perturbación.

La representación gráfica de la función anterior (fig. 21) permite establecer:

- Para $f_p/f_n < 1/2$, la transmisibilidad es igual que si no existiera unión elástica.
- Para $1/2 < f_p/f_n < \sqrt{2}$, la transmisibilidad aumenta fuertemente por el efecto de resonancia del sistema para $f=f_n$.
- Para valores de $f_p/f_n > \sqrt{2}$, la transmisibilidad comienza a reducirse de modo apreciable, de modo que para $f_p/f_n=3$, el valor transmitido es sólo 16,66% de la energía de excitación.

Nota: Las expresiones de la transmisibilidad se han simplificado considerando que no existe ningún tipo de amortiguamiento interno en el sistema masa-muelle, lo que no es cierto en la realidad, ya que siempre existirá amortiguamiento. No obstante, la utilización de la expresión utilizada permite unos resultados aceptables en la práctica totalidad de los casos que se presentan.

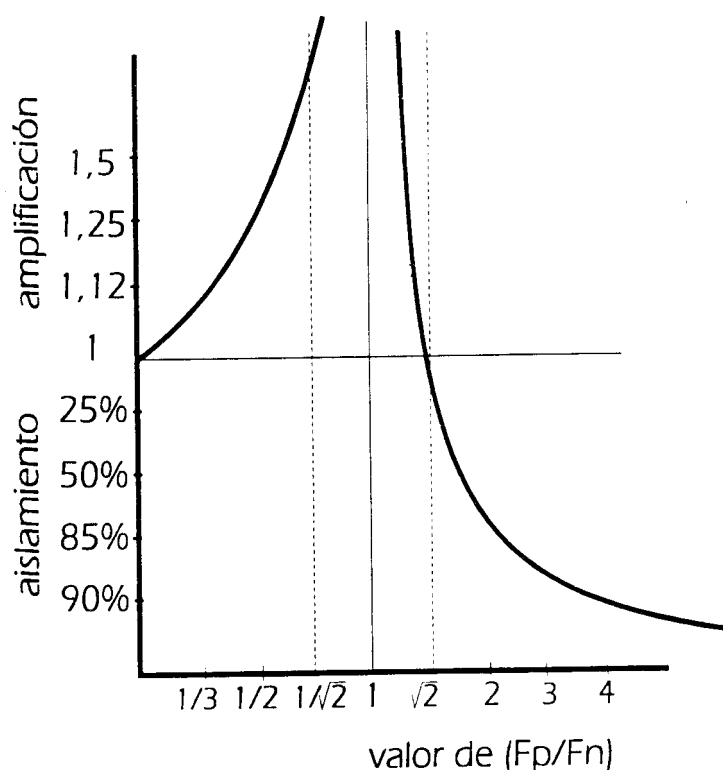


Fig. 21.

El valor práctico generalmente admitido es que deben utilizarse elementos elásticos con una f_n tal, que sea como mínimo $f_n = f_p/3$, siendo f_p Hz el valor de la frecuencia más baja capaz de excitar el sistema. Por ejemplo, si se quiere proteger la estructura de un edificio de las vibraciones que genera un compresor que trabaja a 1.450 rpm, deberán instalarse elementos amortiguadores que presenten una $f_n \leq 1.450/60 \cdot 3$ Hz, con la masa total repartida en el número de elementos amortiguadores diferentes.

A efectos prácticos, puede utilizarse el gráfico de la fig. 22, para la determinación de la f_n necesaria para grado de aislamiento, dado en tanto por ciento de excitación no transmitida.

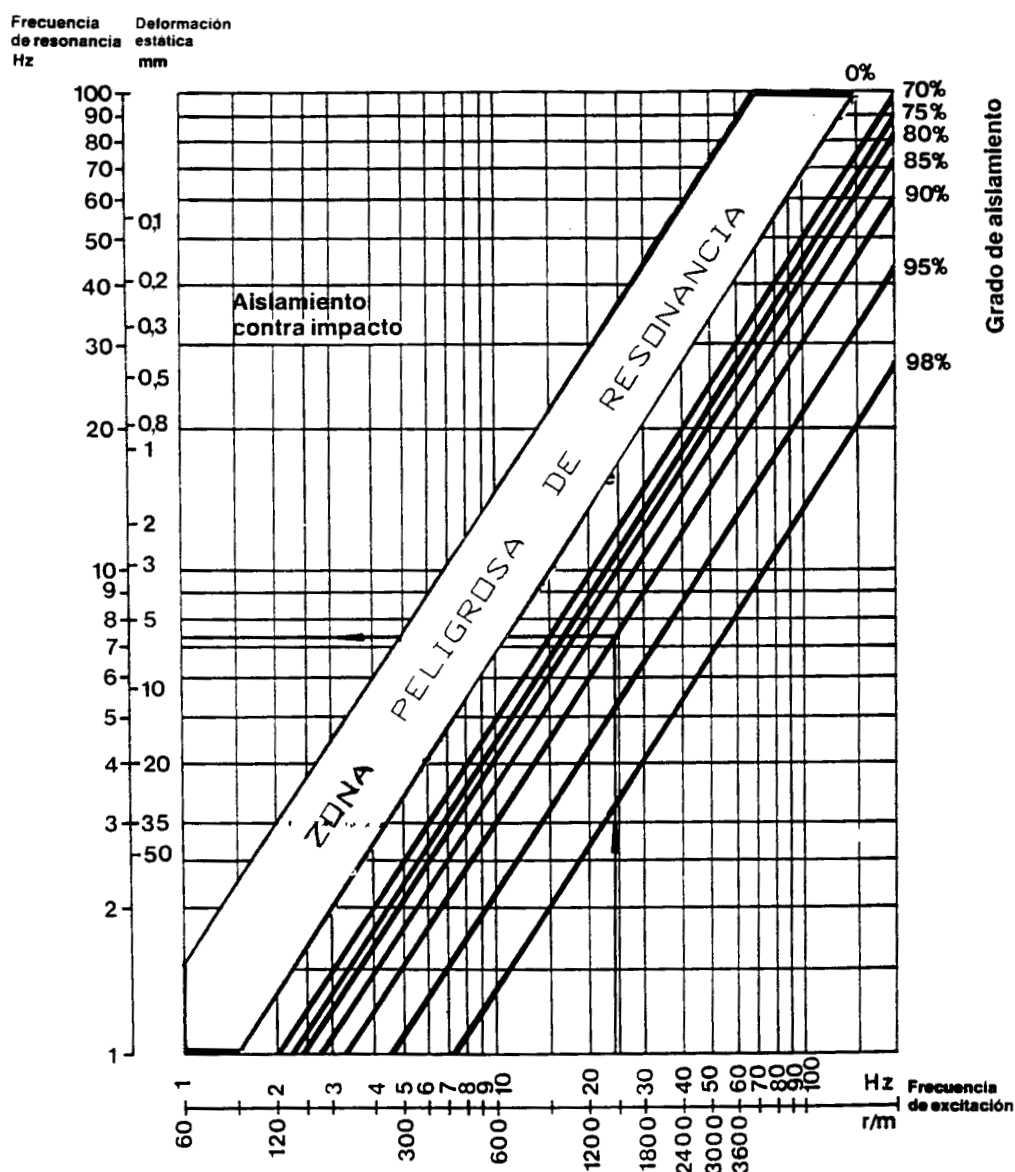


Fig. 22.

Es muy importante establecer que los elementos de amortiguación se construyen por los fabricantes para un intervalo de cargas determinado y para el que se garantiza la f_n Hz de catálogo. Fuera de ese intervalo de cargas, los elementos trabajan mal o no trabajan. Si la carga es inferior a la prevista, el material trabaja con una f_n superior a la prevista, lo que aumentará la transmisibilidad y por tanto la energía de la vibración; si la carga es superior a la prevista, el material se aplastará saliendo del campo elástico de trabajo, con el resultado equivalente a que se rigidiza y parece como si no se hubiera puesto ningún elemento de amortiguación.

En resumen: la elección de los elementos de amortiguación dependerán de la f_n que se haya determinado y del modelo adecuado para esa f_n , con cada una de las cargas (iguales o no) en que se reparta el peso total del equipo.

Un aspecto relativo a la elección de los elementos de amortiguación es la necesidad o no de disponer de bancadas de inercia en la instalación de equipos.

Una bancada de inercia no tiene ningún efecto sobre la eficacia en la función antivibratoria, pero sí puede afectar a la magnitud del movimiento propio del equipo.

Lo anterior tiene especial importancia cuando los equipos presentan fuerzas desequilibradoras notables para su tamaño o tipo de movimiento. Cuando más se manifiestan estos problemas es en los períodos de arranques y paradas de los equipos, ya que al trabajar en frecuencias próximas y por debajo de f_n , el sistema está controlado por la rigidez de las uniones por encima de f_n , el sistema resulta amortiguado.

Por todo esto, es fundamental la determinación previa de disponer o no de bancadas de inercia, ya que afectan a la elección del modelo, cuando no del tipo de los elementos de amortiguación.

A) Materiales y tipos de elementos de amortiguación

Los tipos generales son:

- Antivibradores metálicos: Están constituidos por muelles de acero al carbono, con alta resistencia a la tracción. Tienen una gran capacidad de deformación elástica bajo carga, por lo que se recomiendan para aislar frecuencias bajas (menos de 1.000 rpm, es decir, 16 Hz). En el mercado se encuentran modelos con f_n tan baja como 2 Hz (fig. 23).

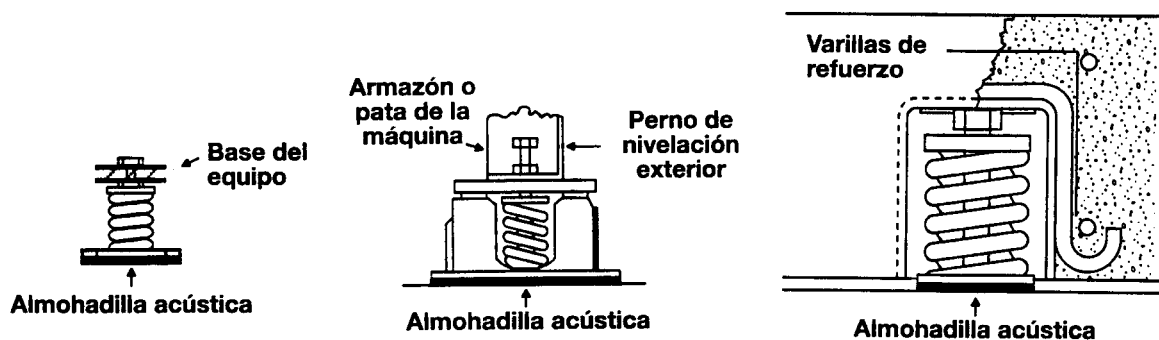


Fig. 23.

- Antivibradores de caucho: Se trata de material natural o mezclado sometido a proceso de vulcanización, con las características técnicas necesarias. Tienen menor capacidad de deformación que los metálicos, por lo que sólo pueden recomendarse para frecuencias superiores a 20 Hz. Sin embargo, tienen una buena amortiguación interna absorbiendo muy bien los impactos. Se encuentra en el mercado con f_n desde 7 Hz (fig. 24).

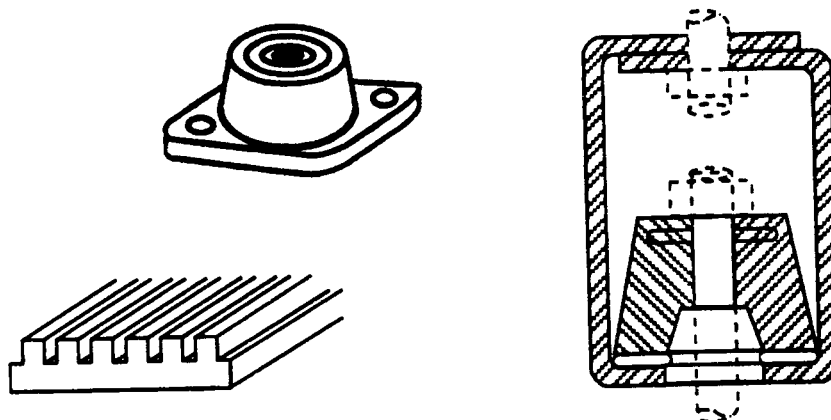


Fig. 24.

- Lanas minerales: Las lanas de vidrio y roca, con densidades adecuadas, actúan como elementos amortiguadores con valores aceptables de trabajo para frecuencias superiores a 30 Hz. Esto es posible por el bajo módulo de rigidez dinámica de las lanas minerales, que es algo superior al del aire. Así, bajo cargas uniformemente repartidas (losas flotantes), se obtienen sistemas con f_n de 10 Hz. El material trabaja perfectamente dentro de su campo elástico ya que las deformaciones bajo carga son de 2-3 mm.

B) Valores de reducción a ruido de impacto

Desde el aspecto acústico, una de las aplicaciones más interesantes de los sistemas señalados es la reducción a ruido de impacto en el local subyacente al que lo origina, mediante la construcción de una losa flotante, sobre un elemento elástico del tipo de una lana mineral. De acuerdo con lo establecido en la NBE-CA-88, el valor del nivel a ruido de impacto normalizado es:

$$L_N = L_o - 10 \log \frac{10}{A} \quad \text{dB}$$

donde:

L_N es el nivel sonoro normalizado

L_o es el nivel medido por el equipo producido por una máquina de martillos normalizada, medido en el local receptor

A es el área absorbente del local receptor, en m^2 .

La diferencia de medidas sobre un elemento horizontal antes y después de aplicarle una solución de mejora para los ruidos de impacto representa la reducción.

$$\Delta L_N = L_{N1} - L_{N2} \quad \text{dB}$$

Un método teórico de cálculo, basado en la reducción de la energía transmitida, establece que el aislamiento acústico o mejora es:

$$L_N = 40 \log \frac{f_p}{f_n} \quad \text{dB}$$

Que es válida para toda $f_p > 3 \cdot f_n$.

Los únicos valores admisibles son los de ensayo, pero este tipo de soluciones permite establecer resultados teóricos con suficiente aproximación a los reales de ensayo. En la fig. 25 puede verse el resultado de mejora a ruido de impacto de una losa flotante de hormigón sobre una lana de vidrio de 15 mm de espesor.

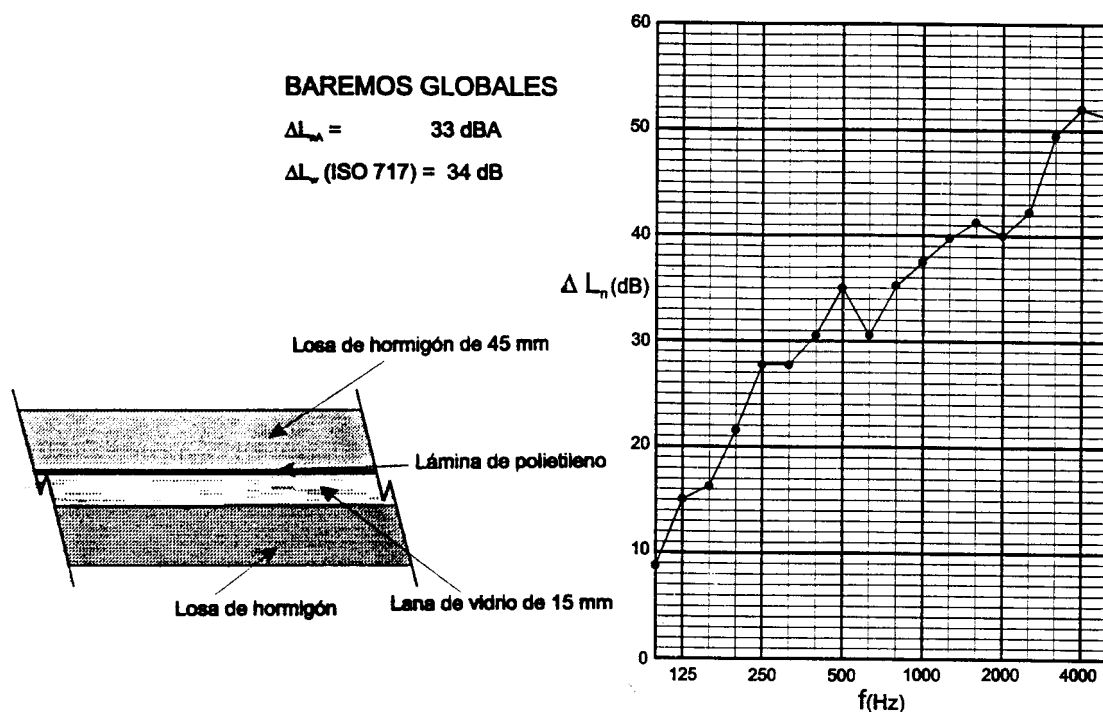
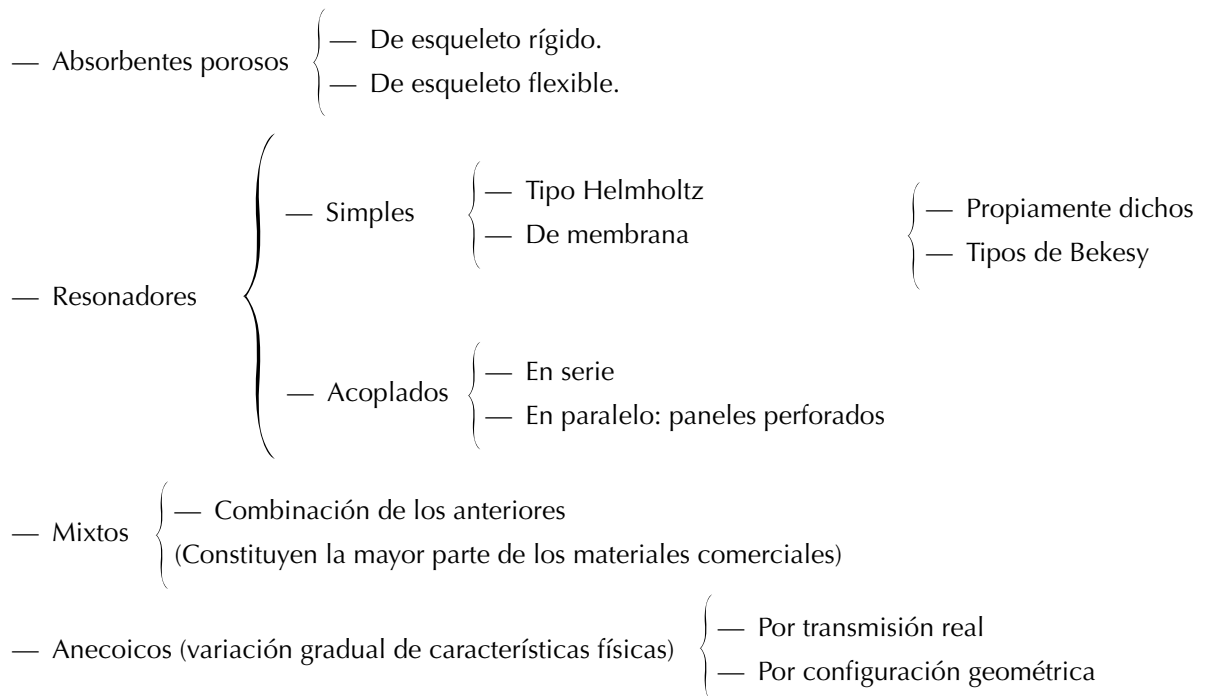


Fig. 25.

04.05. Absorbentes sonoros

Son todos aquellos materiales o sistemas que disponen de elevados coeficientes de absorción sonora en todo o en parte del espectro de frecuencias audibles.

Se pueden clasificar según el siguiente esquema:



Los más típicos, y desde luego los únicos, de entre los considerados aquí, con características de verdadero material, son los materiales porosos; siendo, los demás, dispositivos o estructuras absorbentes.

Los *materiales* porosos están constituidos por un medio sólido (esqueleto), recorrido por cavidades más o menos tortuosas (poros) comunicadas con el exterior.

La degradación de la energía acústica se produce por fricción viscosa del fluido en el seno de las cavidades.

Desde el punto de vista del comportamiento acústico, conviene distinguir entre materiales de esqueleto rígido y flexible. En los primeros el coeficiente de absorción aumenta con la frecuencia, mientras que en los segundos se presentan resonancias (máximos) de absorción a frecuencias bajas y medias.

Los *resonadores*; como su propio nombre indica, producen la absorción de energía acústica mediante un proceso de resonancia. El movimiento resonante de una parte del sistema extrae energía del campo acústico, de manera selectiva y preferente, en una banda de frecuencias determinada.

Hay diversas fórmulas para el cálculo de la frecuencia central de resonancia, y así poder utilizar el más adecuado en cada caso.

Los *absorbentes anecoicos*, también llamados dispositivos de absorción con variación progresiva de las características físicas, hacen uso del hecho por el que la reflexión de una onda acústica se produce cuando encuentra una variación de las características físicas del medio en que se propaga. Con la variación gradual de éstas, se pretende reducir al mínimo el obstáculo que presenta el material.

Con estas absorbentes se logran coeficientes de absorción a incidencia normal superiores al 99%, a partir de una determinada frecuencia llamada de corte. Su utilización es específica en cámaras anecoicas.

En la práctica son tres los materiales o sistemas utilizados:

- Materiales porosos.
- Resonadores de placa.
- Resonadores de Helmholtz.

04.05.01. MATERIALES POROSOS

Los materiales porosos están constituidos por una estructura que configura una elevada cantidad de intersticios o poros, comunicados entre sí. Los materiales de estructura fibrosa se ajustan exactamente a esta configuración.

Al incidir una onda acústica sobre la superficie del material, un importante porcentaje de la misma penetra por los intersticios; haciendo entrar en vibración a las fibras, con lo que se produce una transformación en energía cinética de parte de la energía acústica.

Por otra parte, el aire que ocupa los poros entra en movimiento; produciéndose unas pérdidas de energía por el rozamiento de las partículas con el esqueleto, que se transforma en calor.

Como quiera que la sección de que dispone la onda acústica está limitada por el esqueleto o elemento sólido; se comprende que el comportamiento del material dependerá de la porosidad del mismo.

Efectivamente, la elevada absorción acústica de los materiales constituidos por fibras de vidrio o roca es explicable a su elevada porosidad que puede rebasar el 99%.

No obstante, como quiera que los espesores de capa que normalmente se utilizan es muy limitada, por problemas de espacio y costo, la absorción acústica con materiales porosos es muy elevada a las altas frecuencias y limitada a las bajas. Efectivamente, para obtener un grado de absorción del 99%, es necesario un espesor de aislamiento para una determinada frecuencia; equivalente a $\lambda/4$ (λ longitud de onda).

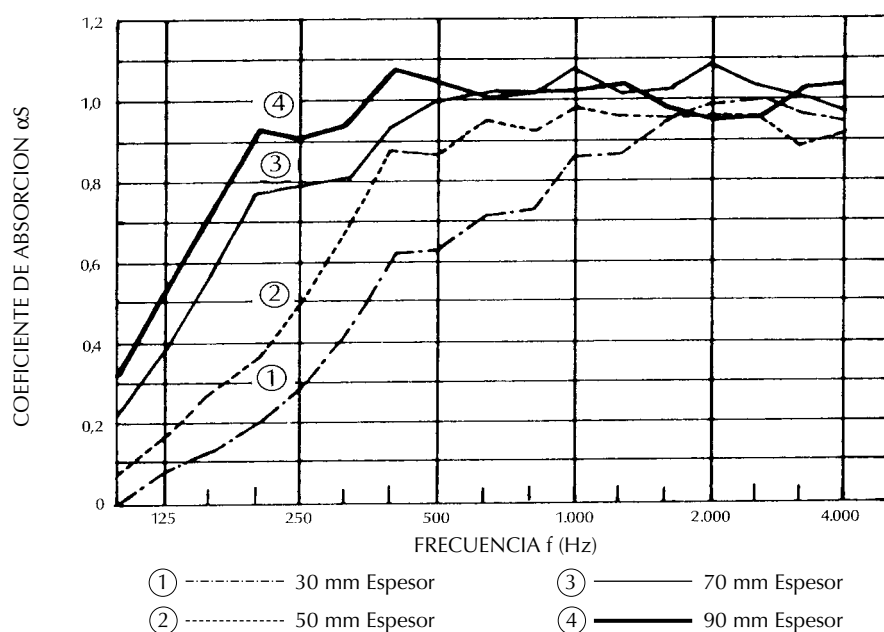


Fig. 9. Absorción acústica de paneles de lana de roca «ROCLAINE» de densidad 70 kg/m³ apoyados sobre una superficie rígida.

En la Fig. 9 aparecen las curvas de absorción acústica de un panel de lana de roca con diferentes espesores.

Observando las mismas, puede apreciarse lo anteriormente expuesto: la influencia del espesor sobre el coeficiente de absorción. Efectivamente, así como para las altas frecuencias el comportamiento está muy en línea para los cuatro espesores considerados, en las medias y especialmente en bajas frecuencias, se aprecia claramente la ganancia obtenida al aumentar el espesor.

Otros factores de influencia son los espacios vacíos entre el material absorbente y la pared rígida (cámara) y los revestimientos.

La cámara actúa como un implementador del espesor real del material, de modo que se consiguen absorciones más elevadas para un mismo producto según su disposición esté más alejada de la pared rígida.

Este hecho tiene especial relevancia en las bajas y medias frecuencias, pero no en las altas, ya que en éstas los coeficientes de absorción son de por sí muy elevados.

El otro aspecto importante es el revestimiento con el que se presentan habitualmente estos productos para su comercialización como «techos acústicos».

Los revestimientos pueden ser de dos clases: porosos e impermeables.

Si el revestimiento es poroso, no presenta una impedancia importante al paso del aire, por lo que los valores de absorción del material base no resultan modificados prácticamente. Es el caso de los revestimientos de tejidos de fibra de vidrio u otros materiales y las aplicaciones de pinturas con pistola.

Los revestimientos impermeables (láminas plásticas o metálicas) modifican sustancialmente el espectro absorbente acústico del material de base, sobre todo a partir de las frecuencias en que la resistencia de masa de la lámina supera la impedancia del aire.

$$\omega \cdot M > \rho \cdot c$$

ω - Frecuencia angular [$\omega = 2\pi f$] (Hz)

M - Masa de la lámina (kg/m^2)

ρ - Densidad del aire (kg/m^3)

c - Velocidad del sonido del aire (m/seg).

De acuerdo con esta relación, una lámina plástica de $50 \mu\text{m}$ o de aluminio de $25 \mu\text{m}$ puede considerarse permeable al sonido hasta los 1.000 Hz. Para frecuencias más altas, disminuye lentamente la permeabilidad al sonido, y por lo tanto, la absorción de acuerdo con la ley de masa.

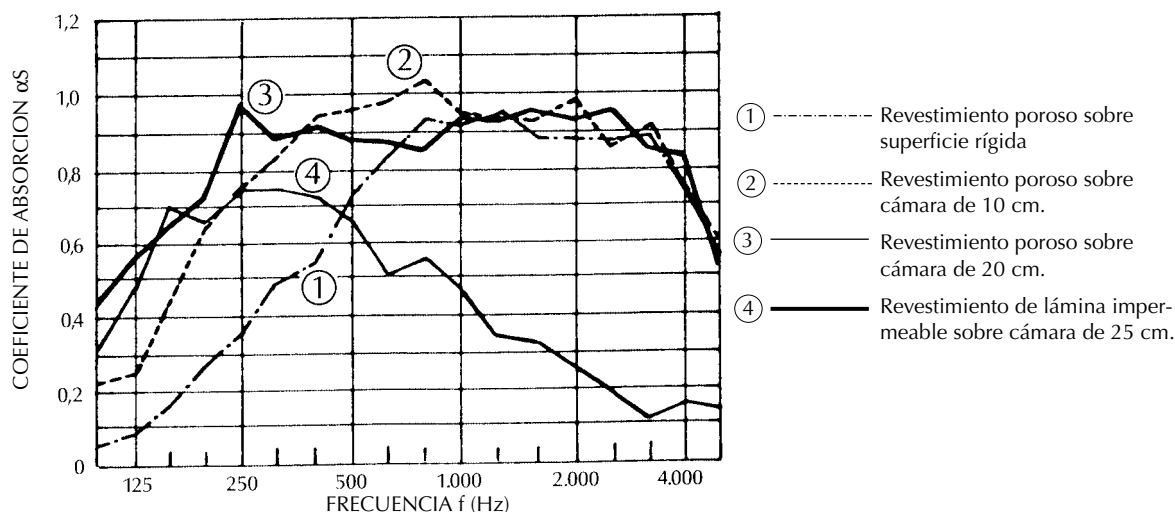


Fig. 10. Absorción acústica de paneles de fibra de vidrio 30 mm, con revestimiento poroso o lámina impermeable.

En la Fig. 10 se encuentran representados estos aspectos.

Las curvas 1, 2 y 3 corresponden al mismo material base con revestimiento poroso. Los valores de absorción acústica directamente apoyados sobre superficie rígida son menores a frecuencias bajas y medias, que si la cámara es de 10 ó 20 cm.

La curva 4 corresponde al mismo material base, pero revestido con lámina impermeable de permeabilidad acústica hasta frecuencias de 250-400 Hz, debido a que la masa de la lámina es importante en este caso. A partir de esas frecuencias, la lámina refleja buena parte del sonido incidente, por no ser permeable al mismo, lo que reduce el coeficiente de absorción sonora, actuando como un sistema de resonador de placa.

Se incorpora una tabla extraída del libro «Acústica en los edificios», de M. Meisser donde están agrupados tipológicamente diversos materiales, indicando también su comportamiento a distintas gamas de frecuencias, donde:

G = gama de sonidos graves.

M = gama de sonidos medios.

A = gama de sonidos agudos.

TABLA 2

NATURALEZA	ASPECTO	FORMA DE COLOCACION	PROCESO DE ABSORCION	VALOR ACUSTICO RELATIVO	OBSERVACIONES
Placas de fibras minerales comprimidas. • Lana de roca. • Lana de vidrio.	Placas rígidas con superficie uniforme o fisurada o ranurada.	Encoladas.	La absorción es debida a la porosidad de las placas.		Estos materiales son imputrescibles y no combustibles. Pueden encolarse sobre paramentos verticales. No es conveniente pintar estas placas, salvo, eventualmente, con pintura al agua que no tape los poros.
		Suspendidas.	Al efecto de porosidad se añade un efecto de diafragma que aumenta la absorción de los graves.		
Placas de fibras minerales poco comprimidas con una lámina plástica. • Lana de vidrio.	Placas semirrígidas autoportantes.	Suspendidas.	La absorción es debida a la porosidad y al efecto diafragma de la placa suspendida. La película plástica modera la absorción de los agudos en favor de los medios.		Estos materiales son interesantes por su poder absorbente casi uniforme. Imputrescible y no combustible.
		Encoladas.	La absorción es debida a la porosidad.		
Placas de fibras vegetales comprimidas. • Fibra de madera. • Fibra de caña de azúcar. • Paja, caña.	Superficie uniforme fisurada, estriada, ranurada o perforada.	Encoladas.	La absorción es debida a la porosidad.		Es un material combustible. Es conveniente no pintarlas. Pueden encolarse sobre paramentos verticales.
		Suspendidas.	La absorción es debida a la porosidad y al efecto de diafragma.		
Placas de fibras de madera	Fibras de madera aglomeradas con cemento. El aspecto es poco decorativo si queda a cara vista.	Encoladas o clavadas.	La absorción es debida a los grandes poros del material.		El poder absorbente aumenta con el espesor. Sólo pueden aplicarse sobre paramentos planos. Es un material combustible.
		Suspendidas.	La absorción aumenta por el efecto de diafragma.		
Enrejados o tejidos.		Suspendidos o fijados sobre armadura.	Se obtiene el resultado que corresponde al material que recubren. Una placa de lana de vidrio colocada sobre un tejido de gran malla da el resultado de la lana de vidrio.		Pueden ser colocados en revestimientos de muros con materiales combustibles, pero pueden ignifugarse.
		Encoladas.	Las células están cerradas y la porosidad tiene poco efecto.		
Poliestireno expandido.	Placas blancas.	Suspendidas.	Efecto de membrana ligera.		Sólo el poliestireno cortado mecánicamente tiene una ligera eficacia. Es un material combustible
		Encoladas.	Las células están cerradas y la porosidad tiene poco efecto.		
Proyecciones de fibras minerales.	Superficie rugosa irregular		Absorción por porosidad.		El revestimiento es bastante frágil, se debe proyectar sobre superficies accesibles para poder efectuar reparaciones
Enlucidos porosos con base de yeso, vermiculita.	Pueden teñirse en la masa.		Eficaz solamente en frecuencias agudas.		
Pinturas absorbentes	Colorido variado.		Eficacia débil y sobre todo en los graves y medios.		

04.05.02. RESONADORES DE PLACA

Si de acuerdo con el espectro del ruido producido, debe realizarse el tratamiento especialmente en bajas frecuencias y si no se dispone del espacio suficiente la solución más idónea es la aplicación de resonadores de placa.

Estos consisten en una placa u hoja que vibra sobre un colchón de aire. Si la placa es suficientemente grande y no demasiado rígida, la fuerza de retroceso vendrá definida por la rigidez de la capa de aire.

Considerando que la placa u hoja vibra con la misma amplitud en toda su superficie (lo cual en la práctica es válido), la frecuencia de resonancia del resonador viene dada por la expresión:

$$f_o = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\rho' \cdot d \cdot d'}}$$

donde:

c - Velocidad del sonido en el aire (m/seg).

ρ - Densidad del aire (kg/m³).

ρ' - Densidad de la placa u hoja (kg/m³).

d - Espesor de la capa de aire (m).

d' - Espesor de la placa u hoja (m).

El grado de absorción de estos resonadores depende de las pérdidas internas del material de placa u hoja y de las pérdidas por frotamiento en puntos de sujeción.

Dicho grado de absorción más bien limitado puede aumentarse rellenando el espacio de aire con un material absorbente de lana mineral (ver Fig. 11).

El material absorbente introducido en la cámara, amortigua las vibraciones reflejadas en la pared rígida, detrás de la placa y que no permiten la vibración completa de ésta, dando lugar en su ausencia a una reducción de la energía absorbida y, por tanto, del valor del coeficiente de absorción.

Lo que sí es importante es cuadricular el espacio de aire para evitar la propagación tangencial de sonido.

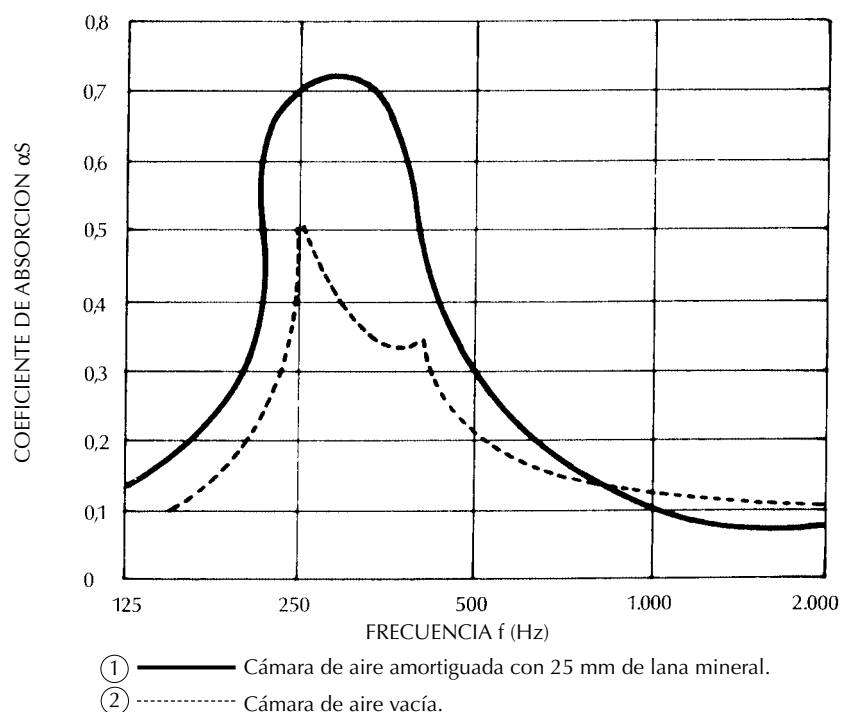


Fig. 11. Coeficientes de absorción acústica de un panel contrachapado de 1,5 mm. con cámara de aire de 60 mm.

04.05.03. RESONADORES DE AGUJERO O DE HELMHOLTZ

La constitución de los resonadores de agujero es en esencia la misma que los resonadores de placa, con la diferencia de que la placa u hoja va provista de perforaciones. Al igual que en los resonadores de placa, debe cuadrícularse el espacio de aire, a fin de evitar la propagación de sonido paralela a la placa. El tamaño de las cuadrículas debe ser pequeño en comparación con la longitud de onda del sonido a amortiguar.

Con este tipo de resonadores se consigue, para un espesor limitado, un elevado grado de absorción para la gama de frecuencias medias. La amortiguación en este caso está determinada por el rozamiento del aire con las paredes de las perforaciones, acompañado de un desprendimiento de calor. Como en caso de los resonadores de placa, el relleno del espacio de aire con un material poroso a base de lana mineral aumenta el grado de absorción.

En la Fig. 12 se representa la curva de absorción de un resonador de agujero, compuesto por una placa rígida de 9,5 mm de espesor y un 8,3% de superficie perforada, con un espacio de aire de 50 mm relleno con lana de roca.

La frecuencia de resonancia del resonador viene dada en este caso por la expresión:

$$f_o = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\epsilon}{l' \cdot d}}$$

donde:

c - Velocidad del sonido en el aire (m/seg).

ϵ - Relación superficie perforada/superficie total (m²/m²).

l' - Profundidad efectiva del agujero (m).

d - Espesor de la capa de aire (m).

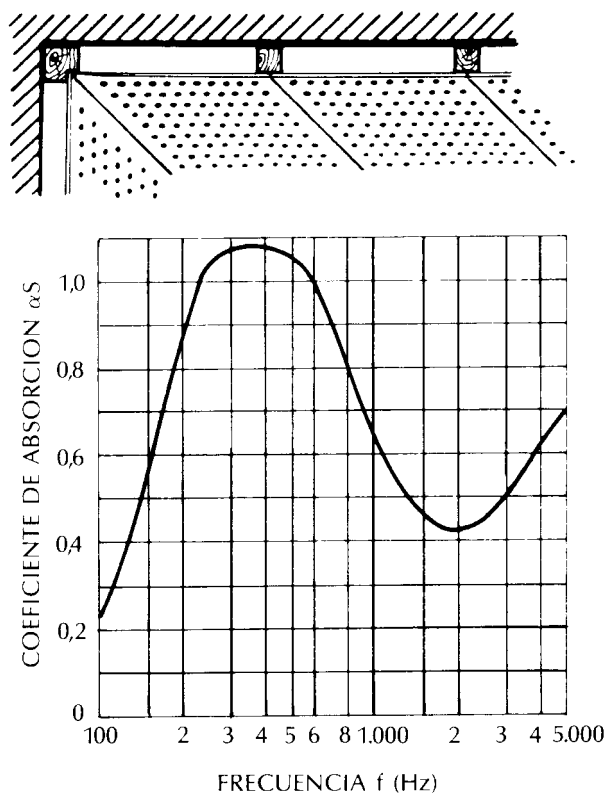


Fig. 12. La curva corresponde a una placa rígida de 9,5 mm con agujeros de 15 mm de diámetro, distanciados a 46 mm (superficie agujeros 8,3%), separada de la pared a 50 mm y rellena de la cámara con lana de roca

04.04. Amortiguación del sonido

En la amortiguación del sonido se incluyen todas las medidas con el ruido, cuya eficacia descansa perfectamente en la absorción del sonido. Entre éstas se encuentran fundamentalmente las encaminadas a reducir el ruido en el mismo local de emisión, y a mejorar la calidad de escucha de una sala.

04.04.01. PROPAGACIÓN Y AMORTIGUACIÓN DEL SONIDO EN ESPACIO LIBRE

Si consideramos una fuente de sonido en espacio libre, a medida que nos alejamos de la misma se produce una disminución de la presión sonora inversamente proporcional a la distancia. Pero este efecto no debe considerarse en principio como una amortiguación del sonido en sí, sino más bien como una disminución de la amplitud originada por la distribución de la energía en un volumen mayor.

La expresión general del nivel de presión sonora a una distancia r de la fuente, viene dada por:

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{\phi}{4\pi r^2}$$

donde:

L_p - Nivel de presión acústica a distancia de la fuente (dB).

L_w - Nivel de potencia acústica de la fuente (dB).

r - Distancia de la fuente (m).

ϕ - Directividad de la fuente emisora, que depende del ángulo sólido de emisión. En la acústica arquitectónica, se suele considerar fuente omnidireccional ($\phi=1$).

Considerando una fuente puntual omnidireccional (radiación esférica), el nivel de presión a una distancia de la fuente r viene determinado por la siguiente relación:

$$L_p = L_w - 10 \log 4\pi r^2$$

En la Fig. 7 se observa la representación gráfica de esta ecuación, que indica una caída de 6 dB cada vez que se duplica la distancia a la fuente.

04.04.02. PROPAGACIÓN Y AMORTIGUACIÓN DEL SONIDO EN RECINTOS

En un recinto o local cerrado, las ondas emitidas por una fuente determinada chocan con las superficies que limitan el local, dando origen a ondas reflejadas, las cuales a su vez se reflejan nuevamente, repitiéndose el fenómeno multitud de veces.

La presión acústica que existe en un punto determinado del recinto, después de haberse producido varias reflexiones del sonido, es la resultante de las presiones de las ondas emitidas en distintos momentos y que en el instante de la observación se cruzan en el punto considerado. Dicho de otro modo, la presión en dicho punto es el resultado de la presión del *campo directo* (ondas que se han propagado desde la fuente sin chocar) y del *campo reverberado* (ondas que han chocado una o varias veces contra las superficies que limitan el local), como se indica en la Fig. 6.

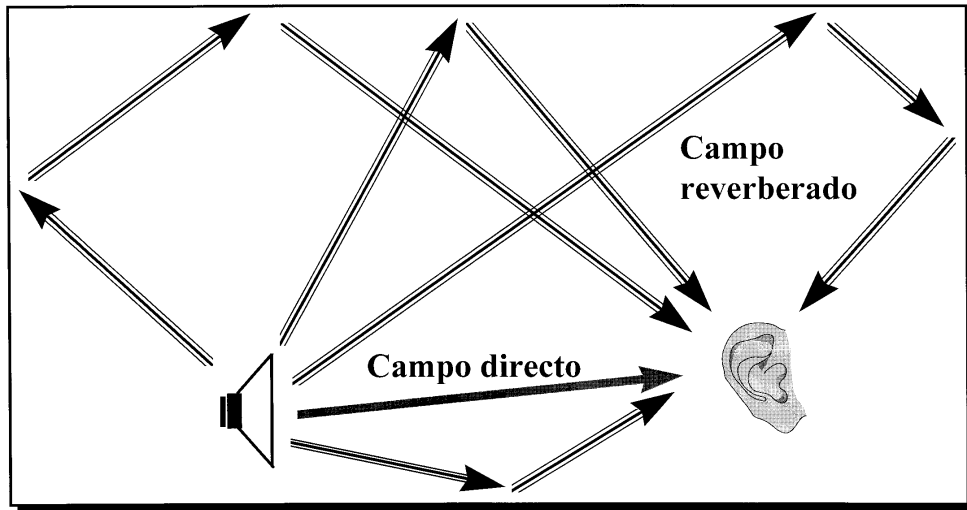


Fig. 6.

Por tanto, el nivel de presión acústica en un punto, depende en gran medida de la absorción acústica de las superficies que limitan el local y que en definitiva definen la absorción global del mismo o área absorbente del local.

Considerando una fuente de propagación omnidireccional, el nivel de presión sonora en un punto viene dado por la expresión:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right)$$

donde:

$$A = \frac{S_T \cdot \alpha_m}{1 - \alpha_m} ; \quad \alpha_m = \frac{\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}$$

y donde:

L_p - Nivel de presión en el punto considerado (dB).

L_w - Nivel de potencia acústica de la fuente (dB).

r - Distancia del punto considerado a la fuente (m).

A - Área absorbente del local (m^2).

S_T - Suma de las superficies que limitan el local (m^2).

α_m - Coeficientes de absorción medio, de las superficies que limitan el local.

$S_1, S_2 \dots S_n$ - Áreas de las diferentes superficies que limitan el local (m^2).

$\alpha_1, \alpha_2, \dots \alpha_n$ - Coeficiente de absorción de dichas superficies que limitan el local.

El término $4/A$ define la reducción del nivel de presión acústica, en el campo reverberado y que lógicamente será función del área absorbente del local.

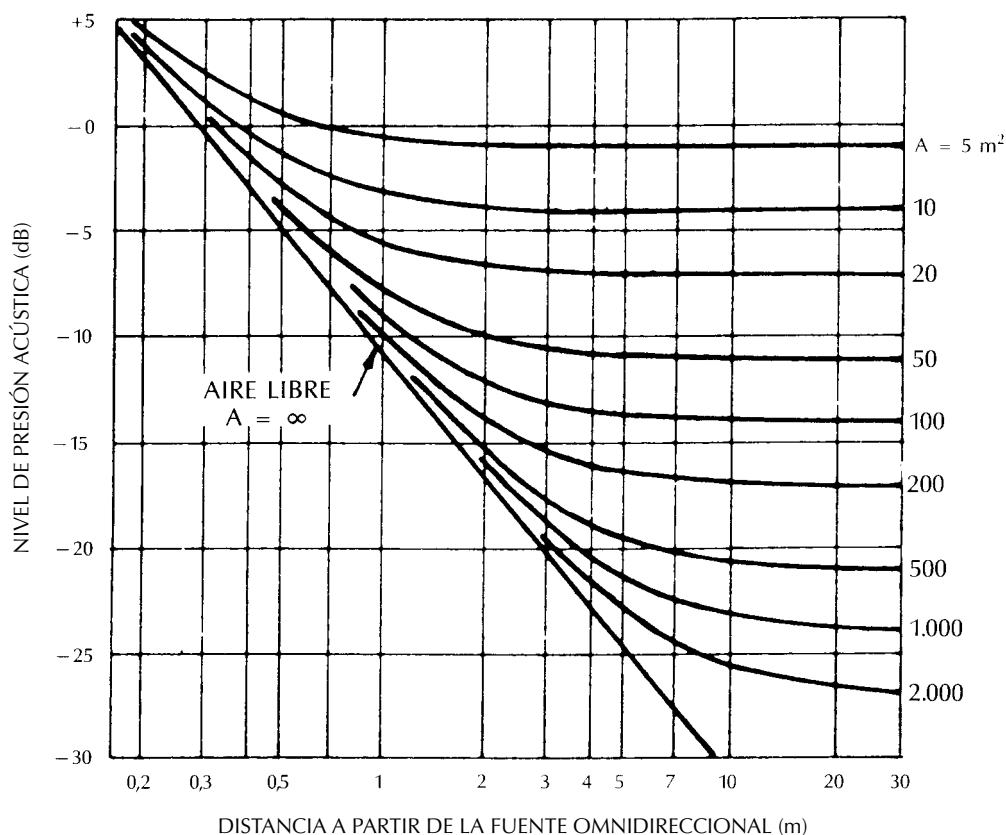


Fig. 7.

El ábaco de la Fig. 7 representa las variaciones de nivel de presión con la distancia y para diferentes áreas de absorción del local; considerando una fuente omnidireccional.

Para distancias mayores a $R = 0,14 \sqrt{A}$ (radio sonoro), se mantiene constante la presión sonora. No obstante, puede observarse que aún para valores de $r > R$, en muchos casos permanece una ligera disminución de nivel, debido a que un campo difuso se cumple raras veces y por otra parte la mayoría de los focos no emiten otras ondas esféricas perfectas. No obstante, debe considerarse el ábaco como un límite práctico de cálculo.

La reducción media de la presión sonora en el campo reverberado, en un recinto donde se aplican materiales absorbentes de sonido; viene dado por la relación:

$$\Delta L_p = 10 \log \frac{A_1}{A_0}$$

donde:

ΔL_p - Reducción de la presión sonora (dB).

A_1 - Área absorbente del local, con el tratamiento de materiales absorbentes (m²).

A_0 - Área absorbente del local antes del tratamiento (m²).

04.04.03. TIEMPO DE REVERBERACIÓN

El cálculo de esta reducción de la presión sonora puede obtenerse igualmente, partiendo de los tiempos de reverberación antes y después de la aplicación de los materiales absorbentes, según la relación:

$$\Delta L_p = 10 \log \frac{T_1}{T_2}$$

donde:

T_1 - Tiempo de reverberación antes del tratamiento (s).

T_2 - Tiempo de reverberación después del tratamiento (s).

El tiempo de reverberación se define como el tiempo durante el cual la energía sonora en el recinto se reduce a una millonésima del valor inicial o, dicho de otro modo, 60 dB; después de cesar la fuente de ruido (Fig. 8).

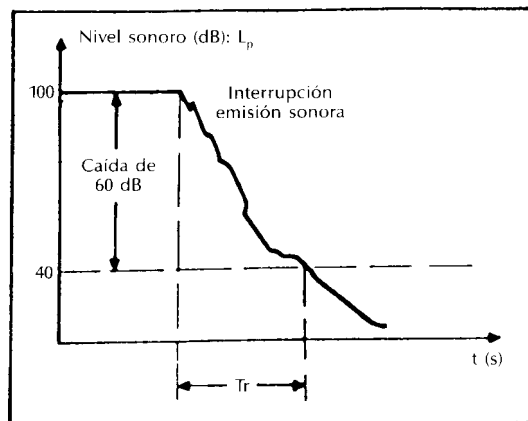


Fig. 8.

Dicho tiempo de reverberación puede medirse con los aparatos adecuados o bien calcularse empíricamente con una cierta aproximación.

La fórmula más utilizada para el cálculo es la aplicación de la ecuación de Sabine:

$$T = \frac{0,161 \cdot V}{A}$$

donde:

T - Tiempo de reverberación (seg).

V - Volumen del recinto (m^3).

A - Área absorbente del local (m^2).

Esta ecuación es aplicable, especialmente en recintos no muy grandes, donde las superficies que los limitan posean un coeficiente de absorción uniforme y cuyo valor no sea superior a 0,2.

Para valores del coeficiente de absorción superiores y siempre que exista una cierta uniformidad entre los mismos, es más conveniente la utilización de la ecuación de Eyring:

$$T_R = \frac{0,161 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_m)}$$

donde:

$$\alpha_m = \frac{\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}$$

y donde:

V - Volumen del local (m^3).

S - Suma de las superficies que limitan el local (m^2).

$\ln$ - Logaritmo neperiano.

α_m - Coeficiente de absorción medio de las superficies que limitan el recinto.

$S_1, S_2, \dots, S_n$ - Superficies que limitan el recinto (m^2).

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ - Coeficiente de absorción de las diferentes superficies que limitan el recinto.

Para valores del coeficiente de absorción muy diferentes, es más exacto utilizar la ecuación de Millington:

$$T = \frac{0,161 \cdot V}{-\sum S \cdot \ln(1 - \alpha)}$$

donde:

$$\sum_{j=1}^{j=n} S_j \ln(1 - \alpha_j) = S_1 \cdot \ln(1 - \alpha_1) + S_2 \cdot \ln(1 - \alpha_2) + \dots + S_n \cdot \ln(1 - \alpha_n)$$

V - Volumen del local (m³).

ln - Logaritmo neperiano.

S₁, S₂..., S_n - Superficies que limitan el recinto (m²).

α₁, α₂..., α_n - Coeficiente de absorción de las diferentes superficies que limitan el recinto.

04.04.04. REDUCCIÓN DEL NIVEL SONORO MEDIANTE REDUCCIÓN DE REVERBERACIÓN

Ciertos locales pueden ser foco de un ruido de nivel sonoro elevado si no se toman precauciones. Este es el caso de muchos locales industriales, donde son corrientes los niveles peligrosos para la conservación de la agudeza auditiva. Esto ocurre también, aunque con una intensidad menor, en los locales que acogen público como cafés, restaurantes, grandes oficinas, salas de espera de estaciones o aeropuertos, pool de mecanógrafas, salas de télex, etc. Como en la mayor parte de los casos de acústica, es en el momento de la concepción de las salas, recintos, etc., cuando hay que pensar en el problema del ruido, y no cuando ya está construido el local.

Para la disminución del ruido se puede recurrir, según los casos, a dos procedimientos:

- Reducir la potencia sonora emitida mediante recursos constructivos, es decir, mediante blindajes adecuados en las máquinas, o, si esto no es posible, mediante apantallados parciales, móviles o no.
- En el caso de no poderse realizar las medidas anteriores (gimnasios, piscinas cubiertas, restaurantes, etc.), sólo queda la posibilidad de reducir el nivel sonoro mediante el aumento del área de absorción equivalente o, lo que es lo mismo, mediante la reducción del tiempo de reverberación.

La eficacia conseguida en la reducción de nivel se puede calcular con la expresión indicada anteriormente:

$$\Delta L = 10 \log \frac{A}{A_0} \quad \text{dB}$$

Siendo:

A₀ = Área de absorción equivalente antes del tratamiento.

A = Área de absorción equivalente después del tratamiento.

Ejemplo práctico:

Una sala de dimensiones l=50 m, a=20 m, h=10 m y un grado de absorción de las superficies limítrofes α₀=0,05 (recordar cuando se trata anteriormente del grado de absorción, que este valor es el característico de los materiales de construcción tradicionales).

El volumen será: V = 50 · 20 · 10 = 10.000 m³.

y la superficie: S = 2 · (l · a + l · h + a · h) = 3.400 m².

El área de absorción equivalente será: A₀ = α₀ S = 170 m².

y, por tanto, el tiempo de reverberación, según la fórmula de Sabine, es:

$$T_0 = 0,161 \frac{V}{A_0} = 0,161 \frac{10.000}{170} = 9,47 \text{ s}$$

Si ahora se recubre el techo con un material muy absorbente ($\alpha=1$), tenemos:

$$A_1 = \alpha_1 \cdot l \cdot a + \alpha_0 (S - l \cdot a) = 1.120 \text{ m}^2.$$

$$T_1 = 0,161 \frac{10.000}{1.120} = 1,44 \text{ s}$$

con lo que obtenemos una reducción de nivel:

$$\Delta L_1 = 10 \log \frac{1.120}{170} = 8,2 \text{ dB}$$

Si se revisten también los 1.000 m² de paredes laterales con el mismo material, tenemos:

$$A_2 = 1 \cdot 2.000 + 0,05 \cdot 1.400 = 2.070 \text{ m}^2; \quad T_2 = 0,78 \text{ s}$$

$$\Delta L_2 = 10 \log \frac{2.070}{170} = 10,9 \text{ dB}$$

Por tanto, el revestimiento adicional de las paredes produce una mejora de 2,7 dB.

04.04.05. ACÚSTICA DE RECINTOS

En este apartado se tratan resumidamente las medidas encaminadas a mejorar la calidad de escucha de una sala.

Para salas pequeñas, esta mejora supone solamente el conseguir un tiempo de reverberación entre ciertos límites dados, que se conoce como «tiempo de reverberación óptimo». Para salas grandes, también influye la forma de las mismas, la distribución de materiales absorbentes, así como el uso que se vaya a hacer de ella.

De una manera general, las cualidades acústicas que debe tener un local destinado a auditorio son las siguientes:

- a) La intensidad acústica de los sonidos útiles (palabra, canto, música, etc.) debe superar netamente a la de los ruidos de fondo. Ello supone que:
 - La sala no sea desproporcionadamente grande en relación con la potencia de las fuentes sonoras. En efecto, la sonoridad depende a la vez de la intensidad del sonido directo y de la intensidad del sonido reflejado. Por un lado, la intensidad del sonido directo es menor cuanto mayor sea la distancia fuente-auditor; por ejemplo, tomemos el caso de un buen orador que emite con un nivel de 80 dBA, a 30 m, el nivel del sonido directo no es más que 40 dBA aproximadamente. Por otro lado, la intensidad del sonido reflejado es menor cuanto mayor sea el poder absorbente del local, y este poder crece en las grandes salas con la superficie ocupada por el público.
 - La forma de la sala sea tal que el sonido directo que llega de la fuente a los oyentes esté libre de obstáculos y, en particular, que no pase muy cerca del público, pues se producirá una absorción no deseable que se uniría a la atenuación producida por la distancia. Lo más indicado es que el lugar para el auditorio se distribuya en gradas; esta condición, además, es favorable para una buena visión de la escena.
 - El poder de absorción de la sala se ajusta de manera que la reverberación refuerce el sonido directo, sin hacerle perder su claridad por una prolongación excesiva de cada emisión sonora.

- Los ruidos de fondo sean de un nivel muy bajo, cuando la intensidad de los sonidos útiles sea débil. Para ello, el local debe estar bien protegido de los ruidos exteriores, y además los equipos del local (asientos, ventiladores, etc.) deben ser lo más silenciosos posible.

b) La calidad del sonido percibido debe ser buena, en particular mediante:

- Ausencia de accidentes acústicos con ecos.
- Claridad apropiada a la naturaleza de la escucha. Por ejemplo, para la palabra, la claridad debe ser bastante superior a la del caso de la música.
- Reverberación apropiada a cada tipo de música.

Todas estas características están ligadas a la forma del local, así como a su poder absorbente (o tiempo de reverberación).

04.03. Aspectos físicos del sonido

04.03.01. PROPAGACIÓN DEL SONIDO

Normalmente se entiende como sonido solamente el que se propaga en gases, especialmente en el aire. Evidentemente, también es posible la propagación de sonidos en los líquidos y en los sólidos.

Como la propagación en gases y en líquidos obedece a las mismas leyes físicas, se pueden estudiar conjuntamente, y luego, por separado, la propagación en sólidos.

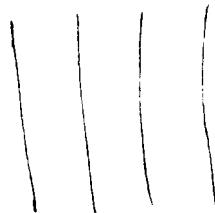
a) En gases y líquidos

Aquí, la propagación del sonido no puede ser objeto de tensiones transversales, y las ondas sonoras son ondas de densidad con movimiento longitudinal. Esta propagación se puede caracterizar con dos magnitudes: la presión sonora, p , (contracciones y dilataciones de volumen: variación de densidad), y la velocidad del sonido, c (movimiento).

Estas ondas longitudinales se propagan fundamentalmente de dos formas:

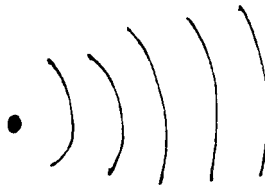
— Ondas planas progresivas (pistón indeformable).

Fuente muy alejada



— Ondas esféricas (esfera radiante).

Fuente próxima



b) En sólidos

En este caso, además de las ondas longitudinales, el sonido también se puede propagar mediante ondas transversales. La propagación mediante unos tipos u otros de ondas depende, en parte, de la geometría del cuerpo sólido considerado.

Existen varios tipos de ondas según tengan componente longitudinal, transversal o ambos.

— Longitudinales: Ondas de densidad.

— Transversales: Ondas transversales y ondas de torsión.

— Longitudinales-transversales: Ondas de alargamiento, ondas superficiales o de Rayleigh y ondas de flexión.

Las más importantes desde el punto de vista de aislamiento acústico son las *ondas de flexión*. La particularidad de este tipo de ondas es que su velocidad de propagación « c », al contrario que en los otros tipos de ondas, no es constante, sino que es proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia ($c = \sqrt{\omega} \sqrt[4]{B/M}$, donde M =masa superficial; B =rigidez a la flexión). Con este tipo de ondas, se produce una dispersión espacio-temporal de las diversas longitudes de onda a su paso por el sólido; es decir, que en la propagación de un impulso con un amplio espectro de frecuencias llegan primero las altas frecuencias a un punto alejado del sólido.

04.03.02. REFLEXIÓN DEL SONIDO

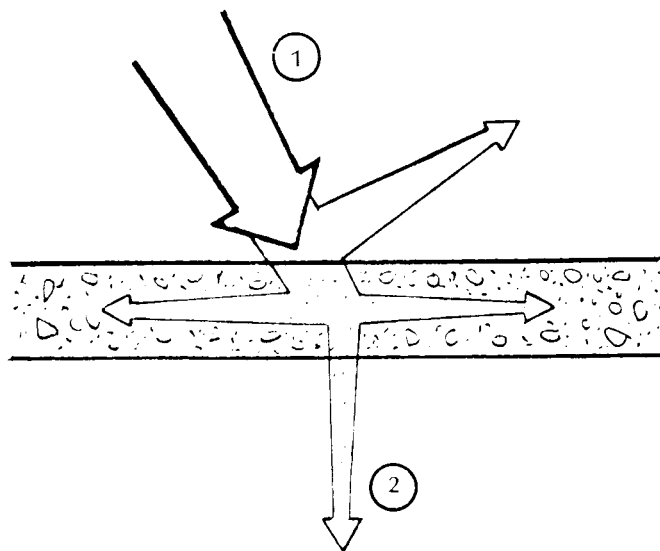


Fig. 4.

En la figura anterior aparecen dos medios 1 y 2 cuyas impedancias son, respectivamente, Z_1 y Z_2 . Consideramos una onda incidente «i» que va del medio 1 al 2. Al llegar al límite, parte de la energía sonora se refleja mediante una onda reflejada «r», y otra parte se transmite al medio 2 mediante una onda transmitida «t».

Se define:

$$\text{Factor (o coeficiente) de transmisión } t = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$\text{Factor (o coeficiente) de reflexión } r = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

Esta última ecuación nos indica que cuanto mayor sea la diferencia entre Z_1 y Z_2 , la reflexión será mayor y, por tanto, existirá una elevada amortiguación del sonido. Por ejemplo: si Z_1 es pequeño, como en el caso del aire, se elegirá para una buena amortiguación un Z_2 grande; por el contrario, si Z_1 es grande, como en el caso del agua y de los sólidos, se elegirá una materia de impedancia Z_2 pequeña.

Grado de absorción

Generalmente, en lugar del factor de reflexión r se emplea el *grado de absorción* (α), que se define como la fracción de energía de onda incidente que no es reflejada. Como vimos en 2.2, la energía es proporcional al cuadrado de la presión sonora; entonces podemos escribir:

$$\alpha = 1 - r^2$$

Para hacerse una idea, veamos un ejemplo: el grado de absorción de paredes sin revestir, empleando materiales de construcción usuales, es, en general, menor del 5% ($\alpha < 0,05$) (imaginarse una habitación vacía). Además, si tenemos presente que con un grado de absorción del 10% ($\alpha = 0,1$) son necesarias más de 20 reflexiones para que la energía de una señal sonora se reduzca en unos 10 dB; es decir, a una décima parte, está claro que la naturaleza de las paredes juega un papel decisivo en la intensidad del interior de un recinto.

04.03.03. ABSORCIÓN DEL SONIDO EN EL MEDIO FÍSICO

La propagación del sonido no se realiza nunca sin pérdidas, sino que está supeditada siempre a una mayor o menor amortiguación; es decir, la presión o la velocidad disminuyen al aumentar la distancia al foco sonoro.

Para esta amortiguación existen diferentes causas que dependen de las características del medio físico y de la frecuencia del sonido.

— Amortiguación «clásica», que incluye:

- Efecto de roce interno de las partículas excitadas por la vibración, condicionado a la viscosidad del medio.
- Efecto de la transmisión del calor generado por el roce de las partículas, dependiente de los coeficientes de transmisión.

— Amortiguación por relajación molecular térmica, debido a las necesidades de energía para el retorno a la posición de equilibrio de las partículas excitadas por las vibraciones. Esta amortiguación es complementaria a la «clásica».

Por ser el aire el medio de propagación habitual, digamos que la amortiguación en dicho medio depende de la frecuencia del sonido considerado, de la humedad relativa y de la temperatura. Los sonidos de alta frecuencia son amortiguados en mayor medida que los de baja frecuencia. Por otra parte, la humedad relativa influye de manera importante en la amortiguación. En la figura 5 puede verse cómo influye la humedad relativa en la amortiguación y para diferentes frecuencias. El máximo de amortiguación se obtiene para un aire muy seco.

También como se ha indicado, influye la temperatura en la amortiguación, disminuyendo ésta al aumentar la temperatura para cualquier grado de humedad (especialmente a partir de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para arriba).

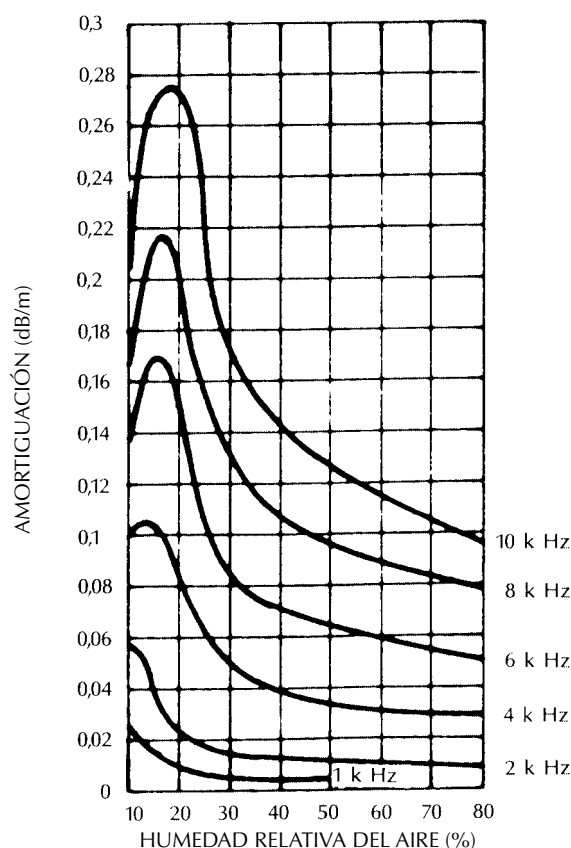


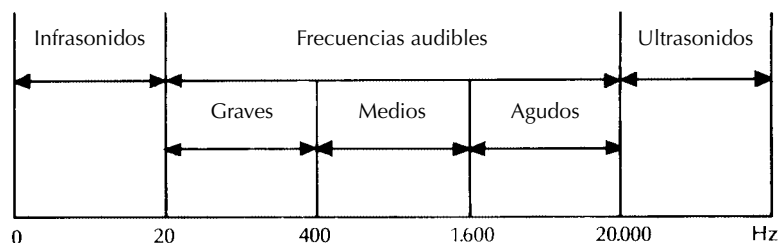
Fig. 5.

04.02. Percepción y nivel sonoro

04.02.01. AUDICIÓN

El oído percibe las variaciones de presión en forma de sonido cuando su periodicidad está entre las 16 y 16.000 variaciones por segundo (de 20 a 20.000 según otras teorías); es decir, cuando su frecuencia está entre 16 y 16.000 Hz (o 20 a 20.000 Hz).

Esta banda de frecuencias audibles se descompone generalmente en tres regiones: frecuencias graves, medias y agudas.



El modo en que el oído percibe el sonido, es el siguiente (fig. 2):

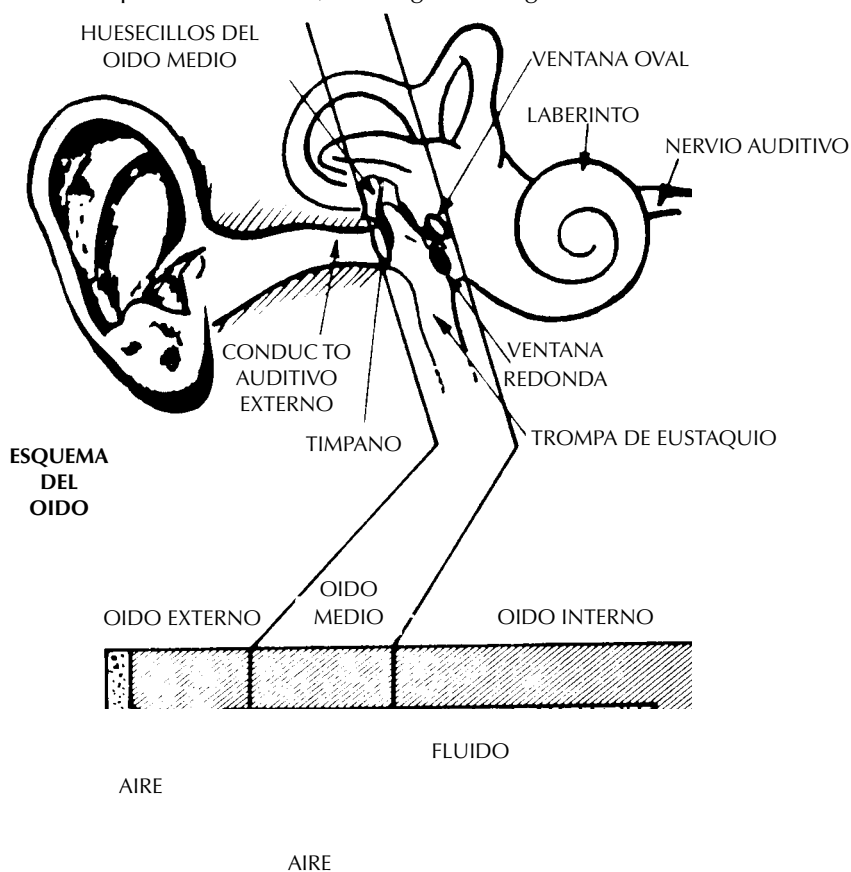


Fig. 2.

- El oído externo, que fundamentalmente tiene una misión de conducción, pero escasa de percepción.
- El oído medio, que arranca en la membrana del tímpano, que es la que recoge las variaciones de presión. Estas son transmitidas por un sistema de huesecillos (martillo, yunque y estribo), que actúan como una sucesión de palancas y que constituyen un amplificador (de 55 a 60 veces).
- El oído interno, con apariencia de caracol, está relleno de un líquido (líquido linfático), que es el que transmite finalmente las variaciones de presión al auténtico órgano receptor que es la membrana basal.

En la membrana basal están las células nerviosas (unas 25.000), son de distinta longitud (similitud con las cuerdas del piano), y según las zonas, recogen los distintos *tonos*.

También y debido al gran número de células, se hace un análisis de la *intensidad*, aunque el análisis más fino se realiza, ya, en el cerebro, al que llega esta señal mediante el nervio acústico.

04.02.02. INTENSIDAD

Las dos sensaciones fundamentales que nos da el oído, como hemos visto, son el tono y la intensidad.

El tono se puede determinar fácil y objetivamente midiendo la frecuencia.

La intensidad es una magnitud, en parte, subjetiva. Está relacionada con la presión sonora, que es objetivamente medible; sin embargo, dos sonidos de igual presión sonora y de distinta frecuencia no producen la misma sensación de intensidad. Se define como la energía por unidad de superficie y se mide en W/m^2 .

Para que el oído comience a percibir un sonido, la presión acústica debe ser, al menos, de $2 \cdot 10^{-4} \mu\text{bar}$. Esto es lo que se denomina Umbral Auditivo.

Cuando la presión acústica supera los $10^3 \mu\text{bar}$, el oído puede sufrir lesiones irreversibles. Esto es lo que se denomina Umbral Doloroso.

En la escala de intensidades, el umbral auditivo es $10^{-12} W/m^2$ y el umbral doloroso es $25 W/m^2$.

Para ver cómo percibe nuestro oído, nos remitimos a la ley de Weber-Fechner: «Nuestras impresiones sonoras varían según una progresión aritmética, cuando las excitaciones físicas que las causan varían según una progresión geométrica». Es decir, que si la excitación varía de 10 a 100, nuestra impresión sonora varía de 1 a 2.

Para simplificar los cálculos y por lo dicho en el párrafo anterior, se recurre a un proceso matemático donde representamos las medidas acústicas en escala logarítmica.

La forma de establecer la medida del nivel sonoro producido por una presión acústica P , se realiza mediante la fórmula:

$$L = 20 \log \frac{P}{P_0} \quad \text{dB}$$

Siendo: $P_0 = 2 \cdot 10^{-4} \mu\text{bar}$, presión acústica del umbral auditivo

L = Nivel sonoro en dB

Se observa que la unidad dB es adimensional, y no tiene sentido físico.

Por otra parte, como las intensidades sonoras son proporcionales al cuadrado de las presiones, la fórmula anterior puede escribirse:

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad \text{dB}$$

Siendo $I_0 = 10^{-12} W/m^2$ la intensidad acústica del umbral auditivo.

Veamos algunos ejemplos:

1. El umbral auditivo, como se ve en la expresión anterior, es el nivel de cero (0) decibelios. Veamos cuántos decibelios es el umbral doloroso ($p=10^3\mu\text{bar}$).

$$L = 20 \log \frac{P}{P_0} = 20 \log \frac{10^3}{2 \cdot 10^{-4}} = 20 \log \frac{10^3 \cdot 10^4}{2} = 20 \log \frac{10^7}{2} =$$

$$= 20 (\log 10^7 - \log 2) = 20 (7 - 0,3) = 20 \cdot 6,7 = \underline{134 \text{ dB}}$$

2. Si un instrumento musical produce 70 dB, dos instrumentos iguales no producirán el doble de decibelios, aunque se produzca el doble de intensidad. Veámoslo:

$$70 = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{I}{10^{-12}} = 10 (\log I - \log 10^{-12});$$

$$7 = \log I + 12; \log I = -5; I = 10^{-5} \text{ W/m}^2 \quad [1 \text{ instrumento}]$$

$$[2 \text{ instrumentos}] \rightarrow I = 2 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2;$$

$$L = 10 \log \frac{2 \cdot 10^{-5}}{10^{-12}} = 10 \log (2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{12}) = 10 \log (2 \cdot 10^7) =$$

$$= 10 (\log 2 + \log 10^7) = 10 (0,3 + 7) = \underline{73 \text{ dB}}$$

Se ve que una duplicidad en la intensidad produce un aumento de 3 dB en el nivel acústico.

04.02.03. SONORIDAD

Sensibilidad auditiva

Como dijimos en el apartado anterior, el oído humano no es igual de sensible a todas las frecuencias. Fletcher y Munson estudiaron la variación de la sensibilidad del oído con la presión sonora (o, lo que es lo mismo, con el nivel acústico) y resumieron su estudio en unas curvas que dan esta variación de sensibilidad en función de la frecuencia (ver fig. 3).

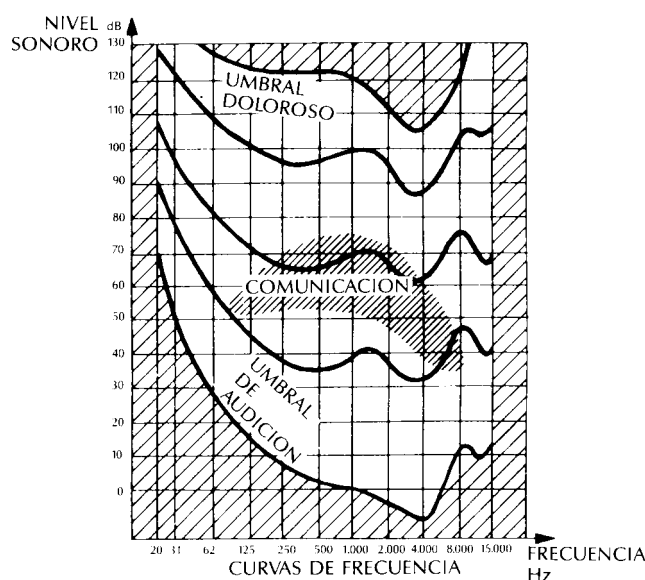


Fig. 3.

Como se ve, la sensibilidad es máxima para 1.000 Hz, es algo menor para frecuencias mayores, y disminuye mucho para bajas frecuencias. Este efecto de sensibilidad depende de las personas y de la edad, la agudeza auditiva disminuye con la edad para frecuencias superiores a los 5.000 Hz.

Efecto de enmascaramiento

La sensibilidad del oído humano que hemos visto para tonos puros no es igual en el caso de sonidos y ruidos compuestos de varios tonos. Esto es lo que se conoce como «efecto de enmascaramiento».

Este fenómeno tiene mucha importancia en la vida cotidiana, y su efecto puede ser ventajoso o perturbador. Por ejemplo, a veces en una casa no se oyen los ruidos de la conversación o de la radio de los vecinos, y no es debido a que los muros o forjados reduzcan tanto los ruidos como para que queden por debajo del umbral auditivo; sino que existe un ruido «enmascarante» que puede ser un ruido de tráfico o de alguna actividad desplegada en la casa; cuando estos «ruidos de fondo» desaparecen, por ejemplo por la noche, se perciben los ruidos perturbadores que antes eran inaudibles.

04.02.04. MOLESTIA

El ruido, por sus efectos fisiológicos, puede ser una fuente de molestia. La aparición repentina de un ruido inhabitual lleva consigo una modificación de la actividad fisiológica: crecimiento del ritmo cardíaco, modificación del ritmo respiratorio, variación de la presión arterial, ...

Desgraciadamente, la perturbación de un ruido que se debe considerar como molesto no está influenciada solamente por las leyes fisiológicas de la sensibilidad sonora, sino también por la disposición psicológica, subjetiva y muy variable con el tiempo de cada observador en particular.

Intentamos definir el concepto de ruido:

Para mucha gente, el ruido no es ni más ni menos que el sonido que producen los demás. Una definición más técnica puede ser: «El ruido es una señal acústica que no muestra claramente ningún tono definido», o «El ruido es una variación de la presión acústica que puede ir acompañada o no de algunos sonidos más o menos musicales».

La molestia objetiva y subjetiva

El concepto de molestia, al que se empareja «in mente» el concepto de ruido, al igual que la intensidad, es un concepto indefinido. Se puede descomponer en una parte estadística, y por ello medible (molestia objetiva); y una segunda parte que no se puede someter básicamente a ninguna medida (molestia subjetiva).

La parte medible se apoya fundamentalmente en la impresión de que las frecuencias altas son más molestas que las bajas, como ya vimos antes.

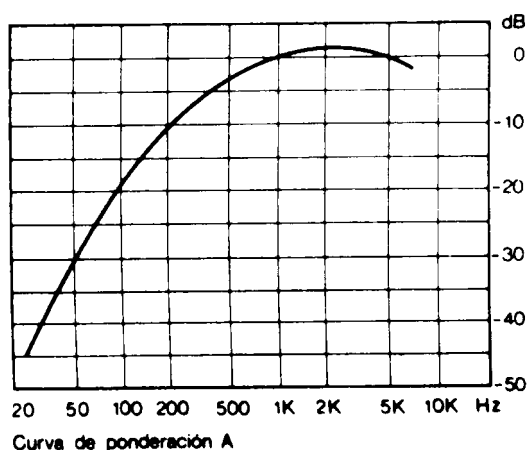
El decibelio A

Debido a la subjetividad, es difícil obtener con un solo valor una medida del nivel acústico; es decir, un valor objetivizado que se aproxima lo más posible a la percepción del oído.

Uno de los sistemas empleados para definir con un solo valor el nivel de presión acústica es el *decibelio A* [dBA]. Esta medida está basada en las curvas antes vistas de Fletcher y Mounson sobre la sensibilidad del oído en función de la frecuencia. Se obtiene mediante la media ponderada entre el espectro del ruido y la curva siguiente, que se conoce como curva de ponderación A.

La medida en dBA se acepta como la valoración simple más aproximada a la sensación producida por música, palabra y ruidos comunitarios más generales, incluidos los de tráfico y electrodomésticos, y siempre que no se trate de ruidos con tonos predominantes.

Esta curva está tomada de la norma UNE 21.314, y se utiliza para compensar las diferencias de sensibilidad que el oído humano tiene para las distintas frecuencias dentro del campo auditivo.



En la siguiente tabla se especifican los valores que toma la curva de ponderación A para un margen de frecuencias común en la realidad.

Frecuencia en Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
Ponderación en dBA	-19,1	-16,1	-13,4	-10,9	-8,6	-6,6	-4,8	-3,2	-1,0	-0,8

Frecuencia en Hz	1.000	1.250	1.600	2.000	2.500	3.150	4000	5.000
Ponderación en dBA	0	0,6	1,0	1,2	1,3	1,2	1,0	0,5

04.02.05. VIBRACIONES

Sensación y percepción de vibraciones

Se entiende, en general, por sensación de vibración, la sensación de excitación vibrátil que se produce por contacto directo del cuerpo humano con un cuerpo sólido que vibra.

Como no existe un órgano determinado que perciba este tipo de vibración, no es posible una separación clara entre sonido y sensación de vibración, a menos que limitemos la expresión de *vibración* a las vibraciones por debajo de 16 Hz (o 20 Hz); es decir, los infrasonidos que no se pueden percibir como sonido. Sin embargo, esta limitación no es razonable ni en sentido físico ni en sentido fisiológico, ya que el oído puede percibir los sonidos que alcanzan y excitan la membrana del tímpano, así como las vibraciones de los huesos del cráneo que excitan directamente al oído interno (audición por conducción ósea, audífonos). También, las células sensoriales de la piel pueden sentir las vibraciones y, en el caso de ser fuertes, pueden abarcar todo el cuerpo y extender esta sensación a los órganos internos, fundamentalmente a los pulmones y estómago, ya que las bolsas de aire que contienen dichos órganos hacen las veces de amplificador de vibraciones.

Aislamiento y acondicionamiento acústico

04.01. Conceptos fundamentales

SONIDO

Una determinación simple: «Se entiende por sonido una variación de la presión ambiental que se propaga en forma de ondas».

Más científicamente se puede definir: «El sonido es un fenómeno vibratorio que, a partir de una perturbación inicial del medio elástico donde se produce, se propaga, en ese medio, bajo la forma de una variación periódica de presión».

PRESIÓN ACÚSTICA

No toda variación periódica de la presión ambiental es perceptible como sonido. Posteriormente veremos dentro de qué límites se encuentra esta percepción.

Esta variación de la presión ambiental es lo que se denomina *presión acústica* (p).

Normalmente, esta variación es débil. Para su medida se utilizan magnitudes más cómodas que el kg/cm^2 o «bar». Se usa generalmente el microbar (μbar), que es la millonésima parte del bar ($1 \mu\text{bar} = 10^{-6} \text{ bar}$), o el pascal (Pa) ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 10 \mu\text{bar}$).

PERÍODO Y FRECUENCIA

Si representamos gráficamente una oscilación cualquiera (ver figura 1), se llama *período* (T) al tiempo que se tarda en realizar un ciclo completo. Se mide en segundos (s).

La frecuencia (f) es el número de ciclos que se realizan en un segundo. Es, por tanto, la inversa del período:

$$f = \frac{1}{T}$$

Se mide en ciclos por segundo (cps), que se denomina normalmente hercios (Hz).

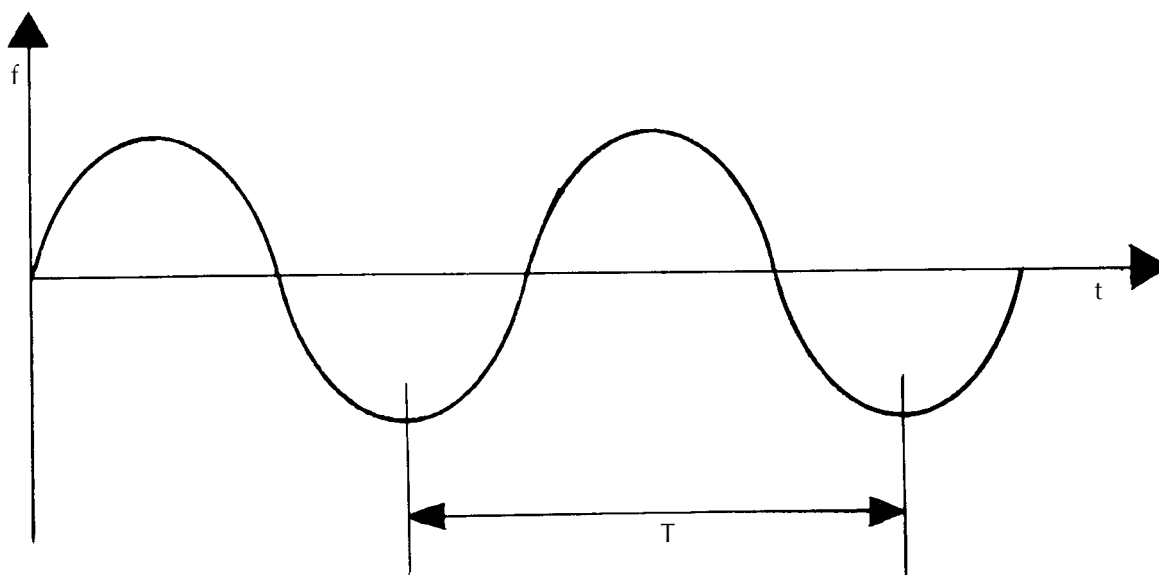


Fig. 1.

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN Y VELOCIDAD DEL SONIDO

La *velocidad de propagación* (c) del sonido es la velocidad con que se desplazan las ondas sonoras. Tiene la dirección perpendicular a la superficie vibrante bajo forma de ondas. Dentro de unos grandes límites, esta velocidad es independiente de la magnitud de la presión acústica.

Depende de las condiciones ambientales (presión y temperatura) y, fundamentalmente, del medio donde se propaga, llamado «campo acústico».

Para un ambiente normal ($P=1$ atm $T=20$ °C), damos, a título de ejemplo, la tabla siguiente para algunos elementos:

AIRE	= 340 m/seg.
AGUA	= 1.460 m/seg.
MADERA	= 1.000 a 5.000 m/seg.
CEMENTO	= 4.000 m/seg.
ACERO, HIERRO	= 4.700 a 5.100 m/seg.
VIDRIO	= 5.000 a 6.000 m/seg.
PLOMO	= 1.320 m/seg.
CAUCHO	= 40 a 150 m/seg.

LONGITUD DE ONDA

La distancia que recorre una onda sonora en el tiempo de un período es lo que se llama *longitud de onda* (λ).

Por tanto, esta longitud de onda dependerá de la velocidad de propagación (c) y del período (T), o su inversa, la frecuencia (f).

$$c = f \cdot \lambda$$

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}$$

Se mide en unidades de longitud (m).

IMPEDANCIA ACÚSTICA

Cada medio, sólido, líquido o gaseoso, ofrece una facilidad más o menos grande para la propagación del sonido. Por analogía con la corriente eléctrica, se dice que el medio posee una *impedancia acústica* (Z).

La impedancia se define como el cociente entre la presión acústica (P) y la velocidad propia del movimiento vibratorio definida antes como velocidad del sonido (v). Es decir:

$$Z = \frac{P}{v}$$

que para el caso de ondas planas se puede expresar también por:

$$Z = \rho \cdot c$$

siendo ρ la masa volumétrica (densidad), y c la velocidad de propagación.

Se mide en Ohmios Acústicos, $\text{g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$, o en Rayls, $(\text{Pa} \cdot \text{s})/\text{m}$.

A continuación, damos una tabla con los valores para algunos elementos:

TABLA 1

SUSTANCIA	IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA	
	$\text{g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$	$(\text{Pa} \cdot \text{s})/\text{m}$
SÓLIDOS		
Hierro fundido	$270 \cdot 10^4$	$270 \cdot 10^5$
Hierro forjado	$400 \cdot 10^4$	$400 \cdot 10^5$
Cinc	$240 \cdot 10^4$	$240 \cdot 10^5$
Acero	$390 \cdot 10^4$	$390 \cdot 10^5$
Granito	$162 \cdot 10^4$	$162 \cdot 10^5$
Mármol	$99 \cdot 10^4$	$99 \cdot 10^5$
LÍQUIDOS		
Agua (13 °C)	$144 \cdot 10^3$	$144 \cdot 10^4$
Agua salada	$155 \cdot 10^3$	$155 \cdot 10^4$
GASES		
Aire a 0 °C	42,7	427
Aire a 20 °C	41,4	414
Vapor de agua	23,5	235

04.07. La protección contra el ruido en la industria y las instalaciones

04.07.01. GENERALIDADES

Existen numerosas fuentes de ruido que pueden producir molestias y sobre las cuales deben realizarse actuaciones concretas, a fin de disminuir el nivel sonoro a límites aceptables. Esto constituye el control del ruido.

Los límites de aceptabilidad suelen estar fijados por disposiciones legislativas que se establecen por las diversas administraciones en el ámbito de su competencia:

- Estatales: Normativa Básica de la Edificación NBE-CD-88.
- Autonómicas: Leyes medioambientales.
- Locales: Ordenanzas sobre el ruido.

Cualquiera que sea la problemática que se plantee, los factores a considerar para controlar el ruido son:

Origen del ruido-Vía de transmisión-Receptor

La experiencia demuestra que los sistemas de control del ruido son tanto más eficaces si se procede a aplicarlos con la misma secuencia que se ha indicado.

Por ello, el origen del ruido debe ser siempre el primer objetivo a analizar para la resolución del problema. Por ejemplo: es imposible alcanzar una actuación adecuada sobre el ruido que produce una máquina si no se ha previsto la colaboración de elementos antivibradores que limiten el ruido de origen sólido.

A veces, la actuación sobre el origen del ruido es imposible, porque no es exterior o porque está muy difundido en múltiples focos. En este caso deben analizarse las vías de transmisión, p. ej. los ruidos del aire transmitido por conductos.

Sólo en último caso debe recurrirse a la protección directa del receptor, ya que ésta sólo es personal (protectores personales), colectiva (cabinas de personal), dejando un ambiente ruidoso de gran extensión que puede afectar a otros receptores.

04.07.02. PROTECCIÓN CONTRA EL RUIDO EXTERIOR

Las principales fuentes de ruido exterior a un edificio o industria son el tráfico (automovilístico o ferroviario), otras industrias ruidosas, maquinaria de obras públicas...

El método más eficaz es el aislamiento acústico adecuado de todos los cerramientos del edificio o industria. Esta solución puede ser a veces imposible por ser abierta la industria o porque puede encarecer fuertemente el coste de aislamiento acústico frente a ruidos elevados.

En la mayor parte de los casos es eficaz la protección mediante pantallas acústicas, que deben considerarse como acciones complementarias a otras de aislamiento, ya que el nivel de protección alcanzado con las pantallas no suele ser elevado (inferior a 20 dB).

El cálculo de pantallas acústicas está basado en las teorías de difracción de Fresnel y en datos experimentales.

Valores aceptables aproximados pueden obtenerse del gráfico de Maekawa adjunto (fig. 26).

En el gráfico se observa que la atenuación acústica que ofrecen las barreras depende del número adimensional N , que relaciona la diferencia del camino que debe recorrer el sonido entre emisor (E) y receptor (R) antes y después de la colocación de la barrera y la longitud de onda del sonido con las diversas frecuencias.

Como es habitual en la acústica, las altas frecuencias son atenuadas más fácilmente que las bajas frecuencias.

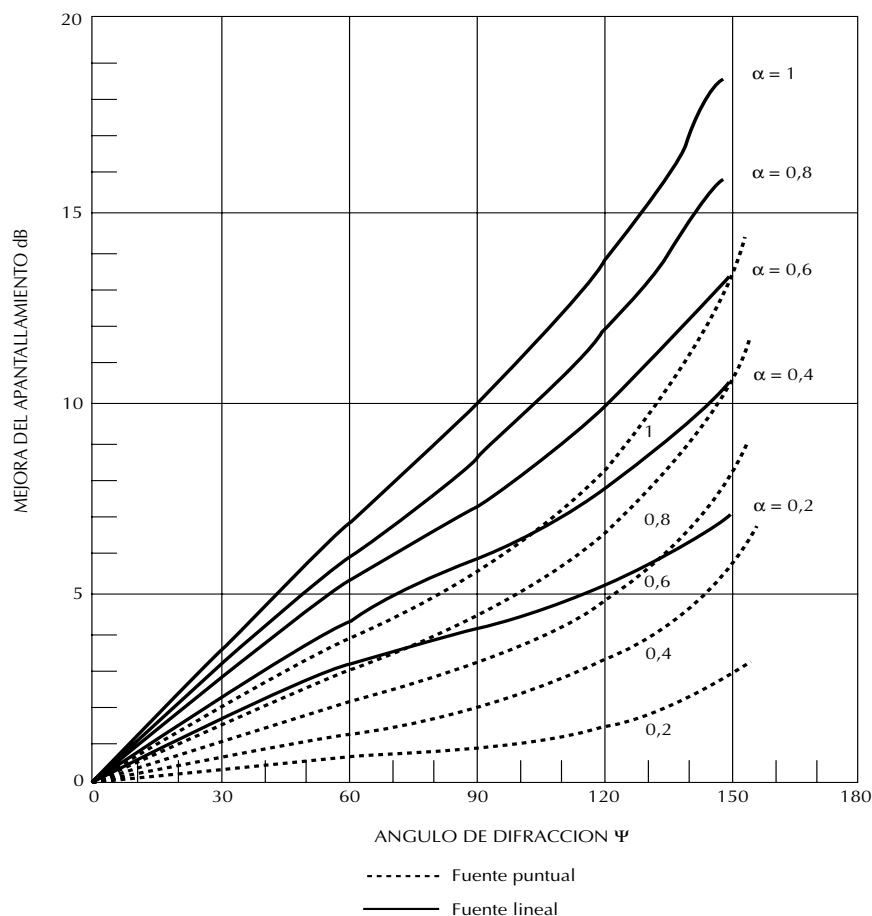


Fig. 27.

03.07.03. ATENUACIÓN DEL RUIDO EN CONDUCTOS

Una vía típica de transmisión de ruidos aéreos la constituyen los sistemas de conductos de climatización y ventilación, así como los sistemas de aspiración y expulsión de aire en cabinas.

Las soluciones de amortiguación del sonido más frecuentes pasan por las técnicas de absorción acústica.

03.07.03.01. Conductos de aire

Un conducto de suficiente longitud respecto a su sección puede atenuar el sonido en su interior de acuerdo a la siguiente expresión empírica:

$$\Delta L = 1,05 \cdot \alpha^{1,4} \cdot \frac{P}{S} \quad \text{dB/m}$$

siendo:

ΔL : Amortiguación del sonido por unidad de longitud del conducto.

α : Coeficiente de absorción del material interior del conducto en α -Sabine.

P: Perímetro interior del conducto, en m.

S: Sección interior del conducto, en m².

La observación de la expresión indicada nos permite evaluar:

- Cuanto mayor sea el valor de α , mayor será la atenuación acústica obtenida. Esto indica que la utilización de conductos de la familiar Climaver, con valores notables de coeficiente de absorción, tendrán resultados excelentes. Lo mismo ocurrirá en conductos metálicos revestidos de absorbentes tipo lana mineral.
- La geometría del conducto es determinante para la atenuación: conductos de pequeñas dimensiones relativas tendrán elevadas relaciones P/S. Por el contrario, conductos de grandes dimensiones tendrán bajas relaciones P/S, con una disminución de la atenuación acústica.

Ejemplo:

Calcular la reducción de ruido que aporta la instalación de un metro de conducto autoportante de lana de vidrio (Climaver) de sección 350 x 350 mm si la fuente sonora es un ventilador helicoidal que mueve un caudal de aire de 20.000 m³/h, venciendo una pérdida de carga de 15 mm de columna de agua.

La potencia sonora generada por el ventilador puede determinarse utilizando la fórmula de Madison-Graham y los coeficientes correctores para tipos helicoidales.

$$L_w = 25 + 10 \log Q + 20 \log P \text{ dB}$$

donde:

Q=Caudal de aire, m³/h.

P=Presión estática, mm.c.a.

W=Potencia del ventilador, kW.

La corrección para este tipo de ventiladores es:

f(Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Corrección dB	-8	-7	-9	-11	-11	-13

resultando que:

$$L_w = 91,52 \text{ dB}$$

con la siguiente distribución:

f(Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
L _w (dB)	83,53	84,53	82,53	80,53	80,53	78,53

La amortiguación aportada por el conducto Climaver viene dada por la fórmula:

$$\Delta L = 1,05 \cdot \alpha^{1,4} \cdot \frac{P}{S}$$

Tomando los valores de absorción del material:

f(Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
α	0,07	0,22	0,63	0,91	1,11*	1,14*

* A efectos de cálculo se tomará $\alpha = 1$.

se obtendrá la atenuación en frecuencias de octava

f(Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
ΔL (dB/m)	0,29	1,44	6,28	10,5	12	12

El nivel sonoro en la salida será:

f(Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
L_p (dB)	83,24	83,09	76,25	70,03	68,53	66,53

Transformando estos valores con la ponderación A se obtiene la siguiente tabla:

f(Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
L_w (dBA)	67,53	75,53	79,53	80,53	81,53	79,53
L_w (dBA)	67,24	74,09	73,25	70,03	69,53	67,53

Los valores globales nos indican:

$$L_{w_g} = 86,78 \text{ dBA}$$

$$L_{p_g} = 78,81 \text{ dBA}$$

Lo que supone una atenuación de 7,95 dBA/m.

03.07.03.02. Cámara de absorción

Consiste en un recinto de entrada y salida no alineadas, con una sección de paso mayor que la correspondiente a los conductos de entrada y salida. El interior de la cámara está revestido de un absorbente sonoro. Constituye en esencia un característico filtro de paso alto (fig. 28).

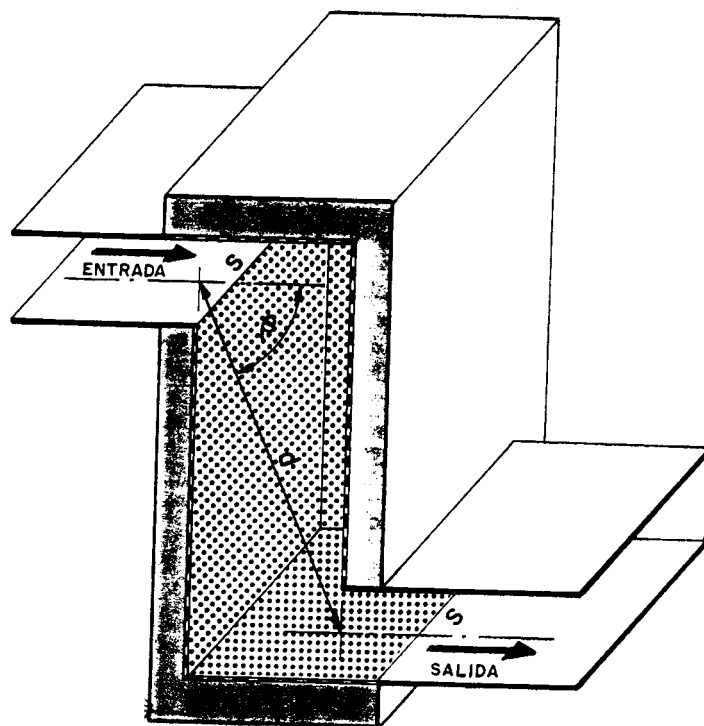


Fig. 28.

El cálculo de la atenuación sonora en las frecuencias medias y altas será:

$$\Delta L = 10 \log \frac{1}{S \left(\frac{\cos \beta}{2\pi d^2} + \frac{1 - \alpha}{A} \right)} \quad \text{dB}$$

donde:

S: Sección del conducto de llegada y salida (m²).

d: Distancia entre los conductos de llegada y salida (m).

α : Coeficiente de absorción del material de revestimiento interior de la cámara (αS).

A: Área absorbente de la cámara (m²).

β : Ángulo indicado en la figura.

Para frecuencias bajas, el resultado real es de 5 dB menos que el calculado.

03.07.03.03. Silenciosos de absorción

Están basados en los mismos principios de absorción del caso de los conductos, pero estableciendo valores muy elevados de α y de la relación P/S, para obtener en poca longitud valores muy elevados de atenuación.

Constituidos por colisas de cuerpo metálico, normalmente rectangular, con un espesor de cuerpo elevado y rellenas de material absorbente (lana de vidrio o de roca).

Las colisas se colocan en el interior de un cajón (fig. 29), paralelamente a sí mismas y a pequeñas distancias unas de otras, respecto a su altura, de modo que queden ranuras estrechas para el paso del aire. El número de colisas a instalar dependerá del caudal de aire en circulación y su velocidad admisible. Los valores de atenuación que pueden obtenerse responden a la conocida expresión

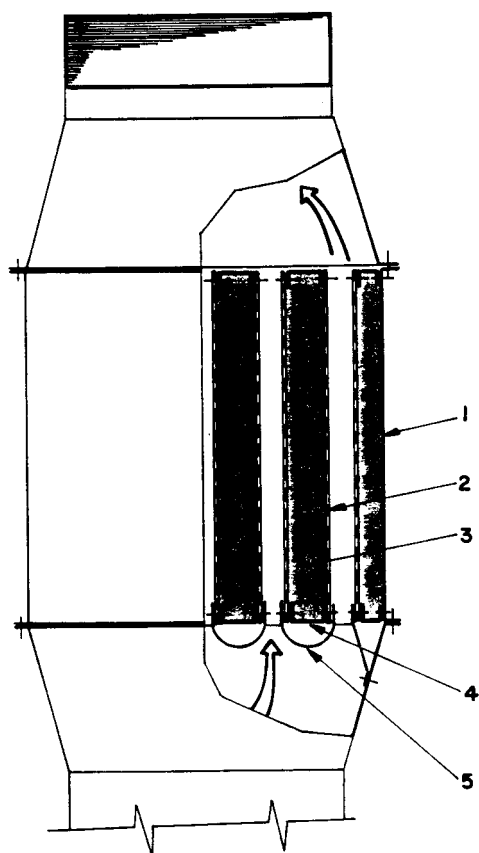
$$\Delta L = 1,05 \cdot \alpha^{1,4} \cdot \frac{P}{S} \quad \text{dB/m}$$

En este caso deben establecerse algunas condiciones:

- El ancho del paso de aire debe ser inferior a $\lambda/8$ de la frecuencia más elevada que desee atenuarse, ya que en caso contrario baja fuertemente la atenuación.
- El ancho de las colisas debe asegurar un elevado valor de α para la menor frecuencia que desee atenuarse.
- La longitud del silencioso debe ser al menos el doble que la altura de las colisas.
- La velocidad de circulación del aire debe ser inferior a 16 m/s para evitar elevadas pérdidas de carga y la aparición de ruidos aerodinámicos de difícil atenuación.
- Las superficies «vistas» de las colisas deben ser de velo o tejido de fibra de vidrio, e incluso de chapa perforada para altas velocidades, con el fin de proteger la lana interior.

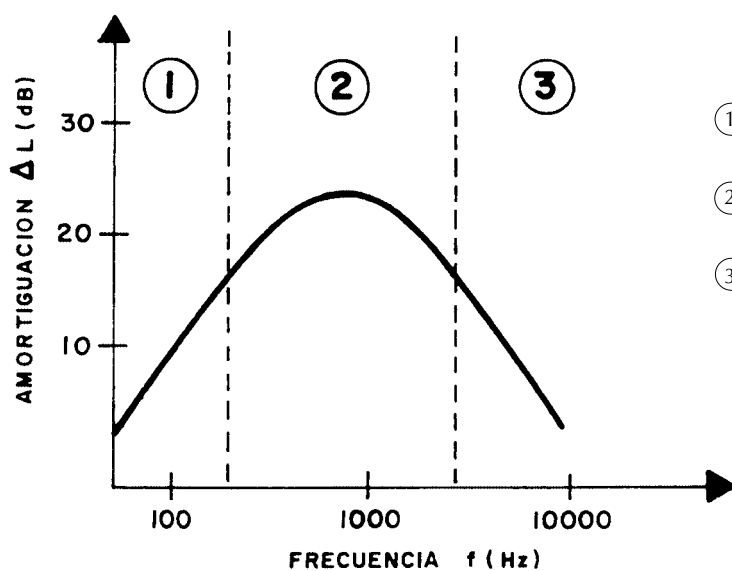
Las formas de las curvas de atenuación de los silenciosos de estas características responden a los de la fig. 30:

- Zona 1: Comprende las zonas de baja frecuencia para las que no se ha diseñado el silencioso, por lo que la atenuación es baja pero creciente hacia las frecuencias próximas a las de diseño.
- Zona 2: Intervalo de frecuencias para las que se ha diseñado el equipo.
- Zona 3: Frecuencias más elevadas, donde decrece la atenuación a medida que $\lambda/8$ es tanto menor que la distancia entre colisas.



1. Chapa lisa revestimiento exterior.
2. Revestimiento de acabado de las colisas chapa perforada.
3. Paneles rígidos «Isover» o «Roclaine» protegidos con velo de vidrio.
4. Bastidor de las colisas perfil -[-
5. Lamas deflectoras de chapa.

Fig. 29.



- ① FRECUENCIAS Bajas
Baja absorción acústica - longitud de onda larga baja amortiguación.
- ② FRECUENCIAS MEDIAS
Buena absorción acústica - longitud de onda media alta amortiguación.
- ③ FRECUENCIAS ALTAS
Muy buena absorción acústica - longitud de onda corta baja amortiguación.

Fig. 30.

Ejemplo

Se considera un sistema de distribución de aire desde un climatizador, con las siguientes características:

- Velocidad aire: 12 m/s.
- Caudal en circulación: 10.000 m³/h.
- Altura máxima para el equipo: 0,3 m.

Calcular las características teóricas de un silencioso de absorción para atenuar 30 dB en el intervalo de frecuencias 100 a 500 Hz.

Se calcula la sección libre de paso neto necesaria:

$$\frac{10.000}{12 \cdot 3.600} \frac{\text{m}^3/\text{h}}{\text{m/s} \cdot \text{s/h}} = 0,2315 \text{ m}^2$$

Para atenuar con efectividad a 500 Hz, la separación entre colisas no debe ser superior a:

$$\frac{1}{8} \cdot \frac{340}{500} \cdot \frac{\text{m/s}}{1/\text{s}} = 0,085 \text{ m}$$

Teniendo en cuenta la altura máxima de colisas de 0,3 m, el número de pasos libres de aire mínimo debe ser:

$$n \geq \frac{0,2315}{0,3 \cdot 0,0085} \frac{\text{m}^2}{\text{m} \cdot \text{m}} = 9$$

Luego deberá haber 10 colisas.

El ancho de las colisas se determinará en función de las características de la lana absorbente elegida. En este caso se elegirá en un material de lana de vidrio denominado PE-400 Velo, cuyas características de absorción son:

Frecuencia (Hz)	Valor de α para espacios		
	50 mm	70 mm	100 mm
125	0,19	0,33	0,54
250	0,43	0,65	0,87
500	0,77	0,88	1

Efectuando operaciones con el valor $\Delta L = 1,05 \cdot \alpha^{1,4} \cdot \frac{P}{S}$ dB/m, tendremos:

Ancho de colisa (mm)	Atenuación en dB/m		
	125 Hz	250 Hz	500 Hz
50	3,1	9,6	21,8
70	6,6	12,2	26,3
100	13,3	25,8	31,4

La solución será elegir entre los valores más bajos de atenuación, en este caso para 125 Hz, resultando el más adecuado un silencioso de 10 colisas, de 0,3 x 0,1 m de sección de colisas, separadas 0,085 m entre sí y con una longitud de $30/13,3=2,3$ m.

04.07.04. PROTECCIÓN DEL RUIDO INTERIOR EN LOS LOCALES

La práctica totalidad de los locales de ocio y muchos locales de trabajo están expuestos a niveles sonoros que perturban la actividad normal y el bienestar de las personas.

El ruido que se genera en los locales por fuentes internas es muy variado y procede desde unos pocos focos localizados hasta un número importante de focos no localizados y distribuidos por todo el local de manera aleatoria.

Evidentemente, problemas diferentes exigen soluciones diferentes, con frecuencia, además, el problema exige más de una solución simultáneamente.

04.07.04.01. Corrección acústica de locales

Este sistema es el más adecuado cuando el número de focos ruidosos es importante, aunque su nivel sonoro no sea elevado individualmente.

Si la distribución de estos focos es muy extensiva en un local o son móviles, se genera un ruido importante que sólo es posible reducirlo mediante acciones en el campo reverberado, dentro de las limitaciones que supone, aumentando el valor de área absorbente del local.

El valor medio de reducción sonora en un local, supuesto un campo reverberado difuso, modificando su área absorbente es:

$$\Delta L = 10 \log \frac{A_1}{A_0} = 10 \log \frac{T_0}{T_1} \quad \text{dB}$$

donde:

ΔL = Reducción del nivel sonoro medio en el local.

A_1 = Área absorbente del local aumentada, en m^2 .

A_0 = Área absorbente del local inicialmente, en m^2 .

T_0 = Tiempo de reverberación del local inicialmente, en s.

T_1 = Tiempo de reverberación del local aumentada la absorción, en s.

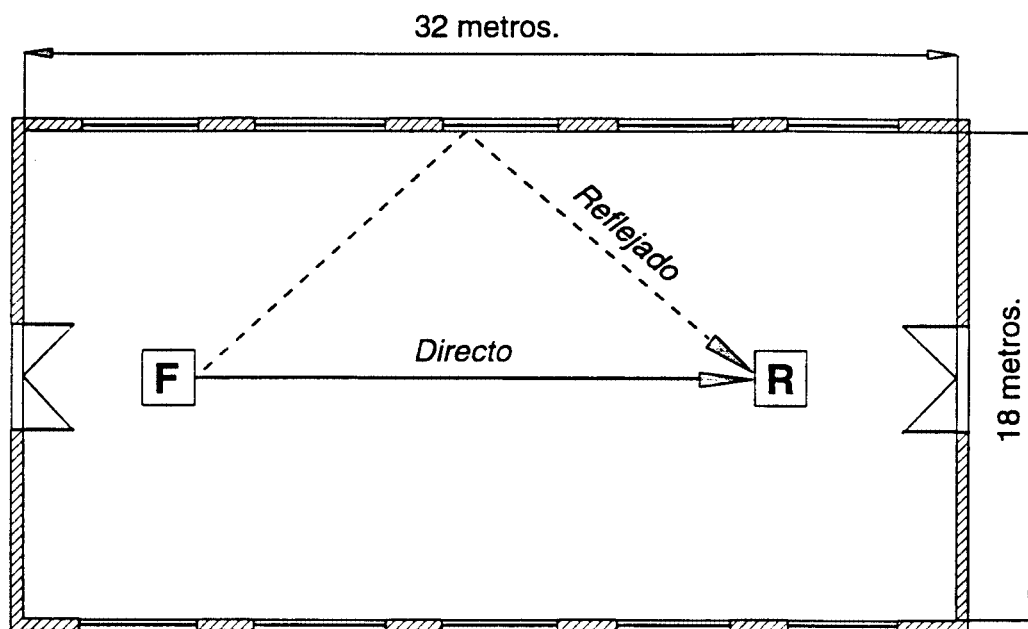
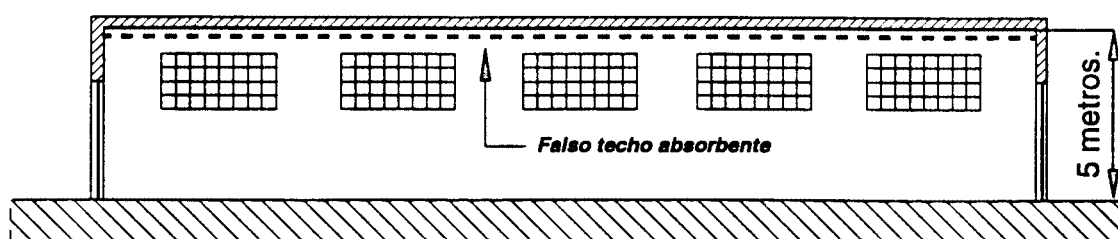
Para conseguir las mejoras de absorción se pueden utilizar:

- Techos acústicos constituidos por paneles rígidos de lana mineral, con elementos funcionales decorativos en su parte vista, que se instalan suspendidos del techo mediante perfilierías vistas u ocultas.
- Baffles acústicos formados por placas absorbentes montadas en marcos rígidos formando figuras geométricas que se suspenden del techo. Las figuras son variadas, pero principalmente son paralelepípedos estrechos y cilindros.
- Murales acústicos consistentes en paneles decorativos de formas planas u onduladas, susceptibles de instalarse paralelos a los cerramientos verticales, y compuestos por elementos absorbentes acústicos.

La característica funcional importante de todos estos sistemas es su espectro de coeficiente de absorción con la frecuencia.

Ejemplo:

Se trata de conocer la disminución general del nivel sonoro en un edificio cuyas características tipológicas y de ocupación son las adjuntas.

**Planta****Dimensiones longitudinal**

Ventanas: 10 unidades de 4 x 2 metros.

Puertas: 2 unidades de 4 x 4 metros.

Superficies cerramientos

- Techo-cubierta de guarnecido y enlucido de yeso: 576 m².
- Paramentos de guarnecido y enlucido de yeso: 388 m².
- Ventanas: 80 m².
- Puertas de chapa de acero: 32 m².
- Solera de pavimento de hormigón, pintado: 576 m².

Se considera una ocupación de 50 personas.

Volumen neto local: 2.880 m³.

Coefficiente de absorción acústica de los cerramientos

Valor medio para frecuencias de 100 a 5.000 Hz.

— Techo-cubierta:	0,03
— Paramentos:	0,03
— Ventanas:	0,10
— Puertas:	0,02
— Solera:	0,015
— Una persona:	0,40

a) Cálculo del tiempo de reverberación del local

El área absorbente será:

Cerramiento	S (m²)		α		αS (m²)
Techo - cubierta	576	x	0,03	=	17,28
Paramentos	388	x	0,03	=	11,64
Ventanas	80	x	0,10	=	8,00
Puertas	32	x	0,02	=	0,64
Solera	576	x	0,015	=	8,64
Operarios	50	x	0,40	=	20,00
					$A_0 = \Sigma \alpha S = 66,2$ (m²)

De acuerdo con la teoría de Sabine, el tiempo de reverberación del local viene dado por la ecuación:

$$T_1 = \frac{0,161 V}{A_0} \text{ (s)}$$

donde:

V: Volumen del local (m³)

$$A_0 = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n$$

donde:

$S_1, S_2, \dots, S_n$: Superficies de los cerramientos (m²).

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$: Coeficientes de absorción de dichos cerramientos.

Aplicando valores en (1), se obtiene:

$$T_1 = \frac{0,161 \cdot 2.880}{66,2} = 7 \text{ (s)}$$

b) Tiempo de reverberación del local, con un techo absorbente acústico

Se considera un techo de paneles Eurocoustic, modelo Tonga de 25 mm de espesor; suspendido dejando un espacio o cámara de 300 mm.

El valor medio del coeficiente de absorción, para frecuencias de 100 a 5.000 Hz, es: $\alpha = 0,78$.

Para el cálculo del tiempo de reverberación en el local, cuando una o varias superficies tienen un coeficiente de absorción muy diferente, se aplica la teoría de Millington y Sette.

Dicho tiempo de reverberación viene dado por la ecuación:

$$T_2 = \frac{0,161 V}{A_1} \text{ (s)}$$

donde:

V: Volumen del local (m^3).

$$A_1 = \sum S_i \ln(1 - \alpha_i) = -[S_1 \ln(1 - \alpha_1) + S_2 \ln(1 - \alpha_2) + \dots + S_n \ln(1 - \alpha_n)]$$

donde:

$S_1, S_2, \dots, S_n$: Superficies de los cerramientos (m^2).

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$: Coeficiente de absorción de dichos cerramientos.

ln: Logaritmo neperiano.

Aplicando valores en [2]:

$$A_1 = -\sum S_i \ln(1 - \alpha_i) = -[576 \cdot \ln(1 - 0,78) + (388 - 100 \cdot 0,325) \cdot \ln(1 - 0,03)] + 80 \cdot \ln(1 - 0,1) + 32 \cdot \ln(1 - 0,02) + 576 \ln(1 - 0,015) + 50 \ln(1 - 0,4) = \mathbf{926,25 \text{ m}^2}$$

Volumen con el falso techo: $2.880 - 576 \cdot 0,325 \cong 2.693 \text{ m}^3$.

$$T_2 = \frac{0,161 \cdot 2.693}{926,25} \cong 0,47 \text{ (s)}$$

c) Reducción del nivel de presión sonora, en el campo reverberado

La reducción del nivel de presión sonora puede calcularse en función del área absorbente en el local, sin y con tratamiento absorbente acústico y también en función de los tiempos de reverberación correspondientes.

Para la reducción obtenida en base al área absorbente, se utiliza la ecuación

$$L = 10 \log \frac{A_1}{A_0} \text{ (dB)}$$

donde:

A_1 : Área absorbente del local con tratamiento acústico (m^2).

A_0 : Área absorbente del local antes del tratamiento (m^2).

Aplicando valores, se tiene:

$$L = 10 \log \frac{926,25}{66,2} \cong 11,4 \text{ (dB)}$$

Para la reducción obtenida partiendo de los tiempos de reverberación se utiliza la ecuación:

$$L = 10 \log \frac{T_0}{T_1} \text{ (dB)}$$

donde:

T_1 : Tiempo de reverberación en el local sin tratamiento absorbente (s).

T_2 : Tiempo de reverberación en el local con el tratamiento absorbente (s).

Aplicando valores, se tiene:

$$L = 10 \log \frac{7}{0,47} \cong 11,7 \text{ (dB)}$$

Nota:

La pequeña diferencia en cuanto a la reducción de nivel de presión obtenida es como consecuencia de los valores del tiempo de reverberación, calculados por las dos teorías aplicadas, la de Sabine y la de Millington y Sette, así como a la reducción del volumen con el falso techo Eurocoustic.

04.07.04.02. Encapsulado de equipos

La solución idónea para los equipos ruidosos es el encapsulado, construyendo un cerramiento total sobre la máquina o grupo de equipos.

El ejemplo que se presenta a continuación es un resumen de las técnicas que conducen al encapsulado como solución, según se indica en la fig. 31.

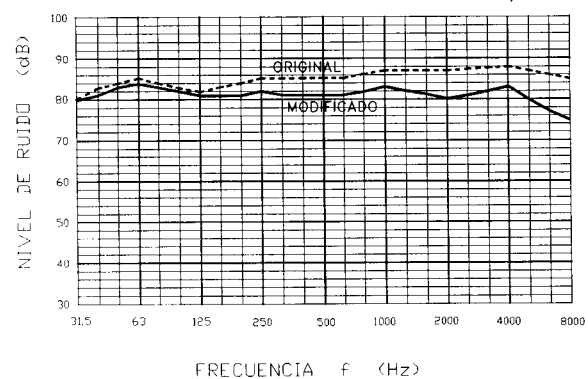
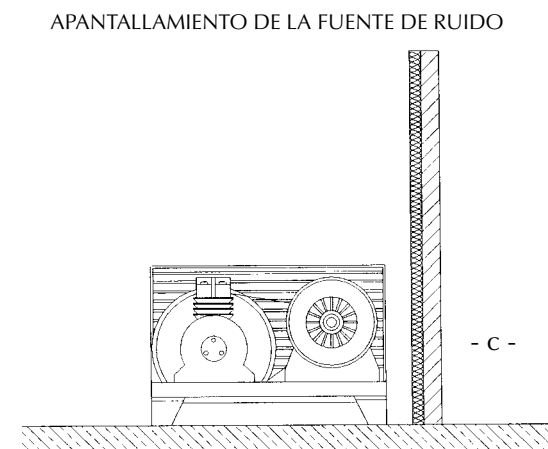
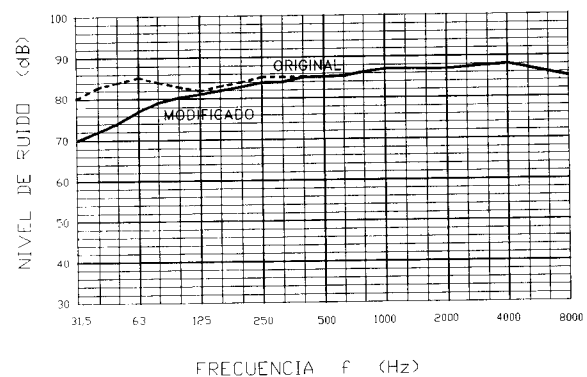
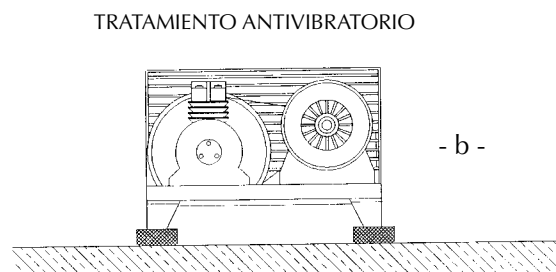
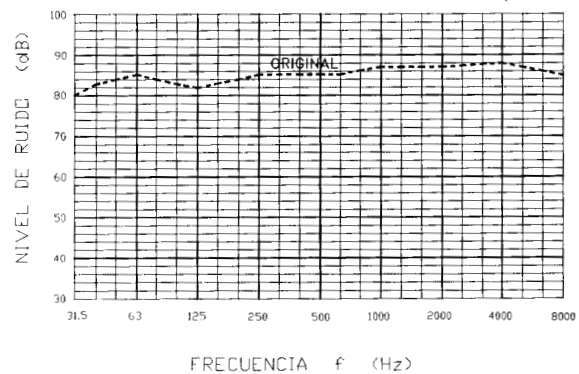
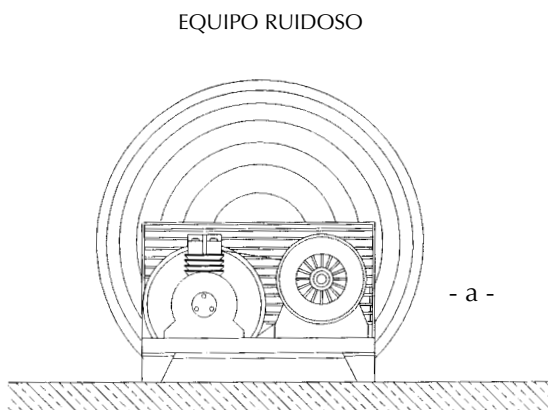
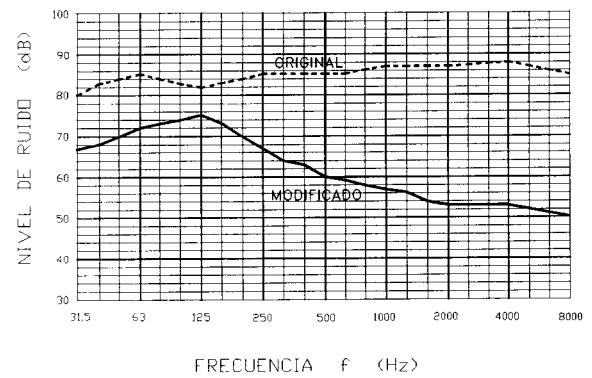
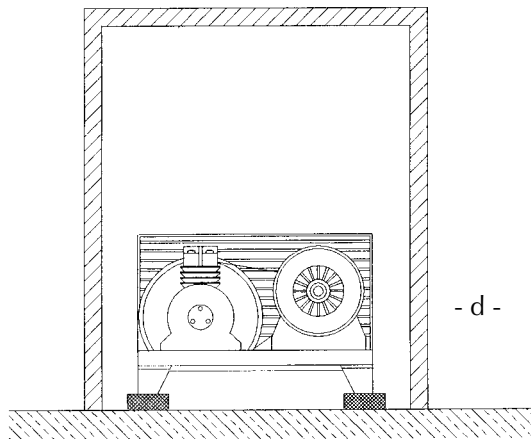
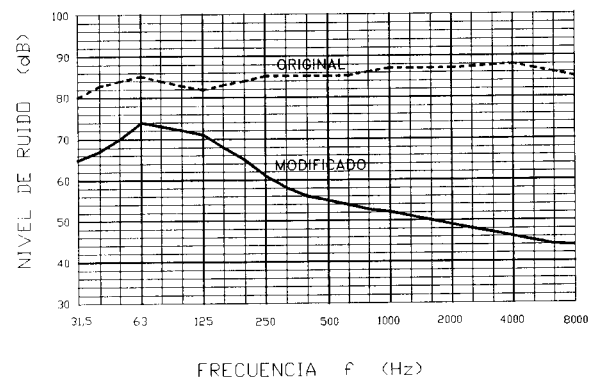
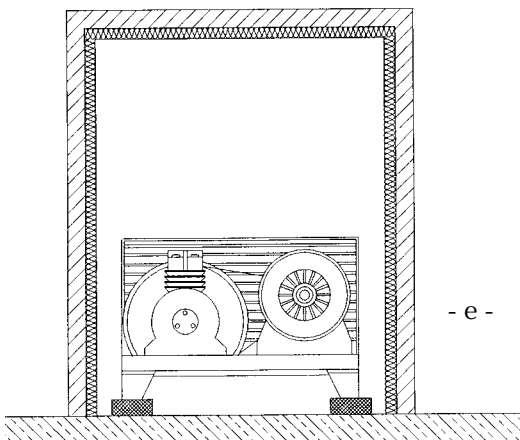


Fig. 31.

CERRAMIENTO RÍGIDO Y HERMÉTICO
CON ANTIVIBRADORES



CERRAMIENTO RÍGIDO Y HERMÉTICO CON
MATERIAL ABSORBENTE Y ANTIBRATORIOS



DOBLE CERRAMIENTO RÍGIDO Y HERMÉTICO CON
MATERIAL ABSORBENTE Y ANTIBRATORIOS

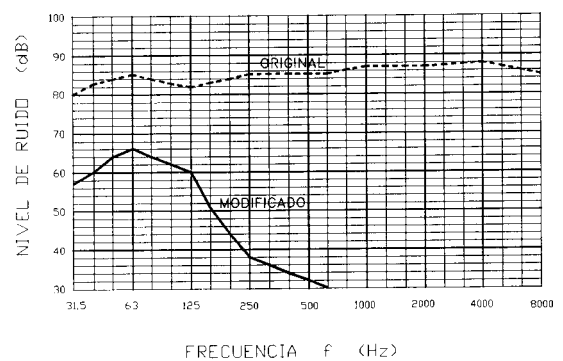
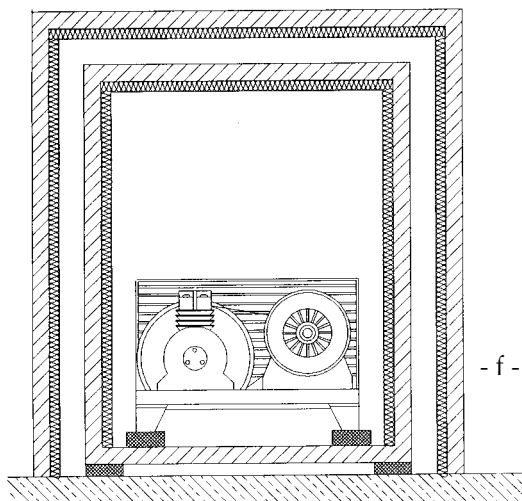


Fig. 31.

Un equipo ruidoso (a) situado en el interior de un local presenta el espectro sonoro a ruido aéreo que se indica. El primer paso elemental para todo equipo con movimiento interno es la desolidarización del apoyo sobre cualquier elemento del edificio. La colocación de elementos antivibratorios adecuados (b) proporciona, además de la reducción de la transmisión vía sólida necesaria, una reducción importante a ruido aéreo en el campo de las bajas frecuencias.

Para tratar de mejorar, se analiza una solución complementaria a la anterior, que es el apantallamiento del equipo. Sin embargo, se comprueba que esta solución aporta poco al aislamiento global. En (c), se representa el efecto que se obtendría solamente con el apantallamiento del equipo, que sólo es aceptable en las altas frecuencias.

El siguiente paso será establecer un cerramiento envolvente del equipo (d), salvo el suelo, que presente un aislamiento teórico de la membrana tan elevado como se desee. La reducción del nivel sonoro es evidente especialmente en el campo de las frecuencias medias y altas.

No obstante, el cerramiento con materiales rígidos presenta una elevada componente en el campo reverberado ya que su coeficiente de absorción será muy bajo a cualquier frecuencia.

Puede disminuirse el nivel sonoro mediante la introducción de materiales fuertemente absorbentes, como son las lanas de vidrio y roca, que reduzcan la componente reverberada. Así se llega a la solución (e), en la que se reduce el nivel en todo el espectro. Normalmente los materiales absorbentes se presentan a la instalación con recubrimientos (velos de vidrio o tejidos de vidrio, placas de aluminio o acero perforado...).

Si el nivel sonoro todavía resultara elevado para las exigencias técnicas previstas, la solución pasa por construir «una caja dentro de la caja», de acuerdo con lo propuesto en (f). En esta solución, el equipo se instala dentro de una envolvente completamente cerrada (incluso el fondo) desolidarizando todo lo anterior por elementos antivibratorios del suelo y situándolo en un cerramiento como el presentado en el caso anterior.

La reducción sonora es muy elevada y prácticamente es la única posible si se desean aislamientos «in situ», superiores a 60-65 dBA. Esta será la solución aplicable a los locales especialmente ruidosos como norma general.

Los cerramientos a efectuar no suelen presentar elementos simples y uniformes, sino que presentan con frecuencia elementos complejos para diversas funciones, como son:

- Elementos transparentes para la inspección visual (mirillas, ventanas...).
- Elementos practicables de acceso y evacuación de personas y materiales (puertas, trampillas, cintas transportadoras...).
- Tomas de aire y evacuación de gases.

Todos estos elementos deben tenerse en cuenta en el proyecto ya que suponen elementos débiles acústicamente y deben diseñarse especialmente para que no debiliten el aislamiento global.

Algunos consejos prácticos para el diseño:

- Mirillas y ventanas dobles, con separaciones importantes entre hojas (mayores de 15 cm). Vidrios de alto espesor, mejor si son laminares. Marcos independientes para cada hoja, desolidarizados. En el límite, hojas no paralelas.
- Puertas y trampillas de doble hoja, con ajustes al marco mediante elementos elásticos. Mejora la calidad acústica con marcos desolidarizados del soporte ciego. En el límite, montaje de dobles puertas, con cámara intermedia de alta absorción acústica.
- Todos los huecos de aspiración y expulsión de gases deben llevar silenciosos, principalmente de absorción, calculados para las atenuaciones acústicas que proceda.

04.07.05. PROTECCIÓN DEL RUIDO DE EMISIÓN DE LOS LOCALES CON ACTIVIDADES INDUSTRIALES

El caso más frecuente es el de los locales con actividades ruidosas en diversos grados, sobre los cuales existe una limitación legal de nivel sonoro de emisión hacia el exterior.

En este aspecto se encuentran los edificios industriales, cuya ubicación zonal sólo supone un nivel diferente, tanto más exigente para situaciones en zonas urbanas hospitalarias o residenciales.

El nivel de emisión al exterior más bajo permitido suele corresponder a las actividades que se desarrollan en edificios compartidos con viviendas. Especialmente conocidas son las actividades de ocio, donde los niveles de ruido generados en el interior de los locales es muy elevado (p.e. bares, discotecas, salas de fiestas...), por lo que se necesitan niveles de aislamiento muy importantes para este tipo de locales.

04.07.05.01. Naves industriales

04.07.05.01.01. Sandwich de montaje in situ

Las naves más habituales son aquellas cuya envolvente está constituida por chapa metálica perfilada, tanto en cerramiento vertical como en cubierta.

Los aislamientos acústicos de las chapas utilizadas, con espesores normales < 1 mm (0,63 y 0,75 mm normalmente), no pueden alcanzar valores importantes pese a las buenas características de la chapa de acero como material blando a la flexión, por tanto con frecuencias críticas elevadas (> 1.500 Hz).

La necesidad de incluir aislamiento térmico ha supuesto el desarrollo de soluciones tipo sandwich, en el que la chapa perfilada constituye los elementos exteriores y un aislamiento térmico es el alma del sandwich.

Esta solución mejora el aislamiento acústico respecto a la chapa perfilada de una sola hoja, aunque es el tipo de material aislante el que determinará la cuantía de la mejora.

Si se utiliza como material aislante térmico un material de síntesis de poro cerrado, como es el caso del poliestireno expandido o extrusionado, o del poliuretano, el resultado acústico es pobre, ya que la nula absorción acústica de estos materiales, así como su rigidez, no permite el funcionamiento del sistema como un cerramiento de doble hoja.

Por el contrario, la utilización de aislamientos térmicos de lanas minerales (lanas de vidrio y de roca) permiten una mejora notable en el valor del aislamiento acústico.

En la fig. 32 pueden observarse los resultados de aislamiento acústico de dos sandwich con los elementos de chapa iguales (chapas de 1 mm de espesor), pero con almas de lana de vidrio (16 kg/m^3) y de poliuretano (30 kg/m^3), respectivamente. En este caso, el aislamiento con sandwich de poliuretano es muy reducido por debajo de la frecuencia crítica de la chapa, lo que supone un aislamiento global notablemente inferior al obtenido con el aislante absorbente.

La necesidad de reducir los ruidos en el interior de las naves para mejorar las condiciones de las mismas, algunas veces se trata de conseguir perforando la hoja interna de chapa para aumentar el coeficiente de absorción. Sin embargo, esta solución es negativa para el aislamiento acústico de la envolvente, ya que reduce la efectividad del aislamiento a la hoja exterior principalmente.

En la fig. 33 se presentan los resultados de aislamiento de dos sandwich iguales con ACUSTIVER-R (fieltro de lana de vidrio), pero con hoja interna lisa y perforada. Como se aprecia, la diferencia de aislamiento acústico es de 7 dB(A). Este valor no es fácil de compensarse sólo con la reducción del ruido interno obtenido por la mejora del coeficiente de absorción (fig. 34).

Las mejores prestaciones posibles resultarán de aumentar la absorción acústica de la nave mediante techos acústicos que tienen esa función, manteniendo el cerramiento sin perforaciones.

Para aumentar los valores de aislamiento acústico de estos sistemas, las soluciones pasan por el incremento de las masas, es decir, el espesor de las chapas, o lo que es más habitual, aumentar el espesor del sandwich, lo que permite una mejora también del aislamiento térmico, reduciendo costes de energía térmica.

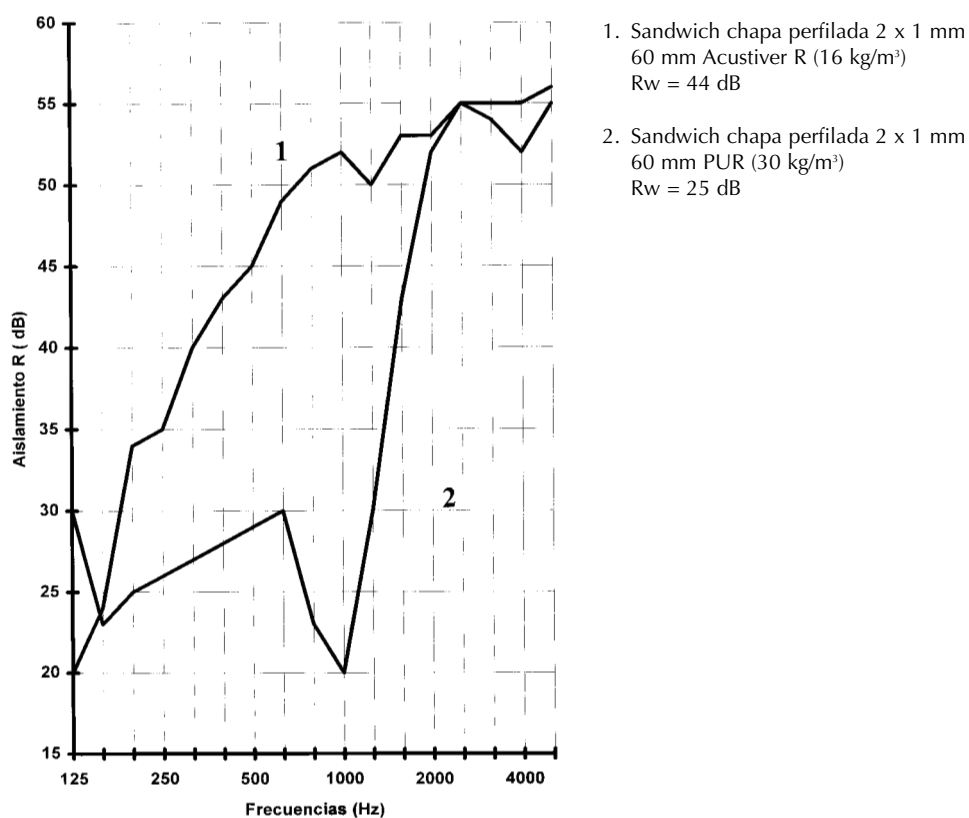


Fig. 32. Aislamiento acústico en Sandwich

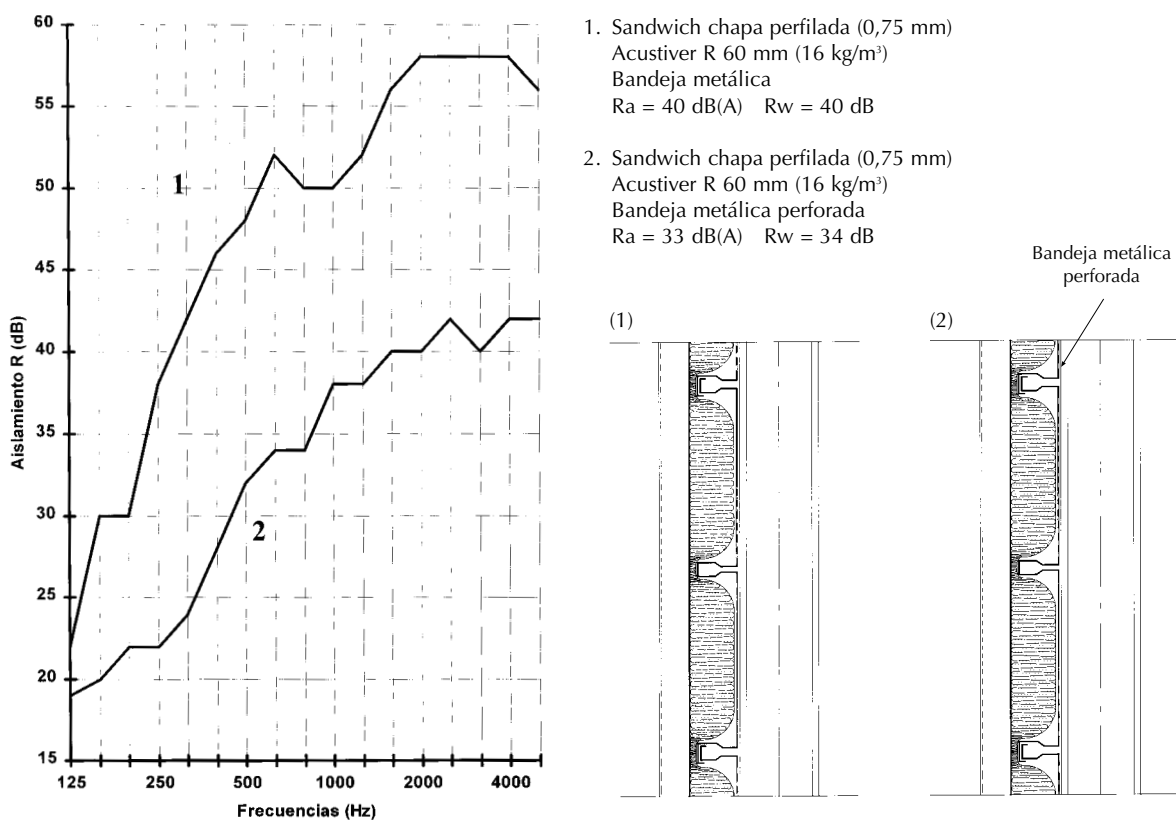
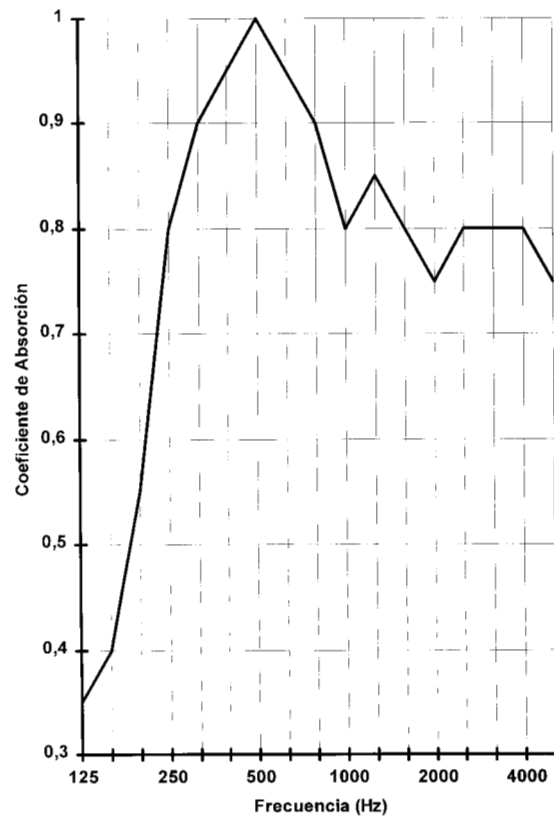


Fig. 33. Aislamiento diferencial entre cerramiento industrial sin y con perforaciones



Sandwich chapa perfilada (0,75 mm)
 Acustiver R 60 mm (16 kg/m³)
 Bandeja metálica perforada
 $R_a = 33 \text{ dB(A)}$ $R_w = 34 \text{ dB}$

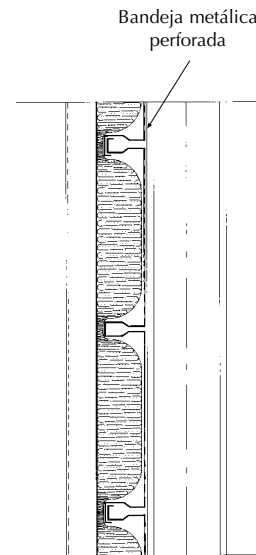
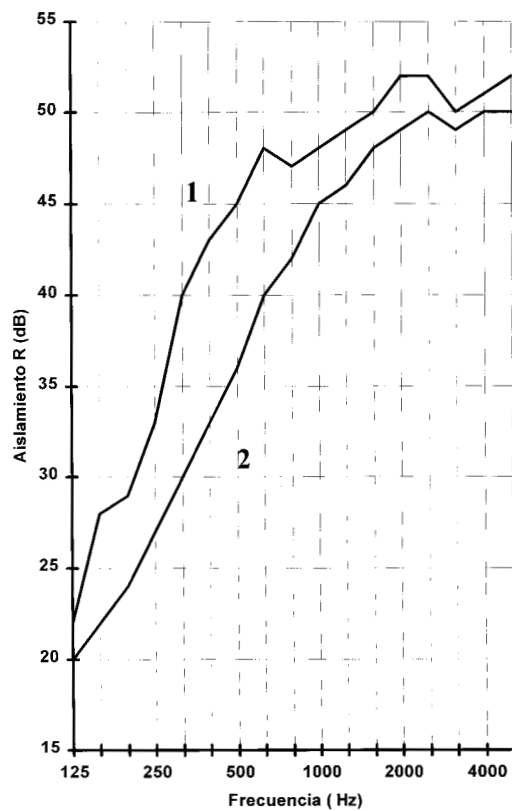


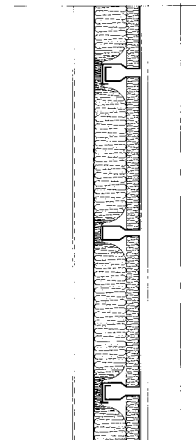
Fig. 34. Coeficiente de absorción del panel



1. Sandwich chapa perfilada (0,75 mm)
 Acustiver R (50 mm) (16 kg/m³)
 Acustiver 160 (50 mm) (16 kg/m³)
 Bandeja metálica
 $R_a = 43 \text{ dB(A)}$ $R_w = 45 \text{ dB}$

2. Sandwich chapa perfilada (0,75 mm)
 Acustiver R (50 mm) (16 kg/m³)
 Acustiver 160 (50 mm) (16 kg/m³)
 Bandeja metálica perforada
 Barrera vapor
 $R_a = 38 \text{ dB(A)}$ $R_w = 39 \text{ dB}$

(1)



(2)

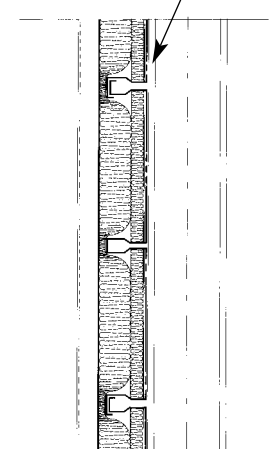


Fig. 35. Comparativo de aislamiento entre soluciones

En la fig. 35 se observan los resultados sobre el aislamiento acústico de aumentar el espesor de aislamiento del sandwich anterior de 60 mm de ACUSTIVER-R a 100 mm (50 mm de ACUSTIVER-R y 50 mm de ACUSTIVER-160). La mejora en este caso es de 3 dB(A) en el caso de chapas lisas.

Para el montaje con la chapa interior perforada, en este caso la mejora es más elevada que lo que cabría esperarse. Esto se debe a la introducción, en el segundo montaje, de una barrera de vapor en la cara caliente del aislante (la cara interna). Esta barrera equivale a reducir el efecto de las perforaciones, aunque no suficiente para sustituir a la chapa lisa por su menor masa superficial. También es fácil comprobar que se reduce el valor del coeficiente de absorción de la cara interna por el efecto de la citada barrera (fig. 36).

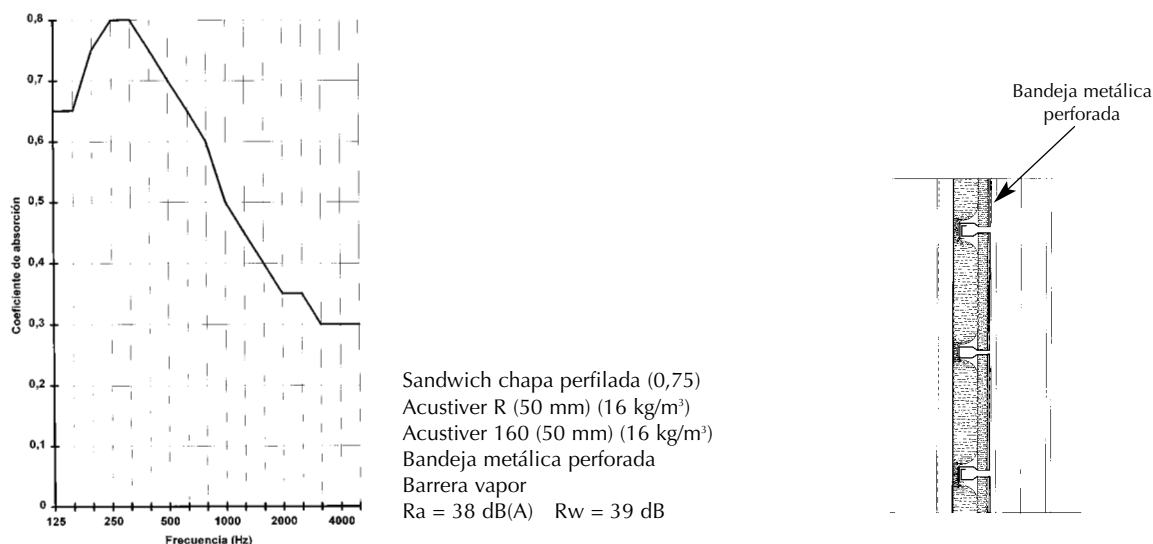


Fig. 36. Coeficiente de absorción del panel

Los aislamientos de cubierta, cuando utilizan las mismas soluciones constructivas, consiguen valores idénticos que las soluciones citadas. De todos modos, la solución más habitual para cubiertas con aislamiento térmico es la denominada «Cubierta Deck», constituida por un soporte de chapa perfilada, un aislante de lana mineral de alta densidad (PANEL CUBIERTA-150) y una impermeabilización, generalmente asfáltica.

El aislamiento acústico obtenido depende de las características de la impermeabilización elegida, ya que ésta será una de las hojas del sandwich mixto. En la fig. 37 se presenta el resultado de un ensayo con aislamiento de lana de roca (150 kg/m^3) con un espesor de 60 mm.

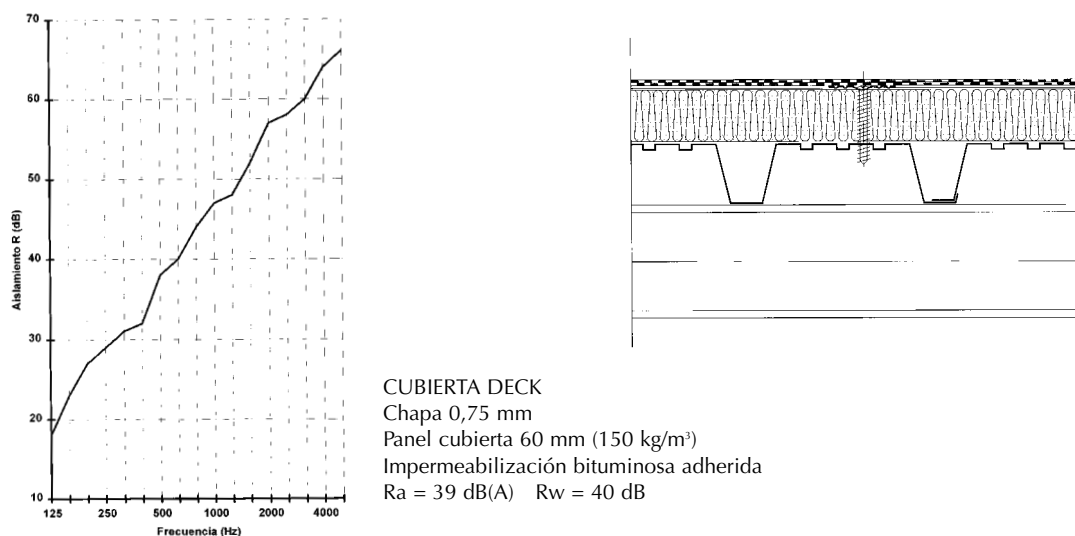


Fig. 37. Aislamiento en cubierta DECK

04.07.05.01.02. Sandwich prefabricados

Son productos mixtos, constituidos por dos láminas de chapa de acero perfilada en frío, con un núcleo aislante interior de lana mineral (lana de vidrio o de roca).

Su construcción se realiza en trenes especiales de perfilado, con ensamblado y corte automático. De este modo, la confección del producto es rápida, de alta precisión dimensional y con elevada calidad de conjunto.

Las propiedades de las lanas minerales se transmiten al producto final, por lo que éste tiene una elevada capacidad de aislamiento térmico y aislamiento acústico, así como una notable resistencia al fuego.

a) Comportamiento acústico:

Dos aspectos son básicos:

- La absorción acústica, por la cual es posible reducir de modo importante el ruido generado en el interior de las instalaciones industriales. La absorción acústica elevada del panel, se obtiene mediante la perforación de la chapa interna (mínimo de 22% de perforaciones).

En la figura adjunta, se presenta la curva de absorción α_s , en función de la frecuencia, para un panel sándwich de 50 mm de espesor y una de las caras perforada. La absorción acústica media obtenida es de $\alpha_w = 0,85$.

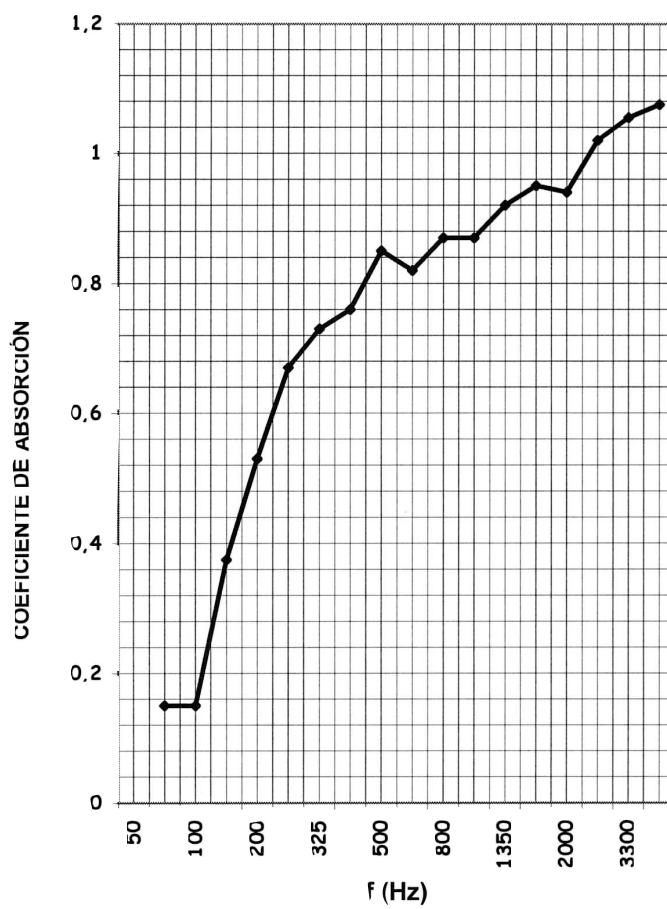


Fig. 38. Sandwich prefabricado, con chapa perfilada de 0,5 mm y alma de lana mineral de 50 mm. (Lámina interior perforada 25%.) Valor global de absorción, $\alpha_w = 0,85$.

- El aislamiento acústico. Es muy alto, como corresponde a este tipo de soluciones constructivas formadas por dos hojas blandas a la flexión (ambas láminas de acero) con un alma interior de lana mineral (absorbente acústico y amortiguador elástico, simultáneamente).

En la figura adjunta se presentan los resultados de aislamiento acústico de dos sandwich de igual construcción, pero con espesores de 50 y 80 mm de lana mineral. Los resultados obtenidos en los ensayos (35 y 37 dB), demuestran que el aislamiento crece con el espesor de lana.

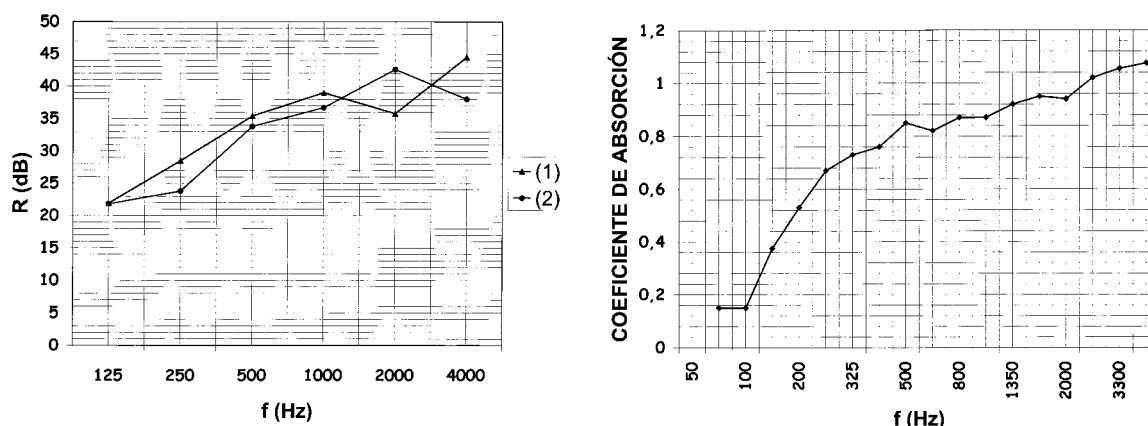


Fig. 39. (1) Sandwich prefabricado, con chapa perfilada de 0,5 mm y alma de lana mineral de 50 mm. (Lámina interior perforada 25%.) Aislamiento acústico: $R_A = 34,4$ dBA $R_w = 35$ dB.
(2) Sandwich prefabricado, con chapa perfilada de 0,5 mm y alma de lana mineral de 80 mm. (Lámina interior perforada 25%.) Aislamiento acústico: $R_A = 36,2$ dBA $R_w = 37$ dB.

04.07.05.02. Locales ruidosos

Se trata en general de los locales donde se desarrollan actividades con sonidos musicales, desde la enseñanza (conservatorios, academias de baile...), hasta el ocio (discopubs, discotecas, salas de fiesta, tabladors...). También se encuentran en este grupo actividades ruidosas no musicales, como bares y cafeterías, y toda industria donde se produzcan niveles de ruido que causen molestias a los vecinos.

Aunque por motivos diferentes, ya que obedecen a necesidades de utilización, las técnicas de aislamiento acústico de elevadas exigencias se aplican a sectores como discografía, radio y televisión (estudios de grabación), cines, teatros...

No es posible establecer un modelo único de solución para el aislamiento acústico de estos locales, debido a que no son iguales los niveles de ruido generados, ni su espectro sonoro, ni el nivel de emisión máximo permitido. Además, este tipo de locales parten de una edificación inicial en la mayoría de los casos, y, en cada uno de ellos, deben efectuarse las adaptaciones oportunas para el cumplimiento de las especificaciones de ese proyecto.

De cualquier manera, el aislamiento de estos locales siempre supone actuaciones en toda la envolvente del local, tanto en los divisorios comunes como en los adyacentes, para evitar el riesgo de las transmisiones indirectas que es necesario reducir al mínimo. Esto requiere que el aislamiento acústico de todos los elementos de la envolvente tengan valores del mismo orden de magnitud.

Para esto se presentan algunas posibles soluciones en elementos de cierre verticales (muros y tabiques), y horizontales (forjados de techo o cubiertas y forjados de suelo o soleras).

a) Muros y tabiques

La existencia de cierres de obra (fábrica de ladrillo o de bloque, muros de hormigón) permite la realización de trasdosados con la otra hoja constituida por elementos blandos a la flexión (placa de yeso, normalmente), con un alma interior de lana de vidrio o de roca.

La utilización de lana de vidrio es más recomendable, ya que el resultado acústico del sistema es prácticamente igual con lanas de vidrio de baja densidad que con lanas de roca de mayor densidad pero de coste sensiblemente superior.

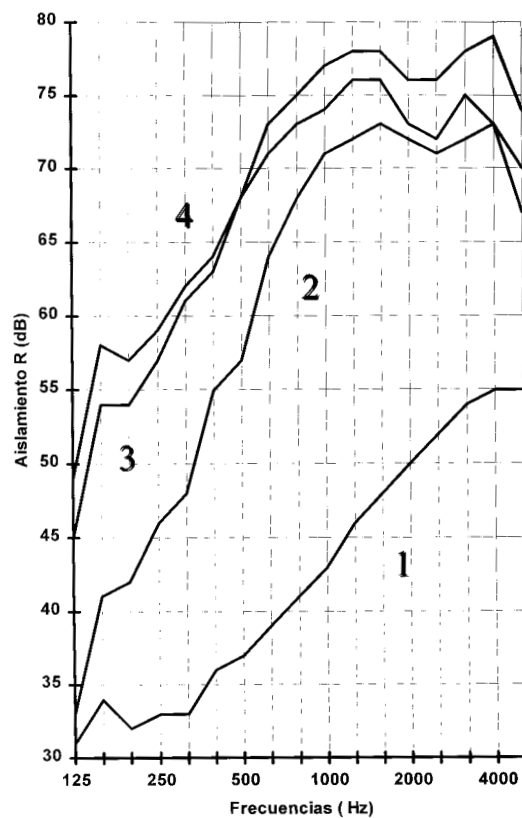
En cuanto a los sistemas de fijación del trasdosado al soporte de obra, lo más importante es la adopción de montajes (pelladas, estructuras de montaje en seco), que presenten el menor grado de unión rígida posible entre ambas hojas. La necesidad de esta desolidarización entre los elementos de cierre es imperativa para obtener aislamientos superiores a 55 dB(A), con unos costes razonables.

Como es lógico, para un mismo elemento de soporte, el nivel de aislamiento de estos sistemas crece con el aumento de la cámara de separación de las hojas (siempre rellena de lana de vidrio o de roca), o bien de la masa de las placas de yeso.

Se presenta en la fig. 40 el valor de aislamiento acústico, certificado por laboratorio homologado, de diversos tipos de trasdosado efectuados a un mismo elemento de obra vertical.

La curva (1) corresponde al soporte, que en este caso es un tabique de ladrillo hueco doble, colocado a media asta y revestido por ambas caras de enfoscado (5 y 15 mm, respectivamente), con un peso global de 163 kg/m² y 130 mm de espesor total. El nivel alcanzado es de 42,5 dB(A).

Trasdosado con CALIBEL 13 mm (placa de yeso) y 40 mm (lana de vidrio), se obtiene la curva (2), con un aislamiento de 55 dB(A), lo que representa una mejora de 12,5 dB(A), con un aumento de sólo 12 kg/m² y 60 mm de espesor.



1. Tabique ladrillo hueco doble
Masa superficial: 163 Kg/m²
Ra = 42,5 dB(A) Rw = 42 dB
2. Tabique ladrillo hueco doble
Calibel 13 + 40
Masa superficial: 175,5 Kg/m²
Ra = 55 dB(A) Rw = 56 dB
3. Tabique ladrillo hueco doble
Placa de yeso laminado (2 x 15)
Acustiver 160 (2 x 50)
Masa superficial: 187 Kg/m²
Ra = 65,5 dB(A) Rw = 67 dB
4. Tabique ladrillo hueco doble
Placa de yeso laminado (3 x 15)
Acustiver 160 (3 x 50)
Masa superficial: 197 Kg/m²
Ra = 69,5 dB(A) Rw = 71 dB

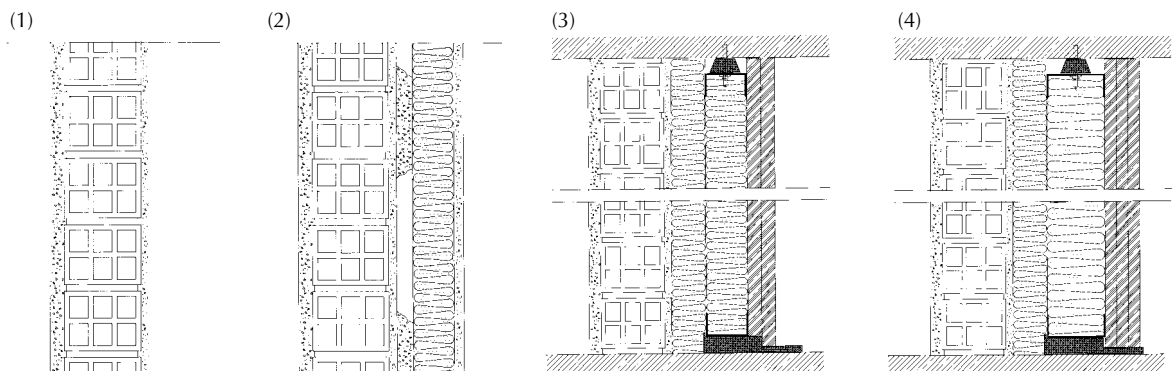


Fig. 40. Soluciones acústicas de trasdosados

Para obtener valores de aislamiento superiores a 60 dB(A), se ha ensayado un trasdosado de 2 placas de 15 mm de yeso, montadas en seco con periferia metálica sujeta al portador mediante elementos antivibratorios, y se ha aumentado la separación a 100 mm, rellenos de ACUSTIVER 160 (2x50 mm). El resultado, curva (3), supone un aislamiento global de 65,5 dB(A), es decir: 23 dB(A) de ganancia sobre el portador, con 24 kg/m² de aumento de peso y 130 mm de espesor.

Es posible la mejora del resultado anterior, con un montaje similar, pero con placas de yeso de 15 mm y una separación de 150 mm, rellena de 3x50 mm de ACUSTIVER-160. En este caso el aislamiento alcanza los 69,5 dB(A), con una ganancia de 27 dB(A), con 33,5 kg/m² más y 190 mm de aumento de espesor.

Nota. Las medidas de laboratorio se han efectuado también de acuerdo a la norma ISO 717, futuro sistema de medición obligatorio en U.E., resultando: 42 dB, 56 dB, 67 dB y 71 dB, respectivamente, que suponen ganancias mejores que las obtenidas en dB(A): 14 dB, 25 dB y 29 dB.

La adopción de un portador de mayor masa superficial (kg/m²) hubiera permitido mejores resultados absolutos, debido a las fuertes ganancias obtenidas.

P. e., si se hubiera utilizado como portador una fábrica de ladrillo cerámico perforado de 1/2 pie, guarnecido y enlucido como el ensayado, con una masa de 250 kg/m², los resultados se hubieran incrementado en 4 ó 5 dB(A).

Los sistemas de tabiquería de montaje en seco, con placas de yeso en ambas hojas y soportadas por estructura metálica, son la solución idónea para obtener valores elevados de aislamiento acústico con pesos bajos y espesores de divisorio pequeños.

Como en el caso de los trasdosados, los factores de influencia para conseguir elevados aislamientos, consisten en disponer de mayor tamaño de cámara (siempre con absorbente), o mayores masas en las hojas. Otro factor muy a tener en cuenta es la influencia de la posición de las armaduras en el resultado final: las armaduras entre hojas deben ser independientes para aislamientos elevados.

En la fig. 39 se presentan las curvas de aislamiento de algunos tipos de montajes representativos:

- La curva (1) corresponde a un tabique con 120 mm de espesor total constituido por: placas de yeso (2x13 mm, en cada lado); ACUSTIVER-R (70 mm) y una armadura común de montantes de 70 mm. El aislamiento es de $R_a=53$ dB(A), o bien $R_w=54$ dB.
- La curva (2) se obtiene para un tabique del mismo espesor, pero con estructura de montantes independientes (48 mm, alternados en cada cara), y ACUSTIVER-R (2x40 mm). El resultado es de $R_a=60$ dB(A) y $R_w=62$ dB.

La ganancia de 7 dB(A) u 8 dB se debe a la reducción de los puentes acústicos que supone la armadura independiente respecto a las armaduras comunes a ambas hojas.

Para comprobar la influencia de otros factores, se presenta en la curva (3) los resultados de un tabique de 160 mm de espesor total, de las mismas características que el caso anterior, pero con una separación entre hojas 40 mm mayor. En este caso, $R_a=62$ dB(A) y $R_w=64$ dB, lo que representa una ganancia de 2 dB(A).

Para muy altas prestaciones, se puede utilizar el tabique de espesor 420 mm, curva (4), constituido por placas de yeso (3x15 mm en cada lado), con estructuras independientes de 120 mm en los montantes, arriostrados con elementos antivibratorios, y rellena con ACUSTIVER-R (2x90 mm) y ACUSTIVER 160 (3x50 mm). El aislamiento de este tabique se ha ensayado «in situ», obteniéndose $R_a>78$ dB(A).

Las posibilidades de la tabiquería de montaje en seco permiten soluciones adaptadas a cualquier exigencia, desde valores de 40 dB(A), con montajes simples (una placa por cada cara y 70 mm de espesor), hasta los más sofisticados como los presentados más arriba.

b) Forjados de techo o cubiertas

A efectos acústicos, el nivel de aislamiento teórico a ruido aéreo de un elemento es independiente de su posición vertical u horizontal. Por esto es posible aplicar las mismas técnicas de “trasdosado” a un forjado, actuando éste como portador. Es importante asegurar la impermeabilidad acústica de los forjados, procediendo al enyesado sistemático de la cara vista del mismo, con 20 mm de capa.

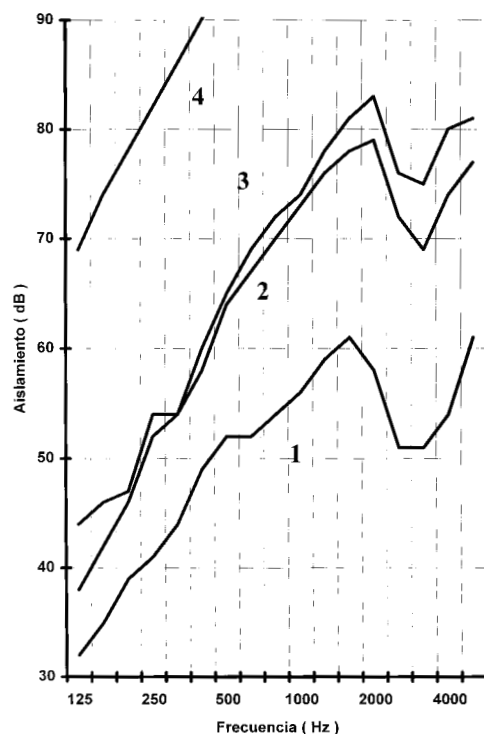
A diferencia de las paredes verticales, en este caso los elementos de la segunda hoja deben suspenderse necesariamente del techo. Si se desea obtener valores elevados de aislamiento, será imprescindible que las suspensiones se efectúen con elementos antivibratorios. Por la misma razón, el espacio entre forjado y placas no puede contener elementos que conecten con el local y suponga un puente acústico (tuberías,

conductos de aire acondicionado...). Estas instalaciones deben estar siempre en el interior de la «caja aislada».

Como los forjados suelen tener masas superficiales de 275 kg/m^2 como mínimo, lo que representa alrededor de $R_a=48 \text{ dB(A)}$, es fácil estimar el valor que alcanzarían soluciones como las propuestas en la fig. 40 estudiada.

El montaje de las placas de yeso debe atenerse a lo establecido por los fabricantes de estos materiales para el montaje de techos (Fig. 41). La elección de los elementos antivibratorios debe asegurar una buena distribución de los mismos y el cálculo de todas las cargas que debe soportar la estructura del techo además de peso propio (otro techo acústico, elementos de iluminación...).

En la fig. 42 se presenta un detalle de colocación del techo aislante, con los conductos de climatización en protección tipo «falsa viga».



1. Placa de yeso laminado (2 x 13)
Acustiver R (70)
Espesor total = 120 mm
 $R_a = 53 \text{ dB(A)}$
2. Placa de yeso laminado (2 x 13)
Acustiver R (2 x 40)
Espesor total = 120 mm
 $R_a = 60 \text{ dB(A)}$
3. Placa de yeso laminado (2 x 13)
Acustiver R (2 x 45)
Espesor total = 160 mm
 $R_a \geq 62 \text{ dB(A)}$
4. Placa de yeso laminado (18 + 2 x 13)
Acustiver R (2 x 80)
Acustiver 160 (150 mm)
Espesor total = 420 mm
 $R_a \geq 78 \text{ dB(A)}$

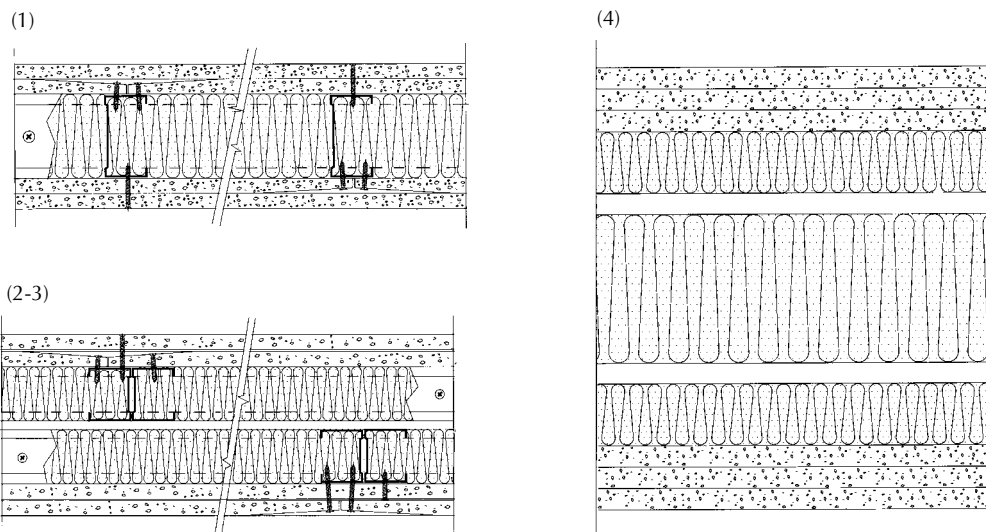


Fig. 41

c) Forjados de suelo y soleras

Cualquiera que sea el tipo de soporte del pavimento, éste debe ir desolidarizado acústicamente del resto de la estructura del edificio para evitar la transmisión de ruidos de impacto, como se ha indicado anteriormente (ver apartado 03.06.02).

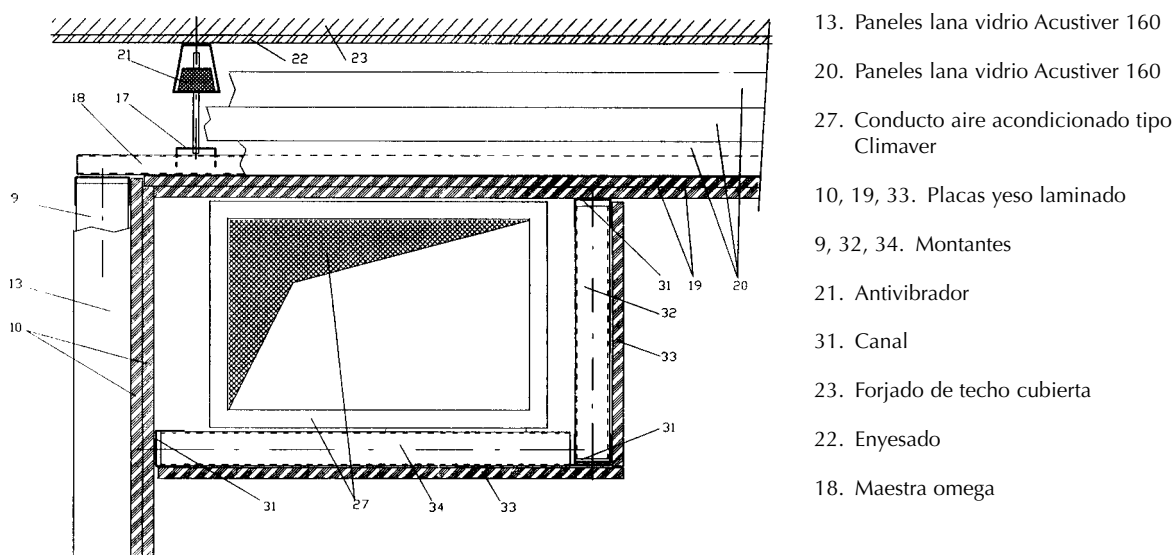


Fig. 42

Si se trata de forjados y la actividad del local supone un elevado nivel a ruido de impacto (discotecas, academias de baile, etc.) se obtienen buenos resultados construyendo un suelo flotante, constituido por:

- Antivibratorios con f_n menor de 5 Hz (rellenando el espacio entre los antivibratorios con Acustiver 160).
- Una losa de hormigón, de 100 mm de espesor, armada con mallazo de 7 mm de diámetro de varilla y 60x80 mm de luz. Para su construcción, montar un tablero de aglomerado de 20 mm y lámina de polipropileno de 0,2 mm.

El cálculo y distribución de los antivibratorios deben tener en cuenta no sólo el peso propio, sino también las sobrecargas de uso, tanto las permanentes como las eventuales.

Cuando se trate de soleras, suele ser suficiente la utilización de lanas de vidrio o roca como elementos amortiguantes a ruido de impacto, utilizándose en estos casos, espesores del orden de 50 mm, con lanas de alta densidad (Panel PF y Panel solado directo).

La construcción correcta de la losa flotante es el paso imprescindible para poder realizar el resto de las intervenciones en el local que deben ir apoyadas sobre la misma. Por supuesto, la realización de tabiques debe suponer la menor sobrecarga posible, es decir, debe ejecutarse con placas de yeso y montaje en seco. Esto es aplicable a cualquier otro elemento de mobiliario y decoración.

Protección contra incendios

05.01. INTRODUCCIÓN

Los incendios constituyen con frecuencia el riesgo más grave para los ocupantes de los edificios o los trabajadores de muchas industrias, la tripulación de un buque, ...

Las consecuencias de un incendio se resumen en una sola palabra: pérdidas.

Siempre habrá pérdidas materiales de bienes familiares, sociales o empresariales. Con frecuencia, también habrá derivaciones en carencia de servicios.

Sin embargo, lo más grave y doloroso por lo irreparable, son las pérdidas de vidas humanas.

Una pregunta surge ante esto: ¿habrá algún medio de eliminar este problema? La respuesta es que probablemente nunca pueda eliminarse, pero sí reducirlo notablemente en dimensiones, mediante acciones adecuadas de incrementar la protección pasiva y activa, especialmente en el hábitat de las personas, como en el caso de los edificios.

Un país que empezó a aplicar esta política a mediados de los años 70 fue EE.UU. con los resultados indicados en el Cuadro 1.

CUADRO 1

AÑO	NÚMERO DE INCENDIOS EN EDIFICIOS	HERIDOS	MUERTOS	PÉRDIDAS EN BILLONES \$ (1984)
1966	970.800	—	10.100	5,9
1977	1.098.000	26.310	6.505	6,7
1980	1.065.000	24.725	5.675	5,5
1984	848.000	23.025	4.525	5,9

La reducción es notable si se tiene en cuenta el incremento de población del 22% en el período 1966-1984.

Las dos formas, complementarias, para una eficaz lucha contra incendios son:

- La protección pasiva, por la cual todos los elementos de un edificio, industria, buque..., tengan escasa o nula capacidad para provocar un incendio, constituyendo además soluciones constructivas que impidan la propagación de un eventual incendio producido a causa del contenido (mobiliario, elementos eléctricos, productos almacenados o transportados...).
- La protección activa permite, en caso de incendio, la rápida determinación y alarma para el uso eficaz de los medios de lucha contra incendios (extintores, mangueras...).

05.02. Protección pasiva contra incendios en los edificios

Deben considerarse aquí todas las acciones orientadas a que un edificio, dentro de una arquitectura y uso determinado, presente el mayor grado posible de resistencia a que se generen incendios y en todo caso, reducir la velocidad de propagación de aquéllos.

De este modo podrá efectuarse la evacuación ordenada de los ocupantes (víctimas potenciales), y se podrán utilizar con más eficacia los métodos de protección activa para reducir el incendio (disminución de daños).

Excluyendo otros aspectos como la compartimentación, las dos orientaciones fundamentales para la protección pasiva residen en la utilización mayoritaria de materiales constructivos incombustibles (que no contribuyan a originar incendios) y de soluciones constructivas resistentes en el tiempo frente al ataque del fuego.

La legislación española en estas materias, está determinada aún por la NBE-CPI-96 (Normativa Básica de la Edificación, Condiciones de Protección Contra Incendios en los Edificios), así como de diversas Ordenanzas de carácter municipal, en los ámbitos de competencia local (actividades industriales, comerciales, hostelería, espectáculos...).

En breve se espera el cambio a las nuevas exigencias del Código Técnico de la Edificación.

05.02.01. COMPORTAMIENTO ANTE EL FUEGO DE LOS MATERIALES

05.02.01.01. La clasificación española actual

La clasificación española para el comportamiento al fuego, estaba basada fundamentalmente en establecer su posición en una escala de inflamabilidad de un material: M0, M1, M2, M3 y M4, son las clases que definen los productos combustibles con grado de combustibilidad creciente.

La determinación de las clases se realiza mediante los ensayos definidos en la norma UNE-23727. Un material que se clasifique M1, puede aspirar a ser M0 (material incombustible), si supera las exigencias correspondientes indicadas en la citada norma.

Las clasificaciones a partir de M1 e inferiores, presentan lagunas informativas y simplificaciones, que conducen a comparaciones poco realistas entre los materiales. Se presentan a continuación una serie de reflexiones sobre este tema, que permitirán una evaluación cualitativa de riesgos, más ajustada a la realidad de un incendio y muy ligados a la seguridad de las personas en caso de incendio.

Concretamente hay dos fenómenos de gran importancia: la carga al fuego y la generación de humos.

a) La carga al fuego:

Los materiales orgánicos presentan valores de carga al fuego caracterizados por su Poder Calorífico Superior (PCS), es decir: la cantidad de energía calorífica desprendida en el proceso de combustión completa de una unidad de masa del material (kJ/kg).

Este valor es característico de cada material. Para los materiales plásticos (o de síntesis) utilizados en los edificios, el valor del PCS oscila entre 50 y 85 % del PCS del petróleo.

La adición de ignifugantes, cuya misión es modificar la clasificación al fuego de algunos materiales, no modifica el PCS de los mismos. Así, materiales que son de naturaleza M4 ó M3 y que con la adición ignifugantes pueden pasar incluso a M1, presentan un PCS prácticamente igual al que tenían cuando eran M3 ó M4.

Es lógico pensar que estos tipos de materiales no deberían colocarse nunca en posiciones expuestas en los edificios, por el elevado riesgo que representan. Dentro de estas posiciones, la normativa sí contempla algunos casos de los elementos vistos de un local o los introducidos en falsos techos o suelos técnicos en forma de elementos para la acústica o la climatización.

Sin embargo, hay otras posiciones expuestas que no suelen considerarse por no estar explícitas en la normativa. Concretamente todos los elementos vistos de un local, las cámaras ventiladas (verdaderas chimeneas en caso de incendio), los elementos bajo cubierta no protegidos y en todo caso, las cámaras de gran volumen relativo, con escasa protección contra incendios en alguna de sus caras.

b) La generación de humos:

El incendio no solo produce fuertes aumentos de temperatura, sino también el desprendimiento de humos. La composición y velocidad de producción de los mismos, depende los productos combustibles y del porcentaje de oxígeno disponible para la combustión.

El problema es serio, ya que se estima que el 80% de las víctimas de los incendios, tienen por origen los humos desprendidos durante el mismo, de acuerdo a dos grupos de factores que determinan estas circunstancias.

b-1) La opacidad de los humos es la característica que determina el grado de visibilidad a través del humo. Si el humo es relativamente opaco, la visibilidad es baja, incluso nula.

La posibilidad de que las personas escapen de un incendio, está directamente relacionada con la rapidez de evacuación de los locales incendiados. La introducción de un condicionante que reduce la rapidez de evacuación, juega un papel negativo e incrementa notablemente los riesgos de las personas.

Además, el riesgo se ve aumentado por la reducción del oxígeno respirable, lo que aumenta la fatiga y, en el caso de personas más débiles, prácticamente supone que no puedan moverse y escapar.

b-2) La toxicidad de los humos.

En un incendio siempre se desprenden anhídrido carbónico (CO_2) y monóxido de carbono (CO), siendo este último gas tanto más abundante cuanto más incompleta es la combustión, como suele suceder en los incendios dentro de los locales cerrados.

Además, en función de la composición química de los materiales, se pueden producir desprendimiento de otros gases con elevado grado de toxicidad para el ser humano, aun en proporciones muy pequeñas.

A este respecto y a título de ejemplo no limitativo, basta recordar que la dosis mortal en un máximo de 10 minutos, es respirar aire con 200 ppm de ácido cianhídrico (HCN), ó 500 ppm de cloro (Cl_2).

Respecto al CO citado antes, la dosis letal para ese periodo de tiempo, es de 4.500 ppm. Pero su peligrosidad es muy elevada, ya que tasas muy inferiores a la indicada, reduce la movilidad de las personas, adormeciéndolas. Es el gas desprendido por los braseros, que tantas víctimas causó en épocas pasadas.

Por otra parte, la toxicidad individual de estos componentes, se potencia por la presencia de otros. Algunas normas (ISO, ASTM, AFNOR...), determinan un «índice de toxicidad de humos», combinando los valores de análisis para este tipo de componentes.

Nota: Generación de un incendio

Un incendio fortuito en un local supone una combustión no deseada en el espacio o en el tiempo.

Suele iniciarse del mismo modo: un foco de calor (cortocircuito, colilla mal apagada,...), es capaz de hacer entrar en ignición a un material combustible próximo a él, produciendo calor y por tanto una elevación local de la temperatura, aunque sólo suponga un pequeño incremento de la temperatura media del local.

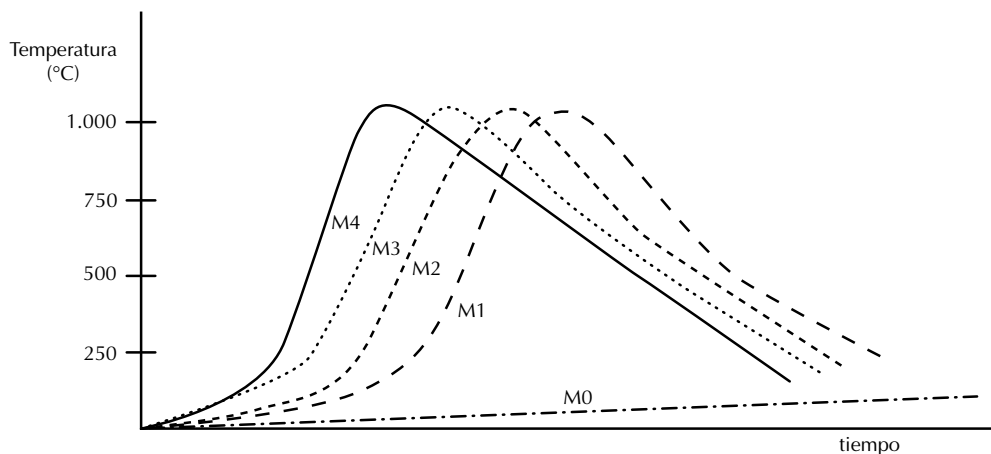
De este modo, se inicia la combustión autoalimentada de los materiales combustibles que se encuentran alrededor del foco de calor, según un proceso realimentado: más cantidad de calor desprendido, con mayor elevación de temperatura en el local. Es una fase de crecimiento del incendio.

Si estableciéramos la evolución de este proceso en un diagrama Temperatura- Tiempo, (ver Gráfico adjunto), encontraríamos que la velocidad de crecimiento del incendio, está ligada al grado de inflamabilidad de los materiales (clasificación de reacción al fuego elevada), así como a la cantidad de material combustible y a su capacidad calorífica (Poder Calorífico Superior).

Por esto, supuesta una misma carga al fuego, los productos M4 y M3 tendrán evoluciones muy rápidas, siendo en general más lentos los crecimientos en M2 y M1. Para los productos M0, la curva tiene un crecimiento prácticamente nulo.

En un entorno entre 400 y 600 °C, se produce el fenómeno del «flashover» (combustión súbita generalizada). Se estima que en ese momento, todo lo que puede arder en el local, ya está en combustión, elevándose todavía más la temperatura, hasta llegar a un equilibrio de transferencia de calor con el ambiente. Aquí el incendio no puede apagarse por medios externos, debiendo dejar que se consuma todo.

Parece evidente que el uso de materiales combustibles en general y sobre todo de aquellos de clasificación al fuego elevada, aumentan notablemente el riesgo y la peligrosidad de los incendios.



05.02.01.02. Futuro de la evaluación de la reacción de la reacción al fuego: las euroclases

A partir de la Directiva de Productos de Construcción (89/106/CEE), se ha trabajado en el desarrollo de los “requisitos esenciales” por varias vías, principalmente mediante la creación de “normas armonizadas” acordes a los mismos.

La “Seguridad en caso de incendio” es uno de los requisitos que en mayor grado pueden afectar a los usuarios de los edificios, y ha sido uno de los sectores de más difícil acuerdo.

Esto se debió, por una parte, a que las normas sobre reacción al fuego existentes en los diversos países comunitarios, presentan diferencias notables y no satisfacían suficientemente a todos para la aceptación unánime de algunas de ellas como “norma armonizada”

Además, se implantó el criterio novedoso de la “condición final de uso” para los materiales sujetos a reacción al fuego, de modo que se debía evaluar no solo un material, sino en una(s) determinada(s) forma(s) de instalación. De este modo, la evaluación podría dar resultados diferentes y determinar con mayor seguridad, las aplicaciones específicas de un material.

Todo ello ha conducido a un nuevo sistema de clasificación y de ensayos, mucho más preciso y tecnificado que el existente hasta ahora en nuestro país. Así se han podido resolver las carencias de información respecto a temas tan importantes como el poder calorífico, la producción de humos y el goteo de partículas.

a) Los «escenarios de fuego» y sus ensayos:

Se han establecido tres situaciones típicas de incendios reales(escenarios), aplicandose para cada una de ellas unos métodos de ensayo representativos.

Además, hay que considerar dos posicionamientos generales de los materiales: productos para revestimientos de paredes y techos y productos para revestimientos de suelos. Para los materiales aislantes, solo tienen relevancia las posiciones de paredes y techos, por lo que, en adelante, solo nos referiremos a éstas.

En orden creciente, los escenarios son:

a-1) *Ataque limitado del fuego (inicio del incendio):*

Simula un ataque de llama de pequeño tamaño, sobre los bordes de un material, donde el interés será conocer la velocidad de propagación y la caída o no de gotas.

El método de ensayo corresponde a la norma UNE EN ISO 11925-2:2002, “Ensayo del pequeño quemador” (Ver figura 1)

Los resultados se expresan en el espacio recorrido por las llamas durante su propagación durante un tiempo determinado. Se denomina Fs (Flame spread), con unidades mm.

a-2) *Elemento único que arde en la habitación:*

Es una fase más avanzada de incendio, donde el material (generalmente en una esquina del local), y colocado en su situación final de montaje, es atacado por el fuego. Se evalúan tanto la extensión del fuego como el desprendimiento de calor, los humos y la caída de gotas.

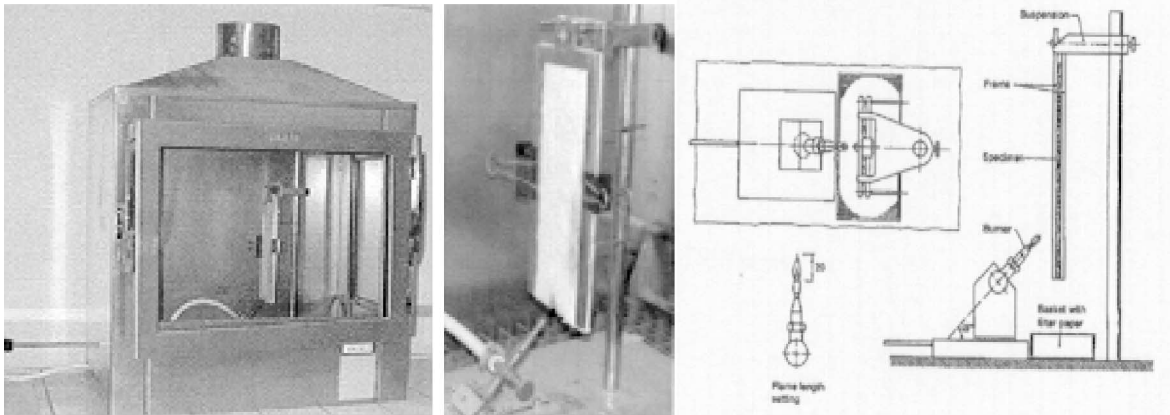


Fig. 1.

El método de ensayo en este caso, ha sido el más controvertido y difícil de acordar.

Inicialmente, y así se mantiene como escenario de referencia, está el ensayo a escala real, correspondiente a la norma ISO 9750, "Room corner test"

Necesidades prácticas llevaron a la creación de un ensayo representativo también de esquina, pero a escala media-pequeña y fuego normalizado de 40 kW, que corresponde a la norma UNE EN 13823:2002, "Single burning item". (Ver figura 2).

Los aspectos a evaluar son:

- El calor desprendido por la muestra en el ensayo, en relación al tiempo. Se denomina FIGRA (Fire Growth Rate) y sus unidades son W/s
- La opacidad de los humos producidos en relación al tiempo. Se denomina SMOGRA (Smoke Growth Rate) y sus unidades son m^2/s^2 .
- La caída de gotas o material ardiendo.

Otras características complementarias a determinar son:

- Emisión total de calor en 600 s. Se denomina THR_{600s} (Total Heat Release), con unidades MJ
- Producción total de humos en 600 s. Se denomina TSP_{600s} (Total Smoke Production), con unidades m^3 .
- Propagación lateral de las llamas. Se denomina LFS (Lateral Flame Spread), no tiene unidades definidas.

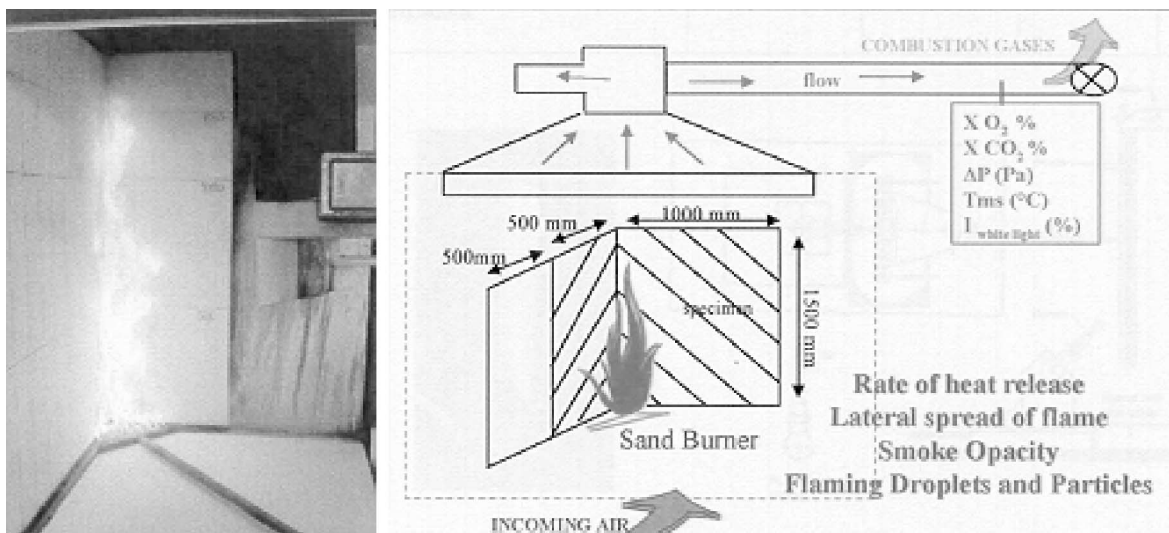


Fig. 2.

a-3) *Fuego totalmente desarrollado:*

La situación es de incendio desarrollado, y el material se valora por su eventual aporte de energía al incendio, con independencia de su colocación.

Los métodos de ensayo en este caso son dos:

a-3-1) Norma UNE EN ISO 1182:2002, “Horno de incombustibilidad” (Ver figura 3). Se evalúa, para una muestra sometida a 750 °C, si emite llamas, pérdida de masa y si aporta energía a esa temperatura.

Las características a determinar son:

- Incremento de temperatura en horno, ΔT , con unidades °C.
- Pérdida de masa de la muestra en el ensayo, Δm , en
- Tiempo de duración de llama sostenida, t_f , con unidades en s

Nota: Este método de ensayo es conocido en España, ya que es el método de ensayo para la determinación del M0

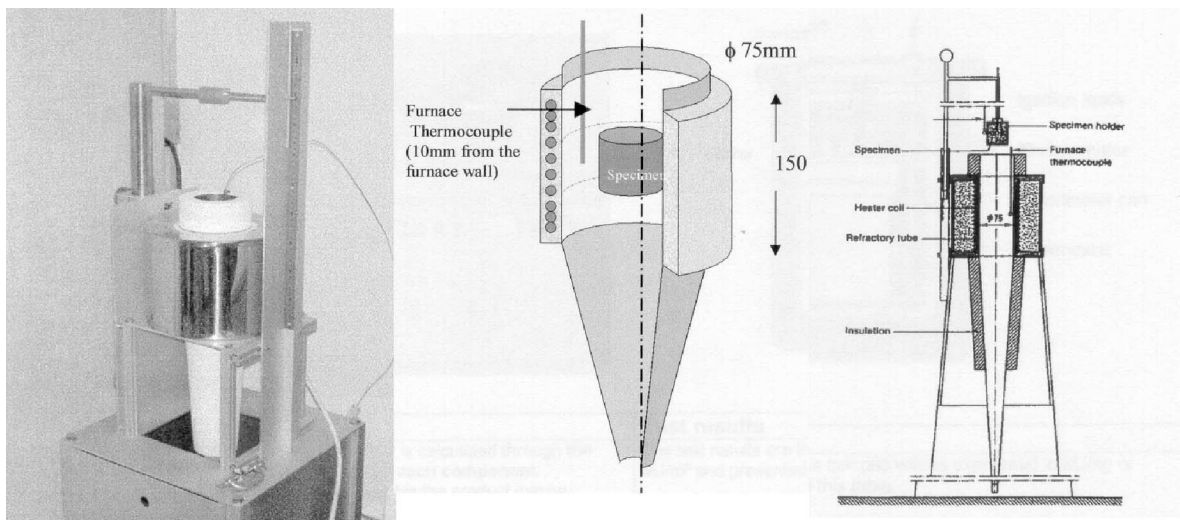


Fig. 3.

a-3-2) Norma UNE EN ISO 1716:2002, “Bomba calorimétrica” (Ver figura 4). Se determina la cantidad de energía calorífica que puede aportar el material en caso de incendio.

Las características a determinar son:

- Poder Calorífico Superior del material o de sus componentes. Se denomina PCS, referido a la unidad de peso, MJ/kg, ó a la unidad de superficie, MJ/m².

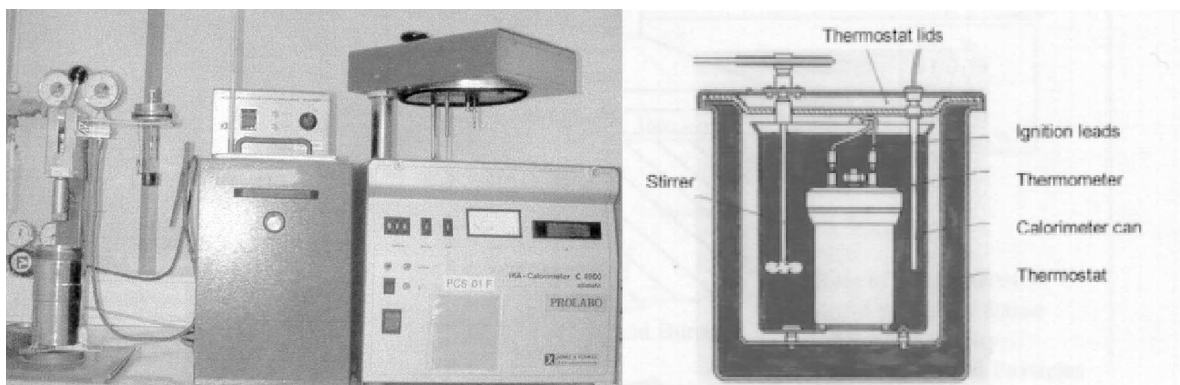


Fig. 4.

3) NIVELES DE CLASIFICACIÓN: LAS EUROCLASES.

Teniendo en cuenta los conceptos anteriores, se han establecido las euroclases en la norma UNE EN 13501-1:2002. En el cuadro adjunto se resume esta clasificación.

Algunos términos sobre los materiales y sus componentes, requieren unas definiciones complementarias:

- Material: Una única sustancia básica o una mezcla de sustancias uniformemente dispersas, como metal, piedra, madera, hormigón, lana mineral con aglutinante de dispersión uniforme, polímeros.

- Producto homogéneo: Producto que consta de un material único, con densidad y composición uniformes.
- Producto no homogéneo: Producto que no satisface los requisitos de producto homogéneo. Se trata de un producto con dos o más componentes, sustanciales y/o no sustanciales.
- Componente sustancial: Un material que constituye parte significativa de un producto no homogéneo. Una capa con masa $\geq 1 \text{ kg/m}^2$ ó espesor $\geq 1 \text{ mm}$, se considera componente sustancial.
- Componente no sustancial: Un material que no constituye parte significativa de un producto no homogéneo. Una capa con masa $< 1 \text{ kg/m}^2$ ó espesor $< 1 \text{ mm}$, se considera componente no sustancial. Dos capas adyacentes no sustanciales, son componentes no sustanciales. Se debe hacer la siguiente distinción:
 - Componente no sustancial externo: Componente no sustancial no recubierto en una de sus caras por un componente sustancia.
 - Componente no sustancial interno: Componente no sustancial recubierto en ambas caras por, al menos, un componente sustancial.

a-4) COMENTARIOS SOBRE LAS EUROCLASES:

En primer lugar debe resaltarse que es una clasificación mucho más completa y precisa para conocer el comportamiento de un material, que la clasificación española actual.

Se pasa de un rudimentaria y simplista clasificación de 5 clases únicas (M0, M1...M4), a otra con 7 clases principales, que se complementa en algunas de ellas con una adición de hasta 3 para niveles de humos (si) y 3 para caída de gotas o partículas incandescentes (di)

En resumen: pasamos de 5 posibilidades de clasificación, hasta la nueva que tiene 40 posibilidades.

Añadir que todo producto que alcance una clasificación, es capaz de cumplir las exigencias de todas las inferiores.

Otro aspecto interesante es una evaluación cualitativa de lo que significa cada euroclase:

- Clase A1: Será la clasificación para materiales que no pueden contribuir en ningún caso al incendio, incluso al plenamente desarrollado. En la práctica correspondería a los productos M0 actual.
- Clase A2: Será para materiales que no puedan aportar, de modo significativo, una carga al fuego ni contribuir a su desarrollo: La limitación de 3 MJ/kg de carga al fuego, es equivalente a menos del 6% del mismo peso en petróleo.
 Por otra parte, se verificará que los productos satisfacen los requerimientos de la clase B respecto al ensayo SBI, lo que es fácil de cumplir por su bajo PCS indicado antes. A esta clasificación ya le afecta las complementarias de producción de humo y partículas ó gotas incandescentes.
 No es posible comparar esta clasificación con la actual, aunque si es factible decir que corresponderá a productos de tipo incombustible, recubiertos con revestimientos delgados de baja combustibilidad, con clasificación M1 actual.
- Clases B, C y D: En general, serán productos combustibles que se ensayarán en el SBI. La clase que alcancen dependerá de los límites cada vez menos exigente de dicho ensayo. La mejor clasificación, B, corresponderá a los productos colocados bajo la protección de elementos de obra u otro tipo incombustibles.
 Les afectarán muy especialmente las complementarias de producción de humo y partículas ó gotas incandescentes.
 No pueden compararse con ninguna de las clases de la actual clasificación.
- Clase E: Productos combustibles, normalmente ensayados desnudos ó con protección débil. Solo se les pide resistir un pequeño ataque de llama, durante un corto periodo de tiempo. A esta clasificación le afecta solo la complementaria de caída de partículas ó gotas incandescentes.
- Clase F: Productos que no pueden satisfacer ninguna de las anteriores.

CLASES DE REACCIÓN AL FUEGO DE LOS PRODUCTOS DE LA CONSTRUCCIÓN, EXCLUIDOS LOS SUELOS

Clase	Método(s) de ensayo	Criterios de clasificación	Clasificación adicional
A1	UNE EN ISO 1182 Y	$\Delta T \leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta m \leq 50\%$ $t_f = 0\text{ s}$ (sin llama sostenida)	—
	UNE EN ISO 1716	PCS $\leq 2,0\text{ MJ/kg}$ (1) PCS $\leq 2,0\text{ MJ/kg}$ (2) (2a) PCS $\leq 1,4\text{ MJ/kg}$ (3) PCS $\leq 2,0\text{ MJ/kg}$ (4)	—
A2	UNE EN ISO 1182 Ó	$\Delta T \leq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\Delta m \leq 50\%$ $t_f = 20\text{ s}$	—
	UNE EN ISO 1716 Y	PCS $\leq 3,0\text{ MJ/kg}$ (1) PCS $\leq 4,0\text{ MJ/m}^2$ (2) PCS $\leq 4\text{ MJ/m}^2$ (3) PCS $\leq 3,0\text{ MJ/kg}$ (4)	—
	UNE EN 13823 (SBI)	Figra $\leq 120\text{ W/s}$ LFS < margen de la muestra THR _{600s} $\leq 7,5\text{ MJ}$	Producción de humo(5) y caída de gotas o partículas inflamadas (6)
B	UNE EN 13823 (SBI)	Figra $\leq 120\text{ W/s}$ LFS < margen de la muestra THR _{600s} $\leq 7,5\text{ MJ}$	Producción de humo(5) y caída de gotas o partículas inflamadas (6)
	UNE EN ISO 11925-2 (8) Exposición = 30 s	Fs $\leq 150\text{ mm}$ en 50 s	
	UNE EN 13823 (SBI)	Figra $\leq 250\text{ W/s}$ LFS < margen de la muestra THR _{600s} $\leq 15\text{ MJ}$	Producción de humo(5) y caída de gotas o partículas inflamadas (6)
C	UNE EN ISO 11925-2 (8) Exposición = 30 s	Fs $\leq 150\text{ mm}$ en 60 s	
	UNE EN 13823 (SBI)	Figra $\leq 750\text{ W/s}$	Producción de humo(5) y caída de gotas o partículas inflamadas (6)
D	UNE EN ISO 11925-2 (8) Exposición = 30 s	Figra $\leq 150\text{ mm}$ en 60 s	
E	UNE EN ISO 11925-2 (8) Exposición = 30 s	Fs $\leq 150\text{ mm}$ en 60 s	Caída de gotas o partículas inflamadas (7)
F	Sin determinación de propiedades		

- (1) Para productos Homogéneos y componentes esenciales de productos homogéneos.
 (2) Para cualquier componente no esencial de productos no homogéneos
 (2^a) Alternativamente, para cualquier componente no esencial externo, con PCS $\leq 2,0\text{ MJ/m}^2$, probando que cumple también con UNE EN 13823: FIGRA $\leq 20\text{ W/s}$; LFS $\leq$ margen de la muestra; THR_{600s} $\leq 4,0\text{ MJ}$; s1 y d0.
 (3) Para cualquier componente no esencial interno de productos no homogéneos
 (4) Para el producto en su conjunto
 (5) Será: s1, si se tiene SMOGRA $\leq 30\text{ m}^2/\text{s}^2$ y TPS_{600s} $\leq 50\text{ m}^2/\text{s}^2$; s2, si se tiene SMOGRA $\leq 180\text{ m}^2/\text{s}^2$ y TPS_{600s} $\leq 200\text{ m}^2/\text{s}^2$; s3, si no es s1 ó s2.
 (6) Será: d0, si no hay caída de gotas ni partículas inflamadas en ensayo SBI en 600s; d1, si no hay caída de gotas ni partículas inflamadas durante más de 10 s en ensayo SBI en 600s; d2, si no es d1 ó d2. La ignición del papel en UNE EN ISO 11925-2, determina clasificación d2.
 (7) Éxito: ausencia de ignición en papel, sin clasificación; Fallo: ignición de papel, d2.
 (8) En condiciones de ataque de llama superficial y, si se adecua a las aplicaciones de uso final del producto, de ataque de llama lateral.

05.02.02. RESISTENCIA AL FUEGO DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

Dos formas diferenciadas se consideran: la capacidad portante de los elementos estructurales para impedir el colapso del edificio en caso de incendio y la capacidad de los elementos de cierre y compartimentación (fachadas, divisorios, forjados, etc.), para confinar el incendio e impedir la ignición y propagación de llamas a espacios contiguos.

Para ambos casos, la característica es el tiempo: cuanto mayor sea el tiempo disponible, será mejor para evacuar personas o luchar contra el incendio.

05.02.02.01. Estabilidad al fuego de las estructuras metálicas

Es la capacidad de un elemento constructivo de mantener durante un tiempo determinado la estabilidad o capacidad portante de uso, determinada en un ensayo normalizado de acuerdo a la norma UNE 23093.

La estabilidad al fuego (EF) de los elementos estructurales, depende en buena medida del material de estructura, en cuanto a la reducción de la resistencia mecánica de éste con la temperatura. El acero alcanza a 538 °C la llamada «temperatura crítica», a la cual no le es posible soportar la carga del diseño.

El acero es muy buen conductor del calor, lo que representan un aspecto negativo en cuanto a la resistencia al fuego, ya que alcanza la «temperatura crítica» en pocos minutos.

El hormigón soporta mejor la acción del fuego por ser un material peor conductor del calor y la resistencia estructural sólo depende del tiempo en que las armaduras de acero alcancen la temperatura crítica.

La utilización de lanas minerales como materiales envolventes de los elementos estructurales, permite aumentar notablemente los tiempos de EF, debido al poder aislante térmico y a soportar altas temperaturas.

Las lanas de roca que deben utilizarse para esta aplicación deben tener un alto punto de fusión (por encima de 1.200 °C), con una densidad muy elevada y una composición especial potenciada en óxidos metálicos.

Dentro de la gama ROCLAINE, el producto adecuado es el TOP-HEAT.

Para la determinación general de protecciones de estructuras de acero, puede utilizarse un método de cálculo técnico-experimental, de acuerdo con la norma UNE 23820 Exp.

El método permite establecer unas correlaciones válidas entre los factores:

- Estabilidad al fuego (EF) de un perfil de acero contorneado por un material aislante de protección.
- Masividad o factor de forma del perfil de acero.
- Espesor del material aislante de protección.

El concepto «masividad» o «factor de forma» del perfil se define como la relación entre el área exterior del perfil con protección contorneada por unidad de longitud y el volumen de acero contenido en dicha área por unidad de longitud. Las dimensiones serán m²/m³, es decir m⁻¹.

En la práctica, para perfiles continuos de la misma sección recta equivale a:

$$\text{Masividad} = \frac{\text{Perímetro de la sección recta protegida del perfil}}{\text{Área de la sección recta del perfil}} \quad \text{m}^{-1}$$

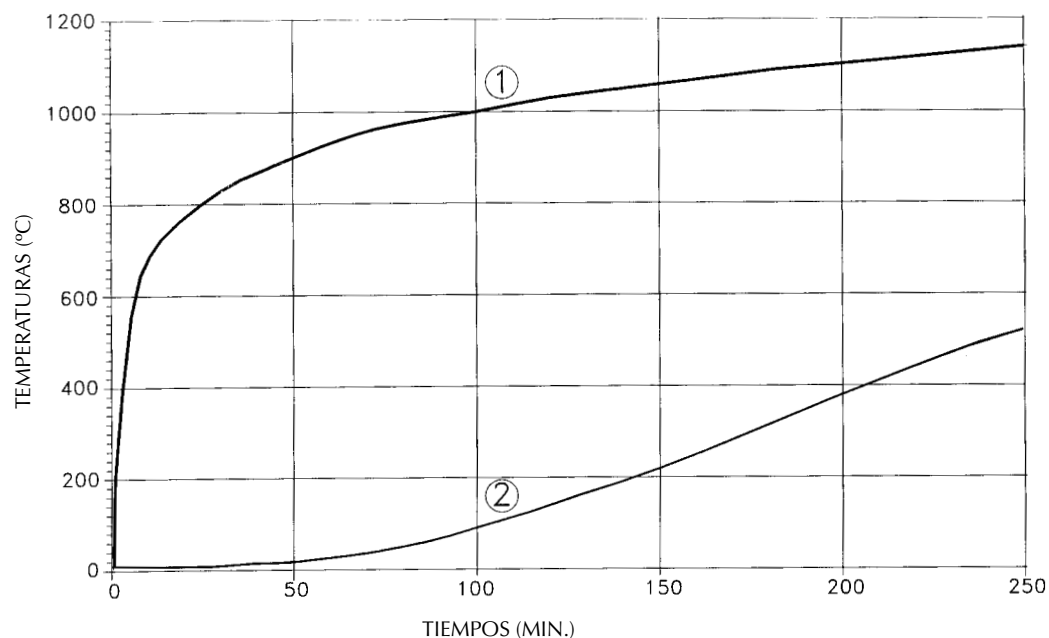
La norma UNE 23820 Exp. citada establece un número de ensayos determinado para diversos perfiles y protecciones, permitiendo la posterior interpolación de resultados de protección para elementos no ensayados.

Los ensayos de estabilidad al fuego se realizan dentro de hornos homologados y mediante la exposición al fuego de una curva patrón establecida de tiempo-temperatura. Durante el ensayo, se establecen las temperaturas en el alma del perfil ensayado, hasta la temperatura máxima de 500 °C en el alma. El tiempo necesario para alcanzar dicha temperatura será la Estabilidad al Fuego teórica, aunque oficialmente sólo se admite el mayor valor inferior de la escala: EF 15, 30, 60, 90, 120, 180, 240 (p.e: si el ensayo ha alcanzado un tiempo de 167 minutos, el resultado oficial es EF-120).

En la Fig. 1 se determinan las curvas reales de temperatura de horno y de alma de un pilar de acero protegido con TOP-HEAT.

Fig. 1

EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DE UN PILAR METÁLICO PROTEGIDO CON «TOP HEAT»



① CURVA PATRÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA DEL HORNO

② CURVA DE ENSAYO CON REVESTIMIENTO PROTECTOR «TOP-HEAT»

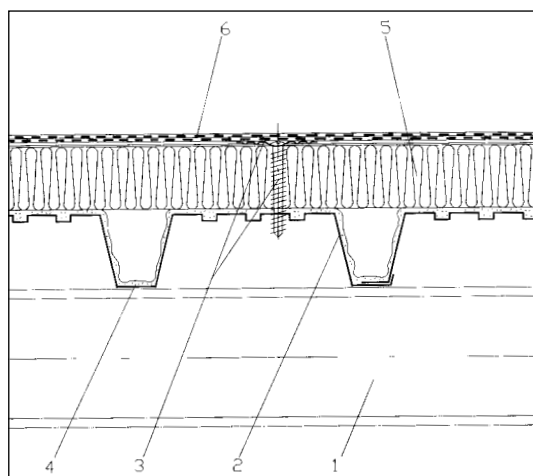
La introducción de aislamientos de lana mineral supone una mejora sustancial.

Consideremos el ejemplo de una cubierta metálica plana (tipo Deck), de una nave industrial. La resistencia al fuego de este tipo de cubiertas, que incorporan un aislamiento de tipo orgánico, no llega a RF-15 en ningún caso.

Si a esta cubierta se le añade un aislante térmico de lana de roca de tipo PANEL CUBIERTA de 40 mm de espesor solamente, se alcanza hasta 42 minutos de resistencia al fuego en el ensayo, quedando clasificado RF-30. (Fig. 2).

Fig. 2

RESISTENCIA AL FUEGO DE UNA CUBIERTA DE CHAPA DE ACERO (TIPO DECK)
AISLAMIENTO DE CUBIERTAS PLANAS NO TRANSITABLES «DECK»



1. Armadura soporte
2. Chapa perfilada para cubiertas
3. Fijación mecánica (tornillo autorroscante y arandela metálica nervada)
4. Adhesivo-barrera de vapor
5. Panel de lana de roca «ROCLAINÉ» tipo panel cubierta de espesor 40 mm
6. Impermeabilización

Resistencia al fuego: RF-30

Estable al fuego: EF-60

05.02.02.03. Puertas cortafuegos

Las exigencias de la NBE-CPI-96 señalan la necesidad de disponer de puertas cortafuegos en los accesos o comunicaciones entre el exterior y un sector de incendios, dos sectores de incendios, pasos a zonas de riesgo especial...

Las puertas se construyen básicamente con un sistema de sandwich en el que los elementos exteriores son chapas de acero de bajo espesor y el alma interior de lana de roca o mixtos, lana de roca y cartón yeso.

El espesor del elemento interno es función del grado de resistencia al fuego que se desee. Como ya se ha indicado en apartados anteriores, los mejores resultados se obtienen con lanas de roca de composición especial tipo TOP-HEAT.

Adquieren especial importancia en estos casos las características de los otros elementos que componen el sistema de las puertas (herrajes, marco perimetral, cerraduras, juntas...), ya que deben estudiarse coherentemente con las exigencias solicitadas al sistema.

Las puertas se ensayan de acuerdo con la norma UNE 23802, construyendo en el horno un cierre vertical constituido por la probeta de ensayo. En esta probeta se habrán incluido dos unidades de la puerta a ensayar (una por cada cara), recibidas en un tabique de obra enfoscado por ambas caras, que tenga una resistencia al fuego muy superior a la que desea ensayarse para las puertas.

En la Fig. 3 aparece un croquis de colocación de termopares en un ensayo de puertas cortafuegos.

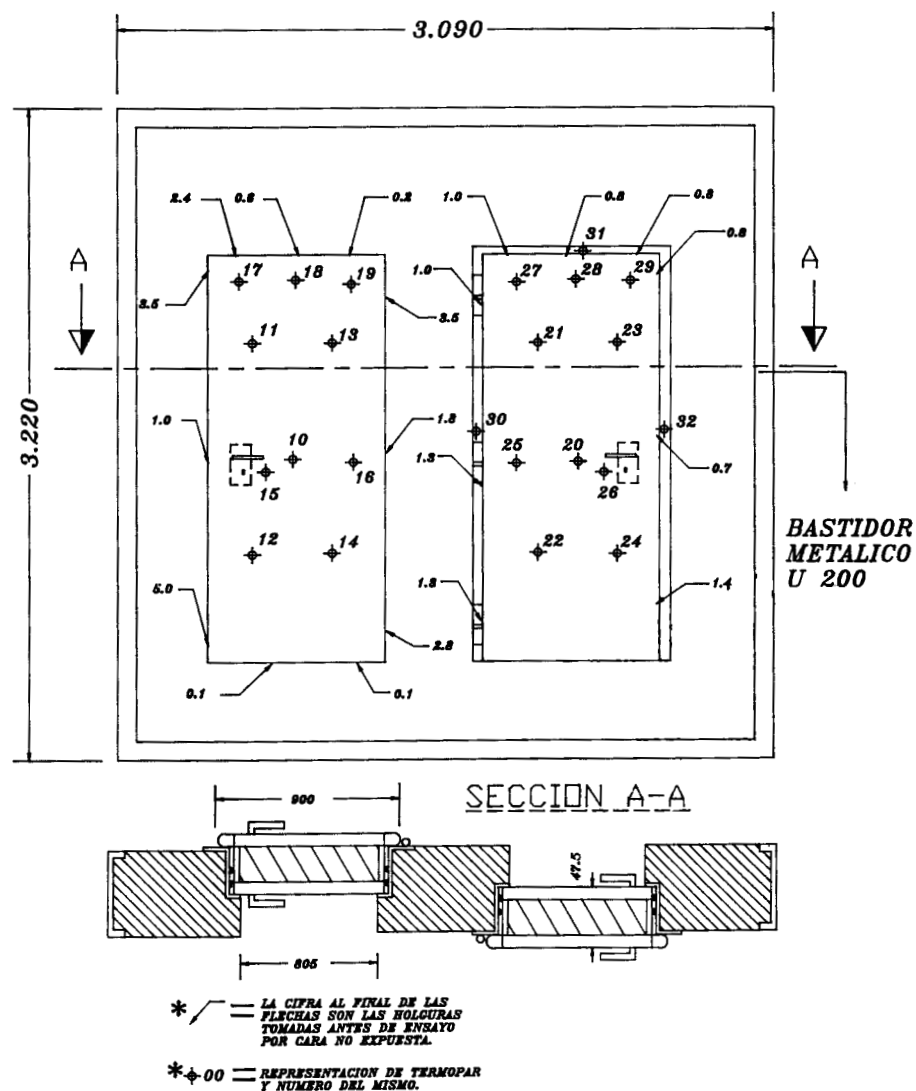
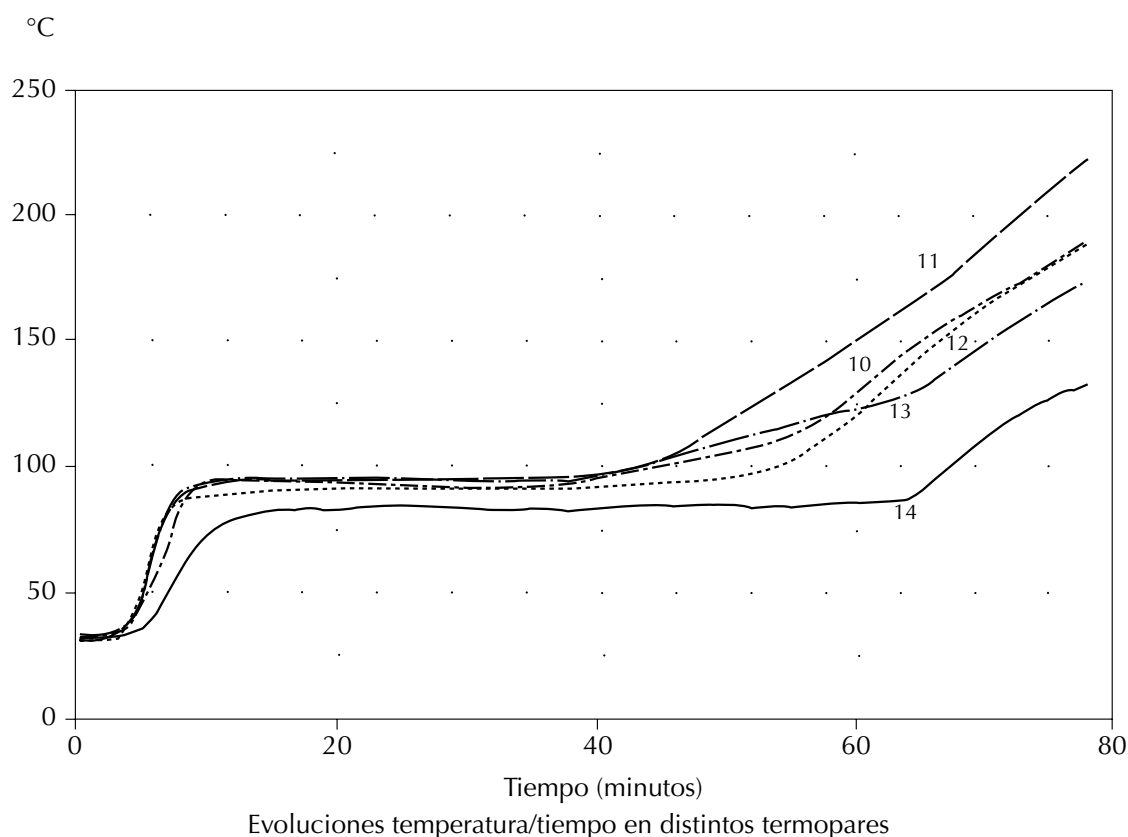


Fig. 3. Croquis de colocación de termopares y medida de holguras.

En la Fig 4., puede verse la evolución de temperaturas en las termopares de la cara no expuesta, correspondiente al ensayo de una puerta cortafuegos ensayada para RF-60. El alma de la puerta lo constituye lana de roca ROCLAINÉ, tipo TOP-HEAT de 45 mm.

Fig. 4

PUERTAS CORTAFUEGOS. GRAFICO DE EVOLUCION DE TEMPERATURAS EN LA CARA NO EXPUESTA



05.02.02.04. Paneles sandwich

Una de las soluciones más novedosas y con mayor desarrollo en los últimos tiempos, es la utilización de sandwich aislantes resistentes al fuego, para todo tipo de soluciones en la edificación.

El producto es simple en su concepción: dos chapas de acero perfiladas en frío, de espesor 0,5 o 0,6 mm, y un alma interior de lana mineral de alta densidad.

Las exigencias de seguridad frente incendios para cerramientos y divisorios según el uso, establecidas en la NBE-CPI-96, se modificarán e incrementarán en las nuevas exigencias que ya conocen del CTE. Específicamente, para los establecimientos industriales, se ha establecido un reglamento (ver apartado siguiente).

En el cuadro, se presentan soluciones de sandwich con sus características de EF y RF.

Tipo de sandwich		Certificación al fuego	
Denominación	Composición	Estabilidad al fuego (EF)	Resistencia al fuego (RF)
PANEL CUBIERTA	Chapa + 50 mm Lana roca + chapa	EF-120	RF-120
PANEL FACHADA	Chapa + 50 mm Lana roca + chapa	EF-60	RF-60
	Chapa + 100 mm Lana roca + chapa	EF-120	RF-120
PANEL CUBIERTA	Chapa + 80 mm Lana roca + chapa	EF-120	RF-60
	Chapa + 100 mm Lana roca + chapa	EF-120	RF-120

05.02.03. LA SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN LOS ESTABLECIMIENTOS INDUSTRIALES

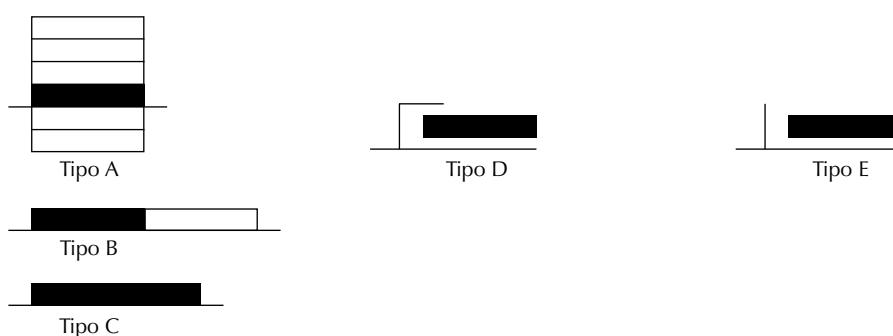
Los establecimientos industriales, no estaban comprendidos en ámbito de aplicación de la NBE-CPI-96, lo que suponía un vacío legislativo de tipo general, teniendo que recurrirse a legislaciones específicas para grupos de actividad industrial.

Por último, el R.D 786/2001 de 6 de Julio, aprobó el Reglamento de Seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.

1. Entre los aspectos más interesantes del mismo, está la caracterización de los establecimientos industriales (Artículo 12; Apéndice1), mediante:

1.1. Su configuración y ubicación con relación al entorno

Se establecen cinco tipologías, según el esquema adjunto:



Tipo A: Establecimientos industriales ubicados en un edificio que ocupa parcialmente un edificio que tiene, además, otros establecimientos, ya sean estos de uso industrial o bien de otros usos.

Tipo B: Establecimientos industriales ubicados en un edificio que está adosado a otro u otros edificios, ya sean estos de uso industrial o bien de otros usos.

Tipo C: Establecimientos industriales ubicados en un edificio que ocupa totalmente un edificio, o varios, en su caso, que está a una distancia mayor de 3 m. Del edificio más próximo de otros establecimientos.

Tipo D: Establecimientos industriales que desarrollan su actividad en espacios abiertos que no constituyen un edificio, que pueden tener cubierto más del 50% de la superficie ocupada.

Tipo E: Establecimientos industriales que desarrollan su actividad en espacios abiertos que no constituyen un edificio, que pueden tener cubierto hasta el 50% de la superficie ocupada.

1.2. Su nivel de riesgo intrínseco.

Para cada sector de incendios, se calcula la densidad de carga de fuego (Mcal/m² ó Mj/m²), ponderada y corregida para cada sector de incendios, en función de los grados de peligrosidad (combustibilidad y activación).

Del conjunto de todos los sectores de incendios, formando un edificio ó establecimiento industrial, se obtiene el riesgo intrínseco global.

Complementariamente se ofrece una tabla muy completa de valores de densidad de carga de fuego media de diversos procesos industriales, de almacenamiento de productos y riesgo de activación asociado. También se encuentran valores de poder calorífico (q) de diversas sustancias.

La tabla adjunta determina el nivel de riesgo intrínseco:

Nivel de riesgo intrínseco		Densidad de carga a fuego ponderada y corregida	
		Mcal/m ²	Mj/m ²
BAJO	1	Qs < 100	Qs < 425
	2	100 < Qs < 200	425 < Qs < 850
MEDIO	3	200 < Qs < 300	850 < Qs < 1275
	4	300 < Qs < 400	1275 < Qs < 1700
	5	400 < Qs < 800	1700 < Qs < 3400
ALTO	6	800 < Qs < 1600	3400 < Qs < 6800
	7	1600 < Qs < 3200	6800 < Qs < 13600
	8	3200 < Qs	13600 < Qs

2. En el Apéndice 2, a partir de estas características se definen las exigencias para:

2.1. Materiales:

Los productos de revestimiento de paredes, techos y suelos, deben ser de calas M2 o más favorable.

Los incluidos en paredes, pero de peor clasificación, deben tener un(as) capa(s) de revestimiento de RF-30 como mínimo.

Los productos en el interior de falsos techos y de suelos elevados, utilizados para el aislamiento térmico y para el acondicionamiento acústico, los que constituyan o revistan conductos de aire acondicionadodeben ser de clase M1 o más favorable.

2. La estabilidad al fuego de las estructuras portantes será:

NIVEL DE RIESGO INTRINSECO	TIPO A		TIPO B		TIPO C	
	PLANTA SÓTANO	SOBRE RASANTE	PLANTA SÓTANO	SOBRE RASANTE	PLANTA SÓTANO	SOBRE RASANTE
BAJO	EF-120	EF-90	EF-90	EF-60	EF-60	EF-30
MEDIO	NO ADMITIDO	EF-120	EF-120	EF-90	EF-90	EF-60
ALTO	NO ADMITIDO	NO ADMITIDO	EF-180	EF-120	EF-120	EF-90

Existen algunas reducciones en las exigencias para las plantas sobre rasante, cuando las cubiertas son de estructura ligera (no transitables, y con carga permanente inferior a 100 kg/m²), o existen instalaciones fijas de protección de las instalaciones con rociadores de agua.

3. La resistencia al fuego de los elementos constructivos, será:

— Si es delimitadora de incendios y portante, no será inferior a la exigida para la EF de la tabla en ese sector de incendios.

- Toda medianería o muro colindante con otro establecimiento, será como mínimo
- Riesgo Bajo.....RF-120
- Riesgo Medio....RF-180
- Riesgo Alto..... RF-240

— Existe además, una serie de consideraciones específicas para puertas cortafuegos, compuertas, etc.

06.02. MÉTODOS DE ENSAYO Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

El proceso anterior dio lugar a unas metodologías de ensayo químicos, que se complementaban en casos más exigentes con ensayos físicos.

a) MÉTODO QUÍMICO

Está basado en el posicionamiento de un producto dentro del gráfico de Karnes.

Está definido en la norma ASTM-C795, donde se establece el gráfico oficial de control y los aspectos que afectan al ensayo y a la determinación de los análisis químicos de los materiales.

A este respecto, y dadas las pequeñas concentraciones de los iones a analizar, es necesario seguir los métodos de ensayo especificados en la norma ASTM-C871 para determinar las concentraciones de Cl^- , F^- , Na^+ y $\text{SiO}_3^{=}$, mediante la lechada de 20 g de material base.

En la Fig. 2 se encuentra el resultado de un análisis típico de una lana de roca ROCLAINÉ.

En la actualidad existe una tendencia a simplificar el método de ensayo, reduciendo el problema de la determinación única del ión Cl^- , fijando la aceptabilidad del material cuando la concentración de este ión es ≤ 6 ppm.

Esta simplificación es totalmente válida pero muy restrictiva respecto a las curvas de Karner, ya que no tiene en cuenta las concentraciones de los elementos pasivantes Na^+ y $\text{SiO}_3^{=}$, los cuales siempre están presentes en las lanas minerales.

b) MÉTODO FÍSICO QUÍMICO

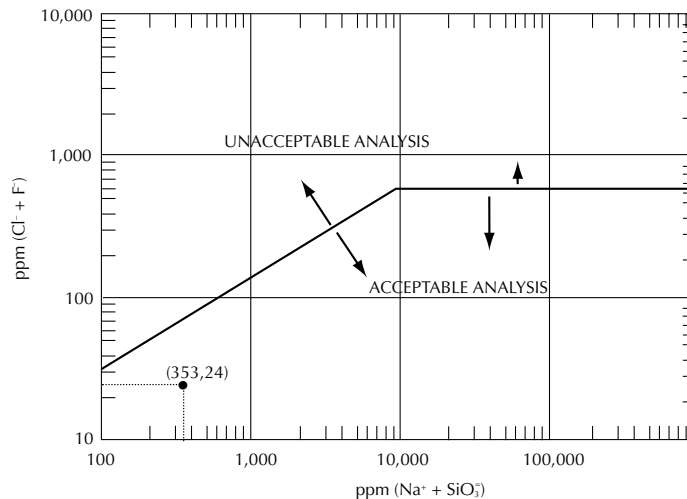
Es el método más exigente, generalmente utilizado sólo en casos especiales, que supone la determinación de no corrosividad de acuerdo a dos formas: la química, anteriormente citada y una determinación física. Se necesitan dos tipos de determinaciones.

- Un análisis físico del posible ataque de un aislante sobre una probeta de acero austenítico, de acuerdo con lo especificado en la norma ASTM-C692.

- Un análisis químico de posicionamiento en la curva de Karner, de acuerdo a lo especificado en las normas ASTM-C795 y ASTM-C871.

Este método es el más completo posible, se exige para el cumplimiento de la REGULATORY GUIDE 1.36, de la UI. ATOMIC ENERGY COMMISSION.

Fig. 2
EJEMPLO DE ANÁLISIS



Cliente: CESA

Producto: Manta Spintex 342G-125

ELEMENTOS:	SiO ₃	(ppm)	209
	F ⁻	(ppm)	20
	Na ⁺	(ppm)	144
	Cl ⁻	(ppm)	4

Lanas minerales aislantes no corrosivas para los aceros

06.01. INTRODUCCIÓN

La corrosión de materiales metálicos (acero, aluminio, cobre...) se produce fundamentalmente por los pares galvánicos en las soldaduras y uniones, además de la acción progresiva de los agentes atmosféricos por sí mismos o bien potenciando como catalizadores otros procesos químicos de corrosión.

Las lanas minerales aislantes son materiales inertes: de pH ligeramente básico (9 ó 10) sólo atacados por el ácido fluorhídrico.

Sin embargo, las lanas minerales pueden producir corrosión en los aceros, a causa del ión cloro (Cl^-), cuando éste se presenta libre en la superficie de las fibras de las lanas (es importante precisar que la acción corrosiva sólo es debida al Cl^- libre y no al contenido en la masa del material, que está combinado).

En los años cuarenta, la US. ATOMIC ENERGY COMMISSION realizó unos estudios con expertos (Dana y Karnes), para analizar dos mecanismos de este tipo de corrosiones, llegando a determinar:

- Existe una acción corrosiva debida a la acción de los iones Cl^- y F^- libres en la superficie de las lanas, ya que estos iones pueden combinarse con la humedad ambiental. La acción corrosiva es tanto mayor cuanto más altas son las concentraciones de los mismos.
- La acción corrosiva se reduce, llegando a desaparecer totalmente (pasividad del material), mediante la presencia de controladores determinados de iones Na^+ y SiO_3^{2-} , libres en la superficie del material y por tanto solubles.
- Se estableció una relación que determinaba las cantidades mínimas de elementos pasivantes que eran necesarias, para que una determinada concentración de iones activos no produjera la acción corrosiva. Se determinó un gráfico (Fig. 1), en el cual las concentraciones de estos iones para una lana mineral determinada, posicionaban un punto en el gráfico donde se establecía si se encontraba en la zona corrosiva o no.

Fig. 1

ACCEPTABILITY OF INSULATION MATERIAL BASED ON THE LEACHABLE ($\text{Cl}^- + \text{F}^-$) AND THE LEACHABLE ($\text{Na}^+ + \text{SiO}_3^-$) ANALYSIS

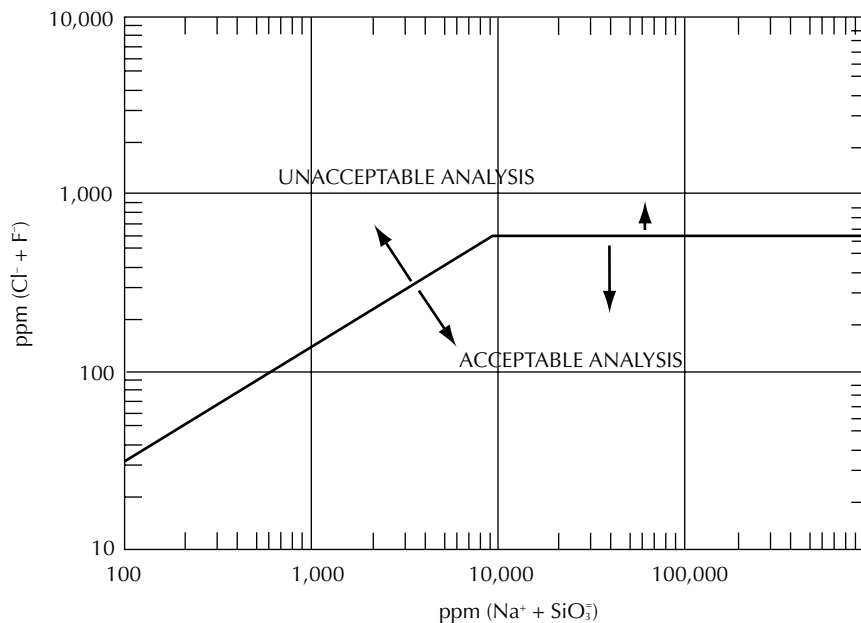


Diagrama de Karnes para la aceptabilidad de un material aislante en función de su composición en iones libres Cl^- y F^- y Na^+ y SiO_3^-

06.03. RECOMENDACIONES PARA LA MANIPULACIÓN Y USO DE LAS LANAS MINERALES

Los productos ISOVER y ROCLAINÉ disponen de los certificados de análisis que determinan la calidad de «NO CORROSIVOS», por lo que pueden utilizarse sin riesgo en el aislamiento industrial.

No obstante, por el carácter externo de los iones que se certifican, estos valores corresponden a producto almacenado inmediatamente después de su fabricación, no manipulado y perfectamente embalado bajo bolsas o film retráctil de Polietileno.

El material, desde la salida de fábrica y hasta su posicionamiento en obra, puede sufrir contaminaciones de origen externo, debido a la acción de los agentes atmosféricos (viento, humedad ambiente elevada, lluvia...), especialmente si se encuentra en terrenos salinos o próximos al mar. Esta contaminación externa puede suponer un aumento elevado en las concentraciones de los iones activos ($\text{Cl}^- + \text{F}^-$), reposicionando el material en la zona no aceptable de la curva de Karnes.

Para mantener las cualidades del producto aislante tal como se encontraban a la salida de la fábrica, se requieren unas mínimas precauciones en la manipulación y transporte del producto:

- Mantener el producto siempre dentro del embalaje hasta el momento de su aplicación.
- Manipular el embalaje con cuidado tanto en la carga como en la descarga del transporte, así como en su almacenamiento, evitando la rotura de los embalajes.
- Almacenar siempre sobre suelos limpios y secos, protegido de las inclemencias atmosféricas.
- Realizar una imprimación de silicato sódico en las superficies a aislar, reforzando dicha aplicación en las zonas más expuestas (bridas, conexiones...). Proteger el aislamiento colocado lo más rápidamente posible, especialmente en instalaciones expuestas o exteriores.
- Usar siempre guantes en la manipulación del material.

ENSAYOS DE CORROSIÓN			
PRODUCTO	NORMA	LABORATORIO	RESULTADO
Coquilla Moldeada Roclaine	ASTM-C-795 y C-781	INASMET	No corrosivo
Coquilla Roclaine	ASTM-C-795 y C-781	INASMET	No corrosivo
Primitivo Coquilla Isover Alta Temp.	Regulatory Guide 1:36	INASMET	No corrosivo
Manta 342-G	Regulatory Guide 1:36	INASMET	No corrosivo
Manta 342-GD-125	Regulatory Guide 1:36	INASMET	No corrosivo
Manta Spintex 322-G-70	ASTM-C-795 y C-781	INASMET	No corrosivo
Manta Spintex 322-G-125	ASTM-C-795 y C-781	INASMET	No corrosivo
Manta Spintex 342-G	Regulatory Guide 1:36	INASMET	No corrosivo
Manta Spintex 342-G-100	ASTM-C-795 y C-781	INASMET	No corrosivo
Manta Spintex 342-G-110	ASTM-C-795 y C-781	INASMET	No corrosivo
Manta Spintex 623-70	ASTM-C-795 y C-781	INASMET	No corrosivo
Manta Spintex 623-80	ASTM-C-795 y C-781	INASMET	No corrosivo
Manta Spintex 643-100	ASTM-C-795 y C-781	INASMET	No corrosivo
Roclaine BX Spintex 643	Regulatory Guide 1:36	INASMET	No corrosivo
Roclaine Manta 342-G-125	Regulatory Guide 1:36	INASMET	No corrosivo
Roclaine Spintex HP-353	Regulatory Guide 1:36	INASMET	No corrosivo
Telisol	Regulatory Guide 1:36	INASMET	No corrosivo
Therminap 322-550	ASTM-C-795 y C-781	INASMET	No corrosivo
Therminap 342-650	ASTM-C-795 y C-781	INASMET	No corrosivo

Climatización y conductos de aire acondicionado

1. INTRODUCCIÓN

Las instalaciones de climatización tienen como misión procurar el bienestar de los ocupantes de los edificios, cumplimentando los requisitos para su seguridad y con el objetivo de un uso racional de la energía.

Las condiciones interiores de diseño deberán estar comprendidas entre los siguientes límites generales:

Estación	Temperatura operativa °C	Velocidad media del aire m/s	Humedad relativa %
Verano	23 a 25	0,18 a 0,24	40 a 60
Invierno	20 a 23	0,15 a 0,20	40 a 60

Fuente: RITE.

Las instalaciones contemplarán, también, una renovación de aire adecuada al número de personas y la actividad que realizan, sin olvidar, las características interiores del local y de los materiales que lo componen.

El proyectista seleccionará el tipo de instalación de aire acondicionado en función de determinados criterios como pueden ser:

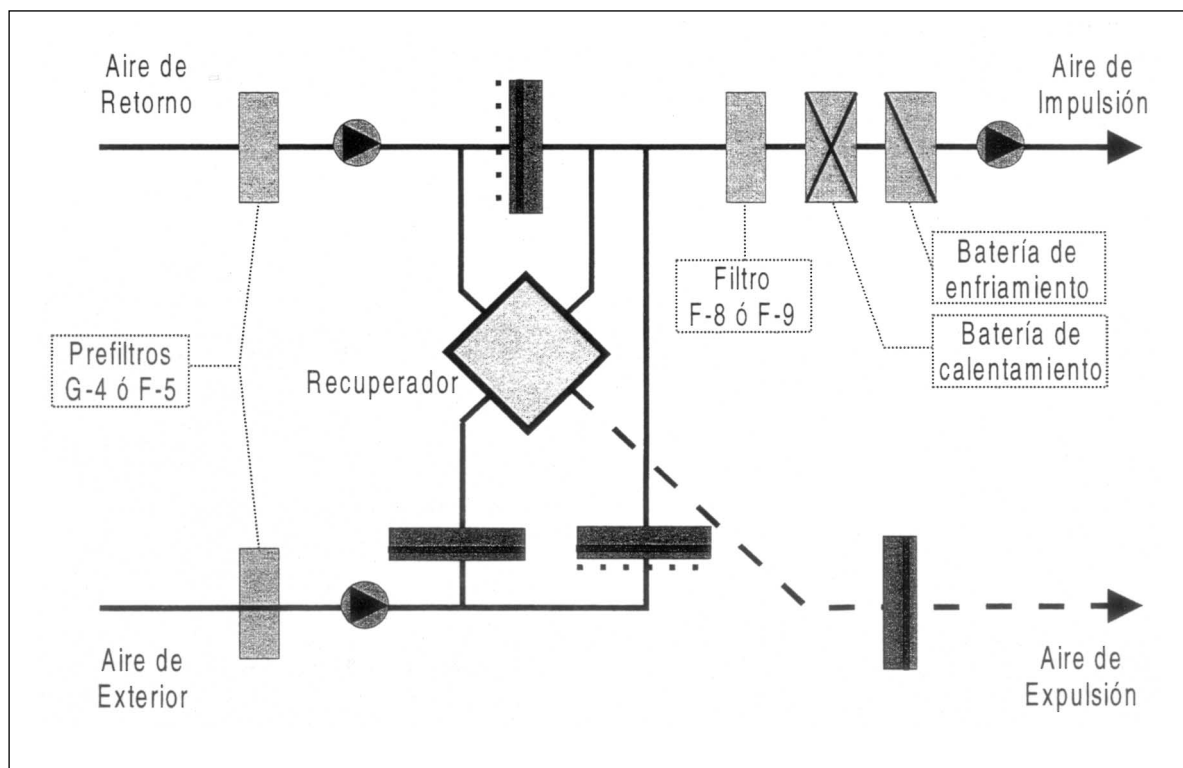
- **Características del área a acondicionar y la actividad que se va a desarrollar en la misma.** Por ejemplo, para aquellos locales con una ocupación muy variable deben estudiarse los dispositivos de variación del caudal de aire exterior.
- **Coste de instalación y de funcionamiento.** La selección de los equipos debe basarse en los rendimientos energéticos. Por otro lado, la Directiva 93/76/CEE relativa a las emisiones de CO₂ indica que los estados miembros de la Unión Europea establecerán y aplicarán programas que permitan a los ocupantes de los edificios regular su propio consumo de energía y de adecuar la facturación de los gastos en función del mismo.

- **Nivel de control de los diferentes parámetros del aire.** Además de la temperatura y la humedad, deben evaluarse parámetros como el CO_2 , excelente indicador de la contaminación del aire originada por los ocupantes.
- **Eficacia en la difusión del aire.** Estudio de la velocidad del aire y de su estratificación, tanto para el ciclo de refrigeración como para el de calefacción.
- **Mantenimiento de la instalación.** El RITE establece la obligatoriedad del mantenimiento para todas aquellas instalaciones que superan los 70 kW de potencia instalada, y en su ITE 08 define la periodicidad de las diferentes operaciones de mantenimiento.
- **Nivel de ruido, etc.**

Podemos clasificar los sistemas de acondicionamiento de aire según la forma mediante la cual enfriamos o calentamos el mismo, dentro del local que se pretende acondicionar.

- Expansión directa (equipos de ventana, unidades partidas...).
- Todo agua (fan-coils...).
- Todo aire (unidades de tratamiento de aire).
- Aire-agua (inducción...).

Los sistemas basados en la distribución de aire son los denominados TODO AIRE. En estos sistemas, el conducto actúa como elemento estático de la instalación, a través del cual circula el aire en el interior del edificio, conectando todo el sistema: aspiración del aire exterior, unidades de tratamiento de aire, locales de uso, retorno y evacuación del aire viciado.



(Fuente Comentarios al RITE. Edición IDAE) Esquema de Unidad de Tratamiento de Aire con dispositivo de enfriamiento gratuito y recuperador de calor. Clasificación de filtros según Norma UNE-EN 779.

Los equipos «Todo Aire» aportan, entre otras, las siguientes ventajas:

- Filtración, humectación y deshumectación centralizadas.
- Funcionamiento silencioso: todos los aparatos móviles se encuentran situados en un espacio común y reducido, lo que permite un tratamiento acústico más sencillo. (Los ruidos originados por el flujo de aire en los conductos y transmitidos de un local a otro deben ser estudiados aparte).
- Todo el aire de retorno pasa por la unidad de tratamiento central, por lo que sufre una nueva filtración y corrección de la humedad, redundando en una mayor calidad del aire.

- El aire de renovación es captado por una única toma exterior, lo que permite una mejor ubicación de la misma, de forma que los efectos del viento en fachada tengan una menor incidencia y que se encuentre alejada de zonas de evacuación de aire viciado o torres de enfriamiento.
- Economía de funcionamiento: en estaciones con temperaturas suaves todo el aire impulsado a los locales puede provenir del exterior sin ningún coste adicional, *freecooling*, sin existir retornos y mejorándose notablemente la calidad del aire interior. Si en el invierno, durante gran parte del día, las ganancias de calor en el edificio superasen a las pérdidas a través de su envolvente más las necesarias renovaciones mínimas de aire, sería necesario enfriarlo, pudiendo recurrir al aire exterior. A este respecto el RITE exige, cuando el caudal de aire expulsado por medios mecánicos hacia el exterior sea superior a 3 m³/s y el régimen de funcionamiento sobrepase las 1.000 horas anuales, se instale un aparato de recuperación con una eficiencia mínima del 45%.
- Mantenimiento centralizado: filtros, sistemas de humectación y deshumectación, intercambiadores del calor y aparatos móviles están ubicados en un mismo local.
- Posibilidad de emplear aparatos de control de las condiciones ambientales de cada local, sencillos y económicos.

En el capítulo sobre Calidad del Aire Interior se incidirá en la importancia de introducir aire exterior en los locales como medio de diluir las sustancias contaminantes.

2. TIPOS DE CONDUCTOS

Los conductos de aire son elementos estáticos de la instalación, a través de los cuales circula el aire en el interior del edificio, conectando todo el sistema: aspiración, unidades de tratamiento de aire, locales de uso, retorno y evacuación del aire viciado.

Aunque existen conductos de materiales plástico, de espumas aislantes poliméricas y de mampostería, en España, la normativa de aplicación en vigor, que está contenida en el «Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE)», con desarrollo en las Instrucciones Técnicas Complementarias (ITE) y su referencia a diversas normas UNE 100, únicamente contempla los conductos metálicos y los de lana de vidrio.

En el citado reglamento se hace mención de las conexiones flexibles entre las redes de conductos de distribución de aire y las unidades terminales. Se indica que la longitud máxima de dichas conexiones debe ser de 1,5 m debido a su elevada pérdida de presión.

2.1. Conductos de chapa metálica

El acero galvanizado o el inoxidable, el cobre y sus aleaciones y el aluminio son metales empleados para la realización de conductos para distribución de aire, aunque el primero es el más usual. Generalmente, el material empleado en el recubrimiento de estos conductos es la lana de vidrio que puede colocarse por el exterior en forma de mantas ligeras con lámina exterior impermeable al vapor de agua, actuando generalmente como aislante térmico, o también puede aplicarse por el interior del conducto en forma de fieltro reforzado con velo de vidrio y película plástica protectora y actúa principalmente como absorbente acústico.

Los conductos de chapa se clasifican de acuerdo a la máxima presión y velocidad del aire:

Clase de conductos	Presión máxima (Pa)	Velocidad máxima (m/s)
B baja	500 (1)	12,5
M media	1.500 (2)	(3)
A alta	2.500 (2)	(3)
(1) Presión positiva o negativa (2) Presión positiva con valores > de 750 Pa. (3) Velocidad generalmente superior a 10 m/s con presiones > de 750 Pa.		

Respecto al grado de estanqueidad, se han establecido 3 clases. Los sistemas de montaje y tipos de refuerzos vienen definidos en el proyecto de norma europea prEN 1507 (actualmente en fase de encuesta pública). Ver también la norma UNE 100-104.

3. INTRODUCCIÓN A LOS CONDUCTOS DE LA GAMA CLIMAVER

Los paneles de lana de vidrio para la realización de conductos fueron desarrollados en EE.UU. hace más de 40 años y, desde entonces, se fabrican por una de las sociedades del Grupo Saint Gobain en ese país (CertainTeed Corp.)

SAINT-GOBAIN CRISTALERIA, S.A., División Aislamiento, productor de lana de vidrio y de lana de roca, fabrica este tipo de paneles desde el año 1967 bajo la marca comercial CLIMAVER®. Las características de resistencia, flexibilidad, cohesión y ligereza de la lana de vidrio ISOVER, la califican como material idóneo para estos paneles de alta densidad.

Los paneles canteados de lana de vidrio CLIMAVER PLUS R y CLIMAVER PLATA, acreditados con la Marca «N» de AENOR, se fabrican en el Centro de Producción de lana de vidrio y de roca de Azuqueca de Henares, poseedor del Certificado de Registro de Empresa «ER» de AENOR.

3.1. Características de los conductos CLIMAVER

Descripción

Paneles rígidos de lana de vidrio aglomerada con resinas termoendurecibles. Una de sus caras, la que constituirá la superficie externa del conducto, está recubierta de un revestimiento que actúa de barrera de vapor y proporciona la estanqueidad al conducto. La otra cara, la interior del conducto, puede aparecer con revestimiento de aluminio, de velo de vidrio, etc.

Aplicaciones

Construcción de conductos para la distribución de aire en instalaciones de calefacción, ventilación y aire acondicionado.

DIMENSIONES DEL PANEL		
Largo (m)	Ancho (m)	Espesor (mm)
3	1,19	25

Los diferentes tipos de revestimientos y densidades de los paneles de lana de vidrio definen los distintos productos que constituyen la gama CLIMAVER.

Gama CLIMAVER	Conductividad Térmica [λ] (W/m °C) a 10 °C (*)	Reacción al fuego	Marcas de calidad	Condiciones de Trabajo Máximas			
				Clase	Presión estática (mm c.a)	Velocidad del aire (m/s)	Temperatura máxima (°C)
PLUS R	0,032	B-s1, d0	CE, N	III	≤ 80	≤ 18	70
Superficie exterior: lámina de aluminio exterior, malla de vidrio textil y Kraft. Superficie interior: revestimiento con lámina de aluminio exterior y Kraft. El canteado «macho» del panel CLIMAVER PLUS R está rebordeado con este revestimiento. El panel incorpora dos velos, uno a cada cara, para aumentar su rigidez.							
PLATA	0,032	B-s1, d0	CE, N	I	≤ 50	≤ 12	100
Superficie exterior: lámina de aluminio exterior, Kraft y malla de vidrio textil. Superficie interior: velo de vidrio							
A2	0,032	A2-s1, d0 ^(*)	CE, N	III	≤ 80	≤ 18	70
Superficie exterior e interior: lámina de aluminio exterior y malla de vidrio textil. El canto «macho» del panel CLIMAVER A2 está rebordeado con el revestimiento interior. El panel incorpora dos velos, uno a cada lado, para aumentar su rigidez.							
A2 NETO	0,032	A2-s1, d0 ^(*)	CE, N	I	≤ 50	≤ 12	100
Superficie exterior: lámina de aluminio exterior y malla de vidrio textil. Superficie interior: tejido de vidrio color negro «Neto».							

(*) Los paneles CLIMAVER A2 y A2 NETO disponen de la mejor clasificación posible para conductos de lana de vidrio y metálicos aislados.

3.2. El Método del Tramo Recto

Una red de distribución de aire por conductos está formada por tramos rectos, donde la velocidad y la dirección del aire no varían, y por figuras, tramos donde el aire cambia de velocidad y/o dirección.

El Método del Tramo Recto, basa la construcción de la red de conductos en la unión de elementos o figuras obtenidos a partir de conductos rectos.

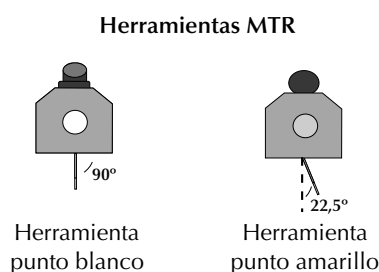
Este método presenta claras ventajas con respecto a otros métodos tradicionales, como, por ejemplo, el método de tapas:

- Mayor precisión
- Resistencia y calidad
- Menores pérdidas de carga
- Mejor acabado
- Menores desperdicios

El Método del Tramo Recto puede utilizarse con los paneles Climaver Plata, Climaver Plus R...

Los paneles Climaver, disponen de un revestimiento exterior exclusivo, con marcado de líneas guía, que facilita el corte de los conductos rectos para la obtención de figuras y elimina riesgos de errores en el trazado.

Las herramientas MTR, realizan el corte de conductos rectos para su transformación en figuras, con los ángulos de corte necesarios. Debido a su especial configuración, realizan un corte limpio y preciso, con la inclinación adecuada a cada caso.



En el Método del Tramo Recto son imprescindibles:

- **Cola CLIMAVER** especialmente desarrollada para lana de vidrio. Debe emplearse siempre en el montaje. Sirve para sellar y aportar una mayor resistencia de las uniones de las piezas de conducto fabricadas bajo el Método del Tramo Recto.
- **Cinta CLIMAVER**. Cinta adhesiva de aluminio para el sellado exterior de los conductos. La cinta incorpora el marcaje de la palabra CLIMAVER como garantía de calidad y de cumplimiento de los requisitos necesarios para esta aplicación.

3.3. El Sistema Climaver Metal®

Las mayores exigencias en aspectos relativos a la calidad del aire interior y de las instalaciones han motivado el desarrollo del nuevo Sistema Climaver Metal en el que el montaje de los conductos también se basa en el denominado Método del Tramo Recto (ver capítulos de Instalación).

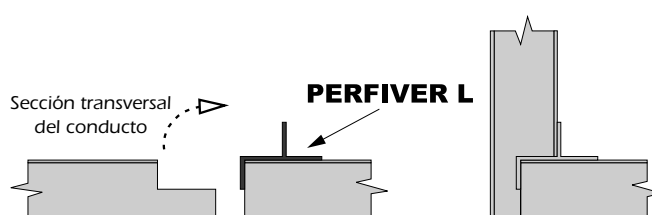
3.3.1. Componentes del SISTEMA CLIMAVER METAL®

- **CLIMAVER PLUS R®**: panel de lana de vidrio ISOVER. Este nuevo producto añade al canteado exclusivo de los paneles CLIMAVER PLUS el rebordeado del canto interior o «macho».

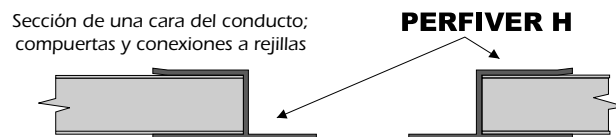


El rebordeado se consigue prolongando el revestimiento de aluminio del panel y adaptándolo a la forma del borde del canto.

- **PERFIVER®**: perfilería patentada compuesta por dos tipos de perfiles: PERFIVER L y PERFIVER H.
PERFIVER L: su misión es reforzar y cubrir las juntas longitudinales internas de los conductos.



PERFIVER H: rebordea los cantos del panel de lana de vidrio en las conexiones a unidades terminales (rejillas...), máquinas (juntas elásticas, marcos metálicos...) y compuertas (de inspección, cortafuego...). El perfil PERFIVER H no es exclusivo del Sistema Climaver Metal.



- Cola CLIMAVER.
- Cinta CLIMAVER.

3.3.2. Ventajas del SISTEMA CLIMAVER METAL®

Los conductos del SISTEMA CLIMAVER METAL basados en el montaje con el Método del Tramo Recto y compuestos por los elementos indicados en el apartado anterior, han sido desarrollados para añadir a los 12 años de garantía que aportan los paneles de la gama CLIMAVER cualidades adicionales de resistencia y facilidad de mantenimiento. Los múltiples ensayos a los que se han sometido los conductos del SISTEMA CLIMAVER METAL avalan las ventajas que a continuación se mencionan:

- Homologación de los conductos del SISTEMA CLIMAVER METAL por empresas de limpieza de conductos de reconocido prestigio y según métodos avanzados de uso extendido a nivel internacional. (Ver «Manual de Conductos de Aire Acondicionado CLIMAVER» para más información.)
- Durabilidad. Los conductos del SISTEMA CLIMAVER METAL, han superado satisfactoriamente tests de envejecimiento acelerado basados en múltiples ciclos con variación de temperatura y humedad. El más conocido de estos tests es el FLORIDA TEST (21 ciclos de 8 horas de duración con variaciones de Humedad Relativa de 18% a 98% y de Temperatura de 25 °C a 55 °C)
- Mayor resistencia mecánica a la presión. Los ensayos realizados bajo la Norma americana UL 181 permiten alcanzar a los conductos del SISTEMA CLIMAVER METAL presiones estáticas de 800 Pa (80 mm.c.a.)
- Ensayo de no proliferación de mohos. Los conductos no favorecen el desarrollo de microorganismos ni mohos según se demuestra en el ensayo realizado en laboratorio independiente y de acuerdo con la citada Norma UL.

- Velocidad de circulación de aire de hasta 18 m/s.
- Elevada absorción acústica. (Ver ficha técnica del SISTEMA).
- Máxima estanqueidad: Al igual que el resto de la Gama Climaver, los conductos del SISTEMA CLIMAVER METAL, son los que presentan menores valores de pérdidas por filtraciones.

4. FUNDAMENTOS DE CONSTRUCCIÓN DE CONDUCTOS

Las condiciones mínimas para la construcción y montaje de sistemas de conductos rectangulares en lana de vidrio, para la circulación forzada de aire con presiones negativas o positivas de hasta 500 Pa y velocidades de hasta 10 m/s, se recogen en la Norma UNE 100-105-84. Actualmente los conductos CLIMAVER PLUS R admiten presiones de hasta 800 Pa y velocidades de hasta 18 m/s.

DEFINICIONES: DENOMINAREMOS FIGURA A AQUELLOS CONDUCTOS DE FORMA ESPECIAL, ES DECIR, A AQUELLOS TRAMOS NO RECTOS (EJ.: CODOS, REDUCCIONES, DERIVACIONES, «PANTALONES», «R»...) SE DENOMINARÁ PIEZA AL ELEMENTO QUE UNIDO A OTROS DA LUGAR A UNA FIGURA. FINALMENTE TAPA ES UN ELEMENTO O PIEZA PLANA QUE, UNIDA A OTRAS, CONSTITUYE UNA FIGURA O TRAMO RECTO.

La fabricación de las diferentes figuras y tramos rectos de la red de conductos se inicia con el trazado sobre el panel de las diferentes piezas que posteriormente se recortarán y ensamblarán, todo ello, mediante el empleo de un reducido número de herramientas ligeras y de fácil manejo.

El presente manual pretende describir las operaciones a realizar para la correcta instalación de una red de distribución de aire.

Se diferencian claramente dos métodos de fabricación de figuras:

- **Método del Tramo Recto**, es el método recomendado en general e imprescindible para la fabricación de las figuras en el SISTEMA CLIMAVER METAL.
- **Método por Tapas** o tradicional, que solamente se aplicará en este manual para el apartado de construcción de reducciones.

Para ambos métodos, la construcción de tramos rectos es la misma. En cambio, las diferencias son notables en lo que se refiere a la fabricación de figuras.

Aunque existen máquinas automatizadas para la fabricación de tramos rectos de conducto, el empleo de herramientas manuales es la forma más usual de fabricación y son imprescindibles para la realización de figuras, sobre todo para el método por tapas.

Para la fabricación de los conductos se requiere:

Material	CLIMAVER PLUS R		SISTEMA CLIMAVER METAL
	MTR	Por tapas	
Paneles de lana de vidrio CLIMAVER PLUS R®	✓	✓	✓
Perfilería PERFIVER L®	—	—	✓
Perfilería PERFIVER H®	—	—	✓
Cola CLIMAVER para reforzar las uniones de piezas en la fabricación de figuras	✓	—	✓
Herramientas MTR	✓	—	—
Herramientas CLIMAVER MM	✓	✓	✓
Regla-escuadra CLIMAVER MM	✓	✓	✓
Sierra circular tangencial con aspiración	—	—	✓
Cinta CLIMAVER de aluminio autoadhesiva para sellar exteriormente uniones	✓	✓	✓
Un rotulador, un flexómetro, un cuchillo de doble filo con una de las puntas roma y una grapadora	✓	✓	✓

4.1. Trazado

Una vez conocidas las secciones y el tipo de elemento o figura de la red de conductos (tramo recto, codo, desvío, etc.), se trazan sobre el panel o tramo recto de conducto las diferentes piezas, se cortan y se ensamblan. Los trazados que aquí se desarrollan, se realizan para las Herramientas CLIMAVÉR MM.

Se insiste en la facilidad del trazado de tramos rectos haciendo uso de la Regla-escuadra CLIMAVÉR MM, y con este fin se explica en este manual su modo de utilización.

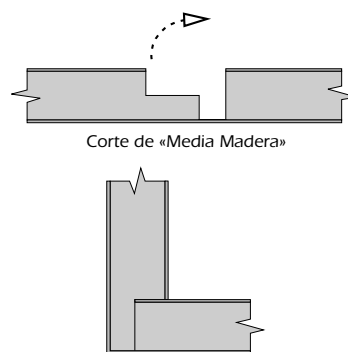
4.2. Corte

Se detallan en imágenes posteriores las dimensiones y cortes a considerar en función del tipo de elemento que se va a realizar.

Las Herramientas CLIMAVÉR MM utilizan cuchillas de acero de gran calidad y de fácil reposición.

Han sido desarrolladas especialmente para cortar el complejo interior del panel CLIMAVÉR PLUS R y sirven para toda la gama.

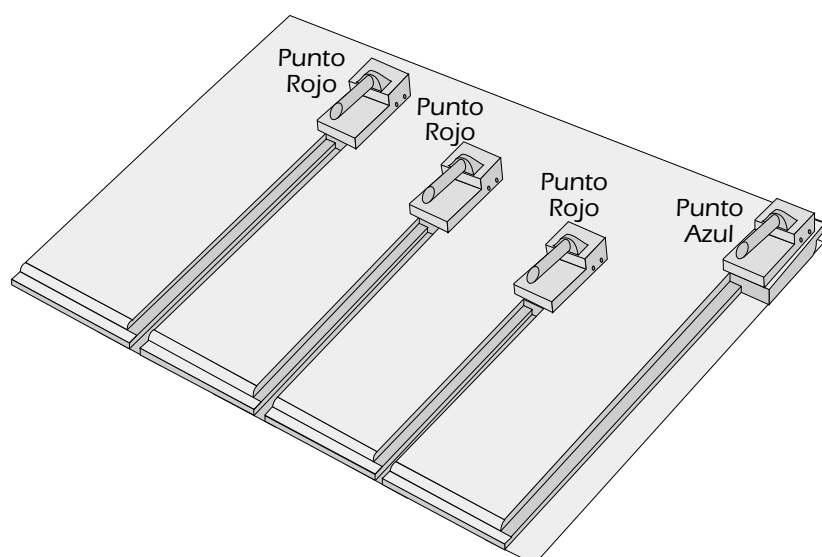
Realizan acanaladuras en forma de «media madera» para doblar el panel con un ángulo de 90°. Extraen el recorte a medida que se avanza al cortar con la herramienta.



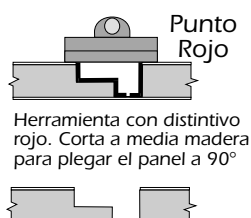
Corte de «Media Madera»

Nota: Este tipo de corte proporciona una mayor rigidez a la sección, por lo que se recomienda su uso, en sustitución de las herramientas de corte en «v».

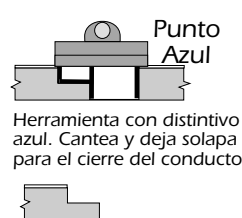
Estos útiles son más ligeros y además permiten el ahorro de tiempo en el trazado, mediante el empleo de útiles calibrados como es la Regla-escuadra CLIMAVÉR MM.



Herramienta con distintivo negro. Realiza canteados para fabricar tapas



Herramienta con distintivo rojo. Corta a media madera para plegar el panel a 90°

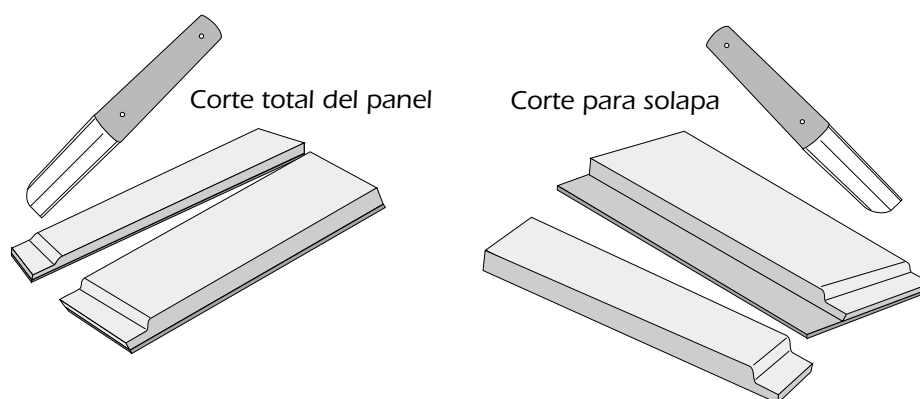


Herramienta con distintivo azul. Cantea y deja solapa para el cierre del conducto

Las herramientas se componen de un soporte o cuerpo al que van atornilladas las cuchillas. La nueva generación de Herramientas CLIMAVER MM lleva incorporado un dispositivo que simultáneamente corta el panel y facilita la separación del recorte sobrante.

Sobre el panel se marcan las referencias que sirven para colocar una regla guía en la que se apoya el soporte, produciéndose el corte a medida que se avanza con la herramienta. Con la ayuda de la Regla-esquadra CLIMAVER MM ya no es necesario marcar las referencias.

Otra herramienta imprescindible para el corte es el cuchillo de doble filo. En el dibujo se aprecia la diferencia en la utilización del cuchillo para cortar el revestimiento o para otras operaciones, como la limpieza de la solapa.

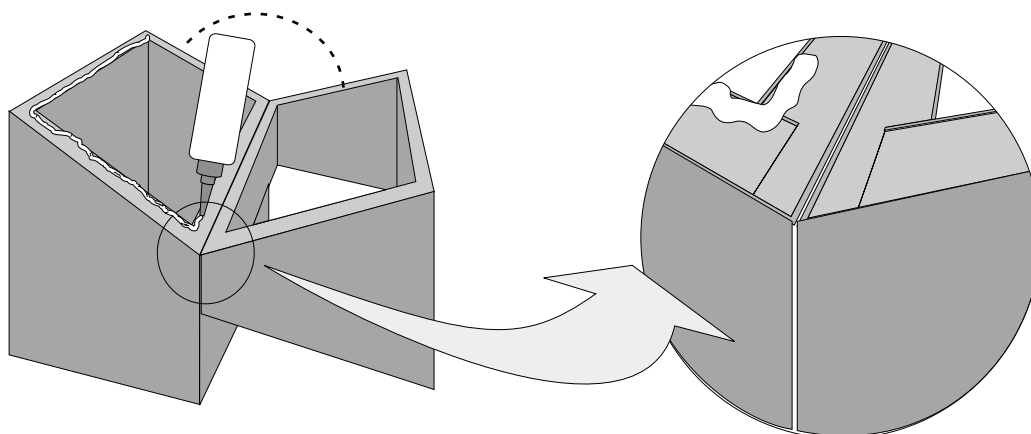


4.3. Sellado

Existen dos tipos de sellado:

Sellado interior:

Esta operación se realiza obligatoriamente en la unión de piezas para la obtención de figuras como son los codos, las derivaciones «r, pantalón y zapato»...



El sellado se obtiene aplicando un cordón de Cola CLIMAVER sobre la superficie de lana de vidrio de una de las piezas a unir, junto al borde del revestimiento interior y completando el perímetro interior de la sección.

La sujeción que permitirá el secado correcto de la Cola CLIMAVER y el sellado exterior de las piezas que conforman la figura se realiza aplicando unas tiras transversales a las juntas exteriores en cada plano del conducto y el encintado perimetral posterior.

Sellado exterior:

El sellado exterior de los conductos de la gama CLIMAVER es especialmente estanco, siendo despreciables las fugas de aire hacia el exterior, siempre y cuando hayan sido contruidos y ensamblados correctamente.

Importante: Para garantizar la resistencia y duración de los conductos, las cintas adhesivas deben cumplir:

- Hoja de aluminio puro de 50 µm de espesor con adhesivo a base de resinas acrílicas.
- La cinta debe tener una anchura mínima de 65 mm.
- Homologación bajo Norma americana UL 181 A-P o garantía similar del fabricante: [Resistencia a la tracción $\geq 2,8$ N/mm; Elongación $\leq 5\%$; Pelado (180°) $\geq 0,5$ N/mm; Pelado (20°) $\geq 0,36$ N (24 h.)/mm].

Consejos de aplicación:

Para la aplicación de las cintas de aluminio la temperatura ambiente deberá ser superior a 0 °C. Debe eliminarse la suciedad de las superficies a sellar. Mediante la espátula plástica, se hará presión sobre la cinta friccionando hasta que aparezca el relieve del revestimiento marcado en la cinta.

En las uniones longitudinales de paneles para obtener conductos rectos y en las uniones transversales entre conductos, el sellado se realiza posteriormente al grapado del revestimiento exterior, mediante la cinta de aluminio adhesiva.

Debe adherirse la mitad del ancho de la cinta a la solapa ya grapada, y la otra mitad a la superficie sin solapa.

En las uniones de piezas para la construcción de figuras mediante el Método del Tramo Recto no existirá grapado previo al encintado, y se realizará el sellado de las uniones interiores con Cola CLIMAVER.

SAINT-GOBAIN CRISTALERÍA, S.A. comercializa las **Cintas CLIMAVER** que cumplen los requisitos de la Norma UL-181. Como identificativo de calidad en las instalaciones llevan impresa en toda su longitud la marca CLIMAVER.

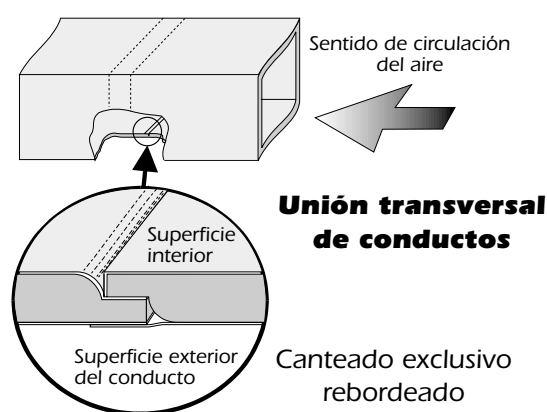
4.4. Unión transversal de elementos

Como se comentó en el apartado de sellado exterior, la unión transversal de elementos para formar la red de conductos se realiza colocando las superficies de dos tramos de conducto en un mismo plano, grapando la solapa de uno de ellos al otro (sin solapa) y sellando la unión con cinta autoadhesiva. La simplicidad de montaje estriba en que los bordes de los elementos a unir están canteados, de forma que una de las secciones se denomina «macho» y la otra, «hembra».

Los paneles de la gama CLIMAVER poseen los bordes canteados de fábrica facilitándose así la operación de ensamblado.

Gracias a que se trata de un canteado exclusivo de fábrica, la densidad de la lana de vidrio en este borde es muy superior, lo que aumenta la rigidez de la unión y mejora el montaje.

Para conseguir un acabado interior perfecto, el panel CLIMAVER PLUS R, presenta el canto macho rebordeado.



5. LOS CONDUCTOS PARA CLIMATIZACIÓN: COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA

La selección adecuada de los materiales de conductos para una red de distribución, presenta aspectos diferenciados:

- Técnicos, por los cuales se deben utilizar sólo aquellos materiales contrastados que sean capaces de cumplir las funciones previstas y vehicular el aire en condiciones idóneas a los puntos de difusión.
- Económicos, tanto desde el punto de vista de la inversión necesaria en materiales a instalar, como en los costes de funcionamiento asociados a las características de la red.

Este último aspecto, adquiere cada día más relevancia para el usuario de la instalación, ya que ésta debe considerarse como una inversión productiva y como tal, el usuario tiene derecho a conocer que la instalación se realice con criterios económicos, que contemplen tanto la inversión como los costes de funcionamiento.

El objetivo final de una instalación de climatización, no es otro que alcanzar unos estándares suficientes de confort ambiental para los usuarios del edificio.

En este sentido, las condiciones físico-químicas del aire son importantes (temperatura, humedad relativa, pureza del aire...), pero no debe olvidarse el aspecto del ruido, ya que toda la red de conductos es una vía transmisora de este contaminante ambiental.

El trabajo que se presenta a continuación, tratará de dar respuesta a estos problemas, considerando las soluciones idóneas para los materiales que componen los conductos.

5.1. Bases del estudio

A lo largo de los años ochenta los técnicos de EE.UU. observaron que existían frecuentes diferencias entre los cálculos teóricos de consumo energético de los proyectos y los resultados reales de las instalaciones, para mantener un grado de confort determinado.

Estas diferencias se traducían habitualmente en un consumo energético más elevado que el previsto. Una investigación sobre más de 1.000 edificios en toda la geografía de EE.UU., demostró desvíos de 10-12% en los consumos, estableciéndose que, en gran medida, el origen del problema estaba en los conductos, a causa de las filtraciones de aire y la ausencia de aislamiento térmico en los mismos.

En 1990, la Asociación TIMA (Thermal Insulation Manufacturers Association) presentó los resultados de un estudio con el fin de determinar por un método comparativo y exacto cuáles eran las pérdidas en conductos geoméricamente iguales y trabajando en las mismas condiciones para los diversos tipos de materiales utilizados en EE.UU. Estos estudios han sido confirmados posteriormente (1995) por NAIMA (North American Insulation Manufacturers Association).

Así establecieron las pérdidas energéticas por filtración de aire y de transmisión de calor en función de los materiales, tipo de montaje y grado de aislamiento térmico.

5.2. Estudio técnico-económico para España

Basado en las condiciones anteriores y en los datos de los estudios citados, se ha realizado una adaptación para España.

Se han considerado.

- Conductos de igual geometría; sección rectangular de 400 x 500 mm y longitud total de 15 m.
- Presión de diseño: 250 Pa.
- Velocidad del aire: 6 m/s.
- Diferencia de temperatura entre aire tratado y aire ambiente: 13,7 °C (ciclo de verano).

5.2.1. Materiales de conductos considerados

- Conductos de chapa galvanizada, sin sellado de juntas (sin juntas tipo «METU»).

- Conducto de chapa galvanizada, sin sellado de juntas, recubierto interiormente por un material de lana de vidrio termo-acústico, de 12 mm de espesor y 36 kg/m^3 de densidad (nombre comercial: VN 12).
- Conducto de chapa galvanizada, sin sellado de juntas, aislado exteriormente por lana de vidrio termo-acústica de 55 mm de espesor y 12 kg/m^3 de densidad (nombre comercial: IBR-Aluminio).
- Conducto autoportante de lana de vidrio termo-acústica de alta densidad, recubierto interior y exteriormente por un complejo triplex de aluminio visto, sellado exteriormente con banda de aluminio autoadhesiva (nombre comercial: CLIMAVER PLUS R).
- Conducto autoportante de lana de vidrio termo-acústica de alta densidad, recubierto interior y exteriormente por un complejo triplex de aluminio visto, montado con perfilería de refuerzo en aluminio, sellado exteriormente con banda de aluminio autoadhesiva (nombre comercial: SISTEMA CLIMAVER METAL).

5.2.2. Pérdidas en las instalaciones

En el Cuadro I se encuentran representados los resultados de pérdidas para cada una de las instalaciones descritas, tanto desde el aspecto filtraciones como las térmicas por paredes de conducto en función del aislamiento térmico existente.

Algunas consideraciones de cálculo deben precisarse:

5.2.2.1. Pérdidas por filtración

Se han obtenido directamente de los estudios de EE.UU. antes citados y están expresadas en pérdidas para toda la instalación de ensayo.

Los valores obtenidos en los conductos de chapa galvanizada sin sellado de juntas, muy habitual en la distribución de aire a baja presión, son algo más elevados que los límites máximos que se está estudiando fijar en las normas CEN, concretamente dentro del TC-156, para conductos con presiones inferiores a 400 Pa.

Los valores que se obtienen para los conductos de la gama CLIMAVER también son algo superiores a los encontrados experimentalmente en nuestros laboratorios, pero se encuentran en este orden de magnitud.

En cualquier caso, las relaciones de pérdidas por filtración se mantienen para ambos tipos de conductos.

A efectos de este estudio, se ha considerado la necesidad de tratar un aire suplementario para conservar el caudal teórico de la instalación al final de la misma, según las condiciones de diseño.

5.2.2.2. Pérdidas térmicas por paredes

En este caso, las pérdidas se han calculado directamente de los ábacos sobre «Diseño de conductos» del «Manual Ashrae, 1985 Fundamentals».

CUADRO I

PÉRDIDAS ENERGÉTICAS EN INSTALACIONES DE CONDUCTOS					
TIPO	CHAPA (sin sellar)	CHAPA (sin sellar) + VN 12	CHAPA (sin sellar) + IBR AL.	CLIMAVER PLUS R	SISTEMA CLIMAVER METAL
CONCEPTO					
FILTRACIONES: • VOLUMEN (m³/h) • ENERGÍA (Kw · h)	223 1,28	223 1,28	223 1,28	28 0,19	28 0,19
PAREDES: • U W/(m² °K) • ENERGÍA (Kw · h)	3,7 1,66	2,1 0,97	0,8 0,35	1,1 0,57	1,1 0,57
TOTAL ENERGÍA (Kw · h)	2,94	2,25	1,63	0,76	0,76

Para la velocidad del aire prevista (6 m/s) y el tipo de material de conducto resultan los coeficientes U ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) de termotransferencia que se indican en Cuadro I.

5.2.3. Valoraciones económicas

Se ha establecido el Cuadro II, donde se comparan los aspectos económicos de las inversiones que representarían instalaciones de conductos como las indicadas, con el sobrecoste de funcionamiento que suponen las pérdidas calculadas y el periodo Payback.

El estudio se ha realizado a finales de 2000 en Madrid, por lo que los datos de costes, de inversión y de funcionamiento de la instalación se centran en esas coordenadas. El método de cálculo es válido, siempre y cuando se actualicen los valores económicos en el tiempo y según la zona a estudiar.

Algunas aclaraciones a los datos del Cuadro II, son:

a) Inversiones

Cada una de las cantidades se ha obtenido como promedio de varios datos de mercado real, para instalaciones de 500/1.000 m² de conductos.

b) Costes por pérdidas

Para establecer un precio real del Kwh, se han estudiado dos valores extremos: un gran edificio climatizado, de más de 16.000 m² de superficie de oficinas y un estudio de 325 m².

En ambos casos se ha obtenido el precio real medio del Kwh consumido según facturas pagadas por el usuario durante un año, resultando un promedio de 18 ptas/Kwh, que es el aplicado.

El rendimiento energético del sistema COP, se han estimado en 2,5. En este sentido se han reducido los consumos energéticos procedentes del Cuadro I.

c) Payback

Como base de la comparación en el estudio americano se toma, de entre todos los tipos de conductos que se utilizan en ese país, el conducto de chapa metálica desnudo y sin sellado de juntas.

También en el presente estudio tomaremos al conducto de chapa desnudo y sin sellado de juntas como base para el presente estudio. Así, el Payback obtenido, equivale a las horas de funcionamiento que deben transcurrir para que se compense, por menor sobrecoste de funcionamiento, el mayor coste de inversión de otros sistemas de conductos.

La particularidad a nivel español consiste en que el conducto Climaver Plus R, es de menor coste de instalación que el de chapa metálica de referencia, además de tener un sobrecoste de funcionamiento más bajo que éste. Todo ello supone un Payback menor que cero, o lo que es lo mismo: es la instalación más barata de inversión y con más bajo sobrecoste de funcionamiento.

Es interesante precisar que cualquier instalación tiene un sobrecoste de funcionamiento más bajo respecto al conducto de chapa metálica, por lo que una vez alcanzado el Payback, se tendrá siempre un ahorro proporcional al tiempo de funcionamiento.

CUADRO II

COSTES EN INSTALACIONES DE CONDUCTOS (en €)						
CONCEPTO	TIPO	CHAPA (sin sellar)	CHAPA (sin sellar) + VN 12	CHAPA (sin sellar) + IBR AL.	CLIMAVER PLUS R	SISTEMA CLIMAVER METAL
SOBRE COSTE FUNCIONAMIENTO (€/m² · h)		0,005	0,004	0,003	0,001	0,001
COSTE INSTALACION (€/m²)*		17,13	32,15	24,94	15,93	19,23
PAYBACK (h)		BASE	53,48	23,67	—	3,62

* Las cifras reflejadas como coste de las instalaciones son orientativas y pertenecen a cálculos realizados con datos procedentes del área de Madrid para edificios de tamaño medio y obtenidos en 2000.

Las conclusiones de este estudio son claras:

- El Climaver Plus R es, como ya se ha comentado, un sistema de conductos con menor coste de instalación y de mantenimiento que cualquiera de los sistemas basados en conductos de chapa.

- El Sistema Climaver Metal pese a ser ligeramente más caro que la chapa desnuda, presenta valores de pérdida mucho menores, por lo que tiene un Payback bajo (sólo 603 horas) o lo que es lo mismo, poco más de mes y medio de funcionamiento en una instalación media.
- Los sistemas basados en conductos de chapa aislada necesitan periodos elevados de funcionamiento para comensar la inversión inicial. En cualquier caso, conllevan costes de funcionamiento mayores que los sistemas de conductos Climaver.

5.2.4. Otras ventajas técnicas: reducción del ruido

Los conductos de aire representan una vía de transmisión del sonido para dos tipos de ruidos:

- Los propios de la instalación, a causa de elementos en movimiento (unidades de tratamiento, ventiladores, flujo de aire en los conductos...).
- Los de «transmisión cruzada», producidos en un local y transmitidos a otros adyacentes por el sistema de conductos.

El material del conducto juega un papel importante en la atenuación sonora de los ruidos y está ligado a los coeficientes de absorción del material.

Así, para la geometría de conductos que se estudia, las atenuaciones sonoras específicas, por unidad de longitud (dB/m) están representadas en el Cuadro III para cada material.

Puede verse que los conductos metálicos desnudos no tienen prácticamente atenuación sonora. Esta aumenta cuando existe un revestimiento interior de lana de vidrio (p.e. VN 12).

Para alcanzar valores importantes de atenuación sonora hay que considerar los conductos de la gama Climaver. En este estudio se presentan dos productos típicos de la gama a estos efectos: Climaver Plata y Climaver Plus R, especialmente el primero, ya que bastan unos pocos metros de conducto para apreciar la atenuación.

CUADRO III

ACÚSTICA EN INSTALACIONES DE CONDUCTOS						
	ATENUACIÓN ACÚSTICA (dB/m) PARA (Hz)					
TIPO	125	250	500	1.000	2.000	4.000
CHAPA	0,07	0,07	0,19	0,19	0,1	0,07
CHAPA + VN 12	0,14	0,18	0,23	1,28	2,8	3,2
CHAPA + IBR AL.	0,14	0,14	0,38	0,38	0,2	0,14
CLIMAVER PLUS R / CLIMAVER A2*	1,26	1,26	1,26	4,99	3,97	3,97
CLIMAVER PLATA*	0,23	1,13	5	8,28	9,45	9,45
CLIMAVER A2 NETO*	1,67	4,99	5,52	8,86	9,45	9,45

(*) Según ensayos del CSIC Instituto de Acústica y norma ISO R 354.

5.3. CONCLUSIONES

Por todo lo expuesto, puede afirmarse que en el aspecto técnico, los conductos de lana de vidrio Climaver Plus R, Climaver Plata, Climaver A2 y Climaver A2 Neto poseen las mayores ventajas, por sus menores pérdidas energéticas por filtraciones y transmisiones de calor, aportando las mejores propiedades en atenuación acústica para la reducción del ruido.

Tablas de conversión de unidades

CONVERSION DE UNIDADES

LONGITUD	m	in	ft		
1 m	1	39,3701	3,2808		
1 in	0,0254	1	0,0833		
1 ft	0,3048	12	1		
SUPERFICIE	m ²	in ²	ft ²		
1 m ²	1	1.550	10,7639		
1 in ²	0,000645	1	0,0069		
1 ft ²	0,0929	144	1		
VOLUMEN	m ³	in ³	ft ³		
1 m ³	1	61.023,74	35,31467		
1 in ³	0,000016387	1	0,00057837		
1 ft ³	0,028317	1.729	1		
MASA	kg	lb	oz		
1 kg	1	2,20462	35,2740		
1 lb	0,453592	1	16		
1 oz	0,028349	0,0625	1		
DENSIDAD	kg/m ³	lb/ft ³			
1 kg/m ³	1	0,062428			
1 lb/ft ³	16,0185	1			
FUERZA	N	kgf	lbf		
1 N	1	0,102	0,224809		
1 kgf	9,81	1	2,204		
1 lbf	4,44822	0,4536	1		
PRESION	k Pa	kgf/m ²	lbf/ft ²	lbf/in ²	atm
k Pa	1	102	20,8854	0,145038	0,009869
kgf/m ²	0,00981	1	0,2048	0,00142	0,00009676
lbf/ft ²	0,04788	4,883	1	0,00694	0,0004725
lbf/in ²	6,895	703	144	1	0,06806
atm	101,325	10.335,15	2.116,27	14,692	1
VELOCIDAD	m/s	km/h	ft/s	mil/h	
1 m/s	1	3,6	3,28084	2,23694	
1 km/h	0,27777	1	0,91134	0,621371	
1 ft/s	0,3048	1,09728	1	0,681819	
1 mil/h	0,44704	1,609344	1,46666	1	
POTENCIA	W	hp	BTU/h		
1 W	1	0,0013410	3,41214		
1 hp	745,701	1	2.544,436		
1 BTU/h	0,293071	0,000393	1		

m = metro
in = pulgada
ft = pie
kg = kilogramo
lb = libra
oz = onza
N = Newton
kgf = kilogramo fuerza
lbf = libra fuerza
kPa = kilo Pascal
atm = atmósfera
s = segundo
km = kilómetro
h = hora
mil = milla
W = vatio
hp = caballo vapor

1 Pa = 1N/m²

m = metro

in = pulgada

ft = pie

kg = kilogramo

lb = libra

oz = onza

N = Newton

kgf = kilogramo fuerza

lbf = libra fuerza

kPa = kilo Pascal

atm = atmósfera

s = segundo

km = kilómetro

h = hora

mil = milla

W = vatio

hp = caballo vapor

1 Pa = 1N/m²

CONVERSION DE UNIDADES

TEMPERATURA	°K	°C	°F	
x °K	x	x — 273	9/5 (x—273) + 32	
x °C	x + 273	x	9/5 x + 32	
x °F	5/9 (x—32) + 273	5/9 (x—32)	x	
ENERGIA	kJ	kWh	kcal	BTU
1 kJ	1	0,000278	0,239	0,947817
1 kwh	3.600	1	860	3.414
1 kcal	4,187	0,001163	1	3,968
1 BTU	1,055	0,000293	0,252	1
CAPACIDAD CALORIFICA	kJ/kg	kcal/kg	BTU/lb	
1 kJ/kg	1	0,2389	0,429923	
1 kcal/kg	4,186	1	1,7998	
1 BTU/lb	2,3256	0,5556	1	
CALOR ESPECIFICO	kJ/kg °K	kcal/kg °C	BTU/lb °F	
1 kJ/kg °K	1	0,238846	0,238846	
1 kcal/kg °C	4,1868	1	1	
1 BTU/lb °F	4,1868	1	1	
CONDUCTIVIDAD TERMICA	W/m °K	kcal/hm °C	BTU in/ft ² h °F	BTU/ft ² h °F
1 W/m °K	1	0,860	6,9335	0,577789
1 kcal/hm °C	1,163	1	8,0645	0,67185
1 BTUin/ft ² h °F	0,14423	0,124	1	0,83333
1 BTU/ft ² h °F	1,73073	1,48843	12	1
CONDUCTANCIA TERMICA	W/m ² °K	kcal/hm ² °C	BTU/in ² h °F	BTU/ft ² h °F
1 W/m ² °K	1	0,860	0,0012217	0,176110
1 kcal/hm ² °C	1,163	1	0,001421	0,20483
1 BTU/in ² h °F	818,53	703,73	1	144,15
1 BTU/ft ² h °F	5,67826	4,882	0,006937	1
VISCOSIDAD DINAMICA	Pa • s	cP		
1 Pa • s	1	10 ³		
1 cP	10 ⁻³	1		
VISCOSIDAD CINEMATICA	m ² /s	cSt		
1 m ² /s	1	10 ⁶		
1 cSt	10 ⁻⁶	1		

°K = kelvin

°C = centígrado

kJ = kilojulios

kWh = kilowatios hora

kcal = kilocalorias

BTU = unidad térmica británica

cP = centipoise

cSt = centistoke

°F = fahrenheit

ACUSTICA - UNIDADES

UNIDAD	DESIGNACION	SIMBOLO
Longitud de onda	metro	m
Area de absorción	metro cuadrado	m ²
Período, tiempo	segundo	s
Frecuencia	Hertzio	Hz
	1 Hz = 1 Ciclo por segundo	
Presión acústica	Pascal	Pa
	milipascal	mPa = 10 ⁻³
	micropascal	μPa = 10 ⁻⁶
Nivel de presión acústica L _p	decibelio	dB
	$L_p = 20 \log \frac{\text{Presión real (Pa)}}{\text{Presión de referencia (2} \cdot 10^{-5} \text{ Pa)}}$	
Potencia acústica	vatio	W
	milivatio	mW = 10 ⁻³
	microvatio	μW = 10 ⁻⁶
	picovatio	pW = 10 ⁻¹²
Nivel de potencia acústica L _w	decibelio	dB
	$L_w = 10 \log \frac{\text{Potencia real (W)}}{\text{Potencia de referencia (10}^{-12} \text{ W)}}$	
Intensidad acústica	vattios por metro cuadrado	W/m ²
	picovatio por metro cuadrado	pW/m ² = 10 ⁻¹² W/m ²
Nivel de intensidad acústica L _i	decibelio	dB
	$L_i = 10 \log \frac{\text{Intensidad real (W/m}^2\text{)}}{\text{Intensidad de referencia (10}^{-12} \text{ W/m}^2\text{)}}$	
Impedancia acústica específica	Pascal segundo por metro	Pa • s/m
	1 Pa • s/m = 1 N • s/m ³ = 1 Rayl	
Impedancia acústica, Resistencia	Pascal segundo por metro cuadrado	Pa • s/m ²
	1 Pa • s/m ² = 1 Rayl/m	