

Control de soroll

Emilio Castejón Vilella

PID_00186766



Els textos i imatges publicats en aquesta obra estan subjectes –llevat que s'indiqui el contrari– a una llicència de Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 Espanya de Creative Commons. Podeu copiar-los, distribuir-los i transmetre'ls públicament sempre que en citeu l'autor i la font (FUOC. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya), no en feu un ús comercial i no en feu obra derivada. La llicència completa es pot consultar a <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.ca>

Índex

Introducció	5
Objectius	6
1. Fonts de soroll: característiques	7
2. Propagació del soroll	12
3. Estratègies d'actuació per al control de soroll	16
4. Actuacions sobre les fonts de soroll	19
5. Condicionament acústic de locals	24
5.1. Absorció acústica d'un material	24
5.2. Característiques absorbents d'un local	28
5.3. Nivell sonor en un local	31
6. Transmissió del soroll	37
6.1. Aïllament d'una paret simple	37
6.2. Parets dobles	42
6.3. Parets compostes	42
6.4. Aïllament entre locals	43
6.5. Cabines acústiques	44
7. Pantalles acústiques	48
Exercicis d'autoavaluació	53
Solucionari	56
Bibliografia	59

Introducció

L'article 4.1 del Reial decret 286/2006, de 10 de març, sobre la protecció de la salut i la seguretat dels treballadors contra els riscos relacionats amb l'exposició al soroll, disposa que:

“Els riscos derivats de l'exposició al soroll s'han d'eliminar en l'origen o reduir-se al nivell més baix possible, tenint en compte els avenços tècnics i la disponibilitat de mesures de control del risc en origen.”

Article 4.1 del Reial decret

Per tant, s'ha de tenir en compte que, com recorda la Guia tècnica editada per l'Institut Nacional de Seguretat i Higiene en el Treball (INSHT) sobre aquest Reial decret, les obligacions que s'hi estableixen “no es limiten al compliment dels valors límit i valors d'exposició que donen lloc a una acció”, sinó que a més s'ha d'eliminar prèviament el risc o reduir-lo al nivell més baix possible, un nivell que en tot cas haurà de respectar els límits establerts en el Reial decret.

La reducció del risc s'ha de basar en els principis generals de prevenció que estableix l'article 15 de la Llei de prevenció de riscos laborals i considerar especialment els mètodes de treball, l'elecció d'equips poc sorollosos, el seu manteniment adequat, la reducció tècnica del soroll, la concepció i disposició dels llocs de treball, la informació i formació als treballadors, i la reducció del soroll mitjançant actuacions en l'organització del treball, en particular mitjançant reduccions en el temps d'exposició.

En aquest mòdul ens centrarem en les tècniques de reducció de l'exposició al soroll orientades a l'actuació sobre la font de soroll i en l'actuació sobre la seva propagació, de manera que arribi a la persona que treballa tan “debilitat” com sigui possible. Això exigeix que dediquem la nostra atenció, d'una banda, a les fonts de soroll, les seves característiques i les possibilitats de minimitzar-ne les emissions i, de l'altra, a les possibles actuacions en el procés de propagació del soroll en el seu camí des de la font cap a l'individu, la qual cosa exigirà fer actuacions sobre el local on té lloc la propagació del soroll.

El control del soroll és un tema complex, que requereix dominar l'enginyeria acústica; per això, un coneixement profund del tema queda fora del camp de la higiene industrial. No obstant això, els higienistes industrials necessiten tenir uns coneixements mínims del tema a fi d'estar capacitats per a efectuar una primera estimació dels resultats que es poden aconseguir mitjançant les possibles intervencions que cal adoptar i per a discutir amb especialistes les opcions existents.

Lectura recomanada

Vegeu el document següent:
Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con la exposición de los trabajadores al ruido (en línea)

Objectius

Amb l'estudi d'aquest mòdul es persegueixen els objectius següents:

- 1.** Conèixer els principis bàsics de control del soroll.
- 2.** Conèixer les tècniques fonamentals de reducció del soroll.
- 3.** Ser capaç d'efectuar càlculs senzills sobre l'efectivitat de les solucions més habituals per a reduir el soroll.

1. Fonts de soroll: característiques

La principal característica d'una font de soroll és la seva **potència acústica**, que és l'energia emesa per unitat de temps, que s'expressa en watts.

Per a la majoria de les aplicacions d'interès en higiene industrial el watt (W) és una unitat massa gran per a mesurar la potència acústica, per la qual cosa aquesta es mesura en **decibels (dB)** i en aquest cas es parla del **nivell de potència** (com sempre que una magnitud es mesura en decibels). El nivell de potència acústica, L_w , es defineix com a:

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (1)$$

en què W és la potència de la font en watts i W_0 és la **potència de referència**, que per convenció val 10^{-12} watts.

En la taula 1 es donen alguns exemples de fonts sonores, l'ordre de magnitud de les seves potències acústiques habituals i la seva equivalència en nivells de potència.

Taula 1. Valors típics de potència i nivell de potència de fonts sonores comunes

Tipus de font	Potència típica (watts)	Nivell de potència (dB)
Veü humana en una conversa normal	10^{-5}	70
Veü humana cridant	10^{-3}	90
Equip de música domèstic a màxim volum	10^{-2}	100
Clàxon d'un camió	10^{-1}	110
Motor d'avió	1	120
Tub d'òrgan a màxim nivell	10	130
Avió quadrimotor	100	140
Coet espacial <i>Saturn</i>	30.000.000	195

Exemple

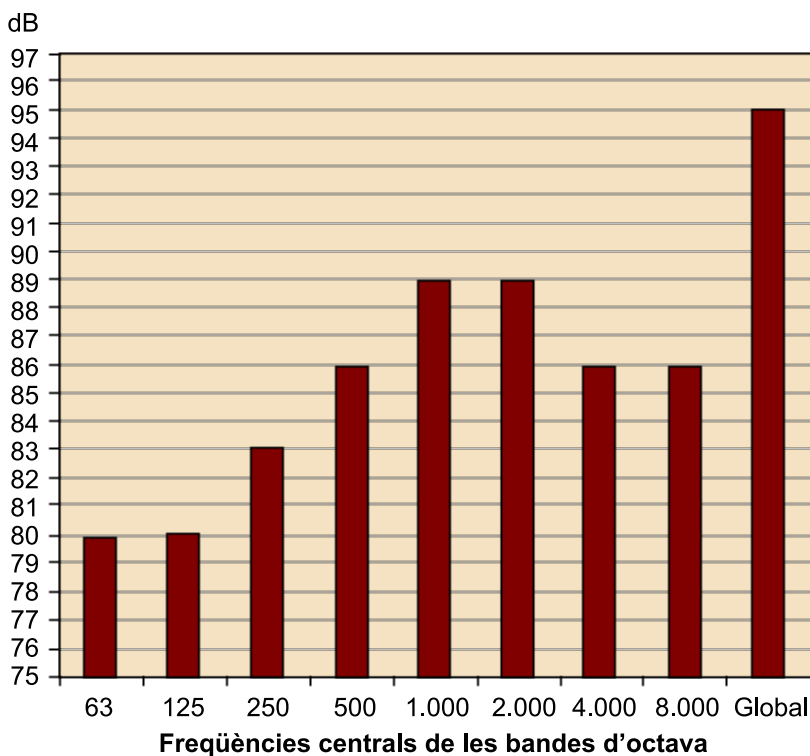
Així, si una sirena té una potència acústica de 0,1 W, el seu nivell de potència valdrà:

$$\begin{aligned} L_w &= 10 \log \frac{0,1}{10^{-12}} = \\ &= 10 \log 10^{11} = 110 \text{ dB} \end{aligned}$$

Quan es vol reduir el soroll, conèixer la potència acústica d'una font és necessari, però insuficient; fa falta saber, a més, com es distribueix aquesta potència entre les diferents bandes de freqüència, i per a això se solen fer servir les **bandes d'octava**.

Aquesta distribució és el que es denomina **espectre de freqüències**; a partir d'aquest espectre és possible determinar la potència acústica de la font mitjançant les tècniques habituals de **suma de decibels**. En la figura 1 es mostra un exemple d'espectre de potència d'una font sonora i el valor de la seva potència acústica **global**.

Figura 1. Espectre de potència d'una font sonora amb indicació del seu nivell global de potència (L_w)



Un altre aspecte important relatiu al comportament de les fonts sonores és la seva **directivitat**. En general, les fonts sonores no emeten l'energia sonora igual en totes les direccions de l'espai, és a dir, són **direccionals**.

La magnitud de l'energia sonora emesa en una certa direcció es diu **intensitat acústica**, que es defineix com la quantitat d'energia que travessa, per unitat de temps, una unitat de superfície col·locada perpendicularment a la direcció de propagació del so.

La intensitat acústica es mesura en watts per metres quadrats (W/m^2).

Octava

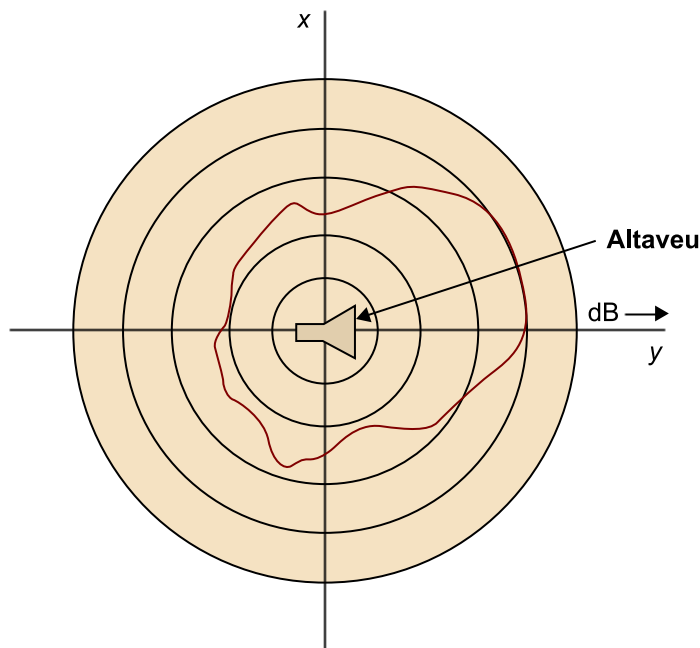
Una **octava** és un interval de freqüències l'extrem superior del qual val el doble que l'inferior. Així, una octava va de 1.000 a 2.000 Hz, per exemple. La **freqüència central** de l'octava val, per definició, la mitjana geomètrica dels seus extrems; en l'exemple anterior la freqüència central seria:

$$f_c = \sqrt{1.000 \cdot 2.000} = 1.414 \text{ Hz}$$

Els instruments de mesura utilitzen **octaves normalitzades**, les freqüències centrals de les quals són 31,5, 63, 125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000 i 8.000 Hz.

En alguns casos, les fonts sonores es construeixen de manera que l'energia sonora emesa sigui distribuïda preferentment en certes direccions: és, per exemple, el cas de la majoria dels altaveus, dissenyats per emetre el so "cap endavant". En la figura 2 es mostra la distribució espacial de la intensitat acústica d'un altaveu, en què es veu que l'energia es dirigeix preferentment cap a la seva part davantera.

Figura 2. Distribució espacial de la intensitat acústica d'un altaveu en el pla x-y



La magnitud de la intensitat acústica en cada direcció és determinada per la distància entre l'origen i la corba gruixuda.

Si una font de potència sonora W emet la mateixa intensitat sonora en totes les direccions de l'espai (**font isòtropa**), la intensitat acústica **mitjana** (I_m) a una distància r de la font valdrà:

$$I_m = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (2)$$

en què $4\pi r^2$ és la superfície de l'esfera de radi r centrada en la font.

La directivitat d'una font de potència acústica W en una direcció determinada θ a una distància r es quantifica mitjançant l'anomenat *coeficient o factor de directivitat*, $Q_{\theta,r}$, que es defineix com a:

$$Q_{\theta,r} = \frac{I_{\theta}}{I_m} \quad (3)$$

en què I_{θ} és la intensitat acústica a la distància r en la direcció θ i I_m és la intensitat que produiria a la mateixa distància una font isòtropa de la mateixa potència el valor de la qual és determinat per l'expressió (2).

Com que en una font isòtropa I_θ val el mateix per a qualsevol angle, per a qualsevol distància serà $I_\theta = I_m$ i, per tant, $Q = 1$:

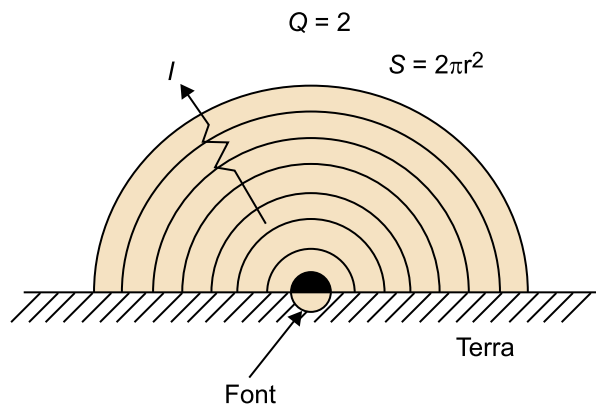
El coeficient de directivitat d'una font isòtropa (que emet igual en totes direccions) val la unitat.

Suposem ara una font isòtropa col·locada sobre el terra (figura 3). Com que tota la seva potència sonora serà emesa cap amunt, a una distància r la intensitat acústica valdrà en qualsevol direcció:

$$I_\theta = \frac{W}{2\pi r^2} \quad (4)$$

en què $2\pi r^2$ és la superfície de la **semiesfera** de radi r centrada en la font.

Figura 3. Emissió sonora d'una font isòtropa col·locada sobre el terra

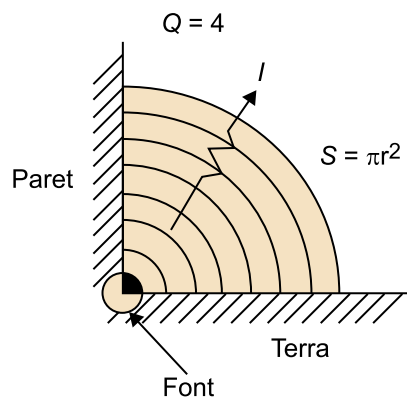


Combinant les expressions (2) i (3) obtenim el valor del coeficient de directivitat:

$$Q_{\theta,r} = \frac{W/2\pi r^2}{W/4\pi r^2} = 2 \quad (5)$$

que, com que és independent de l'angle i de la distància, es designa simplement per Q . D'una manera similar, si una font isòtropa està situada al terra en un racó d'un recinte (figura 4), s'obté fàcilment que el coeficient de directivitat val $Q = 4$.

Figura 4. Emissió sonora d'una font isòtropa col·locada sobre el terra i en un racó



El coeficient de directivitat és una dada necessària per a avaluar la distribució del soroll als locals. En general, per a les fonts ordinàries, com màquines sorolloses situades sobre el terra, es considera $Q = 2$, tret que sigui en un racó i llavors es considera $Q = 4$.

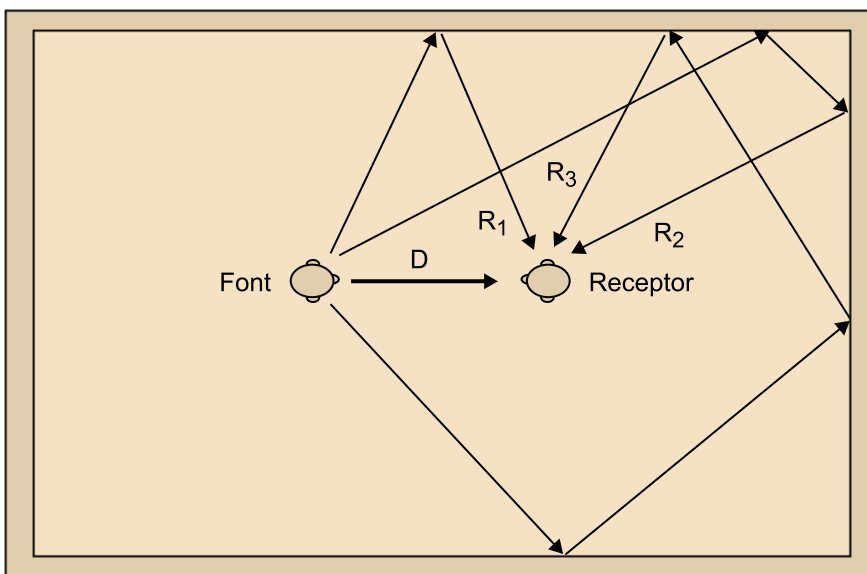
2. Propagació del soroll

Quan diem que una font sonora *emet soroll*, volem dir que algunes parts d'aquesta font vibren, la qual cosa indueix la vibració de l'aire immediatament en contacte amb aquestes parts. Com que l'aire és un medi elàstic, la vibració es transmet a les molècules veïnes de manera que l'energia que fa vibrar la font acaba "viatjant" pel local en forma de les anomenades *ones sonores*, que és el nom que se sol donar a la manera com es transmeten les vibracions **audibles** a l'aire. La zona de l'espai en la qual hi ha ones sonores procedents d'una font es denomina *camp sonor creat per la font*.

A la pràctica, es distingeixen dos tipus de camps sonors: camp lliure o directe i camp difús o reverberant.

1) **Camp lliure** és aquell en el qual les ones sonores es poden propagar a l'aire sense limitacions físiques, i per tant en un punt d'aquest camp només hi ha les ones sonores que provenen directament de la font. És el tipus de camp normalment existent en exteriors. També es poden simular les condicions de propagació de camp lliure a les cambres anecoiques. Les **cambres anecoiques** són recintes amb les parets interiors recobertes de materials especials que no reflecteixen les ones sonores, de manera que es compleix la condició que les ones que passen per un punt del recinte solament són les que provenen directament de la font.

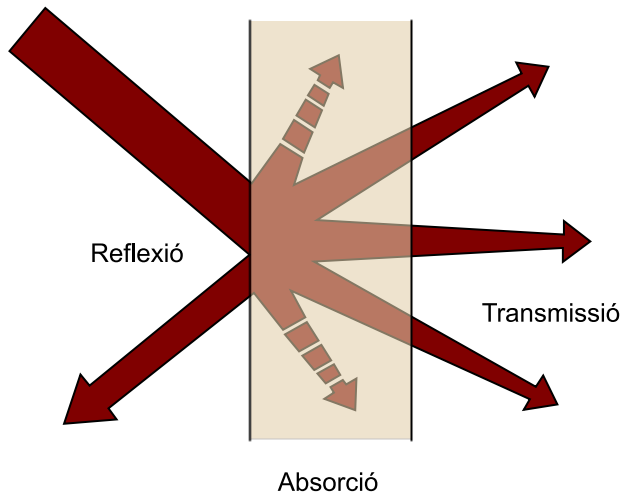
Figura 5. Emissió i recepció del so en un local



En general, les fonts de so emeten ones sonores en totes direccions (figura 5). Als locals tancats, quan les ones sonores arriben a un parament del local (una paret, el sostre, etc.) es comporten de manera similar als rajos de llum en

un mirall, i es reflecteixen i continuen el seu “viatge” fins que arriben a un altre parament, on es repeteix el fenomen (figura 6). En cada reflexió una part de l’energia de l’ona sonora és absorbida pel parament (**absorció**), i una altra part travessa el parament (**transmissió**). La quantitat d’energia absorbida o transmesa depèn de les característiques del parament, la qual cosa estudiarem amb detall més endavant.

Figura 6. En arribar a un parament, l’energia sonora incident es reflecteix en part, en part és absorbida i en part transmesa



És possible, no obstant això, que part de l’energia sonora emesa per la font arribi al receptor sense haver experimentat cap reflexió. És el que es diu **so directe** i que en la figura 5 s’ha simbolitzat per *I*. La figura 7 mostra la mateixa idea en un entorn més industrial.

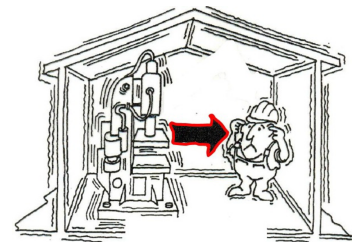


Figura 7. So directe

La figura 8 mostra, en el mateix entorn, la coexistència del so directe amb el **so reflectit**. Òbviament, el so reflectit arribarà a l’individu des de totes les direccions de l’espai, encara que en la figura això se simbolitza amb una sola fletxa.

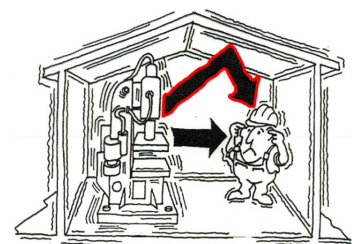


Figura 8. So reflectit

2) Un **camp difús** o **camp reverberant** es caracteritza perquè les ones sonores provinents d’una mateixa font es propaguen en totes direccions. Per a aconseguir aquest resultat la font sonora ha d’emetre el soroll en un recinte tancat, de manera que el so existent en un punt està compost per les ones que hi arriben directament des de la font i les que s’han reflectit en els límits del recinte. Perquè el camp sigui realment difús és necessari que les ones directes siguin de magnitud insignificant, és a dir, que la totalitat de l’energia sonora que passa per un punt es degui a les ones sonores que ja han experimentat alguna reflexió en els límits del recinte.

Si la vibració de la font sonora és prou intensa, aquesta es podria arribar a transmetre al paviment sobre el qual es recolza i la vibració transmetre's a altres punts del local. El paviment (o la mateixa estructura) es pot convertir, així, en una nova font de soroll en transmetre's a l'aire la seva vibració. La figura 9 mostra gràficament aquesta idea.

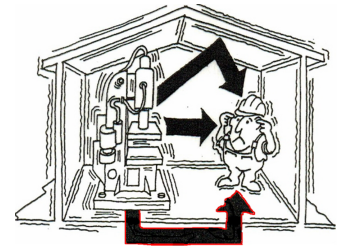


Figura 9. Transmissió del soroll per l'estructura

La transmissió del so per l'estructura és virtualment impossible de controlar i es pot transmetre a grans distàncies, per la qual cosa s'ha d'evitar instal·lant adequadament la maquinària de manera que les seves possibles vibracions no es transmetin a l'estructura. Per a això, se solen fer servir diversos dispositius antivibratoris (figura 10) i, quan això és necessari, com pot ocórrer en el cas d'equips molt grans o pesants, es recorre a situar-los sobre fonaments separats dels de la resta de l'edifici. Atès que una vibració excessiva sol ser un problema per als mateixos equips potencialment sorollosos, el control de les vibracions se sol tenir en compte en el mateix procés d'instal·lació de l'equip, per la qual cosa en aquest apartat el donarem per solucionat.

Figura 10. Diversos tipus de suports antivibratoris

a.



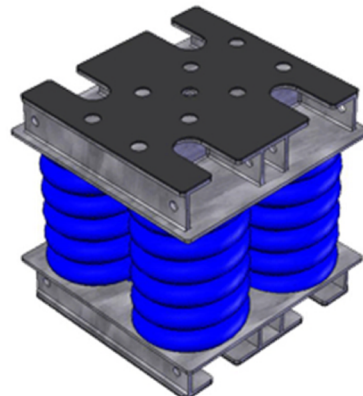
b.



c.



d.



Així, doncs, suposant que no hi ha transmissió per l'estructura, el so que arriba a una persona és la suma de dos components: el **so directe** i el **so reflectit**. El primer depèn de la potència sonora de la font i de la distància existent entre la persona i la font sonora; el segon depèn bàsicament de les característiques absorbents del local, és a dir, en quina proporció el so, en cada reflexió, és absorbit.

D'això es dedueix que el **soroll percebut** depèn de les característiques de la font, però també de les característiques del local. Aquest és un aspecte important que cal tenir en compte, perquè implica que el **nivell de pressió acústica** produït per una font serà diferent en locals diferents; el que sí que és característic de la font de soroll és el seu **nivell de potència**.

3. Estratègies d'actuació per al control de soroll

Com en tot problema d'higiene industrial, les solucions es poden buscar modificant l'organització del treball (per exemple, actuant sobre el temps d'exposició), mitjançant el recurs a la protecció individual o mitjançant actuacions tècniques, que són les que considerem en aquest apartat.

La primera actuació per al control de soroll s'ha de dirigir cap al **focus contaminant**, que en aquest cas és la font sonora. Una vegada esgotades les possibilitats de reduir la potència sonora emesa, ens haurem de concentrar en el **medi de transmissió**, és a dir, introduir "obstacles" al soroll a fi que arribi tan "debilitat" com sigui possible al treballador que volem protegir.

En aquest cas, l'actuació recomanada depèn de si l'individu és "a prop" o "lluny" de la font de soroll. Òbviament, més endavant descriurem amb més detall el que significa *a prop* o *lluny*, però de moment ens mantindrem en l'àmbit qualitatiu.

1) Si l'individu és prop de la font de soroll, hi ha tres opcions:

a) La primera (figura 11) consisteix a tancar la màquina en un recinte que impedeixi que el soroll produït surti a l'exterior. Per a això, s'utilitzen les anomenades *cabines acústiques*, la principal limitació de les quals és que perden gran part de la seva eficàcia si s'hi han de practicar obertures per a assegurar el bon funcionament de l'equip (alimentació de materials, ventilació, greixatge, etc.). Un exemple de cabina acústica es mostra en la figura 12.



Figura 11. Tancament de la font sonora

Figura 12. Cabina acústica



b) La segona opció consisteix (figura 13) a tancar el treballador en una cabina acústica. Com que cada vegada és més freqüent que els treballadors desenvolupin la feina a sales de control i només de tant en tant hagin d'accedir físicament als voltants de la font sonora, aquesta solució és viable en un nombre de situacions creixent.

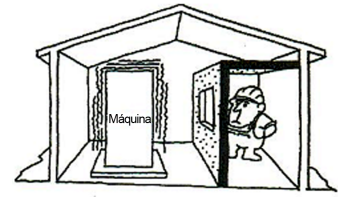


Figura 13. Tancament del treballador

c) Quan no és possible tancar ni l'equip sorollós ni el treballador, es pot recórrer a les pantalles acústiques (figura 14). Les pantalles acústiques s'utilitzen sovint per a reduir el soroll produït pel trànsit d'autopistes i altres vies ràpides, que pot ser molt molest per als qui viuen a les seves proximitats (figura 15). Les pantalles acústiques aconseguen reduccions importants en aplicacions a l'exterior però són molt menys eficaces en interiors, a causa de la presència del soroll que es reflecteix en els paraments de l'edifici, que no hi ha a l'aire lliure. Per això, en interiors no són la millor opció, encara que de vegades s'hi recorre.

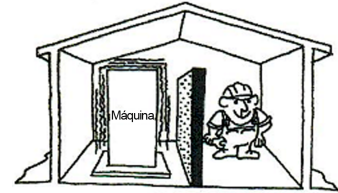


Figura 14. Pantalles acústiques

Figura 15. Pantalles acústiques en una autopista



2) Quan l'individu és lluny de la font de soroll la millor opció és augmentar la capacitat d'absorció del local recobrint-ne els paraments amb materials de gran capacitat d'absorció, la qual cosa pot permetre reduccions importants del nivell de pressió acústica, però només lluny de la font de soroll. Si l'individu que cal protegir és a prop, la reducció aconseguida pot ser inapreciable malgrat que s'hagin invertit quantitats importants de diners a millorar l'absorció del local. Quan la superfície de paraments en els quals es poden col·locar materials absorbents és insuficient per a aconseguir la reducció volguda, es recorre, de vegades, a penjar del sostre un gran nombre de panells absorbents, la qual cosa permet aconseguir reduccions importants de soroll (figura 16a). Aquest tipus de solució també es fa servir sovint en entorns no pròpiament laborals per a millorar el confort acústic; aquest seria el cas de la cafeteria que es mostra en la figura 16b, en la qual s'han muntat absorbents en forma de cilindre, més

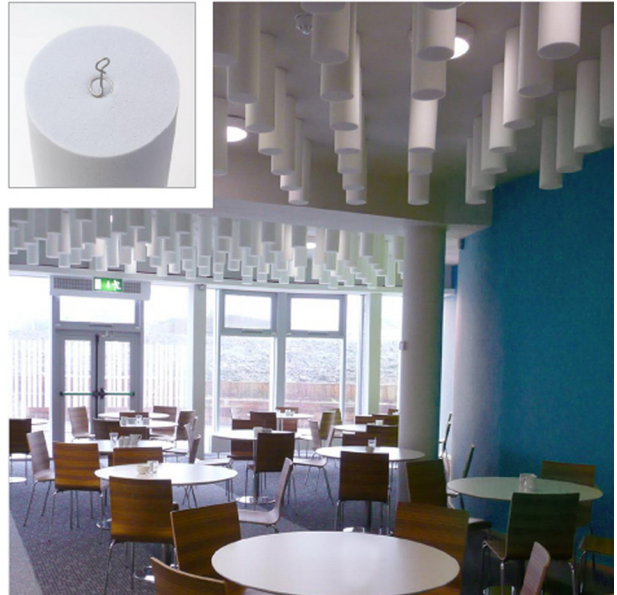
satisfactoris estèticament que els panells que es mostren en la figura 16a, encara que el seu objectiu i resultats són semblats si es col·loquen en la quantitat apropiada.

Figura 16

a.



b.



a. Panells absorbents de soroll penjats del sostre d'un taller
b. Absorció de soroll mitjançant absorbents cilíndrics en una cafeteria

4. Actuacions sobre les fonts de soroll

En general, reduir el soroll emès per una font sonora, com una màquina o equip de treball, que actua directament sobre ella és una tasca que només està a l'abast del fabricant i, en molts casos, en el curs del procés de fabricació. Modificar una màquina o una altra font sorollosa ja construïda amb l'objectiu de reduir la potència sonora emesa és, sovint, una tasca extremament costosa a causa que els canvis que s'han d'introduir poden ser substancials o fins i tot impossibles de fer.

En resum, és molt més econòmic comprar equips poc sorollosos que reduir el soroll després d'adquirir-los.

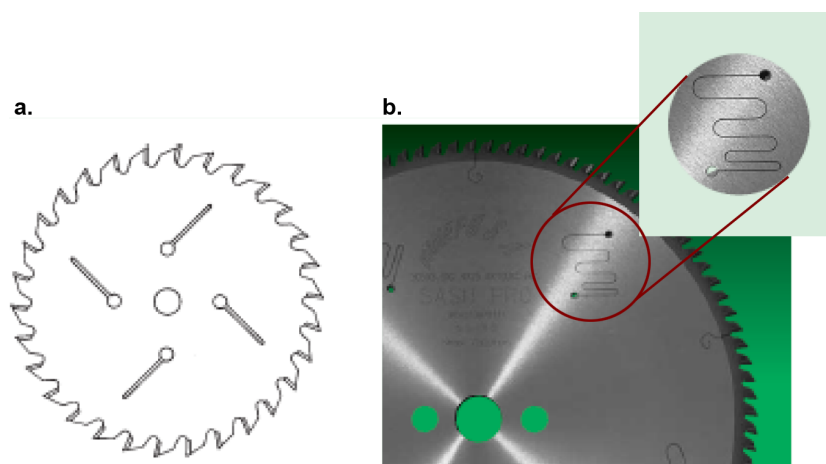
En comprar una màquina o un equip de treball que podria donar lloc a un problema de soroll, en les especificacions de compra s'haurien d'incloure unes **especificacions de soroll** i verificar-ne el compliment amb la mateixa exigència que la de qualsevol altre paràmetre directament productiu.

Molt sovint els fabricants de màquines estan en condicions d'oferir diverses alternatives de diferent nivell de potència sonora per a un mateix equip o màquina, encara que usualment a un preu superior si emet menys soroll.

Serres de fusteria de diferents nivells de potència

Un exemple el trobem en les serres circulars de fusteria: el soroll produït per la fulla en serrar es pot disminuir si hi fem unes "osques" apropiades, l'efecte de les quals és modificar-ne les característiques vibratòries. La figura 17 mostra un exemple d'aquest tipus de fulla, amb les quals es poden aconseguir reduccions del nivell de soroll en el lloc de l'operador de fins a 10 dB.

Figura 17. Dos exemples de fulla de serra circular amb osques per a la reducció del soroll



Reial decret 1644/2008, de 10 d'octubre

El Reial decret 1644/2008, de 10 d'octubre, pel qual s'estableixen les normes per a la comercialització i posada en servei de les màquines, en l'"annex I", dedicat als requisits essencials de seguretat i de salut relatius al disseny i la fabricació de les màquines, estableix (apartat 1.5.8) que:

"La màquina s'ha de dissenyar i fabricar de manera que els riscos que resultin de l'emissió del soroll aeri produït es redueixin al nivell més baix possible, tenint en compte el progrés tècnic i la disponibilitat de mitjans de reducció del soroll, especialment en la font."

Així mateix, en el manual d'instruccions preceptiu s'han d'incloure:

"Les instruccions relatives a la instal·lació i al muntatge, dirigides a reduir el soroll i les vibracions."

A més, el fabricant ha de proporcionar les indicacions següents sobre el soroll aeri emès:

- El nivell de pressió acústica d'emissió ponderat A als llocs de treball, quan superi 70 dB(A); si aquest nivell fos inferior o igual a 70 dB(A), s'ha d'esmentar aquest fet.
- El valor màxim de la pressió acústica instantània ponderat C als llocs de treball, quan superi 63 Pa (130 dB amb relació a 20 mPa).
- El nivell de potència acústica ponderat A emès per la màquina, si el nivell de pressió acústica d'emissió ponderat A supera, als llocs de treball, 80 dB(A).

Aquests valors es mesuraran realment en la màquina considerada, o bé s'establiran a partir de mesures efectuades en una màquina tècnicament comparable i representativa de la màquina que cal fabricar. Quan la màquina tingui unes dimensions molt grans, la indicació del nivell de potència acústica ponderat A es podrà substituir per la indicació dels nivells de pressió acústica d'emissió ponderats A a llocs especificats entorn de la màquina.

Quan no s'hi apliquin les normes harmonitzades, les dades acústiques es mesuraran utilitzant el codi de mesura que s'adapti millor a la màquina. Quan s'indiquin els valors d'emissió de soroll, s'especificarà la incertesa associada a aquests valors. S'hauran de descriure les condicions de funcionament de la màquina durant la mesura, i també els mètodes que utilitza.

Quan el lloc o llocs de treball no estiguin definits o no es puguin definir, la mesura del nivell de pressió acústica ponderat A s'efectuarà a 1 m de la superfície de la màquina i a una altura d'1,6 metres per sobre del terra o de la plataforma d'accés. S'indicarà la posició i el valor de la pressió acústica màxima.

Quan hi hagi directives comunitàries específiques que prevegin altres requisits per a mesurar el nivell de pressió acústica o el nivell de potència acústica, s'aplicaran aquestes directives i no s'aplicaran els requisits anteriors.

Per al conjunt dels equips de treball, el Reial decret 1215/1997 en l'annex I, dedicat a definir les disposicions mínimes aplicables a aquests equips, estableix (punt 17) que:

"Qualsevol equip de treball que comporti riscos per soroll, vibracions o radiacions ha de disposar de les proteccions o dels dispositius adequats per a limitar, en la mesura que sigui possible, la generació i propagació d'aquests agents físics."

Això no significa que una observació atenta dels focus de soroll existents en un local no pugui suggerir modificacions que poden contribuir a reduir notablement el nivell sonor, que sempre han de ser compatibles amb el procés concret que es duu a terme.

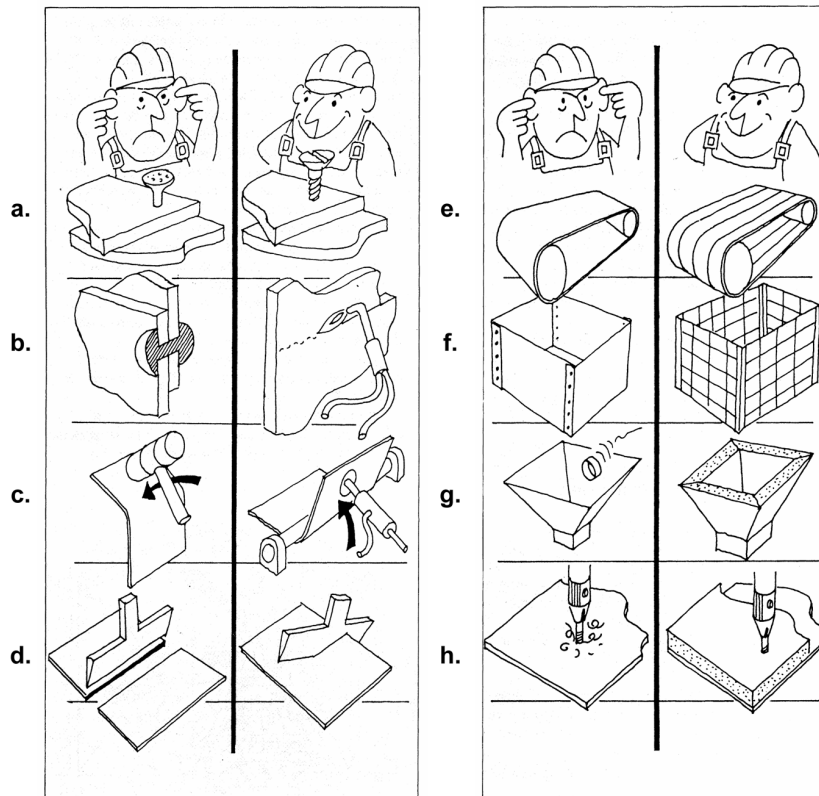
Reduir el soroll mitjançant mesures d'organització del treball també pot ser una opció per considerar. En un taller mecànic on s'utilitzen esmoladores manuals, per exemple, és habitual que n'hi hagi de disponibles amb diferents diàmetres de mola; els nivells de soroll solen ser superiors en les esmoladores de mida més gran. Per exemple, en un cas concret es van mesurar 102 dBA en utilitzar una esmoladora de 10 cm de diàmetre, i 108 dBA en emprar-ne una de

22,5 cm. Si en lloc d'utilitzar l'esmoladora més propera disponible s'estableix la norma que s'ha de fer servir sempre l'esmoladora de menys mida compatible amb la feina que cal fer és possible que la dosi de soroll rebuda pels operaris disminueixi.

Operacions sorolloses i no sorolloses

En la figura 18 es mostren alguns exemples d'operacions sorolloses que poden ser substituïdes per d'altres d'equivalents menys sorolloses:

Figura 18. Exemples d'operacions sorolloses i no sorolloses



a) unir amb cargols és menys sorollós que rebllar;

b) tallar amb un bufador és menys sorollós que utilitzar un mitjà mecànic;

c) doblegar una planxa metàl·lica amb un cilindre hidràulic és menys sorollós que fer-ho copejant;

d) tallar amb una eina de tall progressiu produeix menys soroll que fer-ho amb una altra que produeix un tall total instantani;

e) les corretges múltiples produeixen menys soroll que les que són d'una sola peça;

f) els contenidors utilitzats en moltes indústries per a emmagatzemar les peces que es van produint produeixen més soroll en col·locar-hi les peces si les seves parets són massisses que si són de reixeta metàl·lica;

g) un embut en el qual cauen les petites peces produïdes per una màquina copejant-ne la paret farà menys soroll si es folra exteriorment amb un material apropiat (per exemple, cautxú) que si les parets són de simple xapa metàl·lica;

h) finalment, aquest mateix "truc" es pot utilitzar per a reduir el soroll produït en perforar una planxa metàl·lica.

Una font de soroll habitual en moltes indústries la constitueix l'aire comprimit que s'utilitza en múltiples equips amb finalitats de comandament: vàlvules, finals de recorregut i molts altres elements governats pneumàticament (figura 19) que produeixen un soroll considerable quan deixen escapar l'aire comprimit. Aquest soroll es pot reduir dràsticament utilitzant silenciadors, que essencialment utilitzen algun tipus d'element (per exemple, una escuma de plàstic) per a reduir la velocitat de l'aire comprimit en la fuga (figura 20). No s'ha de passar per alt, no obstant això, que els silenciadors, com qualsevol altre equip, tenen una vida limitada i, per tant, s'han de reparar o substituir quan perdin eficàcia.

Figura 19. Exemples d'equips que utilitzen aire comprimit com a element de comandament



Figura 20. Exemples de silenciadors que mostren la secció d'un model



Una altra de les utilitzacions habituals de l'aire comprimit és com a agent d'expulsió de peces una vegada conformades. S'utilitzen per a això broquets que projecten un raig d'aire (figura 21). Sovint aquests broquets consisteixen simplement en un tub l'extrem del qual s'ha aixafat d'un cop de martell per a donar més velocitat (i, per tant, més força) a l'aire expulsat. L'alternativa és usar broquets comercials amb un disseny aerodinàmic. La diferència, a banda òbviament del preu, és que, a igualtat de capacitat d'embranchada, els broquets comercials produeixen nivells de soroll que poden ser fins a 15 dBA inferiors i consumeixen fins a 10 m³/h menys d'aire comprimit. Tenint en compte que l'aire comprimit té un cost no insignificant (compressor, manteniment, con-

sum elèctric...) que es pot xifrar entorn de $0,02$ euros/ Nm^3 , un broquet comercial es pot amortitzar ràpidament tenint solament en compte l'estalvi en aire comprimit; i, a més, produeixen menys soroll.

Figura 21. Dos broquets d'aire comprimit: **comercial** a la dreta i de **bricolatge** a l'esquerra



5. Condicionament acústic de locals

Condicionar acústicament un local significa actuar-hi sobre els límits físics (sostre, terra i parets) modificant-ne les característiques a fi que els nivells de soroll al seu interior es trobin dins dels límits que es considerin apropiats en cada cas.

5.1. Absorció acústica d'un material

Quan una ona sonora incideix en una superfície, una part de l'energia sonora és absorbida pel material, i l'ona reflectida té menys energia que la incident. La relació entre la quantitat d'energia absorbida i la incident es denomina **coeficient d'absorció del material**, i se sol representar amb la lletra α .

$$\alpha = \frac{E_{abs}}{E_{inc}} \quad (6)$$

en què E_{abs} és l'energia absorbida i E_{inc} l'energia incident.

L'absorció acústica és una característica de cada material. Els materials de construcció usuals (maó, ciment, vidre, metalls, etc.) tenen coeficients d'absorció molt baixos ($\alpha < 0,05$), mentre que els materials porosos o tous (tèxtils, aglomerats de fibres, etc.) presenten valors de prop de 0,5 i els materials especialment fabricats com a absorbents acústics (panells, llosetes per a sostres, etc.) poden tenir valors propers a la unitat.

L'absorció d'un material també depèn de la freqüència del so. Per als materials porosos el coeficient d'absorció sol augmentar amb la freqüència. Això és a causa que per a aquests materials l'absorció es produeix per la transformació de l'energia del moviment de l'aire en calor a causa del fregament que s'estableix entre l'aire en moviment i les parets dels porus. En freqüències altes l'energia dissipada és més gran perquè la velocitat a la qual oscil·len les partícules de l'aire és més alta que a freqüència baixa i, per això, també ho és el fregament.

En la taula 2 s'indiquen valors del coeficient d'absorció de materials típics de construcció. Observeu que per a una finestra oberta el coeficient d'absorció val la unitat, ja que tota l'energia incident és absorbida, perquè l'energia reflectida és nul·la. En el cas de persones o mobles, que també absorbeixen part del so que reben, és habitual no donar el valor del coeficient d'absorció α , sinó el seu producte per la superfície S en metres quadrats. Per això, el valor que s'indica en la taula 2 en aquests casos ($S \cdot \alpha$) s'expressa en metres quadrats, ja que α no té dimensions.

Taula 2. Coeficient d'absorció acústica de diferents materials

Material	Freqüència (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Maó vist	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Formigó, terratzo	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Marbre	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Blocs de formigó pintats	0,01	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Blocs de formigó sense pintar	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25
Lliscat de guix	0,12	0,09	0,07	0,05	0,05	0,04
Vidre en finestra	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Parquet de fusta sobre formigó	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Cortines 340 g/m ²	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortines 475 g/m ²	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
Fibra de vidre 50 kg/m ³						
• gruix 25 mm	0,08	0,25	0,65	0,85	0,80	0,75
• gruix 50 mm	0,17	0,50	0,75	0,90	0,85	0,80
Moqueta de 4 mm	0,02	0,03	0,06	0,15	0,23	0,47
Moqueta de 10 mm	0,03	0,08	0,20	0,28	0,37	0,45
Aigua en piscina	0,008	0,008	0,013	0,015	0,02	0,025
Finestra oberta	1	1	1	1	1	1
Persona asseguda (m ²)	0,21	0,35	0,46	0,45	0,50	0,35
Cadires de fusta (m ²)	0,01		0,02		0,02	
Butaca encoixinada (m ²)	0,19		0,28		0,28	

De vegades, és útil disposar d'un únic nombre que valori la capacitat global d'absorció d'un material; per a això, alguns fabricants de materials absorbents solen utilitzar el coeficient de reducció de soroll (NRC¹), que es defineix com la mitjana dels coeficients d'absorció a 250, 500, 1.000 i 2.000 Hz.

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1.000} + \alpha_{2.000}}{4} \quad (7)$$

en què els diferents α_i són els valors del coeficient d'absorció a la freqüència i .

⁽¹⁾Sigla de noise reduction coefficient.

L'NRC dóna solament una indicació aproximada de la qualitat absorbent d'un material, ja que no indica les diferències de coeficient d'absorció entre les diferents freqüències.

Exemple 1

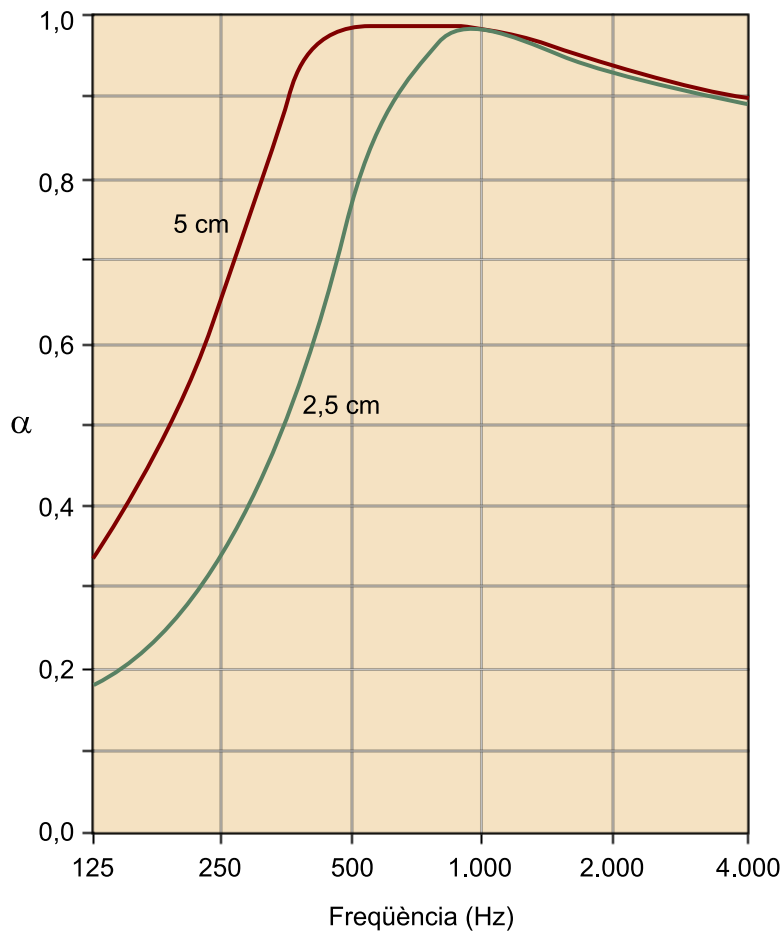
Determinarem l'NRC d'una fibra de vidre de 50 kg/m^3 i 25 mm de gruix.

En la taula 2 llegim els coeficients d'absorció que a 250 Hz, 500 Hz, 1.000 Hz i 2.000 Hz valen, respectivament, 0,25, 0,65, 0,85 i 0,8. El coeficient de reducció de soroll valdrà, per tant:

$$NRC = \frac{0,25+0,65+0,85+0,8}{4} = 0,64 \quad (8)$$

Els valors del coeficient d'absorció acústica d'un material que es donen en la taula 2 o en altres de similars disponibles en la bibliografia són el resultat d'una mesura feta segons un assaig normalitzat. A la pràctica, no obstant això, el coeficient d'absorció real depèn no solament de les dades d'assaig del material, sinó de certs paràmetres addicionals relacionats amb la manera com es munta.

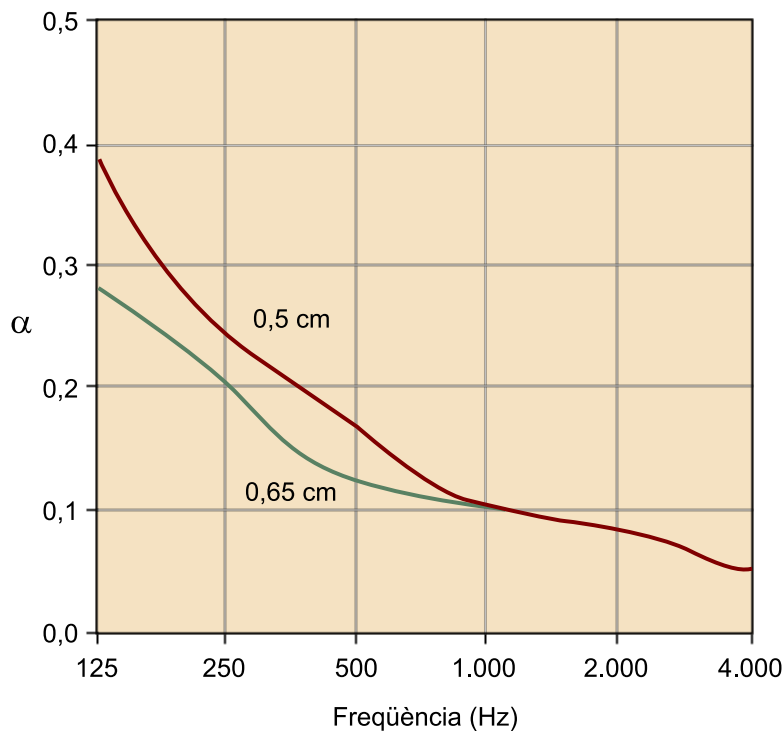
Figura 23. Coeficient d'absorció de dos panells de material porós de diferents gruixos



Un dels paràmetres importants és el **gruix del material**. Com s'observa en la figura 23, un augment del gruix d'un material absorbent porós enganxat sobre un mur o sostre produeix un augment del coeficient d'absorció a freqüències baixes, però gairebé no el modifica a freqüències altes. Variant el gruix, doncs, es pot millorar l'absorció a freqüència baixa.

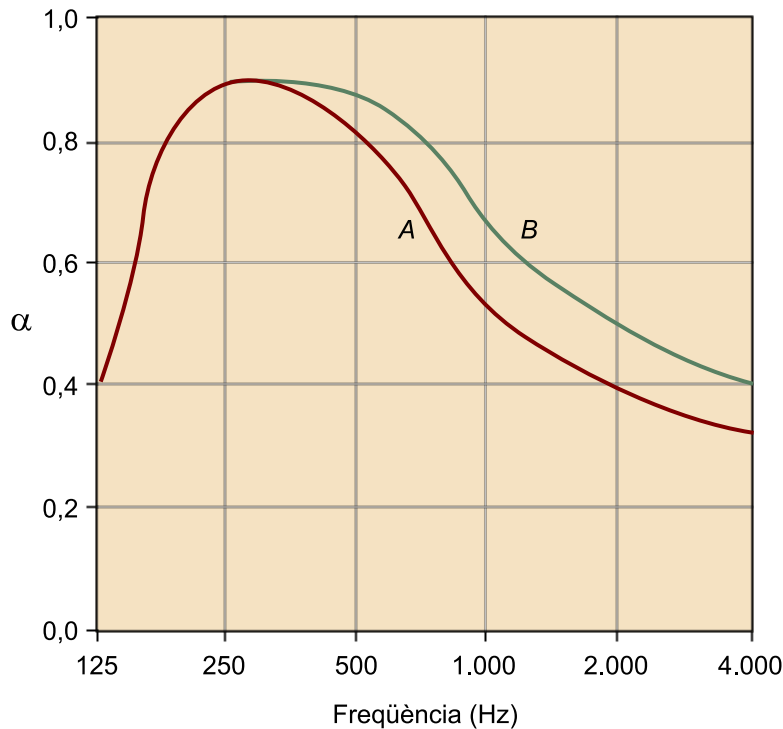
Quan es vol un material que absorbeixi més a freqüències baixes que a freqüències altes se sol recórrer a panells rígids no porosos muntats sobre llatas d'empostissar, de manera que quedi una cavitat d'aire entre el panell i la paret. En aquestes circumstàncies, el coeficient d'absorció (figura 24) a freqüències baixes és més gran per al panell més prim, ja que com que és menys rígid vibra més i aquesta vibració superior del panell dissipa més energia. L'absorció es pot millorar omplint la cavitat situada entre el panell i la paret amb un absorbent porós. El vidre d'una finestra es comporta de manera similar (té darrere una cavitat de gruix infinit); per aquesta raó, en la taula 2 s'observa que el coeficient d'absorció d'un vidre en una finestra disminueix amb la freqüència.

Figura 24. Coeficient d'absorció de dos panells de fusta de diferents gruixos muntats a 5 cm de la paret



Per a aconseguir materials que tinguin el seu màxim coeficient d'absorció a freqüències intermèdies (de 250 a 1.000 Hz) se sol recórrer a panells perforats muntats sobre llatas d'empostissar, de manera que hi hagi una cavitat d'aire entre els panells i la paret. La figura 25 mostra el coeficient d'absorció d'un panell de fusta de 12,5 mm de gruix amb forats de 5 mm de diàmetre que ocupen el percentatge d'àrea que s'indica. La cambra d'aire rere el panell és de 55 mm de gruix i s'ha omplert amb un absorbent porós.

Figura 25. Coeficient d'absorció d'un panell de fusta perforada muntat amb un absorbent porós a la part posterior. A: 11% d'àrea perforada. B: 16,5% d'àrea perforada



En resum, doncs, les característiques bàsiques d'absorció d'un material absorbent es poden modificar en gran manera segons la manera com es munta, la qual cosa permet aconseguir les característiques necessàries per a cada aplicació.

5.2. Característiques absorbents d'un local

En general, els diferents paraments d'un local (sostre, parets, terra i ocupants) no tenen el mateix coeficient d'absorció. Per aquest motiu, es defineix el **coeficient d'absorció mitjà** com a:

$$\alpha_m = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots + \alpha_n S_n}{S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n} \quad (9)$$

en què $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ són els coeficients d'absorció dels paraments les superfícies respectives dels quals són S_1, S_2, S_3, \dots

Quan al local hi ha persones o mobles, el valor de $\alpha_i S_i$ per a ells es té en compte en el numerador de l'expressió (9) (recordeu que aquest valor està disponible en la taula 2 o altres de similars) però el valor corresponent de S_i no s'inclou en el denominador, ja que els valors de S_i no es poden estimar.

Un altre paràmetre acústic d'interès és l'anomenada *constant del local* (R), que es defineix com a:

$$R = \frac{\sum \alpha_i S_i}{1 - \alpha_m} \quad (10)$$

Observeu que R té dimensions de superfície i, per tant, es mesura en metres quadrats.

L'expressió $\sum \alpha_i S_i$ es denomina *absorció acústica del local* i es representa per A . És una mesura de l'absorció acústica d'un local i té dimensions de superfície. Si un local té una absorció acústica de $x \text{ m}^2$, és que absorbeix tanta energia sonora com una superfície de $x \text{ m}^2$ d'un material que no reflectís el soroll ($\alpha = 1$).

Quan una font sonora actua en un local tancat, i cessa d'emetre, el nivell sonor al local no cessa de manera brusca, sinó que decreix de manera progressiva a causa de l'existència d'ones reflectides a les parets que es continuen propagant a l'interior del local encara que hagi cessat l'emissió.

Es defineix com a **temps de reverberació** el temps necessari perquè el nivell sonor disminueixi 60 dB mesurat a partir de l'instant en què la font de soroll cessa d'emetre.

És una mesura de la capacitat del local per a absorbir les ones sonores. Com més gran sigui l'absorció, inferior serà el temps de reverberació. El temps de reverberació d'un local se sol mesurar provocant un so curt i intens mitjançant una pistola de fogueig o un artefacte similar i mesurant mitjançant un equip especial el temps que triga a reduir-se el soroll 60 dB (figura 26). El temps de reverberació és la mesura bàsica de la qualitat acústica d'un local. En general, per a locals destinats a la comunicació (aules, sales de conferències, oficines, etc.) interessa tenir temps de reverberació baixos perquè s'augmenta la intel·ligibilitat de les paraules, mentre que per a sales d'audició de música el temps de reverberació pot ser més elevat per a aconseguir "omplir de so" el local.

El temps de reverberació d'un local està relacionat amb les característiques d'aquest per la **fórmula de Norris-Eyring**:

$$T = 0,161 \frac{V}{S[-\ln(1 - \alpha_m)]} \quad (11)$$

en què T és el temps de reverberació en segons, V el volum del local en metres cúbics, S la superfície total del conjunt dels paraments en metres quadrats, i α_m és el coeficient d'absorció mitjà.

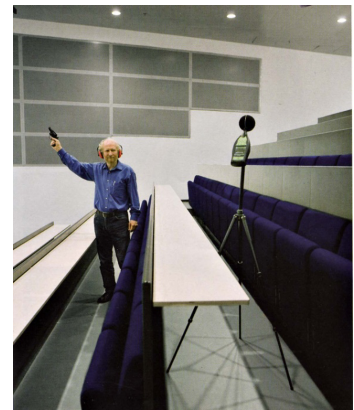


Figura 26. Mesura del temps de reverberació

Com que el temps de reverberació es pot mesurar i els paràmetres V i S són relativament fàcils de mesurar, la mesura del temps de reverberació s'utilitza de vegades per a calcular el valor del coeficient d'absorció mitjà. A partir d'aquest resultat, combinant les expressions (9) i (10) és possible calcular R , la qual cosa pot resultar de gran utilitat en casos de locals complexos, amb un gran nombre de paraments.

Observeu que el temps de reverberació depèn de la freqüència, ja que és una funció del coeficient d'absorció mitjà, α_m , que varia amb la freqüència.

El **temps de reverberació** és un paràmetre molt important per a la “qualitat acústica” d'un local, és a dir, perquè l'audiència percebi correctament la informació, sia música, paraules, etc. (taula 3).

Taula 3. Valors recomanats per al temps de reverberació

Ús del local	Temps òptim de reverberació (segons) a 500-1.000 Hz
Cinema	0,4-1,0
Concert de música rock	0,8-1,1
Conferència	0,8-1,2
Teatre	1,0-1,2
Òpera	1,3-1,7
Música simfònica	1,5-2,2
Música coral	1,7-2,5
Música d'orgue	2,0-3,0

El temps de reverberació òptim depèn de les activitats que es fan al local. Per això, és important triar el volum del local i les característiques absorbents dels materials de les seves superfícies adequadament, a fi que el temps de reverberació sigui l'adequat a l'ús que tindrà el local. On hi ha fonts de soroll és important tenir temps de reverberació tan baixos com sigui possible.

Per a les freqüències baixes (125 Hz) el temps de reverberació ha de ser fins al 50% superior.

Temps de reverberació òptims

A les aules el temps de reverberació s'ha de situar entre 0,6 i 0,9 segons a totes les freqüències entre 100 i 4.000 Hz a fi d'aconseguir unes bones condicions de percepció de la paraula. A sales de concert el temps de reverberació s'ha de situar entre 1,5 i 2,2 segons a freqüències mitjanes (500-1.000 Hz) i ha de ser més gran com més gran sigui el volum del local.

Exemple 2

S'ha mesurat el temps de reverberació d'un local a 500 Hz, i s'ha obtingut un valor d'1,2 segons. Si el local té un volum de 1.000 m³ i una superfície total de 600 m², calcularem el valor de R a 500 Hz.

De la fórmula (11) es dedueix fàcilment que:

$$\alpha_m = 1 - e^{-\frac{0,161V}{TS}} \quad (12)$$

i substituint s'obté:

$$\alpha_m = 1 - e^{-\frac{0,161 \cdot 1.000}{1,2 \cdot 600}} = 1 - 0,799 = 0,201 \quad (13)$$

D'altra banda, de la fórmula (9) es dedueix que:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i = \alpha_m \sum_{i=1}^n S_i \quad (14)$$

I substituint en (10) s'obté:

$$R = \alpha_m \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{1 - \alpha_m} \quad (15)$$

Però com que $\sum_{i=1}^n S_i$ és la superfície total del local, que és una dada, tindrem:

$$R = \frac{0,201 \cdot 600}{0,799} = 150,94 \text{ m}^2 \quad (16)$$

5.3. Nivell sonor en un local

Quan una font sonora isòtropa de potència L_w a una freqüència determinada es troba en unes condicions tals que la propagació es fa en un **camp lliure** (és a dir, sense reflexions) el nivell de pressió acústica L_p a una distància r és determinat per l'expressió:

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2} \quad (17)$$

en què Q és el coeficient de directivitat de la font.

Exemple 3

Suposem una font sonora que a 1.000 Hz emet una potència sonora de 90 dB. Es tracta d'una màquina col·locada sobre el paviment en un pati exterior, per la qual cosa el seu coeficient de directivitat valdrà $Q = 2$ i podem suposar que la propagació es fa en un camp lliure. Quin serà el nivell de pressió acústica a 1.000 Hz a 10 i 20 m de distància?

A 10 m tindrem, aplicant l'expressió (17):

$$\begin{aligned} L_p &= 90 + 10 \log \frac{2}{4\pi 10^2} = 90 + 10 \log \frac{2}{5.026,6} = 90 + 10 \log 0,0004 = \\ &= 90 + 10(-3,4) = 90 - 34 = 56 \text{ dB} \end{aligned} \quad (18)$$

I a 20 m:

$$\begin{aligned} L_p &= 90 + 10 \log \frac{2}{4\pi 20^2} = 90 + 10 \log \frac{2}{1.256,6} = 90 + 10 \log 0,0016 = \\ &= 90 + 10(-2,8) = 90 - 28 = 62 \text{ dB} \end{aligned} \quad (19)$$

En l'exemple anterior hem trobat que en duplicar la distància a la font (de 10 a 20 metres) el nivell de soroll s'ha reduït 6 dB.

Aquesta regla és una regla general en camp lliure: en duplicar la distància a la font, el nivell de soroll es redueix 6 decibels, com es pot demostrar fàcilment a partir de l'expressió (10).

Quan el so es transmet a grans distàncies, el mateix aire actua com a absorbent, un efecte que és imperceptible a distàncies petites. A 20 °C l'atenuació causada per aquest efecte val:

$$A_{\text{ex}} = 7,4 \cdot 10^{-8} \frac{f^2 r}{H_r} \quad (20)$$

en què A_{ex} és l'atenuació provocada per l'aire en dB, f és la freqüència del so en Hz, r la distància a la font en metres i H_r la humitat relativa en percentatge.

L'expressió (20) indica que l'atenuació és proporcional a la distància, cosa lògica, i que les freqüències altes són molt més atenuades que les baixes. Això explica, per exemple, per què les sirenes dels vaixells, l'objectiu de les quals és comunicar la seva presència a grans distàncies, utilitzen freqüències baixes. En el fenomen intervé també la humitat de l'aire, que contribueix a reduir l'atenuació: a igualtat de freqüència, el so és menys atenuat en dies humits que en secs, com bé saben els qui viuen a la rodalia d'un aeroport o un port.

Quan la font sonora es troba en un **local tancat**, les ones sonores que emet es reflecteixen (i són parcialment absorbides) en els diferents paraments del local. En aquestes condicions el nivell de pressió acústica val:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (21)$$

Nota

Observeu que encara que tant el nivell de potència L_w com el de pressió acústica L_p es mesurin ambdós en dB, conceptualment es tracta de magnituds diferents.

que indica que el nivell de pressió acústica en un punt situat a una distància r de la font sonora depèn del nivell de potència de la font sonora, L_w , de la directivitat de la font, Q , i de les característiques absorbents del local definides per la constant del local, R .

El terme $Q/4\pi r^2$ representa l'aportació del **so directe**, per la qual cosa disminueix a mesura que creix r , és a dir, ens allunyem de la font i el terme $4/R$ representa l'aportació del **so reflectit** que, si el camp és totalment difús (una hipòtesi raonable en la majoria dels problemes de soroll), no depèn de la distància a la font, i és constant en qualsevol punt del local.

La figura 27 mostra com evolucionen el so directe i el so reflectit en allunyar-nos de la font sonora. Com que prop de la font r és petita, el valor de $Q/4\pi r^2$ és gran i supera el de $4/R$, que és constant: el so directe és superior al reflectit. Quan r és gran, lluny de la font, succeeix a l'inrevés. Per tant, en algun punt ambdós valors han de coincidir.

La distància a la qual això ocorre es diu **distància crítica** i representa el punt en el qual la contribució del so directe i la del reflectit són iguals.

De l'expressió (21) es dedueix fàcilment que la distància crítica r_c val:

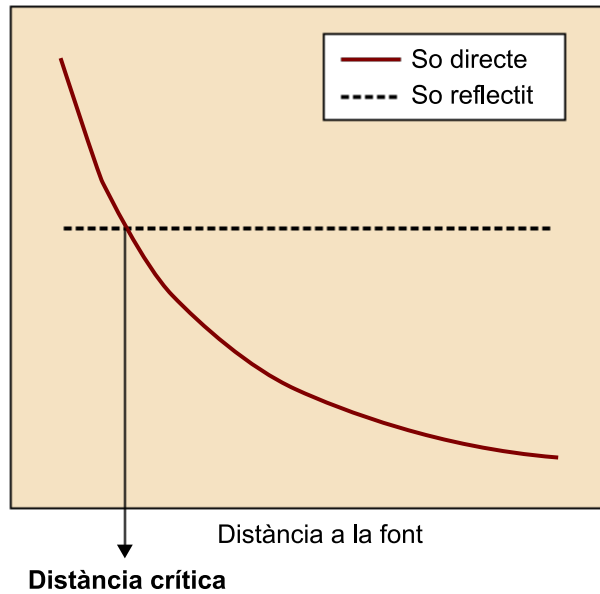
$$r_c = 0,14 \sqrt{QR} \quad (22)$$

Per al cas més habitual d'una font sonora col·locada al terra, amb $Q = 2$, resulta:

$$r_c = 0,2 \sqrt{R} \quad (23)$$

que indica que la distància crítica es fa més gran com més gran és R , és a dir, més absorbent és el local.

Figura 27. Distància crítica



Atès que a distàncies de la font inferiors a la crítica l'energia sonora rebuda procedeix fonamentalment del so directe, en aquesta zona augmentar l'absorció del local no redueix gairebé el nivell sonor. En canvi, a distàncies superiors a la crítica, on l'energia sonora rebuda és bàsicament reflectida, augmentar l'absorció contribueix a reduir el nivell sonor.

Per això, la col·locació de materials absorbents és ineficaç com a mètode de reducció del soroll en punts propers a la font de soroll; en canvi, és un bon mètode en punts allunyats. La **distància crítica** assenjala una frontera aproximada entre ambdues situacions.

Exemple 4

En un local de $20 \times 12 \times 5$ metres dedicat a pintar petites peces metàl·liques en una cabina s'han mesurat els nivells sonors i els temps de reverberació que s'indiquen en la taula 4. Estimarem la reducció del nivell sonor que s'aconseguirà en col·locar al sostre uns panells penjants absorbents de soroll (superfície dels panells: 300 m^2). S'indiquen en la mateixa taula els valors del coeficient d'absorció acústica dels panells. Al local treballen dues persones, un pintor i un ajudant. Suposarem que l'única font de soroll és la maquinària associada a la cabina de pintura (ventilador i bomba de circulació de l'aigua). No es disposa de dades relatives a la potència sonora de les fonts de soroll. Es pot considerar $Q = 2$.

Taula 4

Freqüència bandes d'octava (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000	Nivell global
Nivell sonor en pintor (dB)	93	95	86	80	75	71	97,6
Nivell sonor en ajudant (dB)	88	92	81	74	69	64	93,8
Coefficient d'absorció del panell	0,17	0,5	0,75	0,9	0,85	0,8	-
Temps de reverberació (s)	2,4	4,8	3	2	1,6	1,2	-
Correcció A	-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1,0	-

A partir de les dades geomètriques del local s'obté que el seu volum val $20 \cdot 12 \cdot 5 = 1.200 \text{ m}^3$ i la seva superfície és la suma de la del sostre ($20 \cdot 12$) més la del terra, que és idèntica, més la de les parets laterals, que val $2(20 + 12) \cdot 5$, i totalitza 800 m^2 .

L'ordre dels càlculs, que es mostren en la taula 5, és el següent:

1) Es calcula el coeficient d'absorció mitjà amb la fórmula: $\alpha_m = 1 - e^{\frac{-0,161V}{TS}}$

2) Es calcula el valor inicial de $\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i$, que val $\alpha_m S$, en què S és la superfície total del local (fórmula (3)).

3) Es calcula el valor inicial de R (fórmula (10)).

4) Es calcula el valor final de $\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i$ tenint en compte que és igual a l'inicial més el producte αS dels panells que es pengen al sostre i, per tant, s'afegeixen a les superfícies ja existents.

5) Es calcula el valor final del coeficient d'absorció mitjà amb el valor obtingut per al nou $\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i$

i tenint en compte que la superfície del local ha augmentat 300 m^2 en penjar els panells.

6) Es calcula el valor final de R .

7) Utilitzant la fórmula (10) es calcula la diferència entre el nivell de pressió acústica del pintor suposant que treballa a un metre de la font sonora. Tingueu en compte que, encara que no es coneix el nivell de potència de la font, L_w , en fer la resta aquest valor desapareix.

8) La mateixa cosa per a l'ajudant suposant que treballa a 5 metres.

9) A continuació, amb la fórmula (3) calculem la distància crítica abans i després d'instal·lar els panells. Veiem que se situa prop de 2 metres abans de la modificació i de 5 metres després, la qual cosa explica que la disminució del nivell de pressió acústica sigui molt petita per al pintor i força superior per a l'ajudant.

10) Finalment, calculem els nivells globals de soroll per al pintor i l'ajudant, que seran els que hi havia inicialment menys el que han disminuït. S'observa que per al pintor el nivell global ha disminuït prop d'1 dB, mentre per a l'ajudant el descens ha estat de més de 5 dB.

11) Si s'hi aplica la correcció del filtre A, el pintor ha passat de 89,2 dBA a 88,1 dBA i l'ajudant de 85,2 dBA a 80,2 dBA.

Taula 5

Freqüència bandes d'octava (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000	Global
Coefficient d'absorció mitjà abans del tractament	0,10	0,05	0,08	0,11	0,14	0,18	
Valor inicial de $\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i$	76,58	39,25	61,88	91,00	112,08	145,83	
R inicial	84,69	41,28	67,06	102,67	130,34	178,34	
Valor final de $\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i$	127,58	189,25	286,88	361,00	367,08	385,83	
Coefficient d'absorció mitjà després del tractament	0,12	0,17	0,26	0,33	0,33	0,35	

Freqüència bandes d'octava (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000	Global
R final	104,96	166,24	282,25	390,79	400,67	432,21	
Diferència L_p pintor a 1 m	-0,35	-1,52	-1,02	-0,66	-0,48	-0,30	
Diferència L_p ajudant	-1,53	-5,75	-5,12	-4,15	-3,32	-2,36	
Distància crítica abans	1,84	1,28	1,64	2,03	2,28	2,67	
Distància crítica després	2,05	2,58	3,36	3,95	4,00	4,16	
L_p final pintor	92,65	93,48	84,98	79,34	74,52	70,70	96,5
L_p final ajudant	86,47	86,25	75,88	69,85	65,68	61,64	89,6

Taula 6. Resum de resultats

	Pintor		Ajudant	
	Nivell global, dB	Nivell dB A	Nivell global, dB	Nivell dB A
Abans	97,6	89,2	93,8	85,2
Després	96,5	88,1	89,6	80,2

6. Transmissió del soroll

Molt sovint per a aconseguir la reducció del soroll en un punt determinat (en el nostre cas, un lloc de treball) es recorre a interposar entre aquest punt i la font de soroll una partició sòlida, com una paret. En aquest cas, es defineix l'índex d'aïllament de la paret (IA) com la diferència entre els nivells de pressió acústica existents a banda i banda de la paret:

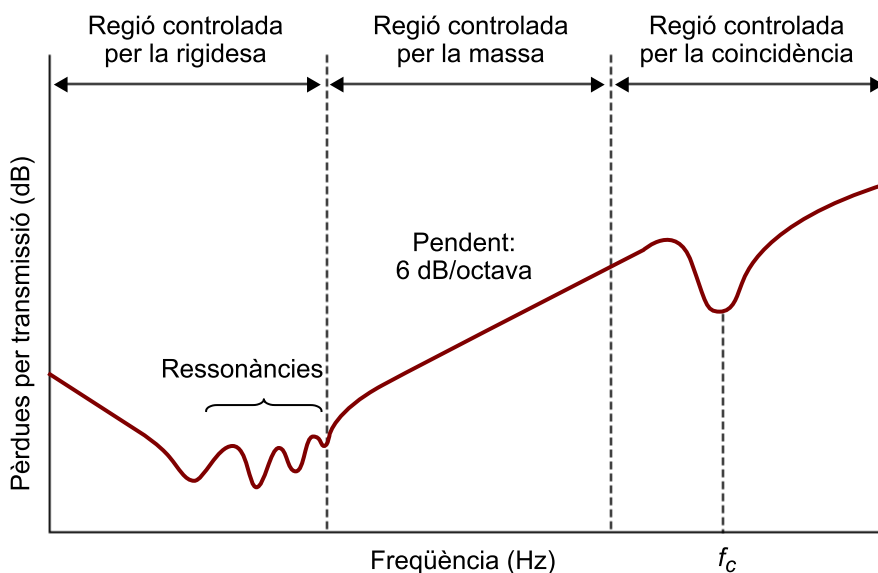
$$IA = L_{p1} - L_{p2}$$

en què L_{p1} i L_{p2} són, respectivament, els nivells de pressió acústica a un costat i a l'altre de la paret. IA es mesura, doncs, en decibels, que són les unitats de L_{p1} i L_{p2} . Els materials que mostren índexs d'aïllament elevats són densos i sense porus, en contrast amb els materials lleugers i porosos habitualment usats per a **absorbir** el soroll.

6.1. Aïllament d'una paret simple

L'índex d'aïllament d'una paret depèn dels materials dels quals està construïda i de la freqüència del so. En la figura 28 es mostra l'aspecte general de la relació entre l'índex d'aïllament d'una paret simple (construïda d'un sol material) i la freqüència. S'hi observen tres zones o regions.

Figura 28. Variació de l'índex d'aïllament d'una paret amb la freqüència



Per a **freqüències baixes** l'aïllament de la paret està controlat bàsicament per la seva rigidesa, i disminueix amb la freqüència fins que s'entra en una zona en la qual es produeixen fenòmens denominats **ressonàncies**. En higiene in-

dustrial aquesta zona no té interès perquè normalment no s'estén més enllà de 100 Hz i aquestes freqüències, com que són molt penalitzades pel filtre A, no tenen interès.

Per a **freqüències intermèdies** es troba l'anomenada **regió controlada per la massa**, en la qual l'índex d'aïllament augmenta a raó de 6 decibels per octava, és a dir, cada vegada que es duplica la freqüència. En aquesta zona l'índex d'aïllament en dB és determinat per l'expressió coneguda com a **lleï de la massa**:

$$IA = 20 \cdot \log(fm_s) - 47,3 \quad (24)$$

en què f és la freqüència en Hz, i m_s és la massa superficial del material en kg/m^2 . La massa superficial és la massa d'un metre quadrat de paret, que com és obvi val:

$$m_s = dt$$

en què d és la densitat del material expressada en kg/m^3 i t el seu gruix en metres.

La lleï de la massa mostra que l'índex d'aïllament a una freqüència determinada augmenta en augmentar la massa superficial de la paret, de manera que, cada vegada que es duplica, l'índex d'aïllament augmenta 6 dB. Per això té aquest nom de lleï de la massa: com més massa, més aïllament.

El creixement regular de l'índex d'aïllament en 6 dB cada vegada que es duplica la freqüència, acaba de manera relativament brusca quan s'entra a la tercera regió: la **regió controlada per la coincidència**. Quan s'assoleix una freqüència determinada el valor de la qual depèn del material del qual està construïda la paret, l'índex d'aïllament experimenta una caiguda brusca de la qual es va recuperant lentament per a freqüències superiors a la de coincidència.

El fenomen de la coincidència és complex i la seva explicació detallada requereix anàlisis físiques que no entren en l'àmbit d'aquest text, però farem un símil per explicar per què certs fenòmens no es produeixen de cap manera per sota de certs límits però, un cop superats, tenen lloc sense limitacions.

El joc del billar americà consisteix a introduir les boles de billar als forats de la taula. Si juguem amb boles amb diàmetre superior al dels forats, resultarà impossible introduir-les: cap no passarà pel forat. En canvi, passaran totes les boles el diàmetre de les quals sigui inferior al del forat, a partir de les que solament són lleugerament més petites que aquest.

En el cas de la paret, el que fa que aquesta tingui més o menys aïllament és la capacitat de les ones sonores per a fer-la vibrar: com més vibració, menys aïllament i viceversa. Encara que a la paret no hi ha forats, el seu comportament és tal que les ones sonores de freqüència inferior a un valor determinat no són capaces d'induir-hi una vibració important, però a partir d'un cert valor (**la freqüència de coincidència**) aquesta capacitat augmenta bruscament i es manté en gran manera per a totes les freqüències superiors.

Per a valors de la freqüència iguals o superiors a la freqüència de coincidència l'índex d'aïllament és determinat en dB per l'expressió següent:

$$IA = 20 \log(f_c m_s) + 10 \log(h) + 33,22 \log(f/f_c) - 48 \quad (25)$$

en què f_c és la freqüència crítica del material i h és l'anomenat *factor de pèrdues* del material.

El **factor de pèrdues** és una mesura del fregament intern del material, que produeix dissipació d'energia quan aquest vibra.

Com mostra l'expressió (25), com més gran sigui el factor de pèrdues, més gran serà l'índex d'aïllament. Igualment, de l'expressió (23) es dedueix que, **per sobre de la freqüència de coincidència**, en duplicar la freqüència l'índex d'aïllament augmenta 10 dB.

La freqüència de coincidència val:

$$f_c = \frac{k}{t} \quad (26)$$

en què k és una constant que depèn el material i t és el gruix de la paret. Habitualment els manuals donen el valor de k expressat en Hz · m o Hz · mm. En la taula 7 es donen els valors de la densitat, el factor de pèrdues i k per a alguns materials comuns.

Taula 7. Propietats rellevants d'alguns materials amb relació al seu aïllament acústic

Material	Densitat (kg/m ³)	k (mm · Hz)	Factor de pèrdues
Alumini	2.700	13.000	0,001
Maó massís	2.200	16.000- 26.000	0,01
Formigó massís	2.300	18.500	0,01
Ciment (5 cm) a banda i banda d'una taula	1.500	32.500	0,01
Maó buit (15 cm)	750	31.000	0,01
Bloc buit de formigó	1.100	21.000	0,015

Material	Densitat (kg/m³)	k (mm · Hz)	Factor de pèrdues
Bloc ple de sorra	1.700	25.000	
Fusta d'abet	550	9.000	0,04
Fusta contraplacada	600	21.000	0,03
Fusta aglomerada	750	97.500	0,02
Vidre	2.500	15.200	0,01
Acer	7.700	12.500	0,001
Plom	11.000	55.000	0,015

A la pràctica, l'índex d'aïllament es calcula solament per a les freqüències centrals de les octaves normalitzades i s'atribueix el valor calculat a la totalitat de les freqüències contingudes en l'octava.

L'expressió (25) es comença a aplicar per a l'octava que conté la freqüència de coincidència i s'aplica a ella mateixa i a totes les superiors.

A aquest efecte és convenient recordar que una octava la freqüència central de la qual és $f_{central}$ s'estén des de $f_{central}/\sqrt{2}$ fins a $f_{central} \sqrt{2}$. Així, l'octava la freqüència central de la qual és 4.000 Hz s'estén des de 2.829 Hz fins a 5.657 Hz.

Exemple 5

Calcularem l'índex d'aïllament d'un panell d'acer de 3 mm de gruix i d'un panell de fusta aglomerada de 19 mm de gruix.

Taula 8

	Acer	Fusta aglomerada
Massa superficial	$7.700 \times 0,003 = 23,1 \text{ kg/m}^2$	$750 \times 0,019 = 14,25 \text{ kg/m}^2$
Freqüència de coincidència	$12.500 / 3 = 4.167 \text{ Hz}$	$97.500 / 19 = 5.132 \text{ Hz}$

La fórmula (25) s'aplicarà en el cas de l'acer a partir de l'octava la freqüència central de la qual és 4.000 Hz, ja que la freqüència crítica de 4.167 Hz està compresa en aquesta octava, amb la qual cosa s'obtenen els resultats de la taula 9.

Taula 9

Freqüència (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
Acer (3 mm)	22	28	34	40	46	21	31

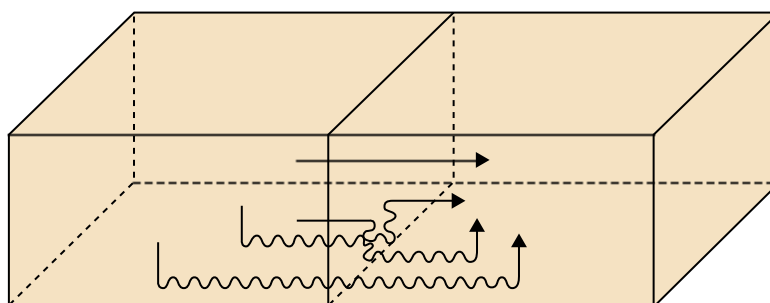
Igualment, en el cas de la fusta la fórmula (14) s'aplicarà a partir de l'octava de 4.000 Hz, ja que la seva freqüència crítica hi està compresa.

Taula 10

Freqüència (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
Acer (3 mm)	18	24	30	36	42	29	39

Una de les raons per a això és que les fórmules (24) i (25) pressuposen que el so es transmet d'un costat a un altre de la paret exclusivament **a través** de la mateixa paret. A la pràctica, això només seria cert per a una paret de grandària infinita. En les situacions reals la transmissió es produeix també per les parets limítrofes (figura 29), cosa que dóna lloc a transmissions paràsites que s'afegeixen a la directa, que és el valor que s'obté amb les fórmules (24) i (25). Atesa la dificultat de calcular les transmissions paràsites, els resultats obtinguts amb aquestes fórmules s'han de considerar simplement bones aproximacions al resultat real.

Figura 29. Transmissió directa i transmissió paràsita

**Nota**

En general, en aquest tipus de problemes els resultats es donen sense decimals, ja que l'exactitud de les fórmules disponibles no justifica més precisió.

6.2. Parets dobles

Un tipus de construcció molt utilitzat (per exemple, en finestres) és el d'una paret doble amb una separació intermèdia d'aire. En aquest cas, l'aïllament global aconseguit depèn de l'índex d'aïllament de cadascun dels panells i també del comportament de la capa d'aire intermèdia.

El comportament del conjunt depèn de la freqüència. Per a freqüències baixes s'aplica la llei de la massa al conjunt d'ambdues plaques (funcionen com una de sola); en aquest cas, doncs, s'aplica l'equació (24) i es pren com a massa superficial la suma de les masses superficials d'ambdues plaques. **Freqüències baixes** significa freqüències inferiors al valor f_0 , que és determinat per l'expressió:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \left[\frac{\rho}{d} \left(\frac{1}{m_{s1}} + \frac{1}{m_{s2}} \right) \right]^{1/2} \quad (27)$$

en què c = velocitat del so a l'aire en m/s, ρ = densitat de l'aire en kg/m^3 , m_{s1} i m_{s2} densitats superficials respectives en kg/m^2 i d = separació entre les plaques en m.

Per a freqüències intermèdies, entre f_0 i $c/2\pi d$, l'índex d'aïllament val:

$$IA = IA_1 + IA_2 + 20 \log (4\pi f d / c)$$

en què IA_1 i IA_2 són els aïllaments individuals de cadascuna de les dues plaques.

Finalment, quan f és més gran que $c/2\pi d$ l'índex d'aïllament del conjunt val:

$$IA = IA_1 + IA_2 + 10 \log \left[\frac{4}{1 + (2/\alpha)} \right] \quad (28)$$

en què α és el coeficient d'absorció de les plaques (suposades iguals).

6.3. Parets compostes

Habitualment les parets no estan compostes d'un sol material, sinó de diversos: hi ha portes, finestres i obertures diverses, cadascuna de les quals fabricada d'un material diferent. L'energia total transmesa per la paret és la suma de les energies transmeses per cadascun dels components elementals, cadascun dels quals té un índex d'aïllament (IA_i) i una superfície (S_i). En aquestes condicions l'índex d'aïllament global de la paret (IA_G) val:

$$IA_G = 10 \log \frac{\sum S_i}{\sum \frac{S_i}{10^{IA_i/10}}} \quad (29)$$

Exemple 6

A una paret que té un índex d'aïllament de 20 dB s'hi practica un orifici que ocupa el 10% de la seva superfície. En calculem el nou índex d'aïllament.

Si la superfície original de la paret era S , ara s'ha convertit en una paret composta en la qual el material original ocupa 0,9 S i el forat, 0,1 S . D'altra banda, un forat té un índex d'aïllament igual a zero, ja que deixa passar tota l'energia que hi arriba.

Aplicant la fórmula (29) tindrem:

$$IA_G = 10 \log \frac{0,9S + 0,1S}{\frac{0,9S}{10^{20/10}} + \frac{0,1S}{10^{0/10}}} = 10 \log \frac{S}{\frac{0,9S}{10^2} + \frac{0,1S}{1}} = 10 \log \frac{1}{0,009 + 0,1} = 9,6 \text{ dB} \quad (30)$$

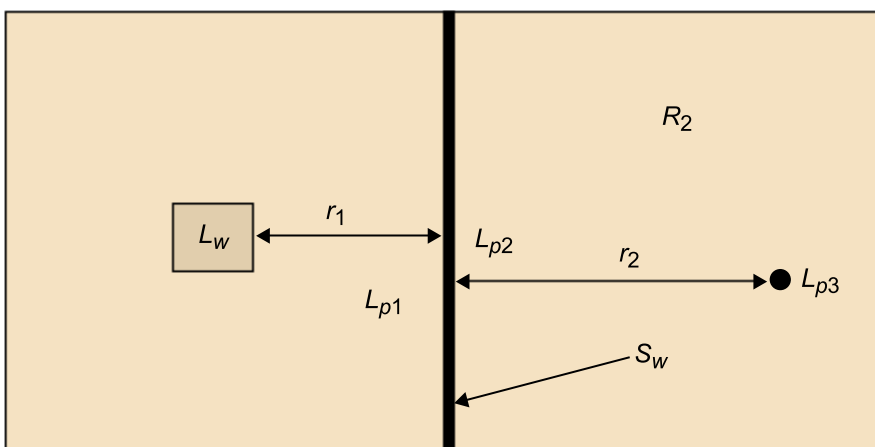
S'observa, doncs, que un forat relativament petit redueix notablement l'índex d'aïllament.

Quan es vol aïllar el soroll mitjançant una paret, és molt important que no hi hagi orificis, esquerdes, juntes, etc. pels quals es pugui "colar" el soroll, ja que la seva presència, fins i tot en petita proporció, disminueix molt l'índex d'aïllament.

6.4. Aïllament entre locals

Suposem (figura 30) un local 1 (a l'esquerra de la figura) on hi ha una font de soroll que emet una potència sonora L_w que és a una distància r_1 d'una paret que separa el local d'un altre de contigu (local 2). La constant d'aquest local val R_1 .

Figura 30. Aïllament entre locals



Part del soroll emès per la font sonora es transmetrà al local 2 per la paret; l'altre local (a la dreta en el dibuix) té unes característiques absorbents conegudes, i la constant del local és R_2 . La paret de separació té una superfície S_w i el seu índex d'aïllament val IA .

En aquestes condicions, i sense considerar la transmissió paràsita, el nivell de pressió acústica en un punt del local 2 situat a una distància r_2 a la paret val:

$$L_{p2} = L_w - 10 \log R_1 + 10 \log (1 + 4S_w/R_2) - IA + 0,1$$

per a $r_2 < (S_w/2\pi)^{1/2}$.

Per a distàncies superiors, L_{p2} és determinat per:

$$L_{p3} = L_w - 10 \log R_1 + 10 \log [(S_w/2\pi r_2) + (4S_w/R_2)] - IA + 0,1$$

Per a reduir el soroll al local de la dreta el dissenyador té diverses opcions:

a) Augmentar l'absorció al local 1, on es troba la font sonora; d'aquesta manera, n'augmentarà la constant R_1 . Això farà disminuir el nivell de soroll al local receptor 2, en augmentar el valor del terme $-10 \log R_1$. Un augment del coeficient d'absorció mitjà de 0,1 a 0,2, per exemple, augmentarà R_1 un factor 2,25, cosa que disminuirà el nivell de pressió acústica al local 2 uns 3,5 dB.

b) Augmentar la constant del local 2, R_2 , tractant-ne acústicament les superfícies, per exemple. Si la resta dels factors romanen iguals, augmentar el coeficient d'absorció mitjà de 0,1 a 0,2 al local 2 augmentarà la constant del local un factor 2,25 i disminuirà el nivell de soroll aproximadament 1,5 dB prop de la paret de separació i uns 3,5 dB lluny d'aquesta paret.

c) Augmentar l'índex d'aïllament de la paret de separació entre ambdós locals. En moltes situacions, aquesta és la solució que aporta una reducció de soroll més significativa. Per exemple, si es duplica el gruix de la paret, la pèrdua per transmissió s'incrementarà 6 dB (a freqüències en les quals sigui vàlida la llei de la massa) i el nivell de soroll al local 2 disminuirà 6 dB.

d) El nivell de soroll al local 2 es pot reduir també reduint la potència sonora de la font col·locada al local 1, si bé això pot ser que no sigui possible de fer.

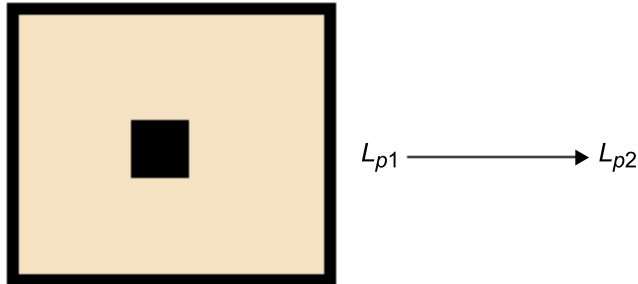
6.5. Cabines acústiques

És una pràctica usual construir tancaments o cabines on s'instal·len màquines o focus de soroll amb la intenció de disminuir el nivell sonor percebut en les proximitats de la màquina.

En aquest cas, la variable que millor defineix l'eficàcia de la cabina no és el seu aïllament, sinó la **pèrdua per inserció** (IL^2), que es defineix com la diferència dels nivells sonors abans i després d'instal·lar la cabina o el tancament (figura 31).

⁽²⁾Sigla d'insertion loss.

Figura 31. Cabina acústica i pèrdua per inserció



Per a **cabines relativament grans** on es compleixi la condició $f(V_0)^{1/3}/c > 1$, en què f és la freqüència, V_0 el volum d'aire a l'interior de la cabina en metres cúbics i c la velocitat del so en m/s, la relació entre la pèrdua per inserció i l'aïllament específic del panell amb el qual es construeix la cabina és determinada per l'expressió:

$$IL = IA + 10 \log \alpha_m$$

en què IL és la pèrdua per inserció (dB), IA l'índex d'aïllament dels panells amb els quals està construïda la cabina (dB) i α_m el coeficient d'absorció acústica mitjà de l'interior del tancament.

Atès que el valor màxim de α_m és la unitat i el logaritme d'un és zero, de l'expressió anterior es dedueix que quan l'interior de la cabina sigui infinitament absorbent ($\alpha_m = 1$) la pèrdua per inserció igualarà l'índex d'aïllament de les parets de la cabina. En tots els altres casos, en els quals $\alpha_m < 1$, $\log \alpha_m$ serà negatiu i això implicarà que la pèrdua per inserció serà **inferior** a l'índex d'aïllament de la cabina. Com que el logaritme d'un nombre positiu proper a zero és negatiu i molt gran, per a valors de α_m molt petits, la pèrdua per inserció teòricament podria arribar a ser negativa, és a dir, haver-hi més soroll a l'exterior que abans d'instal·lar la cabina.

Així, doncs, perquè un tancament proporcioni una disminució important del nivell sonor és imprescindible que tingui una absorció acústica interna molt elevada; en cas contrari, la seva eficàcia pot ser molt baixa (IL petit), encara que el panell tingui un aïllament molt elevat.

L'explicació qualitativa d'aquest fet és simple; en col·locar-hi el tancament, el nivell sonor a les proximitats de la font augmentarà, ja que es col·loca en un local de dimensions reduïdes, i l'aïllament del panell actua sobre el nivell sonor incrementat, no sobre el nivell sonor existent abans de col·locar-hi el tancament. La necessitat que els tancaments aïllants disposin d'una bona absorció de so és la causa que s'anomenin aquests tancaments **cabines insonoritzades**.

Exemple 7

La taula 11 il·lustra el càlcul que s'ha de fer per a determinar el nivell sonor que hi haurà a les proximitats d'una màquina coneixent el nivell sonor inicial, l'aïllament específic del tancament i l'absorció acústica del seu interior. Els càlculs s'han de fer en cada banda d'octava i posteriorment addicionar els nivells en cada banda per a calcular-ne el nivell global.

Taula 11

Freqüència central banda d'octava	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	Global
Nivell inicial (dada) L_e (dB)	82	85	89	91	95	83	75	98 dB
Ponderació A (dB)	-16	-9	-3	0	+1	+1	-1	
Nivell ponderat A	66	76	86	91	96	84	74	97 dBA
Índex d'aïllament del panell (dada) IA (dB)	31	41	46	59	64	56	58	
Superfície del tancament (dada) S (m^2)	18	18	18	18	18	18	18	
Coefficient d'absorció mitjà de l'interior (dada) α_m	0,44	0,56	0,67	0,89	0,94	0,94	0,89	
$IL = IA + 10 \log(\alpha_m)$	27	38	44	58	63	55	57	
Nivell sonor final $L_r = L_e - IL$	55	47	45	33	32	28	18	56 dB
Nivell ponderat amb l'escala A	39	38	42	33	33	29	17	42 dBA

Reducció del nivell sonor en dBA = 97 - 42 = 55 dBA.

Les cabines que no es poden considerar "grans" es comporten d'una manera més complexa; en aquest cas, el factor determinant de la seva pèrdua per inserció és la rigidesa dels panells amb els quals estan construïdes. En tot cas, les cabines que es troben a la pràctica industrial compleixen en la seva immensa majoria la condició que hem esmentat perquè es puguin considerar "grans".

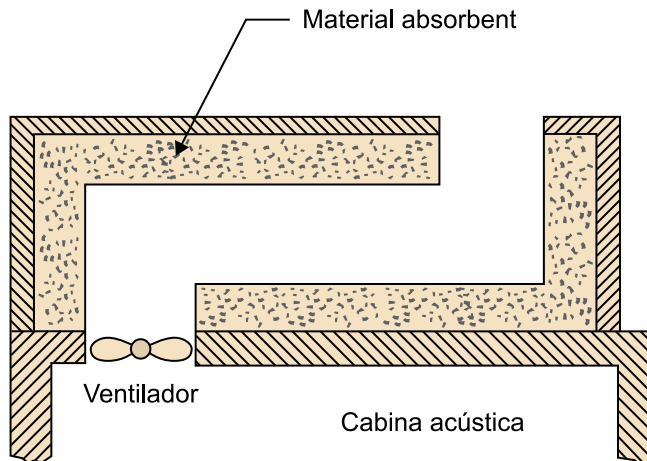
A la pràctica, les cabines insonoritzades no poden ser absolutament hermètiques, sinó que són necessaris orificis per a l'entrada i sortida de l'aire per a ventilar la maquinària, entrada de serveis, entrada i sortida de peces, etc. En aquesta situació l'aïllament global de la cabina pot ser molt baix.

Per a solucionar aquest problema s'instal·len silenciadors d'absorció en tots els conductes de comunicació entre l'interior de la cabina i l'exterior. Un silenciador d'absorció (figura 32) té l'aspecte d'un tram de conducte en el qual la superfície interior s'ha folrat amb un material absorbent de so (normalment materials porosos com fibra de vidre o escuma de poliuretà).

Lectures recomanades

Per al càlcul de la pèrdua per inserció d'un silenciador s'ha de consultar la bibliografia.

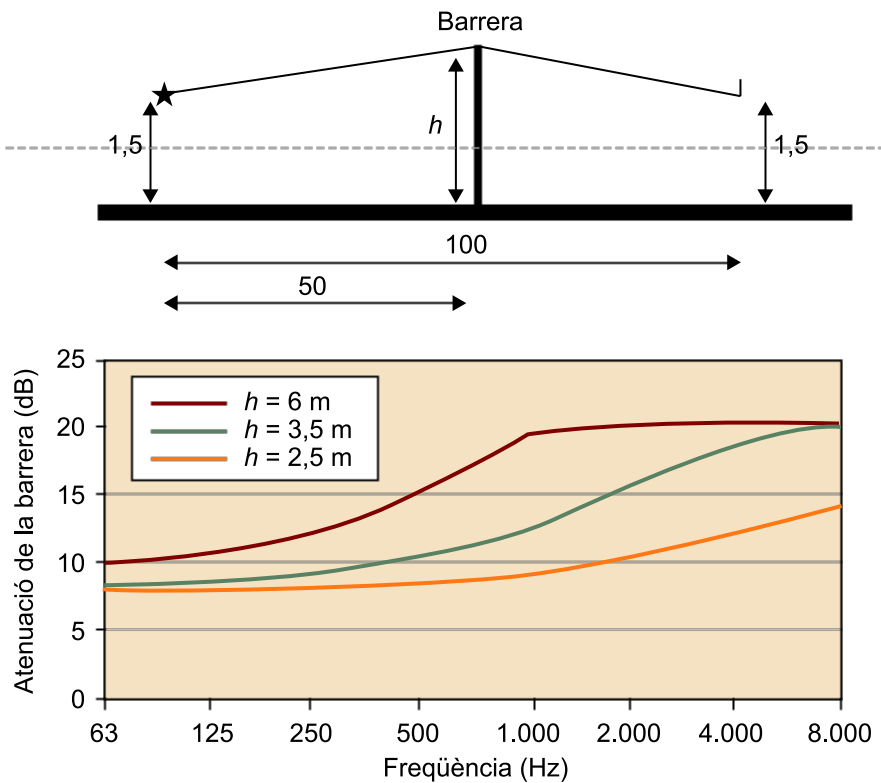
Figura 32. Esquema típic d'un conducte de ventilació en una cabina acústica



7. Pantalles acústiques

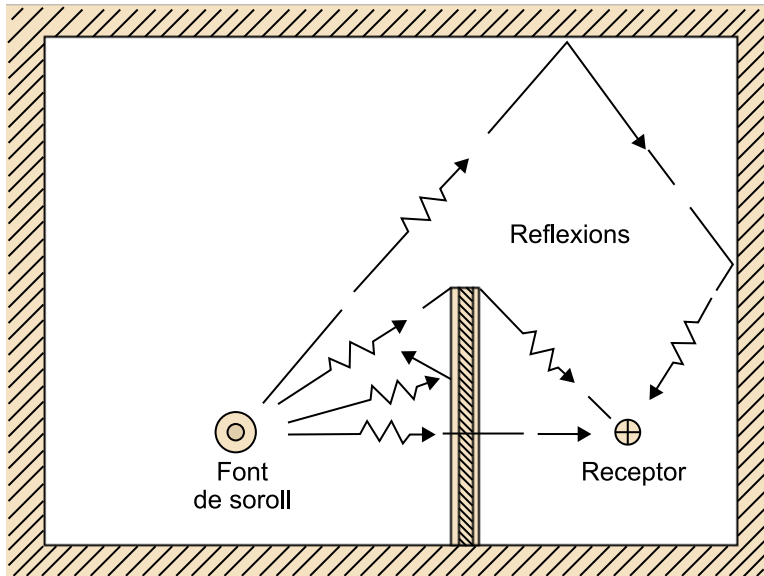
Les pantalles o barreres acústiques s'usen habitualment amb una eficàcia considerable per a controlar el soroll a exteriors, a prop de fonts de soroll associades al trànsit d'automòbils, trens o avions. Les reduccions de soroll que s'aconsegueixen poden ser de 5 a 20 dB aproximadament, segons les circumstàncies. En la figura 33 es donen, a tall d'exemple, les dades de reducció de soroll en un receptor situat a 100 metres de la font quan s'hi instal·la una barrera equidistant d'ambdós (supòsits situats a la mateixa altura), segons l'alçària de la barrera.

Figura 33. Valors típics d'atenuació d'una barrera a l'aire lliure



En interiors, no obstant això, les atenuacions esperables són inferiors, ja que a causa de l'efecte de les reflexions que tenen lloc als paraments del local, l'atenuació es produeix solament en el so directe (figura 34).

Figura 34. Reflexions en una barrera situada a l'interior



Quan les barreres estan col·locades en interiors, la seva atenuació depèn de les característiques absorbents del local (coeficient d'absorció mitjà), de l'índex d'aïllament de la mateixa barrera, del coeficient d'absorció de la superfície de la barrera i de la seva ubicació respecte a la font i el receptor. Les fórmules per al càlcul s'han recollit en la figura 35 i els paràmetres geomètrics de referència en la figura 36.

Càlcul de l'efecte d'una barrera en un local tancat

$$R_b = \frac{aS_0 + S_b(\alpha_1 + \alpha_2)}{1 - \alpha - (S_b/S_0)(\alpha_1 + \alpha_2)}$$

$$N < 12,7 \quad a_b = \frac{[\tanh(2\pi N)]^{1/2}}{2\pi^2 N}$$

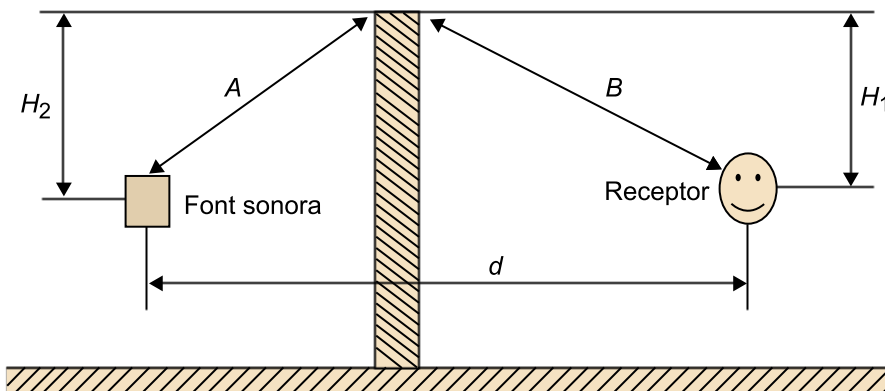
$$N \geq 12,7 \quad a_b = 0,004$$

$$N = \frac{2f(A+B-d)}{c}$$

$$a_t = 10^{-IA/10}$$

$$L_p = L_w + 10 \log \left(4/R_b + \frac{Q(a_b + a_t)}{4\pi(A+B)^2} \right) + 0,1$$
(31)

Figura 35. Paràmetres geomètrics que cal tenir en compte en el càlcul d'una barrera



Primer, es calcula el paràmetre R_b , que representa la constant del local modificada en introduir la barrera. En el seu càlcul intervé el coeficient mitjà d'absorció del local, α_m , els coeficients d'absorció d'ambdós costats de la barrera, α_1 i α_2 (que poden ser iguals o diferents), la superfície total del local, S_o , i la superfície de la barrera, S_b .

Després, es calcula N , un paràmetre anomenat *nombre de Fresnel*, que està relacionat amb la geometria de la ubicació de la barrera (A , B i d), la freqüència del so i la velocitat del so, c . Depenent de si N és més gran o més petit que 12,7 s'utilitza una o una altra de les fórmules indicades per a calcular el valor del paràmetre intermedi a_b . Per al càlcul de a_b , cal calcular la funció tangent hiperbòlica (\tanh), que es troba en les calculadores científiques o en els fulls de càlcul.

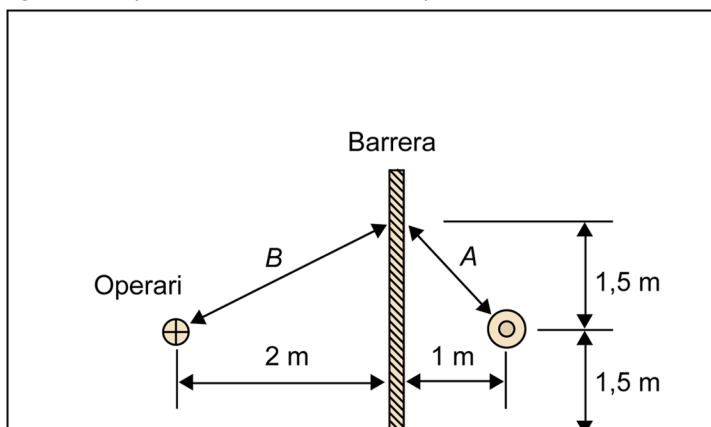
A continuació, es calcula el paràmetre intermedi a_t , relacionat amb l'índex d'aïllament IA de la barrera, que es calcula segons el material de què està construïda amb els mètodes que hem vist.

Finalment, es calcula el valor de la pressió acústica, L_p , en el punt on se situa el receptor fent servir la fórmula de la part inferior de la figura 35, en la qual intervé, lògicament, el nivell de potència de la font sonora.

Exemple 8

Una màquina té un nivell de potència de 109 dB en la banda d'octava de 1.000 Hz. És en un local de 30×30 metres de base i 5 metres d'alçària, el coeficient d'absorció mitjà de la qual val 0,35. El coeficient de directivitat val 2, i l'operari és a 3 metres de la màquina. Es vol reduir el nivell sonor percebut per l'operari instal·lant una barrera de 5 metres de llarg per 3 d'alt situada a 1 metre de la màquina (figura 37). Tant el centre de la màquina com l'orella de l'operari es troben a 1,5 metres del terra. L'índex d'aïllament de la barrera en l'octava de 1.000 Hz val 31 dB, i el seu coeficient d'absorció al costat més proper a l'operari val 0,9, i a l'altre costat, 0,2.

Figura 37. Disposició de la barrera de l'exemple



Començarem determinant l'àrea del local:

$$S_o = 2(30 + 30) \cdot 5 + 2 \cdot 30 \cdot 30 = 2.400 \text{ m}^2$$

La constant del local abans d'instal·lar-hi la barrera val, segons la fórmula (10):

$$R = (0,35 \cdot 2.400)/(1 - 0,35) = 1.292 \text{ m}^2$$

El nivell de pressió acústica en el punt on es troba l'operari abans d'instal·lar-hi la barrera valdrà, segons la fórmula (20):

$$L_{p0} = 109 + 10 \log \left[\frac{4}{1.292} + \frac{2}{(4\pi)(3)^2} \right] = 92,2 \text{ dB} \quad (32)$$

A continuació, calcularem R_b :

$$R_b = \frac{0,35 \cdot 2.400 + 5 \cdot 3(0,90 + 0,20)}{1 - 0,35 - \left(\frac{15}{2.400}\right)(0,90 + 0,20)} = 1.332 \text{ m}^2 \quad (33)$$

Les distàncies que cal tenir en compte valen, segons càlculs geomètrics elementals:

$$\begin{aligned} A &= (1^2 + 1,5^2)^{1/2} = 1,8028 \text{ m} \\ B &= (2^2 + 1,5^2)^{1/2} = 2,5000 \text{ m} \\ A + B - d &= 1,8028 + 2,5000 - 3 = 1,3028 \text{ m} \end{aligned}$$

El nombre de Fresnel valdrà, considerant que la velocitat del so val 347 m/s:

$$N = 2 \cdot 1.000 \cdot 1,3028/347 = 7,509$$

Com que aquest valor és inferior a 12,7 per al càlcul de a_b tindrem:

$$a_b = \frac{[\tanh(2 \cdot 3,1416 \cdot 7,509)]^2}{2 \cdot 3,1416^2 \cdot 7,509} = 0,006747 \quad (34)$$

Ara calcularem a_t :

$$a_t = 10^{-31/10} = 0,000794$$

Amb la qual cosa ja podem calcular el nivell de pressió acústica després de la instal·lació de la barrera:

$$L_{p1} = 109 + 10 \log \left[\frac{4}{1.332} + \frac{2(0,006747 + 0,000794)}{(4\pi)(1,8028 + 2,5)^2} \right] = 83,9 \text{ dB} \quad (35)$$

S'ha aconseguit, doncs, una disminució de 8,3 dB en l'octava de 1.000 Hz.

Exercicis d'autoavaluació

Exercicis

1. Un local fa $6,2 \times 6$ m de base i 3,1 m d'alçària. El sostre i les parets són de lliscat de guix, i el terra de terratzo.

En un racó del local hi ha una màquina el coeficient de directivitat de la qual val 4 i l'espectre de potència de la qual es presenta en la taula 12, expressat en dB:

Taula 12

Freqüència (Hz)					
125	250	500	1.000	2.000	4.000
52	57	60	56	50	43

Determineu el nivell de pressió acústica a 6 m de la màquina.

2. En una fàbrica de paper s'utilitza una màquina sorollosa que es troba dins d'un local de 900 m^2 de superfície i coeficient d'absorció mitjà de 0,05. A 1.000 Hz, la màquina té un nivell de potència de 105 dB i un factor de directivitat de 2, és a 4 m de la paret d'una sala de control la superfície de la qual és de 100 m^2 i el seu coeficient mitjà d'absorció de 0,35. L'aïllament de la paret que separa ambdós locals és de 30 dB, i la superfície d'aquesta paret és de 16 m^2 . L'operador és a 1,5 m de la paret. Calculeu el nivell de pressió acústica a 1.000 Hz al lloc de treball de l'operador.

3. A 1.000 Hz una màquina emet una potència de 114 dB. La màquina està col·locada en un local de 20×20 m de base i 4 m d'alçària, amb un coeficient mitjà d'absorció, a 1.000 Hz, de 0,051. El factor de directivitat de la màquina val 1. Determineu el nivell de soroll suportat a 1.000 Hz per un operari situat a 3 m de la màquina.

Es vol reduir aquest nivell de soroll col·locant la màquina dins d'una cabina d' $1,8 \times 1,2$ m de base i 1 m d'alçària, amb dues obertures de 300×200 mm. La cabina es construirà amb tauler aglomerat de 235 mm de gruix, recobert interiorment amb un material absorbent. La pèrdua per transmissió del tauler aglomerat a 1.000 Hz és de 19 dB, i el coeficient d'absorció de l'absorbent, a 1.000 Hz, és de 0,63.

Calculeu el nivell de soroll suportat per l'operari a 1.000 Hz, una vegada inserida la cabina. Es considera que el terra de la cabina (que no es recobrirà d'absorbent) no contribueix a la transmissió del soroll i que es tracta d'una cabina de mida gran.

Preguntes obertes

4. En què es diferencia la propagació del soroll en un camp lliure i a l'interior d'un local tancat?
5. Com es distribueix l'energia d'una ona sonora quan aquesta xoca amb la paret d'un local?
6. Per què cal posar una cura especial perquè les vibracions d'un equip sorollós no es transmetin a l'estructura del local?
7. Quin és el tipus d'actuació més adequat quan l'individu que cal protegir es troba relativament lluny de la font de soroll?
8. Quines són les obligacions principals del fabricant d'una màquina amb relació al soroll que produeix?
9. Quin tipus de material s'ha de fer servir per a absorbir preferentment les freqüències altes?
10. Com variarà el temps de reverberació d'un local si se n'augmenta el coeficient d'absorció mitjà?
11. Quin és el significat de la distància crítica?

12. Com varia l'índex d'aïllament d'una paret simple en duplicar-ne el gruix, si som per sota de la seva freqüència crítica?

13. Com varia la freqüència crítica d'una paret simple en duplicar-ne el gruix?

14. Per què és molt important que les cabines acústiques tinguin el mínim possible d'obertures?

15. Per què les pantalles acústiques són més eficaces en exteriors que en interiors?

Elecció múltiple

16. Quina de les opcions següents s'hauria d'intentar **en primer lloc** per a reduir l'exposició al soroll d'un individu que es troba a una distància de la font de soroll inferior a la distància crítica?

- a) Fer servir una cabina acústica per a tancar la màquina.
- b) Fer servir una cabina acústica per a situar-hi l'individu.
- c) Fer servir una pantalla acústica.
- d) Reduir el soroll emès per la font sonora.

17. En quins casos el fabricant d'una màquina té l'obligació legal de proporcionar informació sobre el **nivell de potència** emès per la màquina?

- a) Quan el nivell de pressió acústica d'emissió ponderat A superi, als llocs de treball, 80 dBA.
- b) Quan el nivell de soroll als llocs de treball superi 70 dBA.
- c) Quan el valor màxim de la pressió acústica instantània ponderat C als llocs de treball superi 130 dB.
- d) Sempre.

18. Com modifica el coeficient d'absorció un augment del gruix d'un material absorbent porós enganxat sobre un mur o sostre?

- a) Augmenta el coeficient d'absorció a freqüències altes.
- b) Disminueix el coeficient d'absorció a freqüències altes.
- c) Augmenta el coeficient d'absorció a freqüències baixes.
- d) Disminueix el coeficient d'absorció a freqüències baixes.

19. Per què el vidre d'una finestra té un coeficient d'absorció més alt a freqüències baixes que a freqüències altes?

- a) Perquè és porós.
- b) Perquè es comporta com un panell rígid muntat sobre llates d'empostissar.
- c) Perquè no és porós.
- d) Cap de les anteriors.

20. Quan el coeficient d'absorció mitjà d'un local augmenta, el valor del coeficient del local $R_{\text{m}}...$

- a) augmenta.
- b) disminueix.
- c) no queda afectat.
- d) la variació depèn del temps de reverberació.

21. El temps de reverberació d'un local...

- a) és independent de la freqüència.
- b) varia amb la freqüència.
- c) augmenta amb la freqüència.
- d) disminueix amb la freqüència.

22. En un local tancat, a mesura que ens allunyem d'una font sonora...

- a) augmenta el so directe i disminueix el reflectit.
- b) augmenta el so reflectit i disminueix el directe.
- c) disminueix el so directe però el reflectit roman constant.
- d) disminueixen tant el so directe com el reflectit.

23. En augmentar l'absorció d'un local...

- a) la distància crítica augmenta.
- b) la distància crítica disminueix.
- c) la distància crítica no queda afectada.
- d) la distància crítica pot augmentar o disminuir, però no quedar-se igual.

24. Per sobre de la freqüència de coincidència, en duplicar la freqüència, l'índex d'aïllament d'una paret simple augmenta...

- a) 3 dB.
- b) 6 dB.
- c) 10 dB.
- d) En principi no ha d'augmentar.

25. En canvi, per sota de la freqüència de coincidència, en duplicar la freqüència, l'índex d'aïllament d'una paret simple augmenta...

- a) 3 dB.
- b) 6 dB.
- c) 10 dB.
- d) En principi no ha d'augmentar.

Solucionari

Exercicis d'autoavaluació

1. La superfície total del local és 150,04 m², dels quals 112,84 corresponen a sostre i parets i la resta al terra (37,2 m²).

En la taula 13 es reproduïxen els resultats del full de càlcul usat per a resoldre el problema:

Dades	Frequència, Hz					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
L_w	52	57	60	56	50	43
Coefficients d'absorció						
Lliscat de guix	0,12	0,09	0,07	0,05	0,05	0,04
Formigó, terratzo	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Càlculs ($S_i\alpha_i$)						
Lliscat de guix	13,54	10,16	7,90	5,64	5,64	4,51
Formigó, terratzo	0,37	0,37	0,74	0,74	0,74	0,74
$\sum S_i\alpha_i$	13,91	10,53	8,64	6,39	6,39	5,26
α_m	0,09	0,07	0,06	0,04	0,04	0,04
R (m ²)	15,33	11,32	9,17	6,67	6,67	5,45
L_p (dB)	46,31	52,59	56,48	53,84	47,84	41,71

El nivell global serà 59,9 dB i en dBA, 57,6.

2. La constant del local a la sala on hi ha la màquina val:

$$R = (0,05 \cdot 900) / (1 - 0,05) = 47,37 \text{ m}^2$$

Al costat de la paret de separació, al local on hi ha la màquina, el nivell de pressió acústica valdrà:

$$L_p = 105 + 10 \log [(4 / 47,37) + (2) / [(4\pi)(4)^2]] = 94,7 \text{ dB}$$

A la sala de control la constant del local val:

$$R = (0,35 \cdot 100) / (1 - 0,35) = 53,85 \text{ m}^2$$

Com que l'operador és prop de la paret [distància inferior a $(S/2\pi)^{1/2}$, en què S és la superfície de la paret que separa ambdós locals] el nivell de pressió acústica al lloc de l'operador val:

$$L_p = 94,7 - 30 + 10 \log [(1 / 4) + (16 / 53,85)] = 62,08 \text{ dB}$$

En un punt de la sala de control allunyat de la paret (camp reverberant) el nivell de pressió acústica seria:

$$L_p = 94,7 - 30 + 10 \log [(16 / 53,85)] = 59,43 \text{ dB}$$

3. Superfície del local:

$$2(20 + 20) \cdot 4 + 2 \cdot 20 \cdot 20 = 1.120 \text{ m}^2$$

Constant del local:

$$R = (1.120 \cdot 0,051) / (1 - 0,051) = 60,19 \text{ m}^2$$

Soroll suportat per l'operari abans de col·locar la cabina:

$$L_p = 114 + 10 \log [(4 / 60,19) + (1 / (4\pi) \cdot 3^2)] = 102,9 \text{ dB}$$

Superfície de la cabina recoberta per absorbent:

$$2 \cdot (1,20 + 1,80) \cdot 1 + 1,20 \cdot 1,80 - 2 \cdot 0,3 \cdot 0,2 = 8,04 \text{ m}^2$$

Superfície d'obertures:

$$2 \cdot 0,3 \cdot 0,2 = 0,12 \text{ m}^2$$

Àrea d'absorció de la cabina (els orificis tenen un coeficient d'absorció unitat):

$$0,12 \cdot 1 + 8,04 \cdot 0,63 = 5,185 \text{ m}^2$$

Coefficient mitjà d'absorció:

$$5,185 / (8,04 + 0,12) = 0,6354$$

Índex d'aïllament de la cabina tenint en compte la presència dels orificis (l'índex d'aïllament dels quals és zero):

$$IA = 10 \log \frac{8,04 + 0,12}{\frac{8,04}{10^{19/10}} + \frac{0,12}{10^{0/10}}} = 15,7 \text{ dB}$$

Pèrdua per inserció (*insertion loss*):

$$IL = 10 \log (0,6354) + 15,7 = -1,96 + 15,7 = 13,74 \text{ dB}$$

Nivell de pressió al lloc de treball a 1.000 Hz:

$$102,9 - 13,74 = 89,16 \text{ dB}$$

4. En el fet que a l'interior d'un local es produeixen reflexions, que en canvi no tenen lloc en un espai obert.
5. Una part es reflecteix, una altra és absorbida pel material i una altra travessa el tancament (es transmet).
6. Perquè les vibracions de l'estructura són gairebé impossibles de controlar i, a més, es poden transmetre a punts bastant allunyats, i crear molèsties a veïns o altres persones completament alienes a la font de soroll.
7. Millorar l'absorció del local pot aportar millores considerables si s'està prou allunyat de la font sonora, però no si s'hi és a prop.
8. Ha de procurar que emeti el mínim soroll possible i ha d'informar l'usuari del nivell de soroll que es produirà durant l'ús.
9. Els materials porosos són l'elecció adequada.
10. La fórmula (9) indica que si a_m augmenta, el temps de reverberació tendirà a disminuir, la qual cosa és lògic ja que com més absorció menys reflexions i, per tant, menys reverberació.
11. Indica la "frontera" aproximada entre la zona en la qual domina el so directe i la zona en la qual domina el so reflectit (figura 27).
12. Com que en duplicar-ne el gruix se'n duplicarà la massa superficial, segons la llei de la massa l'índex d'aïllament augmentarà 6 dB.
13. Com que el producte del gruix per la freqüència crítica és una constant, en duplicar el gruix la freqüència crítica es reduirà a la meitat.

14. Són dos requeriments independents. Els orificis redueixen molt l'índex d'aïllament de qualsevol paret. D'altra banda, si la cabina és interiorment poc absorbent, el nivell de soroll a l'interior pot ser molt més alt que abans de col·locar-hi la cabina, la qual cosa en podria reduir molt la capacitat aïllant.

15. Perquè als locals tancats el soroll que arriba a un punt és en part directe i en part reflectit. En col·locar una pantalla entre el focus i el receptor, es redueix el so directe, però no el reflectit. A l'exterior, en canvi, no hi ha soroll reflectit, per la qual cosa la reducció de la pantalla, que actua solament sobre el directe, és proporcionalment més elevada.

16. d

17. a

18. c

19. b

20. a

21. b

22. c

23. a

24. c

25. b

Bibliografia

Barron, R. F. (2003). *Industrial noise control and acoustics*. Nova York: Marcel Dekker.

Beranek, L. L. (1992). *Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications*. Nova York: John Wiley & Sons.

Irwin, J. D.; Graf, E. R. (1979). *Industrial noise and vibration control*. Nova Jersey: Prentice-Hall.

Miller, R. K.; Montone, W. V. (1988). *Handbook of Acoustical Enclosures and Barriers*. Atlanta: Fairmont Press, Inc.

Recuero López, M. (ed.) (1991). *Ingeniería acústica*. Madrid: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones.

Pàgines web d'interès

[Curso de Acústica](#)

[HiperPhysics](#)

[Acoustics and Vibration Animations](#)

[Acoustics-noise.com](#)

[Reverberation Time Demonstration](#)

