

---

# Condicionament acústic

---

## Materials, recintes i disseny acústic

PID\_00221942

Pere Artís Gabarró

---

Temps mínim de dedicació recomanat: 5 hores

---



**Pere Artís Gabarró**

Enginyer de telecomunicació per la UPC, especialista en acústica, soroll i vibracions. Després d'haver treballat a Applus, Enginyeria i Arquitectura La Salle i en diferents laboratoris acústics, acredita una sòlida experiència en la consultoria i formació acústica.

Actualment, és gerent de Keacoustics, enginyeria especialitzada en projectes que inclouen assajos acústics, xarxes de monitorització acústica, gestió de la contaminació acústica en *smartcities*, control de soroll, acústica subaquàtica, simulacions numèriques, i formació. Apassionat de l'acústica, membre de telecos.cat i de l'associació catalana de consultors acústics, participa en la redacció de legislació.

Primera edició: febrer 2019

© Pere Artís Gabarró

Tots els drets reservats

© d'aquesta edició, FUOC, 2019

Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona

Realització editorial: FUOC

*Cap part d'aquesta publicació, incloent-hi el disseny general i la coberta, no pot ser copiada, reproduïda, emmagatzemada o transmesa de cap manera ni per cap mitjà, tant si és elèctric com químic, mecànic, òptic, de gravació, de fotocòpia o per altres mètodes, sense l'autorització prèvia per escrit dels titulars del copyright.*

# Índex

<b>Introducció</b> .....	5
<b>Objectius</b> .....	6
<b>1. Propagació del so en un recinte</b> .....	7
1.1. Aproximació geomètrica .....	8
1.1.1. ETC, primeres reflexions, ecos .....	9
1.1.2. Fonts imatge .....	11
1.1.3. Eco i eco flotant .....	12
1.2. Acústica ondulatoria .....	13
1.2.1. Modes propis d'un recinte .....	14
1.2.2. Densitat modal i freqüència de Schroeder .....	16
1.2.3. Dimensions recomanades .....	18
1.3. El temps de reverberació .....	20
1.3.1. Equació de balanç energètic .....	21
1.3.2. Coeficient d'absorció acústica i àrea d'absorció equivalent .....	23
1.3.3. Fórmula de Sabine .....	24
1.3.4. Fórmula d'Eyring-Norris .....	27
1.4. Distància crítica i nivell de pressió sonora en camp difús .....	29
<b>2. Materials absorbents, reflectors i difusors del so</b> .....	32
2.1. Absorbents porosos .....	33
2.2. Ressonadors .....	36
2.2.1. Ressonador de membrana .....	36
2.2.2. Ressonador de Helmholtz .....	38
2.3. Mesura dels coeficients d'absorció en sala reverberant .....	43
2.4. Reflectors i difusors .....	45
<b>3. Disseny acústic d'un recinte</b> .....	50
3.1. Geometries capritxoses .....	51
3.2. Corbes NC .....	52
3.3. Intel·ligibilitat de la paraula .....	54
3.4. Temps de reverberació òptim .....	55
3.5. Absorció acústica del públic i les cadires .....	56
<b>Resum</b> .....	60
<b>Exercicis d'autoavaluació</b> .....	63
<b>Solucionari</b> .....	65

---

<b>Bibliografia.....</b>	<b>66</b>
--------------------------	-----------

## Introducció

En aquest mòdul s'estudia el comportament del so a l'interior d'un recinte, els principals tipus de materials utilitzats per condicionar acústicament els espais arquitectònics i els principis elementals de condicionament acústic.

En la primera secció del mòdul, s'estudien les tres principals teories que expliquen la propagació acústica *indoors*: la **teoria estadística**, la **teoria geomètrica** i la **teoria ondulatòria**. Fent ús de la teoria estadística és possible conèixer la distribució del nivell de pressió en un recinte i el **temps de reverberació**, un paràmetre molt rellevant de l'**acústica de sales** (*room acoustics*). Amb la teoria geomètrica, s'analitzen les geometries més beneficioses o més perjudicials d'un recinte, els difusors i reflectors acústics. L'aproximació ondulatòria estudia el comportament modal del recinte i permet conèixer els emplaçaments dels màxims i mínims nivells de pressió sonora dins d'un recinte.

La segona secció del mòdul tracta dels materials acústics per **condicionar acústicament** un recinte. Per obtenir un temps de reverberació adequat a l'ús del recinte, s'utilitzen els **materials absorbents** del so. L'absorció acústica s'aconsegueix a partir de materials porosos i ressonadors, estant aquests darrers especialment dissenyats per absorbir en bandes freqüencials concretes. Els materials poden ser instal·lats a les superfícies del recinte (parets, sostres, etc.), així com suspesos del sostre o distribuïts uniformement pel recinte com elements unitaris. Per millorar la sensació de sonoritat i la intel·ligibilitat de la paraula, cal incrementar la presència de primeres reflexions utilitzant **reflectors** del so. Alhora, per assolir una difusió suficient, es dissenyen i s'instal·len **difusors** del so específics per actuar en certes bandes freqüencials.

La darrera secció exposa les pautes generals de disseny acústic de recintes. En funció del tipus d'espai (sales de conferència, auditoris, teatres, estudis de gravació, etc.), caldrà definir uns certs paràmetres de disseny i fixar-ne uns certs requeriments. L'estudi es centra, bàsicament, en tres paràmetres: la **intel·ligibilitat de la paraula**, les **corbes NC** (*noise criteria*) i el **temps de reverberació**. Així mateix, s'introdueix l'absorció acústica de les persones i de les butaques, un dels elements cabdals en el disseny acústic de qualsevol espai arquitectònic. A nivell geomètric, es fa èmfasi en les geometries còncaues, que poden induir a focalitzacions del so.

## Objectius

Els principals objectius d'aquest mòdul són els següents:

1. Conèixer el rang de treball i les limitacions de les tres principals teories que governen la propagació acústica en un recinte: acústica ondulatoria, acústica geomètrica i acústica estadística.
2. Saber calcular la distribució modal en un recinte.
3. Saber calcular el temps de reverberació i l'àrea d'absorció equivalent.
4. Conèixer els valors de temps de reverberació òptims en funció del recinte.
5. Saber mesurar el temps de reverberació d'un recinte.
6. Conèixer els mecanismes d'absorció acústica: materials porosos i ressonadors de membrana i de Helmholtz.
7. Saber quantificar l'absorció acústica de les persones i les butaques.
8. Identificar els principals mètodes de *scattering*: difusió geomètrica i difusors de Schroeder.
9. Saber treballar amb la teoria bàsica de les reflexions.
10. Saber identificar les superfícies còncaues i les focalitzacions del so.
11. Conèixer les pautes generals i els requeriments de disseny acústic de recintes segons els criteris associats al paràmetre d'intel·ligibilitat de la paraula.
12. Conèixer les pautes generals i els requeriments de disseny acústic de recintes en funció de les corbes NC.
13. Conèixer el procediment de disseny bàsic per obtenir un temps de reverberació òptim.

## 1. Propagació del so en un recinte

La propagació del so en un recinte es pot estudiar en base a tres teories diferencials: l'**acústica ondulatoria**, l'**acústica estadística** i l'**acústica geomètrica**. Cadascuna d'aquestes aproximacions treballa amb unes premisses determinades que permeten explicar el comportament del so a l'interior d'un recinte. A la vegada, presenten unes limitacions i rangs de treball que s'aniran desgranant al llarg del mòdul i que s'introdueixen breument a continuació.

L'**acústica ondulatoria** parteix de l'**equació d'ona** i treballa amb els **modes propis d'un recinte**, és a dir, amb la **distribució determinista del nivell de pressió sonora**. Permet conèixer el nivell de pressió a cada punt del recinte resolent l'equació d'ona sota unes certes condicions de contorn.

Aquesta teoria és de gran utilitat per estudiar l'acústica de sales petites, en què les longituds d'ona són comparables a les seves dimensions: estudis de gravació o aules d'assaig. En aquests recintes, cal aconseguir una **distribució dels modes propis** en l'espectre freqüencial que redueixi l'efecte de les **ressonàncies**, de tal forma que les emfatitzacions en les freqüències pròpies produeixin les mínimes coloracions en la resposta de la sala.

A partir d'una certa freqüència, augmenta notablement la densitat de modes propis del recinte, definida com el nombre de modes propis en una banda freqüencial. En aquest marge freqüencial, la distribució de modes és tan elevada que la propagació del so en el recinte ja no ve descrita per la distribució d'un únic mode propi, sinó que és el resultat de la suma de diferents modes.

Aquest comportament es pot descriure a partir de l'**acústica estadística**, que suposa una **densitat modal elevada** i un **camp difús**. Aquest tipus de camp es caracteritza per presentar la **mateixa densitat d'energia en tots els punts del camp** i la **mateixa probabilitat de rebre una ona acústica en qualsevol direcció**. El plantejament de l'equació de balanç energètic a partir d'aquestes hipòtesis permet obtenir el temps de reverberació del recinte i el nivell de pressió sonora en funció de les propietats de la font acústica i la distància entre el receptor i la font sonora.

El **temps de reverberació** és un paràmetre clau en l'acústica de recintes i indica el **grau de reverberació del recinte**. Es defineix com **el temps que tarda a decaure el nivell de pressió sonora en un recinte 60 dB una vegada s'ha apagat la font sonora**.

L'acústica estadística permet estimar els nivells de pressió sonora i el temps de reverberació d'un recinte, però no dona informació sobre les trajectòries de les ones acústiques.

L'**acústica geomètrica** tracta les ones acústiques com si fossin rajos que viatgen per l'aire i es reflecteixen en les diferents superfícies de la sala. Els **rajos acústics** perden energia degut a l'absorció de l'aire i a les reflexions, que seran més o menys importants depenent de les propietats absorbents de les superfícies. El comportament d'aquests rajos és d'acord a les lleis de l'òptica, on **l'angle d'incidència és igual al de reflexió**. Així doncs, aquesta aproximació permet identificar ecos desagradables i focalitzacions del so que cal evitar en qualsevol tipus de recinte.

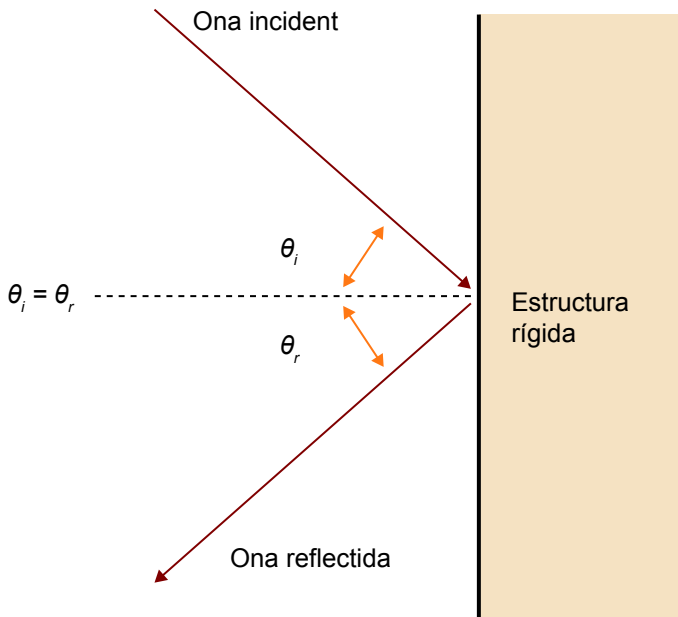
### 1.1. Aproximació geomètrica

Tal i com s'ha enunciat, les ones acústiques es poden entendre com a **rajos acústics** que indiquen la direcció de la propagació de la pertorbació. Els rajos acústics són perpendiculars al front d'ona, que està format per tots els punts de l'espai en fase dins d'un mateix cicle. La informació de la fase i de la longitud d'ona del so no es tenen en compte en l'acústica geomètrica, on els rajos únicament indiquen la direcció de propagació.

Quan un raig acústic incideix sobre una superfície amb un angle d'incidència respecte la seva normal ( $\theta_i$ ), l'angle de reflexió respecte la mateixa normal ( $\theta_r$ ) és igual al d'incidència, seguint la **lleï de reflexió d'òptica**  $\theta_r = \theta_i$ .



Figura 1. Reflexió especular



Font: [http://www.labc.usb.ve/paginas/EC4514/AUDIO/ACUSTICA\\_ARQUITECTONICA/Acustica\\_geometrica.html](http://www.labc.usb.ve/paginas/EC4514/AUDIO/ACUSTICA_ARQUITECTONICA/Acustica_geometrica.html).

Perquè pugui donar-se aquesta **reflexió especular** basada en les lleis d'òptica, cal que:

- La longitud d'ona sigui molt més petita que les dimensions de la superfície.
- El material que revesteix la superfície sigui llis, molt reflectant i poc absorbent.

En el cas que es compleixin les dues premisses anteriors, **els rajos acústics es poden interpretar com si fossin rajos de llum**.

### 1.1.1. ETC, primeres reflexions, ecos

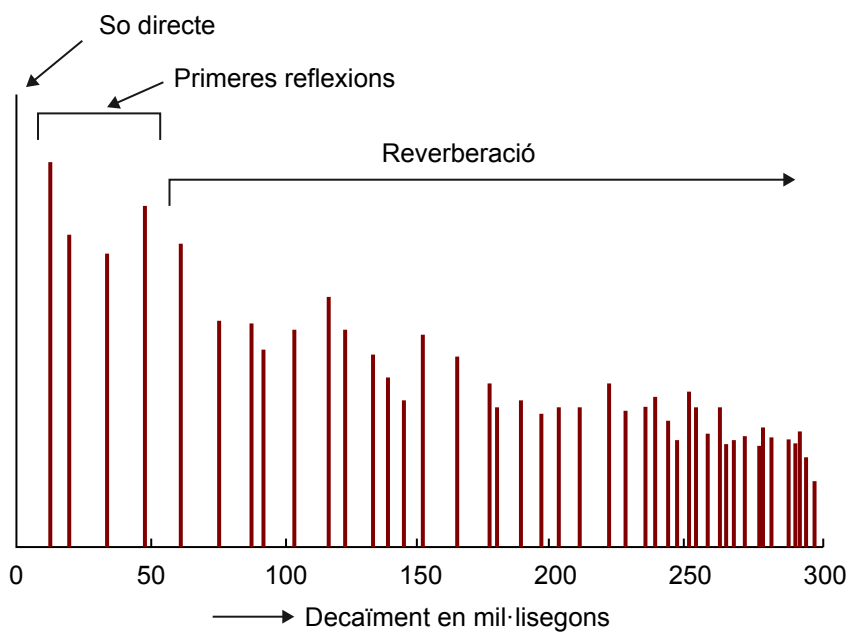
Es pot entendre la radiació d'una font acústica com l'emissió d'un feix de rajos acústics que es propaguen per l'aire del recinte arribant al receptor i a les superfícies límit que el configuren.

El raig que es propaga des de la font acústica fins al receptor sense topar amb cap superfície es correspon al **so directe**.

Els **rajos reflectits** ho són d'ordre  $n$  essent l'ordre de reflexió  $n$  el nombre de reflexions que ha experimentat el raig abans d'assolir el receptor. La intensitat acústica del raig reflectit és funció de les propietats absorbents i aïllants de la superfície. Els rajos reflectits novament impacten sobre altres superfícies i es reproduïx el mateix fenomen, amb reflexions d'ordre major. L'energia dels rajos va decreixent paulatinament a mesura que l'ordre de reflexions augmenta.

Els rajos que arriben al receptor dins un cert interval de temps després del raig directe s'anomenen **primeres reflexions** (*early reflections*) i l'oïda els integra de tal forma que s'incrementa la **intel·ligibilitat de la paraula** i la **sensació de sonoritat**. Per a la parla, aquest interval és de **50 ms**, mentre que per a la música és de **100 ms**. Si alguna reflexió arriba després d'aquest interval i és d'amplitud major que el so directe, serà percebuda com un **eco**.

Figura 2. Ecograma



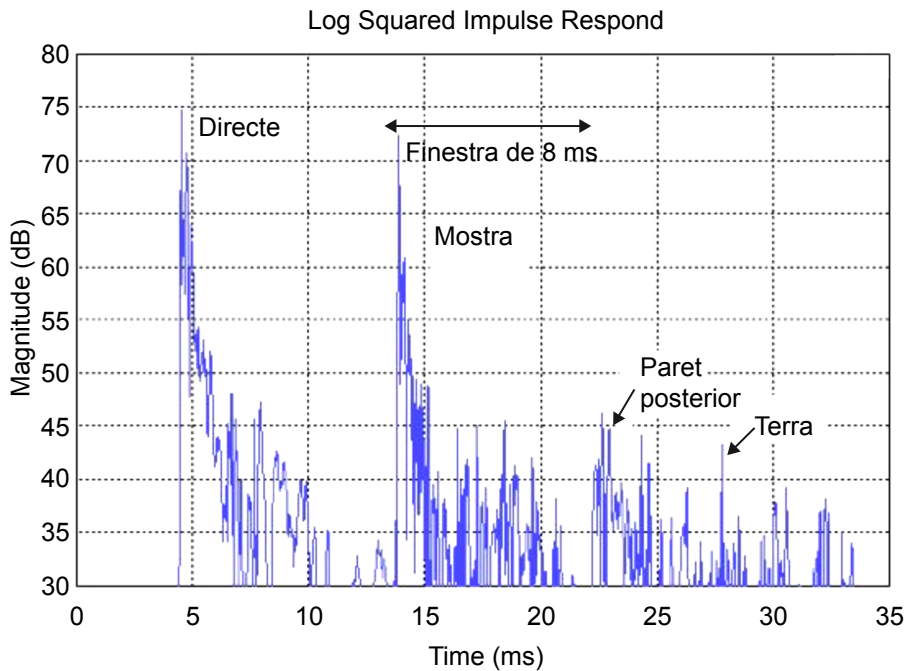
Font: Newell (2008).

Els rajos més enllà de les *early reflections* són d'ordre major i formen la **cua reverberant**. Per representar l'evolució en la recepció dels rajos al receptor, s'utilitza l'**ecograma**, que és característic de l'emplaçament de la font acústica i de la ubicació del punt on es calcula. A la figura 2 se'n representa un de genèric, on s'hi identifica el so directe, les primeres reflexions (de menor intensitat que el so directe) i la cua reverberant amb el decaïment d'intensitat sonora.

A la zona de la cua reverberant la densitat temporal de reflexions en un punt del recinte és molt elevada i s'incrementa quadràticament amb el temps. En termes generals, la cua reverberant és semblant en la majoria de punts del recinte, a diferència del so directe i les primeres reflexions, que sí que varien en funció del punt. L'anàlisi de la cua reverberant es realitza a partir de la teoria estadística.

A la pràctica, s'obté la **corba energia-temps**, o ETC (*energy time curve*), a partir de diverses tècniques de mesura o programes de simulació acústica. A la figura 3 es mostra la corba ETC mesurada amb un analitzador que genera seqüències MLS (*maximum length sequence*).

Figura 3. Corba energia-temps



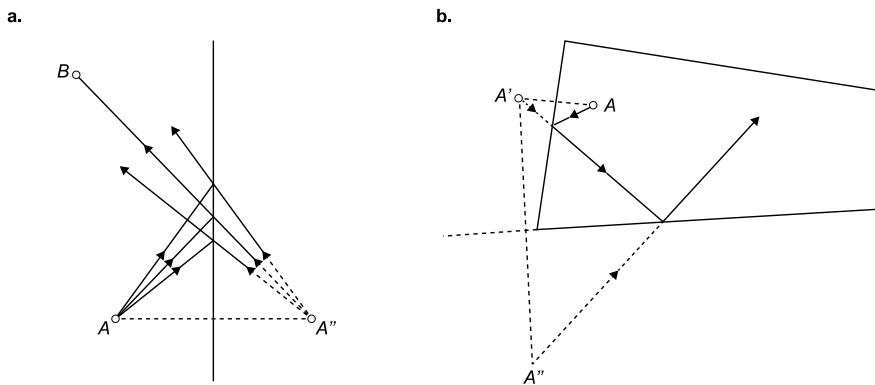
Font: Newell (2008).

L'eix de les ordenades representa el nivell de pressió sonora i el de les abscisses el temps d'arribada de les reflexions. A partir de la ETC en un punt, les dimensions del recinte i la ubicació de les superfícies i objectes que hi pugui haver, es poden identificar les superfícies involucrades en la generació de les primeres reflexions i ecos. Amb un tractament acústic de les superfícies involucrades és possible reduir la presència d'ecos i augmentar la densitat d'*early reflections*. Els programes de simulació acústica permeten simular les corbes ETC de diferents punts del recinte, assignar diferents materials a les superfícies límit del recinte i comprovar la variació sobre les corbes ETC amb l'objectiu de millorar el confort acústic de l'espai.

### 1.1.2. Fonts imatge

Per estudiar la propagació del so amb els rajos acústics, s'utilitza el **mètode de les fonts imatge**. Per cada reflexió, es crea una font sonora imaginària simètrica a la superfície que genera la reflexió i a la mateixa distància de la superfície, tal i com s'il·lustra a la figura 4a.

Figura 4. a) Font imatge A' corresponent a una reflexió de primer ordre. b) Fonts imatge A' i A'' corresponents a reflexions d'ordre  $n = 2$



Font: Kuttruff (2009).

Si es vol conèixer el raig reflectit per la superfície provinent de la font A que arriba al punt B, caldrà operar per prova i error, a no ser que s'utilitzi el mètode de les fonts imatge. Aquest mètode considera la font imatge A', situada simètricament de la font A respecte a la superfície causant de la reflexió. El raig que comunica la font imaginària A' amb el punt B determina l'angle d'incidència amb la superfície del raig real provinent de la font A.

En el cas d'haver-hi més superfícies, cada nova font imatge genera una altra font imatge, i així consecutivament fins a completar la trajectòria de la font al receptor (figura 4b).

### 1.1.3. Eco i eco flotant

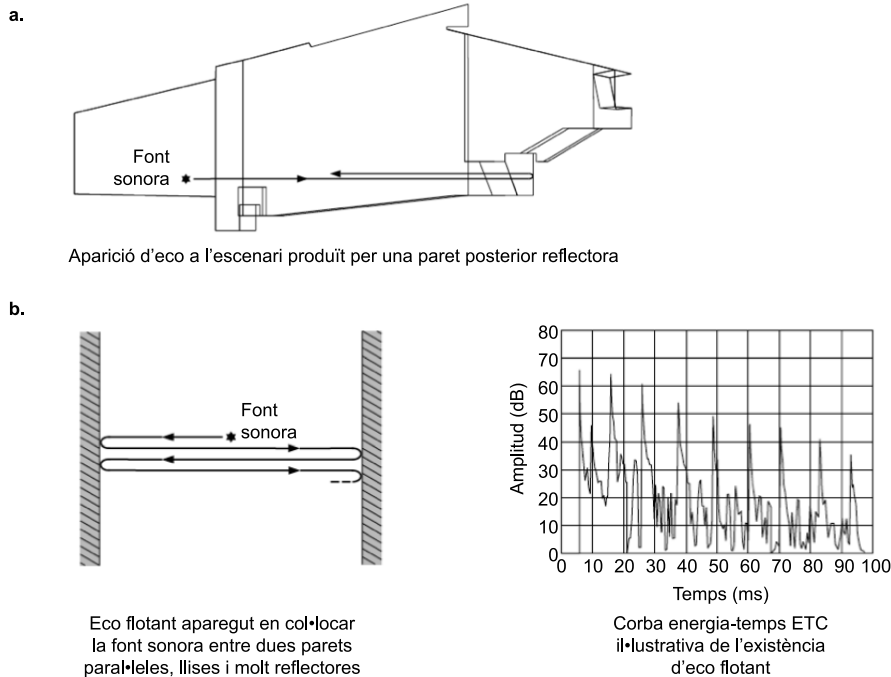
La utilització dels rajos és convenient per identificar, predir i solucionar efectes capritxosos del so, com poden ser els ecos o les focalitzacions d'energia. Aquests fenòmens empobreixen la percepció acústica de qualsevol espai arquitectònic.

Els ecos es donen quan arriba una **reflexió amb un retard superior als 50 ms respecte al so directe, en el cas de la parla, amb suficient energia relativa respecte al so directe.**

Un retard superior a 50 ms es correspon a una distància entre la font i el receptor de 17 m aproximadament. Per exemple, la reflexió a la paret posterior d'un teatre pot generar una reflexió a l'escenari que impliqui un eco molest pels actors, sempre i quan la superfície posterior no estigui tractada acústicament i la distància sigui major de 8,5 m (figura 5a).

Quan hi ha dues superfícies paral·leles, llises i molt reflectants, l'eco es pot anar replicant en un breu instant de temps presentant una resposta similar a l'ETC de la figura 5b. En aquest cas, l'eco es denomina **eco flotant (flutter echo)**.

Figura 5. a) Raig acústic corresponent a un eco originat per la paret posterior d'un teatre. b) Generació de l'eco flotant. c) ETC de l'eco flotant



Font: Carrión Isbert (1998).

El mètode de les fonts imatge també permet estudiar i dissenyar els reflectors en auditoris i teatres, així com el comportament de les superfícies cònques. Al llarg d'aquest mòdul s'aniran desgranant els mètodes de disseny d'aquestes geometries, així com les tècniques per evitar les focalitzacions de les superfícies cònques, que són habituals en auditoris o teatres tot i configurar geometries problemàtiques pel que fa la distribució del nivell de pressió en els espais. El comportament d'aquestes superfícies s'estudia a la secció 3.

## 1.2. Acústica ondulatoria

L'acústica geomètrica aporta informació sobre la direcció dels rajos acústics i permet estudiar l'ecograma, els ecos i les focalitzacions. En prescindir de la fase i la longitud d'ona del so, no és adequada pel tractament del comportament ondulatori del so en un recinte. **Per a recintes petits en què les dimensions són comparables a les longituds d'ona del so, és convenient aplicar l'acústica ondulatoria** per conèixer la distribució del nivell de pressió sonora.

### 1.2.1. Modes propis d'un recinte

En situar una font sonora en un recinte relativament petit, les ones acústiques estan sotmeses a múltiples reflexions a les superfícies que poden provocar **interferències constructives o destructives**.

En plantejar l'equació d'ona per a una sala rectangular de dimensions  $l_x$ ,  $l_y$  i  $l_z$  (en metres), amb les superfícies rígides, s'obté un nivell de pressió sonora que no depèn del temps:

$$P_{n_x, n_y, n_z} = P_{x, y, z} \cos\left(n_x \pi \frac{x}{l_x}\right) \cos\left(n_y \pi \frac{y}{l_y}\right) \cos\left(n_z \pi \frac{z}{l_z}\right) \quad (1)$$

Es tracta d'**ones estacionàries** en els tres eixos del recinte ( $x$ ,  $y$  i  $z$ ) que venen categoritzades pels subíndexs enters  $n_x$ ,  $n_y$  i  $n_z$ , un per cada dimensió. El nivell de pressió sonora serà diferent en cada punt del recinte, configurant un camp acústic no difús, on no apliquen les hipòtesis de les teories geomètrica i estadística. L'equació (1) determina que:

- El nivell de pressió és **màxim a les superfícies del recinte**.
- El camp acústic presenta **plans nodals** (amb nivells de pressió nuls) i **plans antinodals** (amb nivells de pressió màxims), paral·lels a les superfícies.
- Entre els plans nodals i els antinodals, la distribució del camp acústic és **sinusoïdal**.

Cadascuna de les ones estacionàries constitueix un **mode propi** de vibració, determinat per la **geometria**, l'**esmoreïment** i la **freqüència pròpia**.

Els factors  $\left(n_i \pi \frac{1}{l_i}\right)$  amb  $i = x, y, z$  estan relacionats amb el nombre d'ona. Les **freqüències dels modes propis**, expressades en Hz, responen a l'equació (2) i, per tant, **únicament depenen de les dimensions del recinte**:

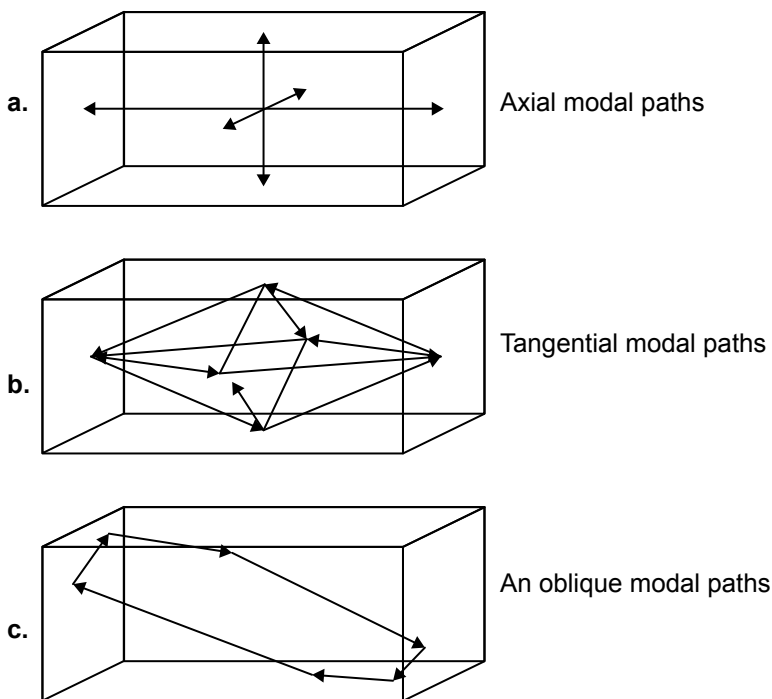
$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (2)$$

essent  $c$  la velocitat de propagació del so en el medi (en el cas de l'aire, és de 345 m/s).

Tal i com s'il·lustra a la figura 6, els modes propis es classifiquen en modes axials, tangencials i oblics:

- Els **modos axials** es refereixen a les ones estacionàries que únicament es propaguen en una dimensió, és a dir, entre dos parets paral·leles.
- Els **modos tangencials** són la combinació de dues dimensions i l'ona estacionària es forma en reflectir-se en quatre superfícies, corresponents a dos dels plans del recinte.
- Als **modos oblics** intervenen totes les superfícies en la generació de l'ona estacionària.

Figura 6. Trajectòries de les ones estacionàries pels modes a) axials, b) tangencials i c) oblics



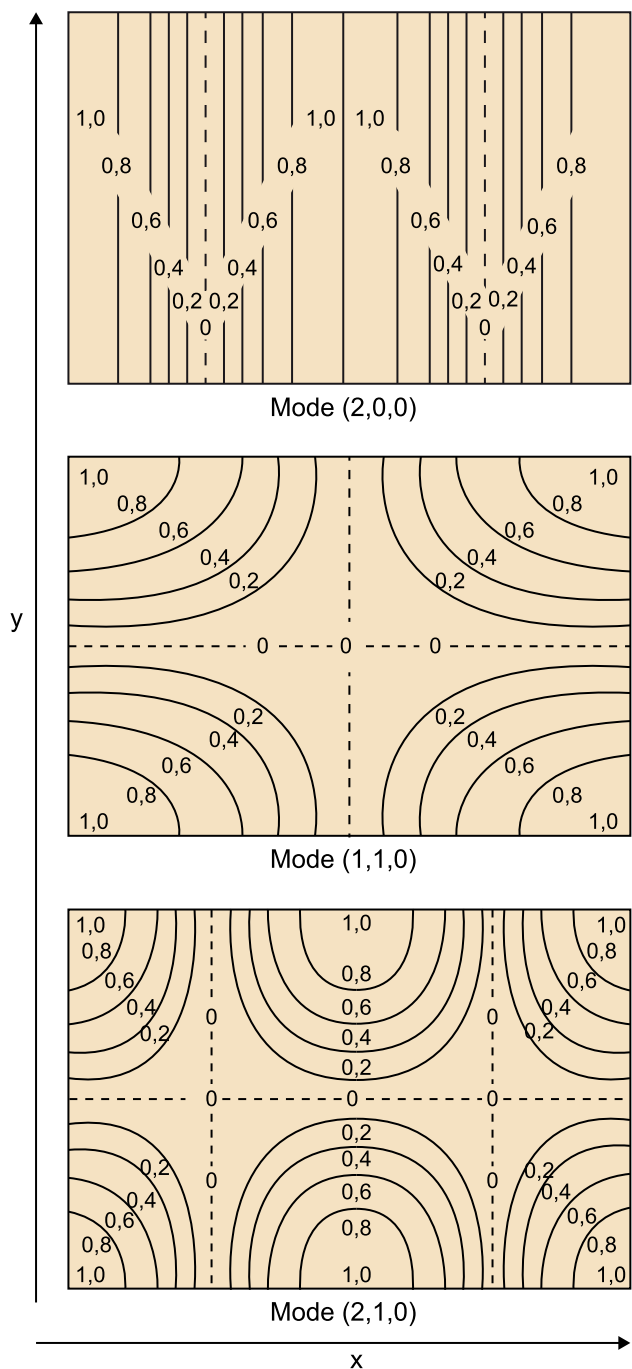
Font: Newell (2008).

A continuació, la figura 7 mostra la distribució del mode axial  $(2,0,0)$  normalitzat en un gràfic de corbes de nivell, on l'amplitud de les corbes es correspon a l'eix  $z$ . A les parets amb menors dimensions el nivell de pressió és màxim, així com a un pla antinodal  $yz$  situat al mig del recinte. També hi ha dos plans nodals  $yz$ , ja que es tracta del mode amb  $n_x = 2$ . Les transicions entre plans nodals i plans antinodals són de tipus sinusoidal.

Pel mode tangencial  $(1,1,0)$ , hi ha un pla nodal  $yz$  corresponent a l'índex  $n_x = 1$ , i un pla nodal  $xz$  corresponent a l'índex  $n_y = 1$ . En aquest cas, a les parets no hi ha un màxim en tot l'eix  $y$ , com sí passava al model axial anterior. Aquest fet és causat per la naturalesa tangencial del mode, de tal forma que els màxims de les parets en l'eix  $y$  queden modificats a causa de l'ona estacionària d'ordre 1 en l'eix  $y$ .

Anàlogament, es pot observar el mateix comportament pel mode tangencial  $(2,1,0)$ , on hi ha dos plans nodals  $yz$ , i un pla nodal  $xz$ .

Figura 7. Distribució en gràfics de contorn dels modes (2,0,0), (1,1,0) i (2,1,0) d'un recinte rectangular. Els valors numèrics representen el valor de pressió sonora normalitzat



Font: Beranek (1996).

### 1.2.2. Densitat modal i freqüència de Schroeder

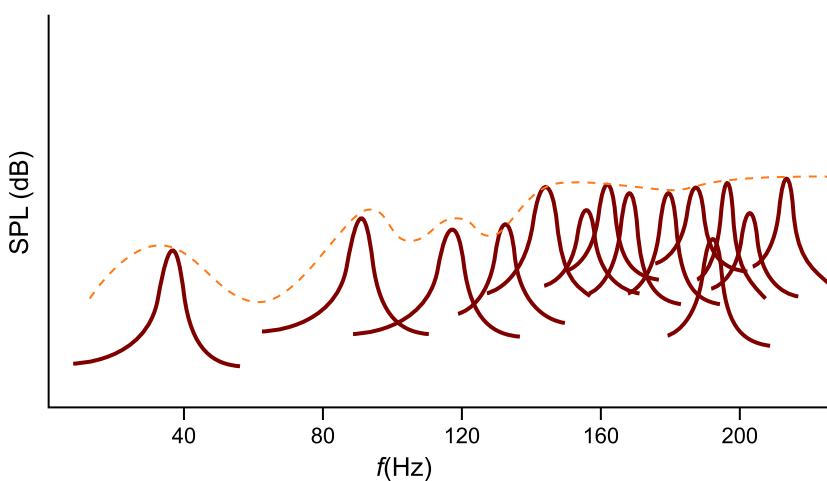
Les freqüències pròpies dels primers modes estan força espaiades, de tal forma que es poden percebre clarament per l'oïda humana. Suposem, per exemple, un altaveu situat a una cantonada d'un recinte de dimensions petites on sempre hi ha màxims de pressió, ja que és una zona antinodal del camp acústic. Si l'altaveu emet un to pur d'una de les primeres freqüència pròpies del recinte, en desplaçar-nos-hi podrem notar clarament les zones amb màxims i mínims de nivell de pressió sonora. En anar incrementant la freqüència d'excitació, es



poden anar detectant els següents modes propis, fins que arriba una freqüència en què els modes propis són tant propers en freqüència que ja no és possible la detecció de les zones nodals i antinodals.

A la figura 8, es representa en línia discontinua la **resposta freqüencial d'un recinte rectangular**. Per cada mode propi, es representa en línia contínua la resposta del recinte independentment dels altres modes propis. La resposta total de la sala ve determinada per la contribució de les respostes de totes les freqüències, de tal forma que, per a freqüències baixes, els modes es poden determinar clarament, mentre que, a mesura que la freqüència augmenta, aquests queden solapats fent-ne impossible la identificació.

Figura 8. Funció de transferència d'un recinte rectangular



Font: Newell (2008).

La **densitat modal** es defineix com el **nombre de modes propis per Hz**, i es pot demostrar que segueix la següent formulació:

$$\frac{\partial N}{\partial f} = \frac{4\pi V}{c^3} f^2 + \frac{\pi S}{2c} f + \frac{L}{8c} \cong \frac{4\pi V}{c^3} f^2 \quad (3)$$

essent  $N$  el nombre de modes propis,  $f$  la freqüència (Hz),  $V$  el volum del recinte ( $\text{m}^3$ ),  $S$  l'àrea total de les superfícies del recinte ( $\text{m}^2$ ),  $L$  la suma de les longituds del recinte (m), i  $c$  la velocitat de propagació del so en el medi (en el cas de l'aire, 345 m/s).

El **primer terme** de l'equació es correspon a la **densitat modal dels modes oblics**; el **segon**, a la dels **modes tangencials**; i el **tercer**, a la dels **modes axials**. A altes freqüències, els modes oblics predominen i el primer terme de l'equació és una bona aproximació de la densitat modal. Tal i com s'ha avançat, a mesura que la freqüència s'incrementa, també ho fa la densitat modal, ja que aquesta en depèn quadràticament.

La **frequència de Schroeder**, o **frequència de tall**, ( $f_s$ ) és aquella **frequència a partir de la qual els modes propis no es poden identificar** i no és possible tractar la propagació acústica en un recinte a partir de l'acústica ondulatoria. Ve determinada pel temps de reverberació del recinte ( $RT_{mid}$ , en segons) i pel seu volum ( $V$ , en  $m^3$ ). Expressada en Hz, respon a l'equació:

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{RT_{mid}}{V}} \quad (4)$$

on  $RT_{mid}$  és la mitjana aritmètica dels temps de reverberació a les bandes d'octava de 500 Hz i 1 kHz. Per a freqüències superiors a  $f_s$ , el tractament acústic del recinte es realitza fent ús de l'acústica estadística i geomètrica.

Cal fer notar que, **per a volums petits, com ara estudis de gravació o aules d'assaig, la freqüència de Schroeder serà major que en sales grans, com auditoris o teatres**. Per a recintes petits, l'anàlisi dels modes propis (i el degut tractament acústic per reduir-ne les coloracions) és fonamental, mentre que, per a auditoris o teatres, no tindrà, en general, un paper decisiu en el disseny acústic.

De l'equació (4) també s'extreu que, **a menor temps de reverberació, menor freqüència de tall**. En efecte, l'amplada de la resposta freqüencial de cada mode propi està relacionada amb el valor de  $RT_{mid}$ , de tal manera que serà major per a valors de  $RT_{mid}$  baixos. Així, a valors més baixos de  $RT_{mid}$ , més fàcilment se solaparan les respostes individuals de cada mode propi.

### 1.2.3. Dimensions recomanades

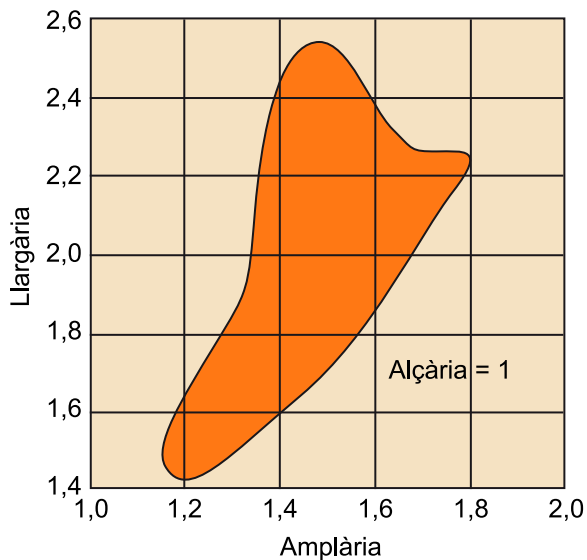
Per tal d'evitar les **coloracions**, que no són més que **emfatitzacions de certes freqüències provocades pels modes propis**, és convenient una correcta distribució modal en l'eix freqüencial. Si hi ha una densitat elevada de modes propis en una banda freqüencial, els efectes no desitjats d'interferència constructiva i destructiva s'incrementaran.

Per exemple, en el cas d'un recinte cúbic de dimensions 5 m x 5 m x 5 m, l'equació (2) ens permet veure que els tres primers modes axials per cada dimensió, (1,0,0), (0,1,0) i (0,0,1), tindran la mateixa freqüència pròpia ( $f_{1,0,0} = f_{0,1,0} = f_{0,0,1} = 34,5$  Hz). De la mateixa manera, els modes axials d'ordre 2, o els tangencials d'ordre 1 en cada dimensió, també seran els mateixos.

Els **modes propis amb la mateixa freqüència pròpia** es denominen **modes degenerats** i convé **minimitzar-ne la quantitat**, dins les possibilitats del disseny del recinte.

A partir del raonament anterior, i tenint present que **la distribució òptima dels modes propis és la més uniforme possible en l'eix freqüencial**, aquesta s'aconseguirà **trencant la simetria del recinte**. Diferents autors han proposat relacions entre les dimensions del recinte per aconseguir una distribució uniforme dels modes propis. La **regla d'or** defineix unes dimensions segons la relació 5:3:2. També es fa servir el **diagrama de Bolt**, que garanteix una distribució uniforme dels modes propis sempre i quan se situïn dins la zona acolorida del diagrama:

Figura 9. Diagrama de Bolt. Relacions recomanades entre les dimensions d'una sala rectangular (normalitzades respecte d'una alçària d'1 m) per obtenir una distribució uniforme de les seves freqüències pròpies



Font: Carrión Isbert (1998).

### Exemple 1

Es disposa d'un estudi de gravació de dimensions 10 m x 5 m x 3,5 m i un  $RT_{mid} = 0,3$  seg. S'han observat deficiències en la resposta de la sala i es vol saber si la distribució dels seus modes propis és uniforme.

### Solució

Mitjançant l'equació (4), calculem la freqüència de Schroeder de la sala:

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{RT_{mid}}{V}} = 2000 \sqrt{\frac{0,3}{10 \cdot 5 \cdot 3,5}} \cong 82,8 \text{ Hz} \quad (5)$$

A partir d'aquesta freqüència podem considerar que el comportament acústic del recinte ja no vindrà determinat per l'acústica ondulatòria.

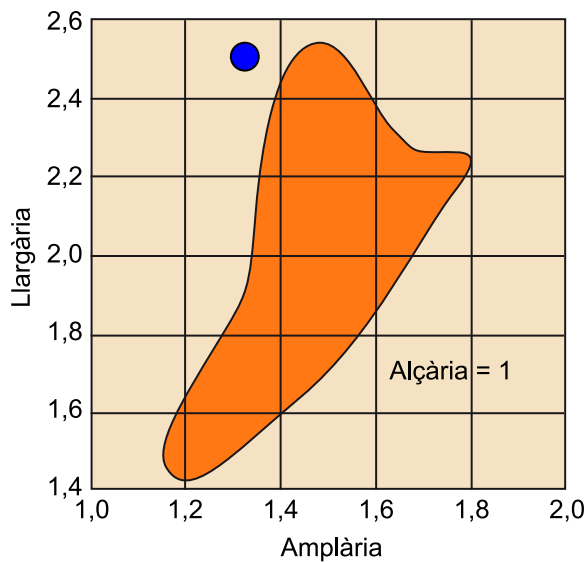
Mitjançant l'equació (2), calculem els modes propis de la sala i, pel que fa als modes axials, se n'obtenen els següents resultats:

Taula 1. Modes propis axials

$n$	Llargària ( $n,0,0$ )	Amplària ( $0,n,0$ )	Alçària ( $0,0,n$ )
1	17,25 Hz	34,5 Hz	49,28 Hz
2	34,5 Hz	69 Hz	
3	51,75 Hz		
4	69 Hz		

S'observa que, a causa que l'amplada és múltiple de la longitud, es generen dos modes propis degenerats per sota la freqüència de tall: 34,5 Hz i 69 Hz. Això explica que l'estudi tingui un mal comportament acústic. En situar al diagrama de Bolt les dimensions de l'amplària i la llargària normalitzades respecte l'alçària ( $\frac{5}{3,5} \cong 1,43$  i  $\frac{10}{3,5} \cong 2,86$ , respectivament), s'observa com en queda al marge i no compleix el requeriment, el qual indica que la distribució dels seus modes propis no és uniforme:

Figura 10. Ubicació del comportament de la sala en el diagrama de Bolt: en quedar fora de la zona acolorida, els seus modes propis no segueixen una distribució uniforme



Font: Carrión Isbert (1998).

### 1.3. El temps de reverberació

El temps de reverberació ( $RT$ ) d'un recinte és el temps que el nivell de pressió sonora tarda en decaure 60 dB.

El temps de reverberació depèn de la freqüència  $i$ , en general, **decreix per a freqüències altes**. Aquesta tendència es deu a la major absorció de l'aire i dels materials de condicionament acústic, a mitges i altes freqüències, que no pas a baixes freqüències.

Valors de temps de reverberació elevats es troben en catedrals, esglésies, coves o **recintes reverberants** en general. Aquests espais es poden descriure com a recintes «vius», mentre que els recintes amb un temps de reverberació baix

es poden anomenar «secs» o «apagats». Típicament, són estudis de gravació, sales d'assaig o **recintes anecoics** condicionats amb materials acústics molt absorbents.

El temps de reverberació és un paràmetre clau en el disseny acústic d'espais arquitectònics. Es defineixen diferents requisits de  $RT$  en funció de l'ús que es desitgi donar al recinte. Per exemple, una sala de música simfònica, on es busca un so envolupant i brillant, haurà de tenir un  $RT$  relativament gran, contràriament a espais destinats a la paraula, que requeriran d'una reverberació menor. En efecte, en aquests recintes cal evitar un temps de reverberació massa elevat que dificulti la comprensió del missatge de l'orador.

A finals del segle XIX, Wallace Clement Sabine va demostrar empíricament que **el temps de reverberació d'un recinte és directament proporcional al seu volum ( $V$ ) i inversament proporcional a l'absorció acústica**, caracteritzada per l'àrea d'absorció equivalent ( $A_{eq}$ ):

$$RT \propto \frac{V}{A_{eq}} \quad (6)$$

La formulació de Sabine indica clarament que el temps de reverberació serà major per a volums elevats que per a volums petits. Aquest fet concorda amb l'experiència real de percebre major reverberació en catedrals que en sales o espais de dimensions més reduïdes. També es pot notar la variació en l'acústica d'un recinte en funció del grau d'assistència de públic. Així, en segons quines sales, la reverberació és més elevada si estan buides que ocupades, ja que les persones actuem com absorbents acústics que incrementem l'àrea d'absorció equivalent. Igualment, el mateix comportament es pot notar entre la diferència de reverberació d'un habitatge buit llest per entrar-hi a viure i el mateix habitatge amb tot el mobiliari col·locat.

### 1.3.1. Equació de balanç energètic

En excitar un recinte reverberant amb un altaveu, les ones acústiques es comencen a propagar per l'aire del recinte fins que es troben amb una superfície. En topar-s'hi, una part de l'energia acústica és absorbida i l'altra reflectida. Les ones reflectides es propaguen novament pel recinte, reflectint-se i absorbint-se novament a les superfícies del recinte. D'aquesta manera, el nivell de pressió sonora en un punt del recinte està format per:

- La contribució del camí directe entre la font sonora i aquest punt.
- Els camins reverberants fruit de les reflexions.

A mesura que al receptor hi arriben més reflexions, el nivell de pressió sonora es va incrementant, fins que arriba a un nivell d'equilibri.

D'una banda, es pot demostrar (Kuttruff, 2009) que l'energia en un recinte reverberant ( $E_{room}$ ) respon a la següent equació:

$$E_{room} = V \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (7)$$

essent  $V$  el volum del recinte en  $m^3$ ;  $p$  la pressió eficaç, o RMS, expressada en Pa;  $\rho$  la densitat mitjana del medi ( $\rho = 1,21 \text{ kg/m}^3$ ); i  $c$  la velocitat de propagació del so ( $c = 345 \text{ m/s}$ ).

D'altra banda, la intensitat incident en una superfície ( $I_{inc}$ ) es defineix com:

$$I_{inc} = \frac{p^2}{4\rho c^2} \quad (8)$$

Així, es pot definir l'absorció total d'un recinte com una àrea d'absorció equivalent  $A_{eq}$  expressada amb unitat s, de sabins ( $m^2$ ).

L'àrea d'absorció equivalent d'un recinte ( $A_{eq}$ ) es defineix com l'àrea d'una finestra oberta que proporciona la mateixa absorció acústica que el recinte.

Considerant l'equació (8), la potència absorbida en un recinte ( $W_{abs}$ ) és igual a la intensitat incident ( $I_{inc}$ ) multiplicada per l'absorció total del recinte ( $A_{eq}$ ):

$$W_{abs} = I_{inc} \cdot A_{eq} = \frac{p^2}{4\rho c^2} A_{eq} \quad (9)$$

Ara, hi situem en el recinte una font sonora amb potència acústica  $W_{source}$ . D'aquesta manera, l'equació de balanç d'energia del recinte és la següent:

$$W_{source} - W_{abs} = \frac{\partial E_{room}}{\partial t} = \frac{V}{\rho c^2} \frac{\partial p^2}{\partial t} \quad (10)$$

En règim permanent, la variació d'energia al recinte és 0, de tal forma que l'energia emesa per la font i l'energia absorbida són iguals ( $W_{source} = W_{abs}$ ).

Resolent l'equació (10), s'obté la pressió sonora en règim permanent ( $p_s$ ):

$$p_s^2 = \frac{4W_{source}}{A_{eq}} \rho c \quad (11)$$

Els següents fets es desprenent de l'expressió (11), si s'assumeix que es tracta d'una aproximació per a camps difusos:

- El nivell de pressió sonora ( $p_s$ ) depèn de la potència acústica de la font ( $W_{source}$ ) i de l'àrea d'absorció equivalent ( $A_{eq}$ ).
- El nivell de pressió sonora és independent de la geometria i del volum del recinte.
- El nivell de pressió sonora és el mateix per a tots els punts del recinte.

Un **camp difús** és aquell camp en el qual es compleixen les dues propietats següents:

- La densitat d'energia és igual en tots els punts.
- Totes les direccions de propagació són igualment probables.

En aquests camps, la densitat modal és suficientment elevada perquè es puguin negligir els efectes d'un mode propi, objecte d'estudi de l'acústica ondulatòria. L'alta densitat de reflexions dels camps difusos permet **obviar les interferències constructives i destructives**.

La hipòtesi de camp difús permet treballar amb les equacions de balanç energètic i estudiar el comportament de la propagació del so en un recinte de forma estadística, configurant la base de la teoria estadística. **L'aproximació de camp difús no aplicarà en punts de l'espai molt propers a la font acústica, on el nivell serà superior a  $p_s$ , segons l'equació (11). Aquesta aproximació tampoc no és vàlida a les ones properes a les superfícies, cantonades o còrnors, on sí que es donaran interferències constructives i destructives.**

### 1.3.2. Coeficient d'absorció acústica i àrea d'absorció equivalent

L'absorció acústica és la propietat dels sòlids i dels fluids d'absorbir l'energia acústica a partir de diferents fenòmens físics. Per quantificar-la, convé definir el coeficient d'absorció acústica i l'àrea d'absorció equivalent a què feia esment l'apartat anterior.

El coeficient d'absorció acústica de Sabine ( $\alpha$ ) indica el grau d'absorció acústica d'una superfície. Pren valors de 0 (per a absorció nul·la) a 1 (per a absorció màxima).

L'àrea d'absorció acústica equivalent d'una superfície ( $S$ ) es defineix com el producte del coeficient d'absorció acústica de Sabine  $\alpha$  per la superfície  $S$ .

Aquests tres conceptes es relacionen de manera tal que:

- Per a una superfície amb  $\alpha = 1$ , l'àrea d'absorció equivalent de la superfície coincideix amb l'àrea de la superfície.
- Una superfície amb absorció màxima és una finestra oberta on totes les ones incidents no són reflectides.

Si se sumen les àrees d'absorció equivalents de totes les superfícies que constitueixen el recinte, s'obté l'**àrea d'absorció acústica equivalent del recinte**, segons Sabine:

$$A_{eq} = \sum_{i=1}^{N_{sup}} S_i \alpha_i \quad (12)$$

essent  $N_{sup}$  el nombre de superfícies diferents del recinte, i  $\alpha_i$  el coeficient d'absorció sonora de Sabine de cada superfície  $S_i$  del recinte.

De les equacions (6) i (12) es dedueix que, per aconseguir un **temps de reverberació baix**, caldrà no únicament **instal·lar materials absorbents al recinte**, sinó també assegurar que l'**àrea total que ocupin sigui el suficientment elevada com per aconseguir una àrea d'absorció equivalent prou gran**.

Es pot definir un **coeficient d'absorció acústica de Sabine mitjà de la sala** ( $\bar{\alpha}$ ) com el **quocient entre l'àrea d'absorció equivalent i la suma de totes les superfícies del recinte** ( $S_{tot}$ ):

$$\bar{\alpha} = \frac{A_{eq}}{S_{tot}} = \frac{A_{eq}}{\sum_{i=1}^{N_{sup}} S_i} \quad (13)$$

És interessant notar que el coeficient d'absorció acústica de Sabine no és un coeficient energètic definit com la relació entre l'energia incident i l'energia no reflectida. Es tracta d'un coeficient d'absorció aparent, podent-se'n arribar a mesurar, erròniament, valors superiors a 1. En aquest cas, cal fixar el valor a 1, ja que un valor superior no tindria sentit.

### 1.3.3. Fórmula de Sabine

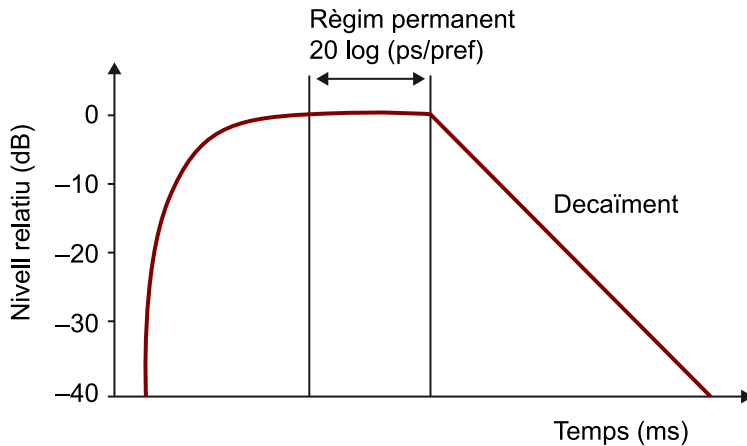
Retornant a l'equació de balanç energètic (10), en activar la font acústica en  $t = 0$ , l'evolució del nivell de pressió sonora al recinte segueix un patró exponencial:

$$p^2(t) = p_s^2 \left( 1 - e^{-\left(\frac{cA_{eq}}{4V}\right)t} \right) \quad (14)$$



La figura 11 il·lustra l'evolució exponencial que segueix de l'equació (14).

Figura 11. Evolució del senyal en un recinte en encendre una font sonora en  $t = 0$  i apagar-la quan s'ha arribat al règim permanent



Font: Carrión Isbert (1998).

Una vegada el nivell de pressió sonora ha assolit el valor d'equilibri  $p_s$ , s'apaga la font sonora. En apagar la font sonora, el nivell de pressió sonora anirà decreixent en funció del grau d'absorció de les superfícies del recinte. L'evolució de la caiguda s'obté forçant  $W_{source} = 0$  a l'expressió (10) i, resolent-ne l'equació diferencial que se'n deriva, s'arriba la solució següent:

$$p^2(t) = p_s^2 e^{-\left(\frac{cA_{eq}}{4V}\right)t} \quad (15)$$

amb  $t = 0$  en el moment en què s'apaga la font. S'observa que el decaïment és exponencial: la gràfica semi-logarítmica de la figura 11 s'utilitza habitualment, ja que la caiguda passa a ser lineal en el cas ideal.

El **temps de reverberació (RT)** es defineix com el **temps que tarda el nivell de pressió sonora a decaure 60 dB**, és a dir, a decaure fins a una milionèsima part del seu valor quadràtic. Per obtenir-lo, s'opera de la següent forma:

$$10 \log_{10} \left( \frac{p_s^2}{p_{ref}^2} \right) - 60 \text{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{p_s^2 e^{-\left(\frac{cA_{eq}}{4V}\right)RT}}{p_{ref}^2} \right) \rightarrow 10^{-6} = e^{-\left(\frac{cA_{eq}}{4V}\right)RT} \quad (16)$$

I s'arriba a la següent formulació de Sabine per al temps de reverberació:

$$RT_S = \frac{0,16 V}{A_{eq}} \quad (17)$$

Per a volums elevats i freqüències elevades, l'aire absorbeix les ones acústiques. L'absorció s'afegeix additivament a l'àrea d'absorció equivalent d'acord amb l'equació següent:

$$A_{eq} = \sum_{i=1}^{N_{sup}} S_i \alpha_i + 4mV \quad (18)$$

essent  $m$  l'absorció de l'aire, que depèn de la temperatura, la humitat i la pressió atmosfèrica.

Per a una humitat relativa ( $h$ ) entre 20% i 70%, una bona aproximació del valor de  $m$  és:

$$m = 5,5 \cdot 10^{-4} \left( \frac{50}{h} \right) \left( \frac{f}{1000} \right)^{1,7} \quad (19)$$

essent  $f$  la freqüència expressada en Hz.

Substituint l'expressió (18) a la (17), en resulta la fórmula de Sabine, àmpliament utilitzada per calcular el temps de reverberació d'un recinte en funció de l'absorció acústica total i del seu volum, segons Sabine:

$$RT_S = \frac{0,16V}{\sum_{i=1}^{N_{sup}} S_i \alpha_i + 4mV} \quad (20)$$

### Exemple 2

Es desitja millorar el disseny acústic d'una sala de cinema de dimensions 5 m x 7 m x 20 m (paral·lelepípede: alçària x llargària x amplària). S'ha observat que el temps de reverberació a 1 kHz és de 1,5 seg, quan hauria de ser d'1 seg.

En quant hauria d'incrementar-se el valor del coeficient d'absorció mitjà del recinte per aconseguir el temps de reverberació òptim a 1 kHz?

### Solució

En primer lloc, calculem el volum i la superfície total del recinte:

$$V = 5 \cdot 7 \cdot 20 = 700 \text{ m}^3$$

$$S_{tot} = 2(5 \cdot 7) + 2(5 \cdot 20) + 2(7 \cdot 20) = 550 \text{ m}^2 \quad (21)$$

Ara, combinant les equacions (13) i (17), i aplicant-hi els resultats obtinguts a (21) i el valor del temps de reverberació de l'enunciat (1,5 seg), obtenim el coeficient d'absorció mitjà a 1 kHz:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\alpha} &= \frac{A_{eq}}{S_{tot}} \\ RT_S &= \frac{0,16V}{A_{eq}} \cdot A_{eq} = \frac{0,16V}{RT_S} \end{aligned} \right\} \bar{\alpha}_{@1kHz} = \frac{0,16V}{RT_S S_{tot}} = \frac{0,16 \cdot 700}{1,5 \cdot 550} \cong 0,14 \quad (22)$$

En el cas que es desitgés aconseguir un temps de reverberació òptim d'1 seg, el valor del coeficient d'absorció mitjà a 1 kHz quedaria com:

$$\bar{\alpha}_{@1kHz} = \frac{0,16 \cdot 700}{1 \cdot 550} \cong 0,2 \quad (23)$$

Per tant, el valor del coeficient d'absorció mitjà a 1 kHz hauria d'incrementar-se en, aproximadament, 0,06 per assolir el temps de reverberació òptim a 1 kHz (o, en termes relatius, incrementar-se en un factor  $\frac{0,2}{0,14} \cong 1,49$ ). Es podria aconseguir aquest augment de l'absorció a mitges freqüències fent ús d'algun material porós, tal i com s'explica en les seccions següents.

#### 1.3.4. Fórmula d'Eyring-Norris

La fórmula de Sabine fou la primera a relacionar el temps de reverberació amb l'absorció acústica total del recinte. Hi ha més expressions que relacionen ambdues magnituds que es poden utilitzar en diferents casos, tot i que l'original encara continua tenint molta importància a dia d'avui (Arau i Puchades, 1999). A continuació se'n detalla la **fórmula d'Eyring-Norris**, que considera **atenuacions unitàries en cada reflexió a què està sotmès el raig acústic**.

Es considera que, una vegada apagada la font, l'energia de les ones s'atenua en un factor  $(1 - \bar{\alpha}_e)$  en cada reflexió que experimenta amb les diferents superfícies del recinte. Es defineix el **coeficient d'absorció energètic mitjà d'incidència aleatòria** ( $\bar{\alpha}_e$ ) d'acord amb la següent expressió:

$$\bar{\alpha}_e = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sup}} \alpha_{ei} S_i}{S_{tot}} \quad (24)$$

essent  $\alpha_{ei}$  el coeficient d'absorció energètic d'incidència aleatòria de cadascuna de les superfícies del recinte.

Es pot demostrar que el **camí mitjà lliure** ( $l_m$ ) entre reflexions en un recinte reverberant rectangular de volum  $V$  i superfície total  $S$  és:

$$l_m = \frac{4V}{S} \quad (25)$$

I, així mateix, que el nombre de reflexions per segon ( $N$ ) és:

$$N = \frac{cS}{4V} \quad (26)$$

En aquest cas, per trobar el temps de reverberació ( $TR$ ), es planteja el procediment anàleg al ja aplicat en l'equació (16) per arribar a la fórmula de Sabine:

$$10 \log_{10} \left( \frac{p_s^2}{p_{ref}^2} \right) - 60 \text{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{p_s^2 (1 - \bar{\alpha}_e)^{N RT}}{p_{ref}^2} \right)$$

$$10^{-6} = (1 - \bar{\alpha}_e)^{N RT} \rightarrow -6 \ln 10 = NRT \ln(1 - \bar{\alpha}_e) \quad (27)$$

I, finalment, s'arriba a la **fórmula d'Eyring-Norris**:

$$RT_{E-N} = \frac{0,16V}{-\text{Sln}(1 - \bar{\alpha}_e)} \quad (28)$$

Si es té en compte l'absorció de l'aire, la fórmula queda:

$$RT_{E-N} = \frac{0,16V}{-\text{Sln}(1 - \bar{\alpha}_e) + 4mV} \quad (29)$$

La fórmula d'Eyring-Norris s'assembla molt a la de Sabine. Per recintes reverberants, on  $\bar{\alpha}_e \ll 1$ , els coeficients d'absorció de Sabine ( $\alpha$ ) i els coeficients d'absorció energètics ( $\alpha_e$ ) es poden considerar equivalents:

$$\alpha = -\ln(1 - \bar{\alpha}_e) \cong \alpha_e \quad (30)$$

Es important ressaltar les següents casuístiques rellevants:

- Per a **recintes molt vius amb molt poca absorció acústica**, on el camp és molt difús, **les dues fórmules són iguals** tot i provenir de punts d'inici diferents. La fórmula d'Eyring-Norris tracta amb coeficients d'absorció energètics que mai poden ser superiors a la unitat, a diferència dels coeficients d'absorció aparents de Sabine, que sí poden portar a valors erronis majors a la unitat.
- Per **recintes amb una absorció elevada, la formulació d'Eyring-Norris és teòricament més correcta que la de Sabine**.
- En el cas extrem d'un recinte amb una absorció mitjana màxima ( $\bar{\alpha}_e = 1$ ), el temps de reverberació segons Eyring-Norris és  $RT_{E-N} = 0$ , mentre que el de Sabine és superior a 0:  $RT_S = 0,16V$ .

Per ajustar correctament el temps de reverberació d'un recinte s'utilitzen les fórmules anteriors a base d'assignar diferents materials absorbents a les diferents superfícies del recinte. Els materials absorbents es caracteritzen pel coeficient d'absorció acústic, que, tal i com s'explica més endavant a l'apartat 2.3, es mesura en cambra reverberant seguint la formulació de Sabine. D'aquesta manera, doncs, no és estrany que, per calcular el  $RT$  d'un recinte, s'utilitzi la fórmula de Sabine tot i les mancances que presenta.

Ja s'ha fet esment que, a banda de les fórmules de Sabine i d'Eyring-Norris, n'hi ha d'altres que relacionen el temps de reverberació amb l'absorció del recinte en funció de l'emplaçament del material absorbent. Aquesta formulació no és tractada en aquest mòdul i es pot consultar a la bibliografia corresponent: Arau i Puchades (1999).

#### 1.4. Distància crítica i nivell de pressió sonora en camp difús

En situar una font sonora en un recinte, a les zones properes a ella hi haurà un nivell de pressió sonora més elevat, provinent del **camp directe**. A mesura que la distància de la font sonora augmenta, el nivell de pressió sonora disminueix fins a arribar a un valor estable, corresponent al **camp reverberant** provocat per totes les reflexions.

A una certa distància de la font, l'energia del so directe s'igualava amb l'energia de la cua reverberant. Aquesta distància es denomina **distància crítica** i és important en el disseny acústic de recintes. Al llarg d'aquest apartat en trobarem l'expressió matemàtica.

En primer lloc, es defineix el **factor de directivitat** ( $Q$ ) com la **relació entre la intensitat de la font sonora en una certa direcció** ( $I_{\theta,\varphi}$ ), definida per les coordenades polars  $(\theta,\varphi)$ , respecte a la d'una font omnidireccional d'igual potència acústica ( $I_o$ ):

$$Q = \frac{I_{\theta,\varphi}}{I_o} \quad (31)$$

En segon lloc, la **constant de la sala** ( $R$ ) és un **indicatiu del grau d'absorció del recinte** i queda definida en funció del valor d'absorció acústica i de les superfícies:

$$R = \frac{S_{tot} \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (32)$$

El valor de la constant de la sala depèn del recinte i és funció de la freqüència.

Tenint en compte l'emplaçament i la directivitat de la font sonora ( $Q$ ) i la constant de la sala ( $R$ ), es pot expressar el **nivell de pressió sonora en un recinte** ( $L_p$ ) a partir de la **potència de la font** ( $L_w$ ), les **contribucions del camp directe** ( $\frac{Q}{4\pi r^2}$ ) i les **contribucions del camp reverberant** ( $\frac{4}{R}$ ):

$$L_p \cong L_w + 10 \log_{10} \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (33)$$

Respecte d'aquesta equació (33), es important tenir en compte el següent:

- Per a recintes amb molta absorció acústica (valors molt elevats de  $R$ ), la contribució del camp reverberant serà baixa ( $\frac{Q}{4\pi r^2} \gg \frac{4}{R}$ ).

- Per a sales anecoiques ( $R \rightarrow \infty$ ), l'expressió resultant defineix la propagació en camp lliure ( $\frac{4}{R} \rightarrow 0 \cdot \left[ \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right] \approx \frac{Q}{4\pi r^2}$ ), en què el nivell de pressió sonora decau 6 dB en doblar la distància:

$$L_p \cong L_W + 10 \log_{10} Q - 20 \log_{10} r - 11 \quad (34)$$

- En recintes amb molt poc material absorbent ( $R \rightarrow 0$ ), la contribució del camp directe tindrà poca importància i el nivell de pressió sonora serà bàsicament causat pel camp reverberant ( $\frac{Q}{4\pi r^2} \ll \frac{4}{R}$ ).

Com ja se n'ha fet esment a l'inici de l'apartat, la **distància crítica** ( $d_c$ ) és **aquella distància a la font sonora en què el camp directe i el camp reverberant són iguals**.

La seva expressió resulta d'igualar la contribució d'ambdós camps i el seu valor depèn únicament del factor de directivitat ( $Q$ ) i de la constant de la sala ( $R$ ):

$$d_c = 0,14 \sqrt{QR} \quad (35)$$

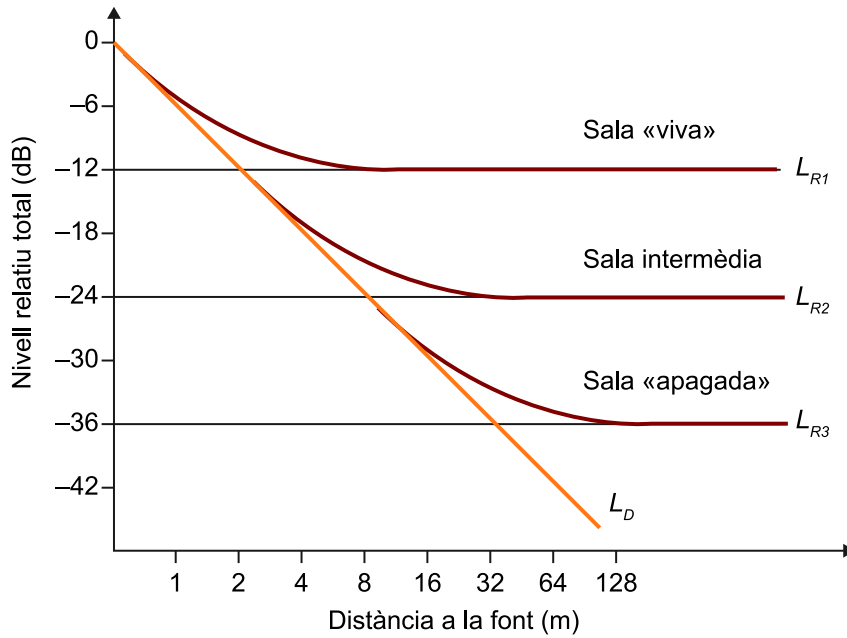
Amb relació als valors que pot adoptar aquesta distància crítica en funció del grau d'absorció del recinte i del factor de directivitat:

- Per a **recintes amb una absorció elevada**,  $d_c$  serà **gran i una bona zona del camp acústic estarà regit pel camp directe**. La zona del camp directe presenta un grau d'intel·ligibilitat de la paraula superior a la zona de camp reverberant, ja que la cua reverberant hi és absent i no perjudica l'índex.
- Per a **recintes amb poca absorció acústica**, com ara les sales reverberants,  $d_c$  serà **baixa i gran part del camp acústic vindrà donada per la contribució del camp reverberant**. De la mateixa manera, si la font és molt directiva, la distància crítica també s'incrementarà, ja que tota la intensitat acústica es distribuirà en un angle sòlid més petit proporcionant major nivell de pressió sonora.

A mesura que el punt d'escolta s'allunya de la font sonora i mentre s'està en camp directe, el nivell de pressió sonora decreix 6 dB cada vegada que es dobla la distància. En arribar a la distància crítica, el nivell de pressió sonora és 3 dB superior al que hi hauria en camp lliure. A la zona de camp reverberant, el nivell de pressió sonora és constant en tots els punts de la sala i independent de la distància entre la font sonora i el punt del camp acústic. A la figura

12 es mostra el nivell del camp reverberant ( $L_{Ri}$ ) respecte el nivell del camp directe ( $L_D$ ) per tres sales diferents (de més a menys reverberant): sala viva, sala intermèdia i sala apagada.

Figura 12. Nivells relatius entre el camp directe i el camp reverberant en sales amb diferents graus d'absorció acústica



Font: Carrión Isbert (1998).

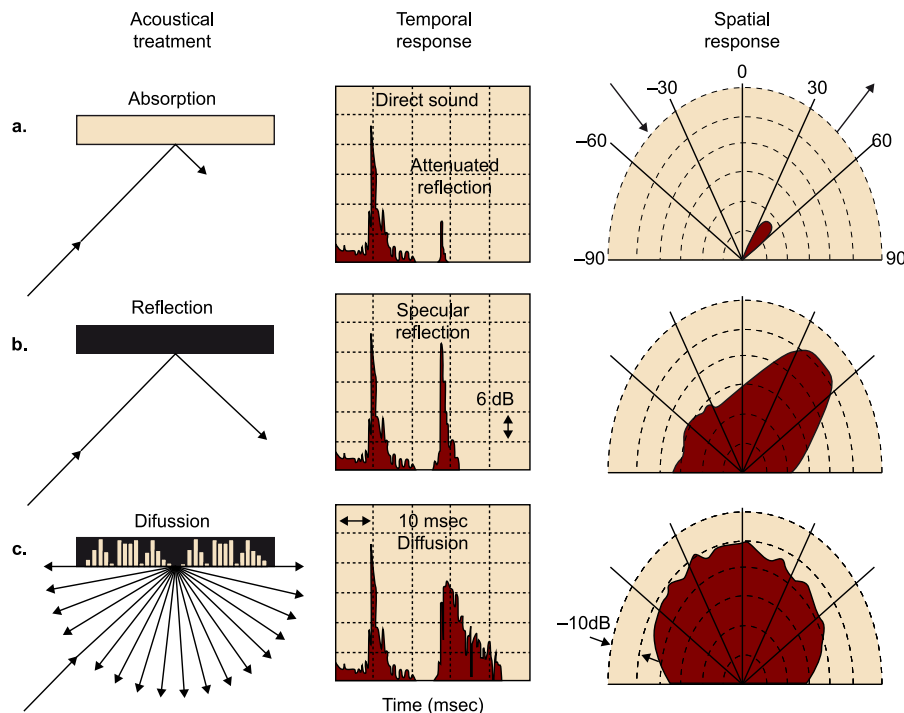
## 2. Materials absorbents, reflectors i difusors del so

A l'hora de dissenyar l'acústica d'un recinte convé tenir en compte tres tipus de materials bàsics: **absorbents acústics, reflectors i difusors del so**.

Per tal de **balancejar correctament el temps de reverberació del recinte, s'utilitzen materials absorbents del so**, de tal forma que l'ona acústica reflectida per la superfície revestida d'aquests materials té una intensitat molt menor a la incident. L'ona reflectida, d'aquesta manera, aportarà poca energia al camp acústic, i la cua reverberant serà menor que si no s'hagués instal·lat cap material absorbent. A la figura 13a es representen les respostes temporal i espacial d'un element absorbent del so en incidir-hi un raig acústic amb un angle d'incidència d'aproximadament 45°.

L'absorció acústica d'un recinte ve donada bàsicament pels revestiments de les superfícies o materials instal·lats al sí del recinte, les persones i les butaques, i, per a volums suficientment elevats, l'aire. Tots aquests elements incrementen l'absorció acústica del recinte i redueixen el temps de reverberació. Amb un procediment de disseny adequat, és possible ajustar-lo al seu valor òptim, que és funció de l'ús del recinte.

Figura 13. Comparació dels principis físics de **a) absorció, b) reflexió i c) difusió**: es comparen les seves respostes temporals i espacials en incidir-hi un raig en una única direcció



Font: Everest i Pohlmann (2001).



Els elements reflectors del so s'empren per incrementar la presència de primeres reflexions a la zona del públic, millorant la sensació de sonoritat i la intel·ligibilitat de la paraula en recintes destinats a la paraula. Els elements reflectors són superfícies llises i no poroses, i poden ser plans o amb un cert grau de curvatura. Anàlogament, la figura 13b representa les respostes d'un element reflector del so en incidir-hi un raig acústic amb un angle d'incidència d'aproximadament 45°. L'energia reflectida per l'element és, òbviament, molt més elevada que pel cas del material absorbent. La reflexió resultant segueix la llei especular, però en la realitat es correspon a un angle d'aproximadament 30°. En el procés de disseny de recintes, cal assegurar una bona cobertura de primeres reflexions, evitar ecos i reflexions massa importants en una mateixa direcció.

Els difusors del so, a diferència dels reflectors acústics, tenen la propietat de dispersar l'energia incident en el màxim nombre de direccions possibles, tal com mostra la resposta espacial de la figura 13(c). Aquests elements s'utilitzen per crear un camp màximament difús i evitar possibles anomalies acústiques del recinte.

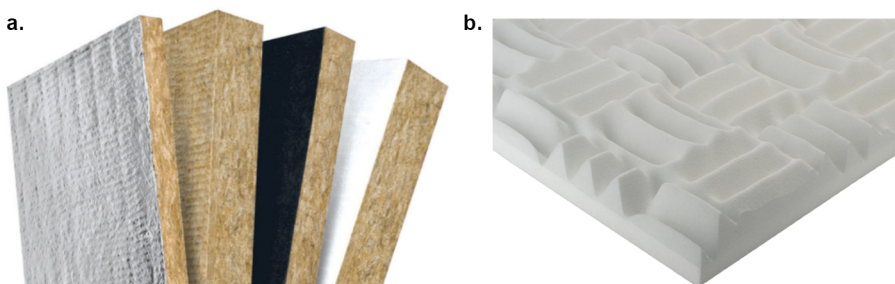
## 2.1. Absorbents porosos

Els absorbents porosos són materials amb estructures obertes on l'aire pot accedir-hi. Les ones acústiques són absorbides en forma de calor en viatjar a través dels porus.

A major grau de porositat del material i major densitat, major absorció acústica.

Els materials porosos es formen bàsicament amb fibres de llana de roca o de vidre, escumes de melamina, resina o poliuretà. A la figura 14 es mostren un conjunt de materials de llana de roca, de diferents gruixos, densitats i acabats, així com un panell d'escuma de resina de melamina. És important destacar que el procés d'absorció acústica únicament es pot donar si els porus són accessibles per l'ona acústica. Per tant cal tenir molta cura en els mètodes de pintat d'aquests materials, que poden tancar els porus i anul·lar-ne l'efecte absorbent.

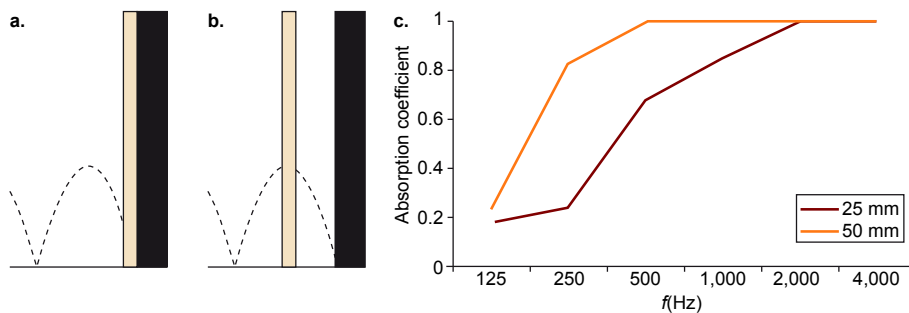
Figura 14. a) Llana de roca amb diferents acabats. b) Escuma de resina de melamina



L'absorció acústica es quantifica amb el **coeficient d'absorció acústica** ( $\alpha$ ), que pren valors des de **0 (absorció nul·la)** fins a **1 (absorció màxima)**. És **funció de la freqüència** i s'expressa en bandes d'octava o de terç d'octava.

Els materials porosos s'acostumen a col·locar sobre superfícies rígides, tal i com es mostra a la figura 15a, on convé recordar que la velocitat de les partícules és nul·la. Si el gruix del material porós és  $g$ , únicament podrà absorbir les longituds d'ona que compleixin  $\lambda \ll g$ , de forma que l'ona acústica present dins del material es correspongui a valors elevats de velocitat de les partícules. Per a freqüències baixes (o longituds d'ona altes), gran part de l'ona acústica que estigui dins del material tindrà velocitat nul·la o molt baixa i no podrà ser absorbida.

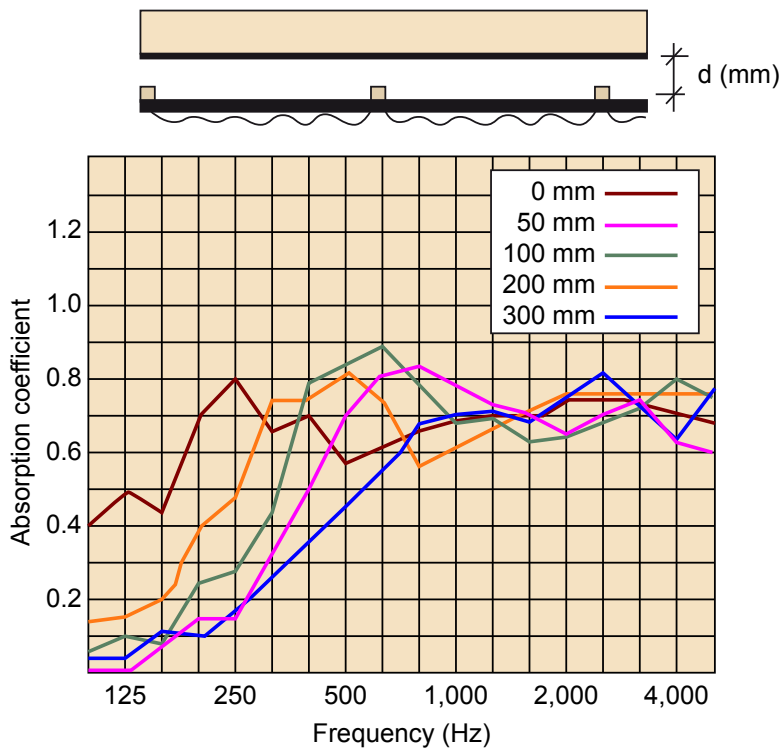
Figura 15. Velocitat de les partícules en l'escenari d'un material absorbent instal·lat **a)** sobre una paret rígida i **b)** a una certa distància d'una paret rígida. **c)** Absorció acústica de diferents materials porosos en funció del gruix



Font: Cox i D'Antonio (2009).

Per tant, l'absorció acústica dependrà del **gruix del material**. La figura 15c mostra els coeficients d'absorció acústica de dos materials porosos d'igual densitat però diferent gruix. **El material amb un gruix superior comença a absorbir a freqüències menors que el material més prim. Els materials porosos són bons absorbents per altes freqüències, mentre que per freqüències mitges i baixes els resulta més complex assolir valors d'absorció acústica elevats.**

Figura 16. Absorció acústica d'un material porós en funció de la distància a la paret



Font: Newell (2008).

Una estratègia per aconseguir **valors d'absorció acústica elevats per a mitges i baixes freqüències** és **instal·lar el material absorbent a una certa distància ( $d$ ) de la paret rígida**, tal i com es mostra a la figura 15b. D'aquesta manera s'aconsegueix que l'absorció màxima es doni a la freqüència que compleix  $d = \lambda/4$ , on la velocitat de les partícules és màxima. **A major distància, menor serà la freqüència d'absorció màxima**, tal com es pot observar a les corbes d'absorció acústica d'un panell absorbent situat a varies distàncies (de 0 mm a 300 mm) de la paret rígida, il·lustrades a la figura 16. Per a una distància de 200 mm, la freqüència teòrica d'absorció màxima seria 430 Hz, que coincideix amb la banda freqüencial de 500 Hz. **A mesura que s'incrementa la distància del material absorbent a la paret, l'absorció a baixes freqüències creix. La contrapartida és la disminució dels valors d'absorció a alta freqüència.**

Els materials s'instal·len en diferents superfícies de les sales a tractar acústicament, amb l'objectiu d'obtenir un temps de reverberació adequat a l'ús del recinte. La figura 17 mostra dos exemples típics de condicionament acústic, una sala de cinema i un despatx diàfan amb diferents llocs de treball:

a) En el primer cas, cal un **temps de reverberació baix** per assegurar que el recinte no modifica o altera les bandes sonores de les pel·lícules. El temps de reverberació ve donat per l'elecció de les **butaques**, que, com més endavant s'explicarà, són un element clau en el disseny d'aquest tipus de recintes, i el cel ras a base de panells de llana de roca.

b) En el segon cas, es requereix un temps de reverberació suficientment reduït perquè els treballadors no hagin d'aixecar la veu per entendre's. En espais amb un pobre tractament acústic, és comú que les persones hagin de parlar més fort, ja que la mateixa reverberació dificulta la comprensió del missatge entre interlocutors. El fet que cada interlocutor aixequi la veu implica que els altres també ho facin, incrementant el nivell de pressió sonora. Alhora, el temps de reverberació haurà d'estar prou balancejat per evitar la sensació d'estar en una sala excessivament sorda o apagada. En el cas de l'exemple, es resol el problema amb la instal·lació de **cilindres d'escuma de melamina penjats del sostre** i pintats de colors amb tècniques que no tapen els porus.

Figura 17. a) Instal·lació de panells porosos a un cel ras. b) Instal·lació de cilindres porosos suspesos del sostre



## 2.2. Ressonadors

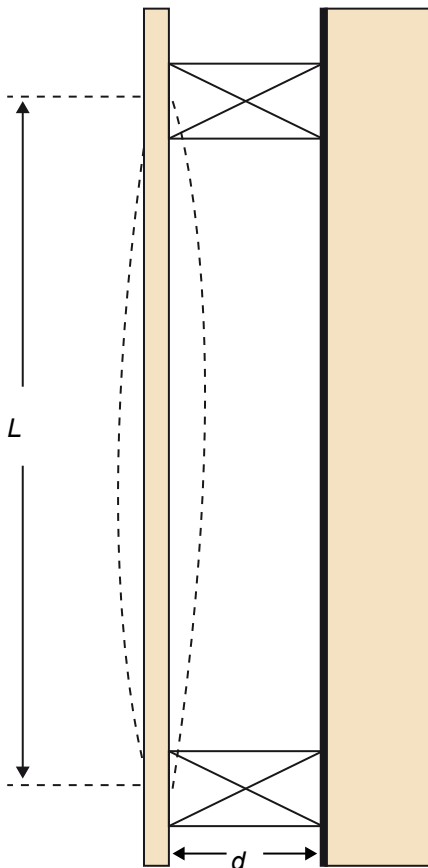
Els **ressonadors** són **absorbents selectius** que tenen un màxim d'absorció acústica a una freqüència, denominada **freqüència de ressonància**.

Bàsicament hi ha dos tipus de ressonadors: els **ressonadors de membrana** (l'element de massa ve donat per un panell) i els **ressonadors de Helmholtz** (l'element de massa ve donat per una cavitat d'aire que separa un volum d'aire del camp acústic). Ambdós absorbents selectius es comporten com un sistema massa-molla.

### 2.2.1. Ressonador de membrana

Un ressonador de membrana (o diafragmàtic) està format per un panell no porós i flexible instal·lat sobre una paret rígida i definint un cavitat d'aire entre les dues superfícies, tal i com s'il·lustra a la figura 18.

Figura 18. Ressonador de membrana o diafragmàtic



Font: Kuttruff (2009).

En incidir una ona acústica sobre el resonador, aquest experimenta una vibració causada pel sistema massa-molla. El panell actua com a massa i l'aire de la cavitat com a molla. La vibració és màxima a la **frequència de ressonància**, que ve definida per la següent expressió:

$$f_o = \frac{60}{\sqrt{d\rho_m}} \quad (36)$$

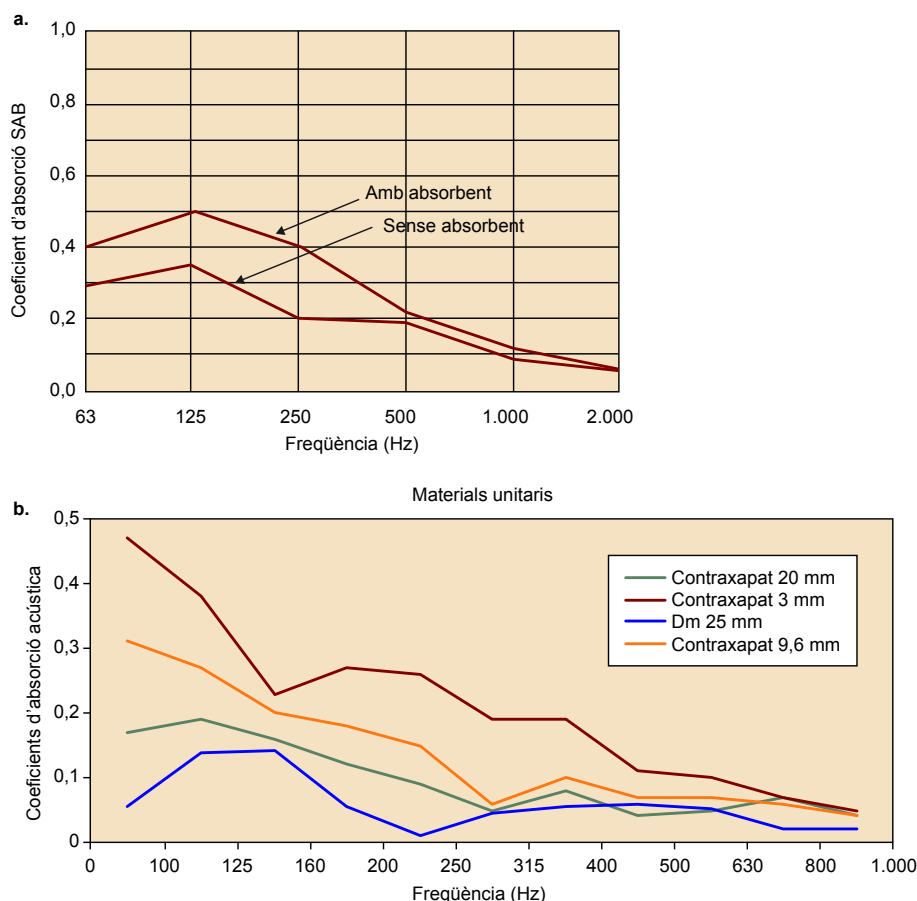
essent  $f_o$  la freqüència de ressonància, expressada en Hz;  $d$  la distància entre el panell i la paret rígida, expressada en m; i  $\rho_m$  la densitat superficial del panell, expressada en  $\text{kg/m}^2$ .

Per tant, **com més gran sigui el resonador i més dens sigui el panell, més baixa serà la freqüència de ressonància**. S'observa que aquest comportament concorda amb el fet que un timbal petit, com pot ser un tamborí, sona menys greu que un timbal gran.

Tot i que el resonador de membrana s'està tractant com un absorbent selectiu, també és cert que en donar-li un cop, aquest radia energia acústica a la freqüència de ressonància. La força del cop és molt superior a la força que l'ona acústica aplica sobre el resonador quan hi incideix. En el primer dels casos, es produeix una vibració de tal magnitud que el resonador radia energia acústica cap a l'exterior. En el cas que aplica, quan una ona acústica hi incideix, la part d'energia radiada és molt petita i, en general, és imperceptible.

Per aconseguir augmentar l'absorció del ressonador diafragmàtic, s'insereix un material absorbent a la cavitat a base de llana de roca o de vidre. En aquest cas, el ressonador deixa de ser tant selectiu i absorbeix en un rang freqüencial major, tal i com es mostra a la figura 19a.

Figura 19. a) Corbes genèriques d'absorció d'un ressonador de membrana, amb  $\rho_m = 1,8 \text{ kg/m}^2$  i  $d = 4,4 \text{ cm}$  (amb i sense material absorbent a la cavitat). b) Corbes d'absorció acústica de diferents ressonadors de membrana amb una cavitat de 40 cm farcida amb llana de roca



Font: a) Carrión Isbert (1998).

La figura 19b il·lustra les corbes d'absorció acústica de diferents ressonadors de membrana, tots formats per una cavitat de 40 cm farcida de llana de roca. Es pot observar que, en funció del panell considerat (contraxapats de 3, 9,6 i 20 mm, i un aglomerat de fusta de 25 mm de gruix), l'absorció varia significativament. En efecte, la fórmula (36) és aproximada, i la freqüència de ressonància també dependrà de la rigidesa i de les dimensions del panell.

### 2.2.2. Ressonador de Helmholtz

Pel que fa als ressonadors de Helmholtz, es distingeix entre el ressonador simple i el múltiple.

#### 1) Ressonador simple de Helmholtz

El **ressonador simple de Helmholtz** està format per un volum  $V$  separat del recinte per una petita obertura de longitud  $l$  i secció  $S$ , tal i com s'il·lustra a la figura 20a.

En aquest cas, l'aire de l'obertura actua com a element massic i l'aire del volum com a element elàstic del sistema massa-molla.

La freqüència de ressonància ( $f_o$ , en Hz) per a un ressonador amb secció circular és:

$$f_o = 5480 \sqrt{\frac{S}{V(l + 1,6a)}} \quad (37)$$

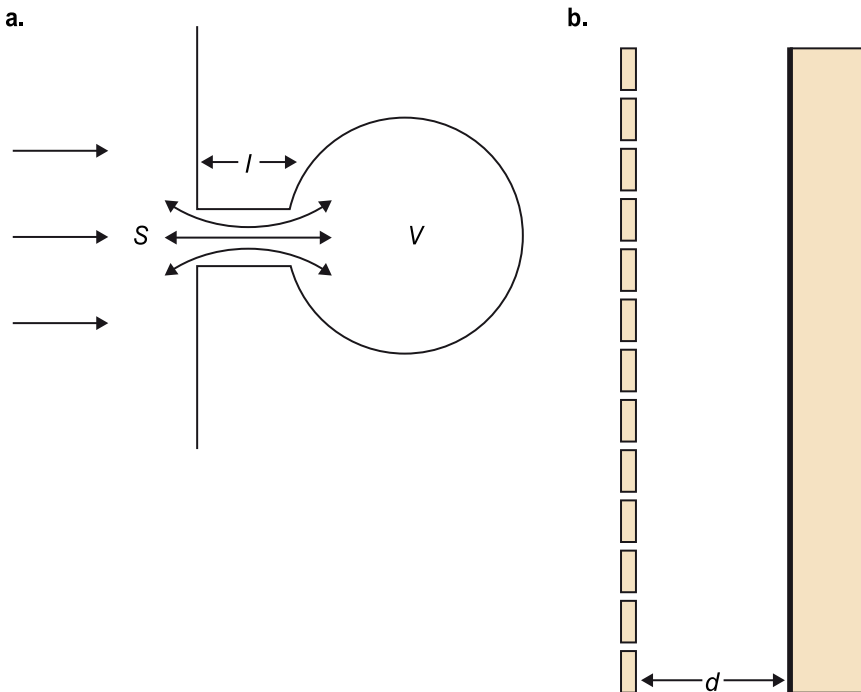
essent  $l$  la longitud del coll (en cm),  $a$  el radi de l'obertura (en cm),  $V$  el volum de la cavitat (en  $\text{cm}^3$ ) i  $S$  la secció transversal del coll (en  $\text{cm}^2$ ).

Cal fer notar que la **longitud efectiva del coll** ( $l_{ef} = l + 1,6a$ ) és superior a  $l$  pel terme  $1,6a$ , ja que l'aire contigu al coll també actua com a element massic i també es mou. Alhora, la formulació resultant determina que **la forma del ressonador no és rellevant pel que fa al valor de la freqüència de ressonància**, ja que aquesta únicament depèn de la relació  $\frac{S}{V \cdot l_{ef}}$ .

En aquest cas, a semblança del ressonador diafragmàtic, és possible excitar la freqüència de ressonància del ressonador bufant al coll.

En bufar al coll d'una ampolla semibuida el so és més agut que si la mateixa ampolla està totalment buida. En el primer cas, el volum és menor, ja que el líquid de l'ampolla es comporta com si fos la paret del ressonador, mentre que, en el segon cas, amb l'ampolla buida el volum s'incrementa i la freqüència de ressonància disminueix.

Figura 20. a) Ressonador simple de Helmholtz. b) Ressonador múltiple de Helmholtz



Font: Kuttruff (2009).

S'acostumen a instal·lar conjunts de resonadors simples de Helmholtz per reduir la presència de modes propis en recintes petits i aconseguir una àrea d'absorció equivalent major que amb únic resonador.

El resonador simple de Helmholtz acostuma a presentar una absorció acústica en una banda molt estreta al voltant de la freqüència de ressonància. Per augmentar el rang freqüencial d'absorció s'utilitzen els resonadors múltiples.

## 2) Ressonador múltiple de Helmholtz

El **resonador múltiple de Helmholtz** està format per un panell no porós i flexible amb una sèrie de perforacions definint una cavitat entre ambdues superfícies, tal i com s'il·lustra a la figura 20b.

Els materials més utilitzats per a la seva realització són: fusta, xapes metàl·liques o plafons de cartró-guix. Segons la implementació de les perforacions, es poden classificar en resonadors a base d'**orificis** o **perforacions**, **ranures** i **llistons**. A la figura 21 es mostra un resonador de Helmholtz amb perforacions instal·lat com a cel ras, una solució utilitzada molt habitualment.



Figura 21. Panell perforat



Aquest tipus de configuracions es poden veure com un conjunt de ressonadors simples de Helmholtz amb volums acoblats que minven el caràcter selectiu del ressonador. En aquest cas, la longitud efectiva del coll ve determinada pel gruix efectiu del panell ( $D_{ef}$ ), ja que part de l'aire contingut als orificis també actua com a element massic, de manera que:

$$f_o = 5480 \sqrt{\frac{S}{VD_{ef}}} \quad (38)$$

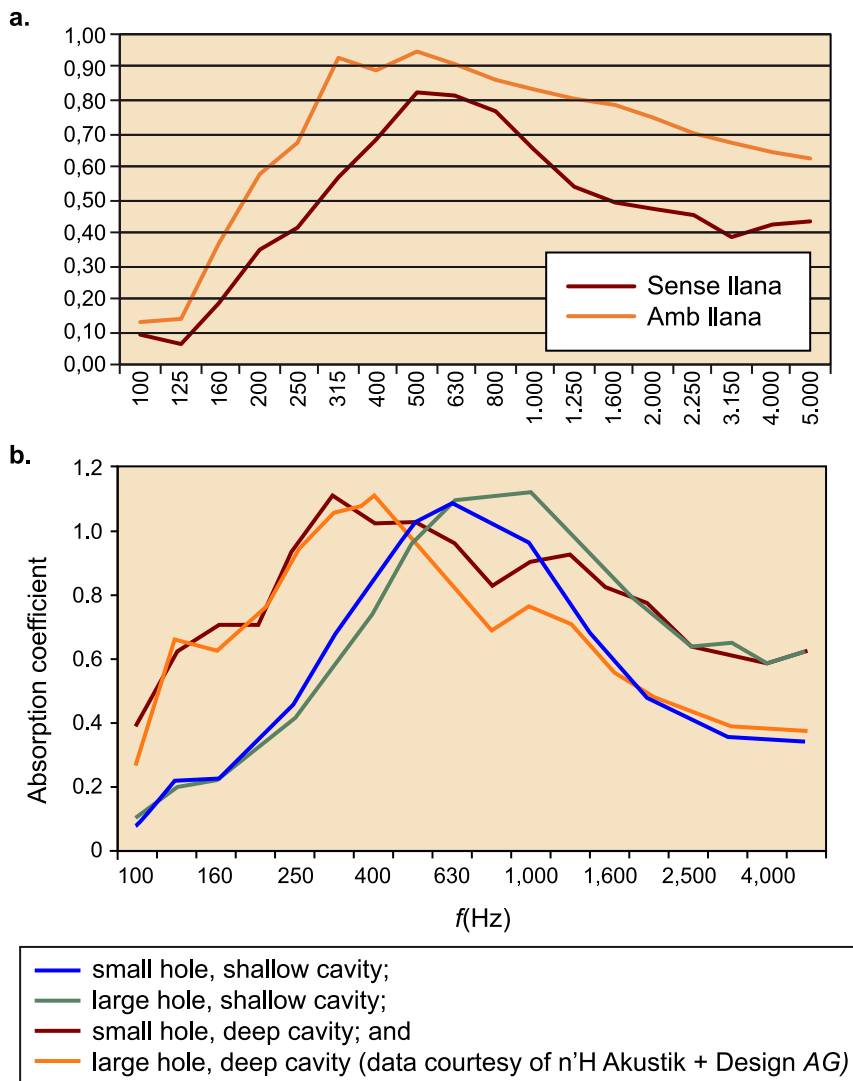
essent  $f_o$  la freqüència de ressonància (en Hz),  $S$  la suma de les seccions transversals de tots els forats (en  $\text{cm}^2$ ),  $V$  el volum de la cavitat (en  $\text{cm}^3$ ) i  $D_{ef}$  l'espessor efectiva del panell (en cm).

Considerant el coeficient de perforació del panell ( $P$ ) i la distància entre el panell i la paret rígida ( $D$ ), la fórmula (38) es pot reescriure com:

$$f_o = 5480 \sqrt{\frac{P}{dD_{ef}}} \quad (39)$$

Per tal d'augmentar l'eficiència del ressonador, s'afegeix esmorteïment a base d'instal·lar llana mineral a la cavitat o practicant orificis molt petits que facilitin la fricció. En general, **en instal·lar llana mineral a la cavitat, el coeficient d'absorció augmenta i la freqüència de màxima absorció disminueix**, tal com es mostra a la figura 22a.

Figura 22. a) Coeficients d'absorció acústica de panells perforats amb cavitat amb llana i sense llana. b) Coeficients d'absorció acústica de panells perforats amb diferents coeficients de perforació i distància a la paret rígida



Font: Cox i D'Antonio (2009).

Els coeficients es corresponen a un panell perforat instal·lat amb una cavitat d'aire de 12 cm de gruix, amb i sense farciment de llana de roca. El panell és d'un aglomerat de fusta, amb un gruix de 12 mm. El radi dels orificis és de 12,5 mm, i la distància entre eixos de 32 mm. A la cara posterior del panell hi ha adherit un vel acústic. En el cas de panells perforats, es pot demostrar que  $P = \frac{\pi a^2}{bc}$ , essent  $a$  el radi de l'orifici, i  $b$  i  $c$  la distància entre centres dels orificis en les dues dimensions,  $x$  i  $y$ . Considerant que  $D_{ef} = D + 1,6a$  per obertures circulars, la freqüència de ressonància teòrica és  $f_o = 612$  Hz força propera al valor mesurat que se situa entre les bandes de 500 i 630 Hz.

A mesura que el coeficient de perforació augmenta, la freqüència de ressonància també ho fa ( $P \uparrow \rightarrow f_o \uparrow$ ). I, a semblança del ressonador diafragmàtic, per panells més gruixuts i més separats de la paret, la freqüència de ressonància decreix ( $D_{ef} \uparrow, d \uparrow \rightarrow f_o \downarrow$ ).

A la figura 22b es mostren diferents corbes dels coeficients d'absorció acústica de panells perforats amb diferents coeficients de perforació i distàncies de la paret rígida. Per a forats més grans, la freqüència de ressonància s'incrementa, així com l'absorció a altes freqüències; per contra, l'absorció a baixes freqüències disminueix. Així mateix, per a ressonadors instal·lats a major distància de la paret rígida, l'absorció es desplaça a baixes freqüències.

Cal fer notar que els valors d'absorció aquest cas il·lustrat a la figura 22b són, erròniament, majors que la unitat. En tractar-se d'un coeficient d'absorció sabínic, i per tant aparent, pot donar-se aquest cas en mesurar-lo en una sala reverberant. Aquesta anomalia se soluciona assignant-los un valor unitari.

Finalment, és interessant ressaltar que, per tal d'augmentar el rang freqüencial d'absorció dels ressonadors múltiples de Helmholtz, s'utilitzen diferents estratègies, com ara contemplar diferents mides de perforacions o situar el panell perforat esbiaixadament respecte la paret.

### 2.3. Mesura dels coeficients d'absorció en sala reverberant

Per tal d'obtenir el coeficient d'absorció acústica, s'acostuma a mesura en sala reverberant d'acord amb la normativa internacional ISO 354 (ISO 354:2003, 2003). Aquestes mesures determinen el grau d'absorció acústica que presenta un determinat material en les bandes freqüencials dels terços d'octava compresos entre 100 Hz i 5 kHz, així com el coeficient d'absorció sonora ponderat  $\alpha_w$  i l'indicador de forma L.M.H., segons la ISO 11654:1998.

Les mesures es realitzen en sales reverberants, que són sales que alberguen un camp difús gràcies a la naturalesa reflectant de les superfícies i una geometria específica per a aquesta aplicació. A la figura 23 es mostren uns panells de llana de roca instal·lats en sala reverberant, amb els micròfons de mesura i la font dodecaèdrica. Els panells de llana de roca estan encerclats per un marc perimetral, de tal forma que únicament s'avalua l'absorció acústica de la seva superfície, no pas la dels laterals.

Figura 23. Sala reverberant



A partir de la mesura del temps de reverberació de la sala buida i de la sala ocupada amb el material absorbent normalment descansant al terra, el coeficient d'absorció acústica s'obté fent ús de la següent expressió:

$$\alpha = \frac{55,3}{S} V \left( \frac{1}{c_2 R T_2} - \frac{1}{c_1 R T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad (40)$$

indicant els subíndexs 1 i 2 la sala buida i la sala amb el material absorbent, respectivament, i essent  $S$  la superfície total del material absorbent, que en general hauria d'estar al voltant dels  $10 \text{ m}^2$ .

Posteriorment, el coeficient d'absorció acústica global i el factor de forma s'obtenen a partir de la normativa ISO 11654. El càlcul del coeficient d'absorció global és similar al del càlcul del valor global d'aïllament acústic a partir d'una corba de referència.

Finalment, a la taula 2 es mostren els coeficients d'absorció de diferents materials.

Taula 2. Coeficients d'absorció acústica de diferents materials

Surface	Frequency (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Acoustic tile, ridged mount	0.2	0.4	0.7	0.8	0.6	0.4
Acoustic tile, suspended	0.5	0.7	0.6	0.7	0.7	0.5
Drywall, gypsum, ½ inch on studs	0.3	0.1	0.05	0.04	0.07	0.1
Plywood, ¼ inch, on studs	0.6	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1
Concrete block, unpainted	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3
Concrete block, painted	0.1	0.5	0.6	0.7	0.1	0.1
Concrete, poured	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Brick	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Vinyl on concrete	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Heavy carpet on concrete	0.02	0.06	0.15	0.4	0.6	0.6
Padded carpet	0.1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
Window glass	0.3	0.2	0.2	0.1	0.07	0.04
Drapes, medium	0.07	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6
Upholstered seats, unoccupied	0.2	0.4	0.6	0.7	0.6	0.6
Upholstered seats, occupied	0.4	0.6	0.8	0.9	0.9	0.9
Wood or metal seats, unoccupied	0.02	0.03	0.03	0.06	0.06	0.05

Surface	Frequency (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Wood or metal seats, occupied	0.4	0.4	0.7	0.7	0.8	0.7

Font: Hall (2002).

## 2.4. Reflectors i difusors

En general, **convé generar primeres reflexions cap a la zona de l'audiència del recinte.**

En el cas de recintes destinats a la parla, com ara teatres o sales de conferències, totes les primeres reflexions que arribin abans que hagin transcorregut 50 ms des de l'arribada del so directe seran integrades per l'oïda humana. La suma de tota l'energia contribueix a millorar la intel·ligibilitat de la paraula i a incrementar la sensació de sonoritat.

Si l'objecte de disseny és un auditori per a música simfònica o una sala destinada a música de cambra, les primeres reflexions abracen fins als 80 ms més enllà de l'arribada del so directe. En aquest cas, contribueixen no només a incrementar la sonoritat del camp acústic, sinó també a millorar la claredat musical i, en el cas de procedència lateral, augmentar la sensació espacial del recinte. En conseqüència, les primeres reflexions ajuden a millorar la percepció subjectiva de la qualitat acústica de l'auditori.

**Una bona difusió del so, consistent en dispersar uniformement i en totes direccions l'energia incident a una superfície, ajuda a millorar notablement la sensació envoltant en auditoris.** L'ús de materials difusors és útil per evitar reflexions no desitjades, ecos, o coloracions en estudis de gravació provocades per la presència de modes propis.

Els reflectors estan formats per **superfícies llises no poroses i altament reflectants del so.**

En incidir una ona acústica sobre el reflector, **les components del camp acústic amb una longitud d'ona menor o comparable a les dimensions del reflector seran reflectides, mentre que aquelles amb longituds d'ona major seran difractades.**

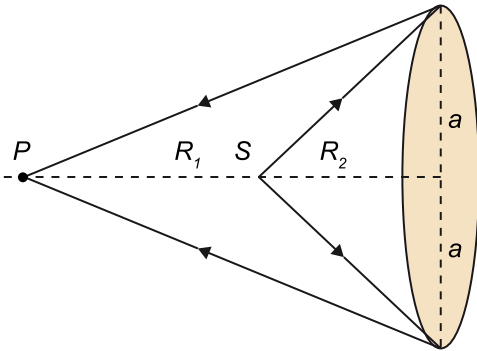
La **difracció** consisteix en la **superació d'un obstacle per part de l'ona acústica, que no veu modificada la seva trajectòria.** Per a aquestes components freqüencials del camp acústic, l'obstacle es comporta com un element invisible.

A partir d'una certa freqüència, funció de les dimensions de l'element, el reflector es comporta com a tal. Es pot demostrar que, per a un panell circular de radi  $a$ , estant el receptor  $P$  i la font sonora  $S$  en l'eix central del panell, a una distància al reflector  $R_1$  i  $R_2$ , respectivament (figura 24), la freqüència mínima a partir de la qual el reflector es comporta com a tal és:

$$f_{\min} \cong \frac{170}{a^2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} \quad (41)$$

Així, per a un reflector i disposició de la font i receptor tals que  $R_1 = 10$  m,  $R_2 = 5$  m i  $a = 1$  m, la freqüència mínima del reflector és  $f_{\min} = 566,7$  Hz. En incrementar les dimensions del reflector a  $a = 1$  m, la freqüència mínima decreix fins als  $f_{\min} = 35,5$  Hz. En efecte, **en disposar d'un reflector major, a les ones acústiques els costa més difractar-se i el rang freqüencial útil del reflector augmenta.**

Figura 24. Reflector circular

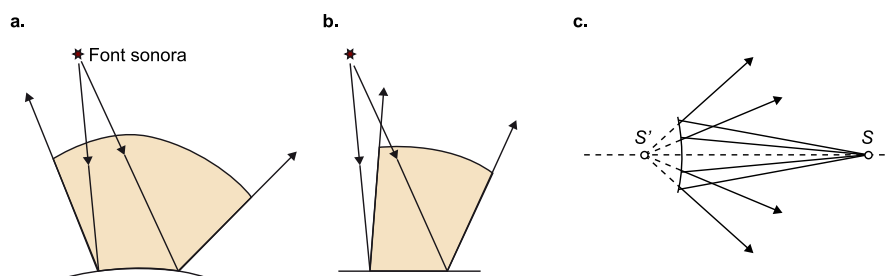


Font: Kuttruff (2009).

Les components difractades de l'ona acústica són, per una banda, transmeses a la part posterior de l'obstacle (és a dir, de l'element reflector) i, per una altra banda, difoses en part cap a totes les direccions. Per aquest motiu, sovint es parla de **difusors geomètrics**.

Les superfícies convexes també es comporten com a reflectors, sempre i quan el radi de curvatura del reflector sigui superior a 5 m. En aquest cas, les reflexions no tenen una intensitat tan elevada com en el cas d'un reflector pla, però tenen una major cobertura, tal i com s'il·lustra a la figura 25a,b. Si la superfície convexa té un radi de curvatura menor de 5 m, es comporta com un difusor, denominat **difusor policilíndric**.

Figura 25. Cobertures: a) reflector convex i b) reflector pla. c) Superfície convexa com a difusor del so



Font: Carrión Isbert (1998) i Kuttruff (2009).

El principi de reflexió especular també és vàlid per a superfícies corbades, ja que aquestes es poden aproximar per diferents superfícies planes sempre i quan el radi de curvatura sigui molt superior a la longitud d'ona. Aplicant aquest concepte, la figura 25c mostra els rajos reflectits per una superfície convexa. La font  $S$  està situada enfront de la superfície, en el seu eix principal. Aplicant la teoria de les imatges, es crea la font imaginària  $S'$  que crea uns rajos acústics que dispersen el raig incident en un nombre major de direccions que un reflector pla.

També es pot aconseguir una bona difusió del so quan les ones acústiques incideixen sobre superfícies irregulars de dimensions iguals a la longitud d'ona. Aquest és el cas de molts dels ornaments presents a les sales de concerts clàssiques. Un bon exemple n'és el Palau de la Música Catalana de Barcelona (figura 26), on, a partir de les floritures, s'aconsegueix difondre el so sempre i quan es compleixi la condició anterior.

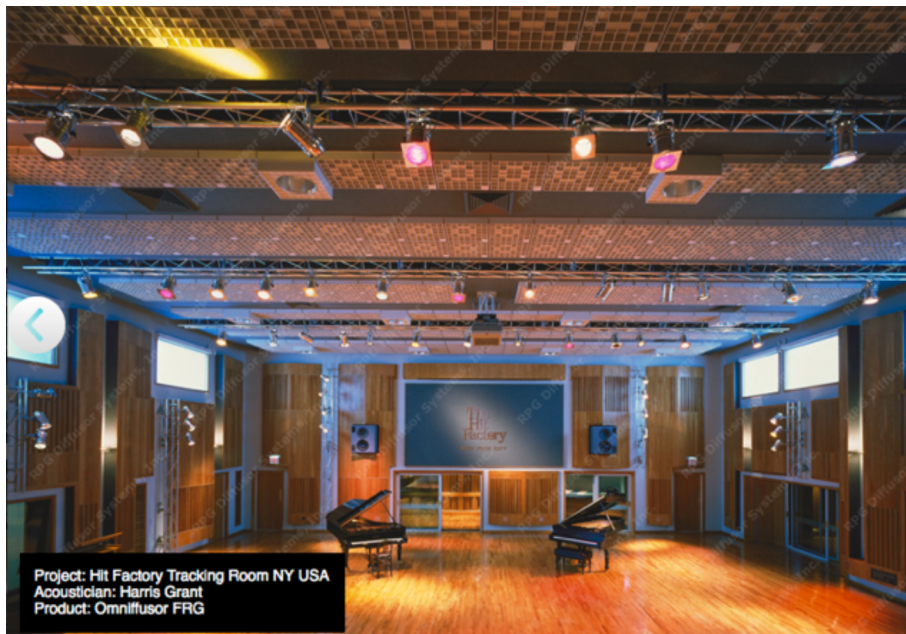
Figura 26. Elements difusors del so al Palau de la Música Catalana



Una altra forma de crear difusió en un recinte és a partir de difusors dissenyats específicament per a un rang de freqüències a base de sèries numèriques, denominats **difusors de Schroeder**, o **difusors RPG** (*reflection phase grating*).

Aquest tipus de difusors s'acostuma a realitzar a partir de panells de fusta llisa i altament reflectant, sobre els quals es practiquen una sèrie de ranures o perforacions de diferents amplades i profunditats (figura 27). L'estructura de les ranures o perforacions defineix l'amplada de banda d'eficiència del difusor.

Figura 27. Difusors de Schroeder al sostre d'un recinte

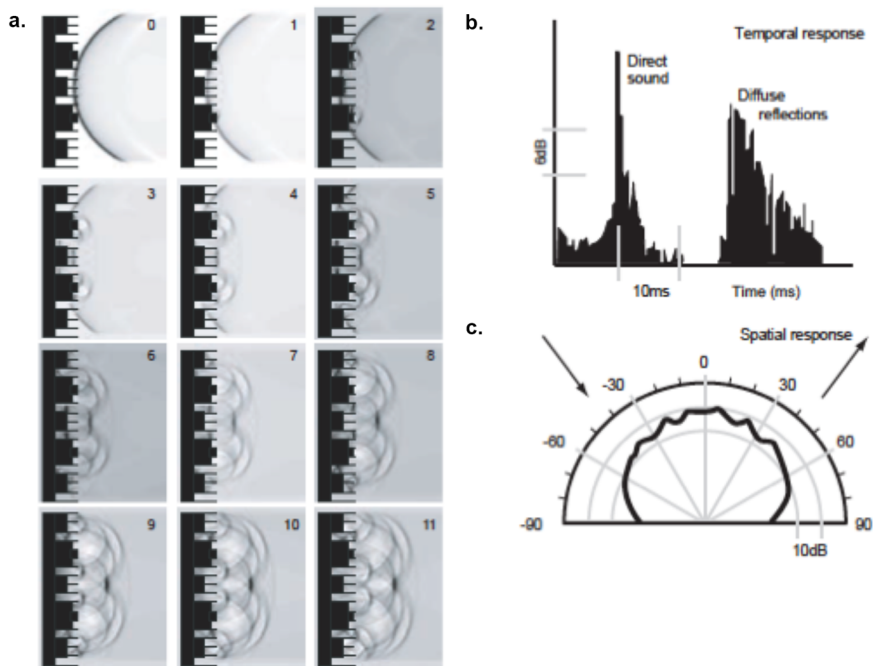


Finalment, a la figura 28 es mostra una simulació a partir d'un model de diferències finites en el domini temporal (FDTD) d'una ona cilíndrica que incideix sobre un difusor de Schroeder. L'ona acústica, en incidir sobre el difusor, ha de recórrer diferents distàncies, determinades per la profunditat de les ranures. Les reflexions que es donen a les ranures de diferents profunditats causen unes interferències que es tradueixen en un patró complex, on l'ona incident (amb una única direcció) es difosa en diverses direccions.

Alhora, la resposta temporal difereix clarament d'una reflexió especular, les respostes temporals i espacials de la qual són il·lustrades a la figura 13b. En aquest cas, la component temporal difosa és més llarga a causa d'aquests recorreguts diferents en cada ranura. Estudar per què una estructura d'aquest tipus difon el so adequadament, així com conèixer els paràmetres de disseny dels diferents difusors de Schroeder, queden fora de l'abast dels continguts i objectius d'aquest mòdul. En tot cas, es pot ampliar la informació referent a aquestes qüestions consultant algunes de les referències citades a la bibliografia del mòdul: concretament, a Cox i D'Antonio (2009) i Carrión Isbert (1998).



Figura 28. a) Simulació del comportament d'un difusor de Schroeder, b) resposta temporal i c) diagrama espacial de dispersió



Font: Cox i D'Antonio (2009).

### 3. Disseny acústic d'un recinte

En termes generals, el **disseny acústic** d'un recinte consisteix a **determinar els paràmetres de qualitat acústica, els valors que han de prendre aquests paràmetres i les implementacions o solucions de disseny.**

Les exigències i els índexs sobre els quals aquestes apliquen dependran del tipus de sala i de l'ús que se li pretengui donar:

- En una **sala destinada únicament a la paraula**, com pot ser una sala de conferències, els factors de qualitat del recinte són el **temps de reverberació, el grau d'intel·ligibilitat de la paraula i un criteri que eviti ecos i focalitzacions del so.**
- En un **auditori destinat a interpretar música simfònica**, el **temps de reverberació** haurà de ser major que en una sala destinada a la paraula. També hi haurà altres paràmetres de disseny que caldrà tenir en compte: la **claredat musical, l'eficiència lateral, la brillantor del recinte**, etc.

Alhora, per cadascun dels recintes caldrà assegurar un **nivell de soroll de fons** suficientment baix i, per tant, uns **aïllaments acústics** determinats. Els aïllaments seran un factor determinant en la qualitat acústica d'un recinte i caldrà assegurar-ne uns valors correctes tant pel que fa el soroll aeri com al soroll d'impactes.

En aquesta secció es donen unes pautes molt generals a l'hora de dissenyar un recinte acústic. No és objecte d'aquest mòdul, ni de l'assignatura en general, especificar els criteris de disseny per cadascun del tipus de recinte, ni definir tots els paràmetres que hi entren en joc.

Bàsicament, la secció es centra en:

- L'exposició dels criteris bàsics per evitar focalitzacions del so (apartat 3.1).
- La definició dels requisits de soroll de fons i del temps de reverberació en funció del tipus de recinte (apartats 3.2 i 3.4).
- La introducció al paràmetre d'intel·ligibilitat de la paraula (apartat 3.3).

- L'explicació d'un criteri general per obtenir un temps de reverberació adequat a l'ús del recinte a base d'aplicar revestiments a les superfícies del recinte (apartat 3.5).

Per a major informació sobre la qüestió es poden consultar algunes de les referències citades a la bibliografia del mòdul: concretament, Arau i Puchades (1999), Carrión Isbert (1998), Kuttruff (2009), Newell (2008) i Cox i D'Antonio (2009).

### 3.1. Geometries capritxoses

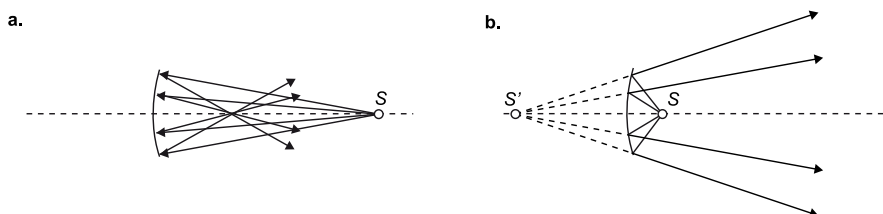
Ja sabem que en auditoris o teatres podem trobar **superfícies corbades de forma convexa** que, segons les seves dimensions, **ajuden a la reflexió o a la difusió de les ones acústiques**.

Altrament, en alguns teatres o auditoris, ben sovint les superfícies poden prendre **curvatures còncaves**, que, com es veurà tot seguit, **poden provocar fenòmens de focalització del so**.

Si la font se situa a una distància superior a  $R/2$  essent  $R$  el radi de curvatura de la superfície còncava, al seu eix principal, existeix un punt focal de concentració dels rajos acústics. El punt focal és a una distància  $R/2$  del panell i, en allunyar-se'n, els rajos es dispersen cap a totes les direccions, tal i com es mostra a la figura 29a. En el cas que el públic es trobi en la zona del punt focal, hi haurà una focalització del so desagradable, fet que cal evitar sempre.

Es pot demostrar que, si la font acústica i el receptor se situen fora la circumferència imaginària que crea la superfície còncava, aquesta es comporta com un difusor incrementant la zona de cobertura. De la mateixa manera, si la font està col·locada a una distància menor de  $R/2$ , el punt focal desapareix de la zona de cobertura i el raig acústic és dispersat, tal i com s'il·lustra a la figura 29b.

Figura 29. Dispersió provocada per superfícies còncaves



Font: Kuttruff (2009).

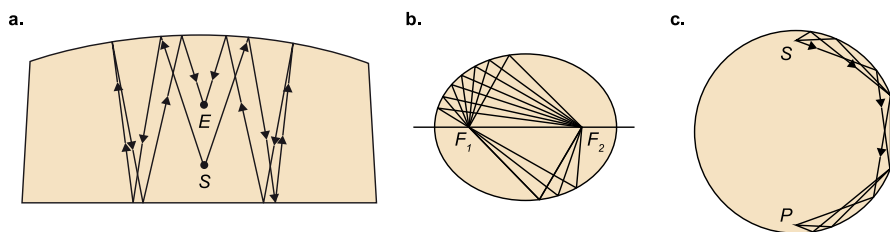
Els fenòmens acústics relacionats amb la geometria del recinte són complexos i poden portar a focalitzacions del so molt incòmodes. A la figura 30, s'il·lustren tres fenòmens curiosos de focalització del so:

a) En el cas d'una superfície semiesfèrica amb un sostre totalment reflectant del so, es crea una zona d'alta concentració de reflexions i, per tant, una diferència de sonoritats entre els punts situats sobre aquesta zona i els altres punts del recinte.

b) El mateix comportament pot passar en recintes de forma el·líptica: en situar una font sonora en un focus de l'el·lipse, es percep una major sonoritat a l'altre focus de l'el·lipse que a la resta del recinte.

També és interessant el fenomen de la galeria de murmuris (*whispering gallery*), en què el so queda confinat en una zona perimetral a la superfície del recinte. El so viatja tangencialment seguint la perifèria del recinte circular, de forma que, si el so generat al punt *S* es dirigeix paral·lelament a la paret, és percebut perfectament al punt *P*.

Figura 30. a) Superfície semiesfèrica. b) El·lipse. c) Galeria de murmuris



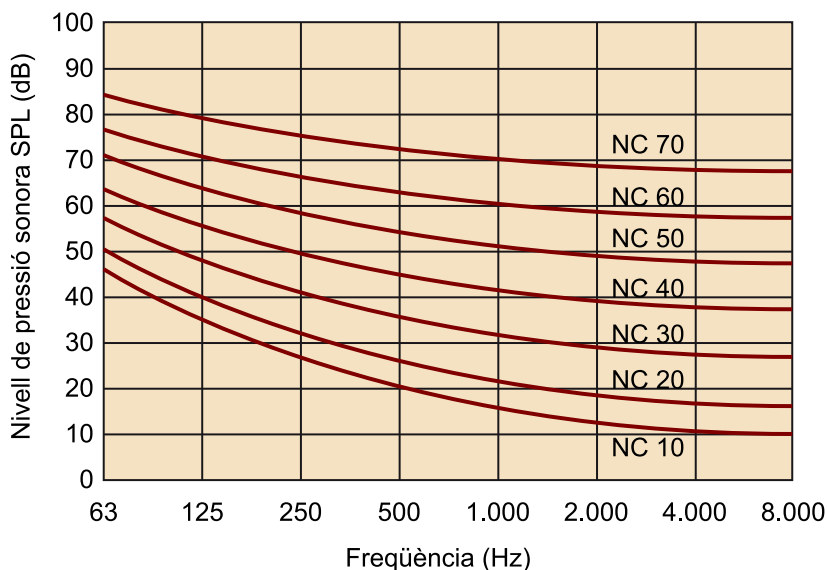
Font: Arau i Puchades (1999); Kuttruff (2009).

### 3.2. Corbes NC

A cada tipus de recinte cal assegurar uns nivells de **soroll de fons** adequats. No es pot demanar el mateix soroll de fons a un estudi de gravació que a un poliesportiu, per exemple. En el primer, que té com objecte gravar amb la màxima fidelitat possible la interpretació d'una peça musical, el soroll de fons serà un factor crític. En un poliesportiu no caldrà garantir un soroll de fons tan baix, ja que la mateixa activitat ja és de per sí sorollosa i no tindria sentit procedir a un disseny excessivament exigent pel que fa el soroll de fons.

Les **corbes NC** (*noise criteria*) són corbes de referència, definides per octaves de 63 Hz a 8 kHz, àmpliament utilitzades per **determinar els nivells de soroll màxims recomanats per a diferents recintes**.

Figura 31. Corbes NC



Font: Carrión Isbert (1998).

Així doncs, **un recinte compleix la corba NC 30 si els nivells de soroll de fons en cada una de les bandes d'octava de 63 Hz a 8 kHz no sobrepassen la corba de referència NC 30.**

Cal fer notar que les corbes NC segueixen força el patró de sensibilitat de l'oïda humana, com no podria ser d'altra manera. Per a freqüències baixes, els requisits són menors que per freqüències altes, ja que la sensibilitat de l'oïda és menor. Alhora, a mesura que el nivell de pressió sonora augmenta, les diferències entre altes i baixes freqüències disminueix, ja que l'oïda té una sensibilitat més semblant per a les diferents freqüències a mesura que el nivell de pressió augmenta.

A la taula 3 s'indiquen els valors recomanats de la corba NC per cada tipus de recinte, sent molt més restrictiva per a recintes destinats a enregistraments, interpretació de música o de teatre, que no pas en recintes com ara cafeteries o tallers.

Taula 3. Valors recomanats de la corba NC en funció del tipus de recinte

Tipus de recintes	Corba NC recomanada
Estudis de gravació	15
Sales de concerts i teatres	15-25
Hotels (habitacions individuals)	20-30
Sales de conferències / aules	20-30
Despatxos d'oficines / biblioteques	30-35
Hotels (vestíbuls i passadissos)	35-40
Restaurants	35-40

Font: Carrión Isbert (1998).

Tipus de recintes	Corba NC recomanada
Sales d'ordinadors	35-45
Cafeteries	40-45
Poliesportius	40-50
Tallers (maquinària lleugera)	45-55
Tallers (maquinària pesant)	50-65

Font: Carrión Isbert (1998).

### 3.3. Intel·ligibilitat de la paraula

L'índex d'intel·ligibilitat de la paraula és un paràmetre important en recintes destinats al missatge oral, on cal garantir una correcta comprensió de la paraula. La informació de la veu humana es troba, bàsicament, a les consonants i queda definida, en termes generals, per a mitges i altes freqüències.

El grau de comprensió vindrà donat, bàsicament, pel temps de reverberació i per la relació senyal/soroll del recinte. A recintes molt reverberants serà difícil comprendre el missatge, així com per a relacions senyal/soroll pobres, on el soroll de fons pot exercir un paper important.

Originàriament, per avaluar el grau d'intel·ligibilitat d'un recinte, un orador anava llegint *logàtoms* (seqüència d'agrupacions de consonant-vocal-consonant) i un conjunt de persones pel recinte anaven anotant el que percebien. A partir d'aquí, es calculava el percentatge de pèrdua d'informació, és a dir, de *logàtoms* perduts. Ja que la informació del missatge oral es troba a les consonants, aquesta pèrdua s'anomena %ALCons (*articulation loss of consonants*) i representa el tant per cent de pèrdua d'articulació de consonants:

$$\%ALCons = 200 \frac{RT_{2k} r^2}{V} \quad (42)$$

essent  $RT_{2k}$  el temps de reverberació a 2 kHz,  $V$  el volum del recinte i  $r$  la distància entre la font i el receptor.

**Per a valors de temps de reverberació elevats, la pèrdua d'intel·ligibilitat és major, i millora a mesura que la distància entre l'emissor i el receptor s'escurça.**

El RASTI (*rapid speech transmission index*) és un índex molt utilitzat per avaluar el grau d'intel·ligibilitat que ofereix un recinte. És una simplificació del STI (*speech transmission index*) i té en compte tant el temps de reverberació com el soroll de fons. Per obtenir el RASTI, s'utilitza un mètode de mesura que emet una sèrie de modulacions determinades i que queda fora de l'abast dels continguts i objectius d'aquest mòdul. L'índex té en compte les freqüències de 500

Hz i 2kHz i pren valors d'1 (màxima intel·ligibilitat) a 0 (nul·la intel·ligibilitat), conforme el que s'indica a la taula 4, on també s'hi relacionen els valors del %ALCons.

Tabla 4. Valors d'intel·ligibilitat de la paraula

%ALCons	STI/RASTI	Valoració subjectiva
1,4%-0%	0,8-1	Excel·lent
4,8%-1,6%	0,66-0,86	Bona
11,4%-5,3%	0,50-0,86	Acceptable
24,2%-12%	0,36-0,49	Pobra
46,5%-27%	0,24-0,34	Dolenta

Font: Carrión Isbert (1998).

### 3.4. Temps de reverberació òptim

Per a cada tipus de recinte, es pot definir un **temps de reverberació òptim**, que alhora és **funció del volum** del recinte. Per a música simfònica, per exemple, el  $RT$  haurà de ser més gran que per a una sala de conferències, per aconseguir una sala més viva i oferir una sensació acústica més adequada.

En general, el requeriment s'aplica al valor  $RT_{mid}$ , definit com la mitjana aritmètica dels valors de temps de reverberació a les bandes d'octava de 500 Hz i 1 kHz:

$$RT_{mid} = \frac{RT_{500} + RT_{1k}}{2} \quad (43)$$

A la taula 5 es mostren els marges dels temps de reverberació òptims en funció del recinte, sempre considerant la sala ocupada. Cal fer notar la gran diferència entre els  $RT_{mid}$  òptims dels locutoris de ràdio (0,2-0,4 seg) i de les sales de música simfònica (1,8-2,0 seg).

Taula 5. Temps de reverberació òptims recomanats

Tipus de sala	$RT_{mid}$ de la sala ocupada (en seg)
Sala de conferències	0,7-1,0
Cinema	1,0-1,2
Sala polivalent	1,2-1,5
Teatre d'òpera	1,2-1,5
Sala de concerts (música de cambra)	1,3-1,7
Sala de concerts (música simfònica)	1,8-2,0
Església / catedral (orgue i cant coral)	2,0-3,0

Font: Carrión Isbert (1998).

Tipus de sala	$RT_{mid}$ de la sala ocupada (en seg)
Locutori de ràdio	0,2-0,4

Font: Carrión Isbert (1998).

Hi ha varis autors que han definit relacions entre els temps de reverberació òptims i els volums dels recintes. A continuació, es mostra la relació segons (Kuttruff, 2009). En general, **a mesura que el volum augmenta, també ho fa el temps de reverberació òptim.**

$$RT_{mid} = 0,15 \frac{V}{S_T} \quad (44)$$

### 3.5. Absorció acústica del públic i les cadires

En qualsevol tipus de recinte, excepte els estudis de gravació, locutors de radio o d'altres recintes d'aquestes característiques (on no es busqui una àmplia zona d'audiència), la zona destinada a l'audiència o el públic ocupa una superfície molt important.

Les persones són absorbents del so, ja sigui a causa de la porositat inherent o bé a partir de la roba i les vestimentes. La zona d'audiència, a més, ofereix una absorció acústica que també dependrà del tipus de butaca, la seva disposició i la densitat de butaques.

Es consideren dos tipus d'absorcions acústiques:

- L'àrea d'absorció equivalent d'una persona.
- El coeficient d'absorció acústica d'un conjunt de butaques.

En primer lloc, l'àrea d'absorció equivalent d'una persona ( $A_{ind}$ ) dona resposta a recintes on podem trobar persones disperses: en un despatx o a una sala diàfana, en el hall d'una estació o en una sala d'espera, per exemple. En aquest cas, es parteix d' $A_{ind}$  i, multiplicant-la pel nombre de persones que hi ha al recinte ( $N$ ), en resulta l'àrea equivalent de totes les persones del recinte ( $A_{people}$ ):

$$A_{people} = N \cdot A_{ind} \quad (45)$$

A la taula 6 es mostren diferents valors de l'àrea d'absorció equivalent d'una persona, expressada en  $m^2$ , en funció de la densitat dels vestits i el tipus de persona, per a diferents valors freqüencials. S'observa que, bàsicament, **l'absorció es dona a mitges i altes freqüències, excepte pel cas dels músics.**



Taula 6. Àrees d'absorció equivalent de persones (en m<sup>2</sup>)

Kind of person	Frequency (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Male standing in heavy coat	0.17	0.41	0.91	1.30	1.43	1.47
Male standing without coat	0.12	0.24	0.59	0.98	1.13	1.12
Musician seated, with instrument	0.60	0.95	1.06	1.08	1.08	1.08

Font: Kuttruff (2009).

En segon lloc, s'ha arribat a la conclusió que, per a grans plans d'audiència, és millor considerar els coeficients d'absorció acústica de les butaques, ocupades i desocupades, mesurades en sala reverberant. En aquest cas, la mesura permet obtenir el coeficients d'absorció de les butaques ( $\alpha_{seats}$ ) i, a partir de l'àrea en què estan distribuïdes ( $S_{seats}$ ), calcular la seva àrea d'absorció equivalent ( $A_{seats}$ ):

$$A_{seats} = S_{seats} \cdot \alpha_{seat} \quad (46)$$

En tot cas, i partint de l'equació (18), l'àrea d'absorció equivalent total del recinte ( $A_{eq}$ ) s'obté sumant les anteriors àrees d'absorció equivalent a la proporcionada pels revestiments i l'aire:

$$A_{eq} = \sum_{i=1}^{N_{sup}} S_i \alpha_i + 4mV + A_{people/seats} \quad (47)$$

Hi ha gran quantitat de valors de coeficients d'absorció de butaques. A la taula 7 es mostren els coeficients d'absorció de diferents tipus de butaques, desocupades i ocupades. S'observa com l'absorció augmenta en totes les freqüències quan la butaca és ocupada. L'absorció de les butaques entapissades augmenta respecte les no entapissades en la majora de freqüències, millorant-ne molt l'absorció a baixes freqüències quan les butaques estan ocupades.

Taula 7. Coeficients d'absorció de butaques ocupades i desocupades

Type of seats		Frequency (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Heavily upholstered	Unoccupied	0.70	0.76	0.81	0.84	0.84	0.81
	Occupied	0.72	0.80	0.86	0.89	0.90	0.90
Medium upholstered	Unoccupied	0.54	0.62	0.68	0.70	0.68	0.66
	Occupied	0.62	0.72	0.80	0.83	0.84	0.85
Lightly upholstered	Unoccupied	0.36	0.47	0.57	0.62	0.62	0.60

Heavily upholstered: 7.5 cm upholstery on front side of seat back, 10 cm on top of seat bottom, arm rest upholstered.

Medium upholstered: 2.5 cm upholstery on front side of seat back, 2.5 cm on top of seat bottom, solid arm rests.

Lightly upholstered: 1.5 cm upholstery on front side of seat back, 2.5 cm on top of seat bottom, solid arm rests.

Font: Kuttruff (2009).

Type of seats		Frequency (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
	Occupied	0.51	0.64	0.75	0.80	0.82	0.83

Heavily upholstered: 7.5 cm upholstery on front side of seat back, 10 cm on top of seat bottom, arm rest upholstered.  
 Medium upholstered: 2.5 cm upholstery on front side of seat back, 2.5 cm on top of seat bottom, solid arm rests.  
 Lightly upholstered: 1.5 cm upholstery on front side of seat back, 2.5 cm on top of seat bottom, solid arm rests.  
 Font: Kuttruff (2009).

### Exemple 3

En una sala de conferències de dimensions 20 m x 10 m x 4 m, es disposa de 80 m<sup>2</sup> de superfície ocupada per butaques. Es tracta d'una sala que la majoria de vegades està totalment ocupada. Els requisits de qualitat pel que fa al temps de reverberació en aquesta sala venen definits pels següents requeriments (que encaixen perfectament amb el marge òptim de  $RT_{mid}$  recomanat per a sales de conferències que es defineix a la taula 5):

f (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
$RT_{optim}$	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8

Quina absorció mitjana han de tenir les superfícies del recinte per tal de complir aquests requisits de qualitat? Nota: obviar l'absorció de l'aire.

### Solució

En primer lloc, els coeficients d'absorció de les butaques estan indicats a la taula 7. Atès que es tracta d'una sala de conferències que la majoria de vegades està totalment ocupada, ens fixem en els valors corresponents a les butaques menys entapissades estant ocupades:

f (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha_{seats}$	0,51	0,64	0,75	0,80	0,62	0,83

En segon lloc, el recinte té un volum total de 800 m<sup>3</sup> i una superfície total de 640 m<sup>2</sup>:

$$V = 20 \cdot 10 \cdot 4 = 800 \text{ m}^3$$

$$S_{tot} = 2(20 \cdot 10) + 2(20 \cdot 4) + 2(10 \cdot 4) = 640 \text{ m}^2 \quad (48)$$

Atès que la superfície ocupada per les butaques és  $S_{seats} = 80 \text{ m}^2$  i que, coneguda  $\alpha_{seats}$ , l'àrea d'absorció corresponent a aquesta superfície podem calcular-la mitjançant l'equació (46), resta per assignar l'absorció sonora a 560 m<sup>2</sup>:

$$S_{tot} = S_{seats} + S_{restant} \rightarrow S_{restant} = 640 - 80 = 560 \text{ m}^2 \quad (49)$$

Això vol dir que el coeficient d'absorció mitjà que hem de calcular ( $\bar{\alpha}$ ) refereix a l'absorció sonora d'aquesta  $S_{restant}$ , de manera que, per les equacions (12) i (13), l'àrea d'absorció equivalent de la sala es pot descompondre com:

$$A_{eq} = \sum_{i=1}^{N_{sup}} S_i \alpha_i = S_{seats} \cdot \alpha_{seats} + S_{restant} \cdot \bar{\alpha} \quad (50)$$

Ara, prenent l'equació (20) (l'equació de Sabine), obviat el terme corresponent a l'absorció de l'aire ( $4mV$ ) i aplicant-hi la descomposició definida a (50), obtenim el següent:

$$RT = \frac{0,16 \text{ V}}{\sum_{i=1}^{N_{sup}} S_i \alpha_i} = \frac{0,16 \text{ V}}{S_{seats} \cdot \alpha_{seats} + S_{restant} \cdot \bar{\alpha}} \quad \cdot \quad \bar{\alpha} = \frac{\frac{0,16V}{RT} - (S_{seats} \cdot \alpha_{seats})}{S_{restant}} \quad (51)$$

Així, podem calcular quin és el valor de  $\bar{\alpha}$  per a cada banda freqüencial que garanteix que el  $RT$  compleixi els requisits de qualitat requerits (d'aquesta manera, queda un  $RT_{mid} = 0,85$ ):

$f$ (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
$RT$	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8
$\bar{\alpha}$	0,156	0,163	0,147	0,171	0,169	0,167

## Resum

Al llarg d'aquest mòdul s'ha detallat el comportament de les ones acústiques a l'interior d'un recinte, les principals característiques dels materials utilitzats en el condicionament acústic, i les pautes de disseny bàsiques per un correcte disseny acústic d'un recinte.

En funció de les dimensions de la sala, la freqüència d'anàlisi, i els paràmetres acústics que es desitgin analitzar, caldrà utilitzar les aproximacions d'acústica geomètrica, ondulatòria o estadística. Cadascuna d'aquestes teories permet una visió concreta del mateix repte: dissenyar recintes amb un comportament acústic òptim.

L'aproximació geomètrica entén les ones acústiques com a rajos, i fent ús de l'ecograma i de les fonts imatge, permet identificar geometries capritxoses i superfícies que aporten energia cap a l'audiència i incrementen la intel·ligibilitat de la paraula.

L'acústica ondulatòria, a diferència de la geomètrica, incorpora la informació de fase, i permet el càlcul dels modes propis d'un recinte, la densitat modal, i les dimensions òptimes per una correcta distribució dels modes propis. És vàlida per recintes relativament petits i fins a la freqüència de Schroeder, a partir de la qual l'elevada densitat modal apunta que cal utilitzar l'aproximació estadística.

S'ha estudiat la relació entre el temps de reverberació i l'àrea d'absorció acústica d'un recinte, així com les equacions de balanç energètic, la constant de sala i la distància crítica. Per camps suficientment difusos s'utilitza la formulació de Sabine, podent-se fer servir també altres relacions com la d'Eyring-Norris. A partir d'aquestes relacions es dissenyen els revestiments interiors del recinte per aconseguir temps de reverberació adequats a l'ús de cada recinte.

Els paràmetres de disseny d'un recinte dependran fortament del seu ús, i els més bàsics són el temps de reverberació mitjà, la corba NC i la intel·ligibilitat de la paraula. En el procés de disseny dels revestiments acústics, o condicionament acústic, hi intervé l'absorció acústica de l'aire i també de les persones; ambdues absorcions s'han incorporat a les formulacions de Sabine i d'Eyring-Norris.

Pel que fa als materials utilitzats en el condicionament acústic, s'han definit els materials absorbents, reflectors i difusors del so.

Els materials absorbents tenen la funció de reduir el temps de reverberació d'un recinte. Se'n poden trobar de diferent naturalesa en funció del rang freqüencial que es desitgi absorbir: materials porosos, ressonadors de membrana i ressonadors de Helmholtz. Per cadascuna d'aquestes solucions s'ha descrit la corba d'absorció sonora en funció dels diferents paràmetres de disseny: gruix del material, distància a la paret, propietats dels ressonadors, materials absorbents a l'interior dels ressonadors, etc. També s'ha detallat el procediment de mesura del coeficient d'absorció acústica en sala reverberant. Per cada aplicació caldrà buscar una solució de compromís.

D'altra banda, per generar primeres reflexions cap a la zona del públic, i millorar la sensació de sonoritat i d'intel·ligibilitat de la paraula, en general caldrà utilitzar reflectors acústics. Si es desitja millorar la difusió del camp acústic s'utilitzaran difusors. La relació entre les dimensions del reflector i la freqüència determinarà l'eficiència de reflexió. Les superfícies convexes poden actuar com a difusors, distribuint el raig acústic en més d'una direcció. També s'ha vist que exerceixnt adequadament amb les fases de les ones reflectides s'aconsegueix crear difusors, els difusors RPG.



## Exercicis d'autoavaluació

1. Quina de les següents afirmacions és correcta?

- a) En el disseny d'un recinte, la densitat modal és rellevant a partir de la freqüència de Schroeder.
- b) La freqüència de Schroeder serà major en tant que el recinte sigui petit i que la sala sigui seca.
- c) En revestir amb materials absorbents un recinte, la freqüència de tall no es modificarà.
- d) Cap de les afirmacions anteriors és correcta.

2. Quina de les següents afirmacions és correcta?

- a) El *flutter echo* es pot solucionar parcialment revestint una de les superfícies involucrades amb material absorbent.
- b) L'ecograma permet identificar les superfícies que intervenen en la generació de primeres reflexions, que incrementen la intel·ligibilitat de la paraula i la sensació de sonoritat.
- c) Les primeres reflexions són aquelles que arriben en un interval de 50 ms o 100 ms per la parla i la música, respectivament, i que es perceben com a reflexions no desitjades.
- d) Les afirmacions (a) i (b) són correctes.

3. Quina de les següents afirmacions és correcta?

- a) Un camp difús o reverberant es podria donar a una sala anecoica si la potència de la font fos prou elevada.
- b) A la zona central d'una sala reverberant, la probabilitat de rebre una ona acústica en qualsevol direcció és la mateixa sempre i quan s'estigui en camp reverberant.
- c) A la zona central d'una sala reverberant, la probabilitat de rebre una ona acústica en qualsevol direcció és la mateixa, independentment de si estem en cap reverberant o en camp directe.
- d) Cap de les afirmacions anteriors és correcta.

4. Quina de les següents afirmacions és correcta?

- a) L'àrea d'absorció sonora equivalent ve a ser la quantitat de material amb absorció total que presenta el recinte a una banda freqüencial.
- b) L'àrea d'absorció equivalent dependrà només de les propietats absorbents del material.
- c) Els coeficients d'absorció de Sabine mesurats en sala reverberant sempre es mouen en l'interval  $[0,1]$ .
- d) Totes les afirmacions anteriors són correctes.

a) 5. Quina de les següents afirmacions és correcta?

- b) Els materials porosos absorbeixen independentment de la distància a la qual s'emplacin de la paret.
- c) Un material porós situat dins un ressonador de membrana actua pel mateix principi de funcionament que un material porós adossat directament a una paret.
- d) Els materials porosos, si es pinten, no veuen afectades les seves propietats absorbents.
- e) Cap de les afirmacions anteriors és correcta.

6. Quina de les següents afirmacions és correcta?

- a) En el procés de reflexió especular, l'ona acústica únicament és reflectida en una direcció.
- b) Que un material tingui un coeficient d'absorció sonora de 0,5 significa que absorbeix el 50% de l'energia incident.
- c) Per incrementar la difusió, es poden fer servir elements ornamentals.
- d) Un reflector treballa correctament amb independència de la freqüència de l'ona acústica.

7. En referència a que en el procés de condicionament d'un recinte convé absorbir les freqüències greus, quina de les següents afirmacions és correcta?

- a) Treballarem, bàsicament, amb absorbents porosos d'elevat gruix.
- b) Un ressonador de membrana pot ser una solució adequada: si es farceix el ressonador amb material absorbent, l'ample de banda d'absorció disminueix.

- c) Un ressonador de membrana pot ser una solució adequada: si es farceix el ressonador amb material absorbent, l'ample de banda d'absorció s'incrementa.
- d) Cap de les afirmacions anteriors és correcta.

8. Quina de les següents afirmacions és correcta?

- a) La corba NC és útil per definir els requisits d'aïllament acústic del recinte.
- b) Si es desitja dissenyar un estudi de radio en un recinte, probablement els modes propis no convingui estudiar-los, ja que la freqüència de Schroeder serà prou baixa.
- c) El temps de reverberació s'incrementa quan el volum del recinte disminueix.
- d) Totes les afirmacions anteriors són correctes.



## **Solucionari**

### **Exercicis d'autoavaluació**

1. d

2. d

3. b

4. a

5. b

6. c

7. c

8. a

## Bibliografia

- Arau i Puchades, H. (1999). *ABC de la acústica arquitectónica*. Grupo Planeta, Ediciones CEAC, Technology and Engineering.
- Beranek, L. L. (1996). *Concert and Opera Halls: How They Sound*. Acoustical Society of America.
- Carrión Isbert, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos* (vol. 4). Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- Cox, T. J. i D'Antonio, P. (2009). *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. CRC Press.
- Everest, F. A. i Pohlmann, K. C. (2001). *The Master Handbook of Acoustics* (vol. 4). McGraw-Hill.
- Hall, D. E. (2002). *Musical Acoustics* (3a. ed.). Brooks/Cole Publishing Company.
- International Organization for Standardization (2003). *ISO 354:2003. Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room*. International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization (2009). *ISO 3382-1:2009. Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces*. International Organization for Standardization.
- Kuttruff, H. (2009). *Room Acoustics*. CRC Press.
- Ministerio de la Vivienda (2009). *Documento Básico HR: Protección contra el ruido*. Ministerio de la Vivienda, Código Técnico de la Edificación.
- Newell, P. R. (2008). *Recording Studio Design*. Taylor and Francis.
- Vigran, T. E. (2008). *Building Acoustics*. CRC Press.