

Acustica încăperilor

ing. Flaviu Oros

JF Studio Design SRL

www.jfstudiodesign.ro

Dec 2006 - Mar 2011

În acest articol vor fi prezentate principiile teoretice pe baza cărora pot fi îmbunătățite proprietățile acustice ale unei încăperi, împreună cu câteva sugestii practice prin care se poate face asta în cazul concret al unui studio de înregistrare sau al unei camere de audiție.

Când vorbim despre îmbunătățirea proprietăților acustice ale unei încăperi, trebuie luate în considerare două etape distincte în realizarea acestui scop :

- **izolarea fonică** a interiorului încăperii față de exterior
- **optimizarea răspunsului acustic** în interiorul încăperii

Pe de o parte, prin creșterea izolației fonice a pereților încăperii, vom reduce transferul de energie sonoră dinspre exteriorul spre interiorul ei (respectiv invers, din interior spre exterior), având ca rezultat minimizarea zgomotelor perturbatoare din exterior, ce ar putea deranja activitățile desfășurate în încăperea (respectiv scăderea șanselor ca emisiile sonore din interior să deranjeze vecinii din exteriorul încăperii).

Pe de altă parte, prin absorbția sau difuzia controlată a energiei sonore rămasă captivă înăuntru, vom optimiza răspunsul acustic al camerei, reducând nivelul rezonanțelor și reflexiilor sonore deranjante, îmbunătățind astfel substanțial ambientul acustic și calitatea activităților ce au loc în cameră (înregistrări audio, audiții muzicale, etc).

Chiar dacă există anumite întrepătrunderi în funcțiile unora dintre materialele și dispozitivele folosite pentru fonoizolare și optimizare acustică, modul de realizare a acestor etape necesită implementarea unor principii distincte ale acusticii și exploatarea unor proprietăți oarecum complementare ale materialelor folosite. Mai mult decât atât, procedeele de creștere a izolației fonice pentru o încăperea duc în general la înrăutățirea răspunsului acustic al acestei încăperi, la rândul lor tehnicile de îmbunătățire a acusticii interioare cauzând în anumite situații deteriorarea fonoizolației.

Pentru a obține rezultate cât mai bune la ambele capitole, va fi necesară o analiză cât mai exactă a condițiilor inițiale ale lucrării (preferabil prin efectuarea de măsurători acustice) și vor trebui stabilite valori țintă pentru parametrii acustici ai construcției finale, pe baza cărora se va putea concepe proiectul de execuție. Realizarea practică a proiectului se va face astfel mai ușor, ajustându-se pe parcurs pe unde este necesar, eventual făcându-se măsurători acustice intermediare de-a lungul desfășurării lucrărilor pentru a putea controla mai precis evoluția parametrilor acustici ai lucrării, până la obținerea rezultatelor dorite.

Izolarea fonică a încăperilor

Izolarea fonică a unei încăperi are două scopuri : împiedicarea sunetelor din interior să ajungă în afara încăperii și reciproc blocarea accesului sunetelor din exterior să ajungă în interiorul încăperii. În situația unui studio de înregistrare sau a unei camere de audiție asta înseamnă pe de o parte protejarea vecinilor de nivele de zgomot deranjante (mai ales la ore târzii) și pe de altă parte obținerea în interiorul studioului/camerei de audiție a unui nivel minim de zgomot care să nu afecteze procesul de înregistrare respectiv cel de audiție care are loc în încăpere. În cazul în care se construiește o nouă încăpere/clădire și nu doar se îmbunătățește una deja existentă, **stabilirea locației construcției** reprezintă o decizie foarte importantă în acest sens, deoarece poate modifica substanțial complexitatea (și deci bugetul alocat) celorlalte etape din realizarea proiectului. Dacă locul ales pentru construcție este unul liniștit, departe de surse sonore deranjante (străzi puternic circulat de mașini, utilaje zgomotoase, linii de tramvai sau metrou, etc), atunci construcția va putea fi mai relaxată, cu izolații fonice mai puțin pretențioase și implicit mai ieftine. Dacă, dimpotrivă, locația este aproape de asemenea surse poluante sonore, vor fi necesare măsuri suplimentare pentru fonoizolare, astfel că cheltuielile la această etapă vor fi mult mai mari. Nu trebuie uitat nici fenomenul invers și anume că, dacă zona aleasă este una liniștită iar izolația fonică a încăperii este realizată mai superficial, există posibilitatea ca la nivele mai mari de audiție în cameră scurgerile de sunet în afară să atingă nivele deranjante pentru vecini.

Soluția optimă va consta în alegerea unei locații cât mai liniștite și folosirea unor materiale și tehnici de fonoizolare care să asigure valorile minime ale izolației fonice necesare astfel încât să fie îndeplinite atât condițiile legale de nivel al zgomotului în afara încăperii/clădirii (mai ales pe timp de noapte) cât și condițiile de silențiozitate dorite în interiorul camerei. În acest scop, primul pas constă în măsurarea nivelului zgomotului ambiant din exterior în momente de maxim (de obicei ziua). Știindu-se nivelul maxim de zgomot ambiant acceptabil în încăpere (există tabele pentru aflarea acestuia, în funcție de aplicație) și făcându-se diferența dintre valorile pentru exterior și interior aflate (se folosesc atât valori medii speciale, cât și valori separate pentru mai multe benzi de frecvență) se poate determina nivelul minim de fonoizolație al pereților construcției necesar îndeplinirii condițiilor de interior. În continuare se vor face calculele în sens invers, adică se va măsura nivelul zgomotului ambiant din exterior la momente de minim (de obicei noaptea) și în funcție de nivelele maxime ale surselor sonore care vor exista în încăpere (difuzoare, instrumente muzicale, etc) se poate calcula o a doua valoare minimă a fonoizolației necesare (de astă dată pentru a îndeplini condițiile zgomotului extern legal acceptat). În final, se va alege valoarea cea mai mare dintre cele două calculate, pentru a acoperi ambele situații. Intr-

un mod asemănător se pot determina și nivelele de fonoizolație necesare pentru pereții interiori ce separă două încăperi între ele, luându-se în calcul, pentru fiecare perete în parte, nivelul sonor maxim generat într-o parte și nivelul de zgomot maxim acceptabil în cealaltă parte a lui.

Înainte de a continua, trebuie făcută o observație importantă. Funcționarea izolației fonice este foarte bine descris de următoarea zicală : **"Tăria unui lanț este dată de veriga lui cea mai slabă"**. Cu alte cuvinte, nivelul maxim de fonoizolație a unei încăperi depinde mult de elementul cu cel mai slab grad de fonoizolare din componența "granițelor" ei. Astfel, spre exemplu, chiar dacă un perete este din beton și are grosime foarte mare (având deci proprietăți fonoizolatoare foarte bune), un geam subțire sau chiar o perforație în perete, datorată unei conducte sau unui cablu electric, va reduce drastic fonoizolația ansamblului, aproape anulând efortul de realizare a unui perete așa de masiv. În acest sens, deoarece undele sonore ce se propagă prin aer vor fi transmise oriunde aerul are cale de acces, este foarte importantă etanșarea tuturor orificiilor sau crăpăturilor din pereți. Concluzionând această idee, putem spune că, pentru a avea rezultate optime, **trebuie acordată o deosebită atenție echilibrării nivelului de izolație fonică a tuturor elementelor** ce constituie perimetrul încăperii (pereți, tavan, podea, geamuri, uși, etc).

O altă problemă ce trebuie neapărat luată în seamă o reprezintă faptul că **sunetele de joasă frecvență se transmit foarte eficient prin infrastructura solidă a clădirii** (pereți, tavan, podea...), mai repede și mai ușor decât prin aer, astfel că vibrațiile emise de orice sursă sonoră ce are contact direct cu unul dintre aceste elemente constructive se vor transmite în toate încăperile. Din această cauză, undele sonore emise de sursă vor fi doar parțial blocate de pereți (doar undele transmise prin aer), o parte din energia sonoră fiind transmisă în celelalte încăperi pe căi ocolitoare (Eng=**flanking path**), prin orice contact direct existent între sursă și infrastructura clădirii (de exemplu prin podea, dacă un difuzor audio este așezat pe ea fără decuplare mecanică) și de aceea valorile fonoizolației în condiții reale pentru pereții respectivi diferă substanțial de valorile teoretice. Pentru minimizarea acestui fenomen, cea mai eficientă soluție constă în adăugarea unui nou rând de pereți/podea/tavan, decuplați mecanic de pereții clădirii, adică construirea unei **camere flotante** (Eng=**floating room**) în interiorul încăperii originale, ai cărei pereți (inclusiv tavan și podea) să fie separate de pereții externi prin spații de aer și materiale fonoabsorbante, ranforsate de elemente de suspensie speciale (arcuri, blocuri de cauciuc sau alte materiale elastice,...) care să mențină anumite distanțe între pereții interiori și cei exteriori. Această decuplare mecanică, dacă este calculată bine (frecvențele de rezonanță proprii ale elementelor de suspensie trebuie să se încadreze în niște plaje de valori) și este executată corect (un singur cui bătut greșit este suficient pentru a compromite întreaga construcție !), poate asigura încăperilor o izolare fonică excelentă.

Fonoizolarea : principii teoretice

În cele ce urmează vor fi prezentate principiile fizice ce stau la fundamentul soluțiilor tehnice de fonoizolare, după care vor fi luate în discuție câteva situații practice mai des întâlnite.

Atenuarea transmisiei unei unde sonore dintr-o parte într-alta a unui obstacol plan (un perete, o ușă, un geam, etc) este un fenomen fizic ce depinde de mai mulți factori, cei mai importanți fiind frecvența de oscilație a undei și proprietățile fizice ale obstacolului (masa, densitatea, rigiditatea, factorul intern de amortizare, structura lui componentă, etc.). Există definite mai multe mărimi fizice de cuantificare a proprietăților fonoizolatoare ale unui material sau ale unui obstacol mai complex, precum și mai multe standarde de măsurare precisă a lor, folosindu-se atât măsurători discrete în mai multe puncte din banda de frecvențe audio, cât și valori medii obținute prin însumarea ponderată după diferite legi matematice. Pentru că majoritatea acestor mărimi sunt mai puțin adecvate aplicațiilor unde sursa sonoră are un spectru bogat în frecvență ca în cazul programele muzicale (primele standarde au fost create pentru a măsura zgomotul din birourile firmelor) și pentru a nu încărca lectura prea mult cu detalii tehnice complicate, ne vom limita la a prezenta o singură mărime și anume **Transmission Loss (TL)**, în traducere liberă **Pierdere în Transmisie**), care este o mărime proporțională cu logaritmul zecimal al raportului dintre energia sonoră emisă de o sursă de sunet într-o parte a unui perete (obstacol plan) și energia sonoră ce se regăsește în cealaltă parte a lui, având ca unitate de măsură decibelul (**dB**). Deoarece **TL** este o mărime oarecum ideală, având valorile rezultate în urma calculelor teoretice și a măsurătorilor din laborator, din cauza diferitelor "scurgeri" neprevăzute de sunet în condiții reale, valorile izolației fonice măsurate după terminarea unei construcții sunt în general ceva mai mici decât cele proiectate (pe baza valorilor măsurate în laborator) și de aceea este bine să se adauge rezerve de siguranță în faza de proiectare.

Legea fizică principală ce descrie TL este legea masei, care spune că, pentru o undă sonoră cu frecvența constantă, TL crește cu 6dB la fiecare dublare a masei obstacolului.

În lucrul cu semnale complexe de audiofrecvență, proprietățile fonoizolante ale unui obstacol sunt date ca o funcție de frecvența undei sonore ce îl străbate și în mare parte această funcție este descrisă de o echivalență a legii masei, care spune că **TL crește cu 6dB la octavă**, adică la fiecare dublare a frecvenței undei sonore atenuarea dată de obstacol crește cu 6dB. De exemplu, dacă un perete are o atenuare **TL** de 30dB pentru undele sonore cu frecvența de 1000Hz, undele având frecvența de 2000Hz vor fi atenuate cu $30\text{dB} + 6\text{dB} = 36\text{dB}$ (ceea ce în putere acustică înseamnă o atenuare de patru ori mai mare la 2000Hz decât la 1000Hz). O creștere de **6dB / octavă** este echivalentă cu o creștere de **20dB / decadă**, astfel că (în condiții

ideale) am putea descrie caracteristica de atenuare (**TL**) a undelor sonore (funcție de frecvența lor **F**) de către un perete fictiv ca fiind dată de următoarea diagramă:

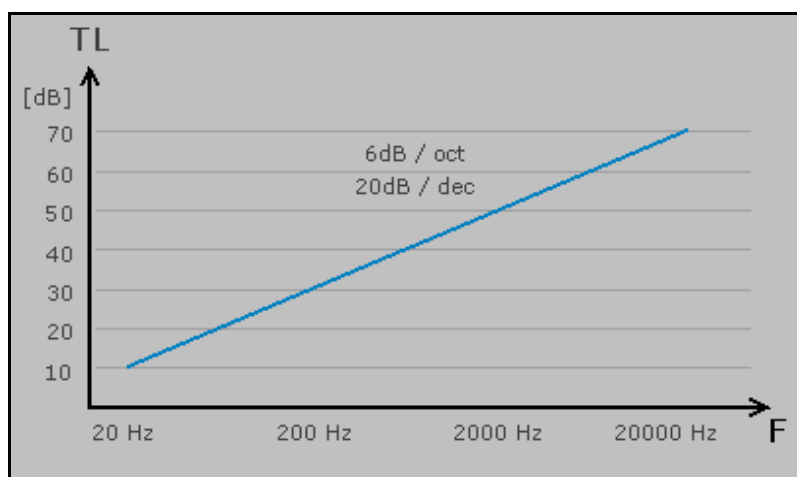


Fig.1

În realitate însă, această lege este alterată de alte fenomene ce au loc în perete la trecerea undelor sonore prin el, în esență fenomene de rezonanță ale materialului sau materialelor din care este compus peretele, rezonanțe ce crează scurtcircuite acustice pentru undele de anumite frecvențe, determinând apariția unor gropi în caracteristicile de atenuare. În acest sens, se definesc două puncte importante în caracteristica de transfer/atenuare a peretelui, care modifică legea liniară a masei:

- **frecvența naturală de rezonanță (F_n)** a peretelui, ce depinde în principal de masa și dimensiunile lui sau ale componentelor lui dacă este un perete compus (de ex. un perete format din cărămidă plus un strat de rigips, cu vată minerală între ele), situându-se de obicei în zona frecvențelor joase sau mediu-joase.

- **frecvența critică (F_c)** a peretelui (la care apare așa-numitul fenomen de **coincidență**), care este dependentă mai ales de grosimea și de rigiditatea peretelui, fiind situată în general în zona frecvențelor mediu-înalte dar poate ajunge la frecvențe joase pentru materiale masive (pereți groși de beton, cărămidă, etc).

În zonele acestor două frecvențe vor apărea scăderi ale **TL** cu valori depinzând în special de gradul de amortizare al rezonanțelor ce au loc în perete la frecvențele respective, amortizare ce depinde la rândul ei de factori precum rigiditatea materialului/materialelor din care este compus peretele sau proprietățile lor fonoabsorbante. În intervalul dintre aceste frecvențe **TL** respectă legea masei (**6dB/octavă**), dar în afara lui (la capetele graficului) apar fenomene auxiliare ce vor schimba comportamentul peretelui la impactul cu unda sonoră și vor face ca fonoizolația în acele zone să se comporte diferit, depinzând mai mult de rigiditatea materialelor componente (Eng=**stiffness**) și factorul intern de amortizare (Eng=**damping**) decât de masa lor.

Din această cauză, o reprezentare mai apropiată de realitate a caracteristicii de atenuare sonoră (TL) a peretelui din exemplul de mai sus va fi dată de diagrama următoare :

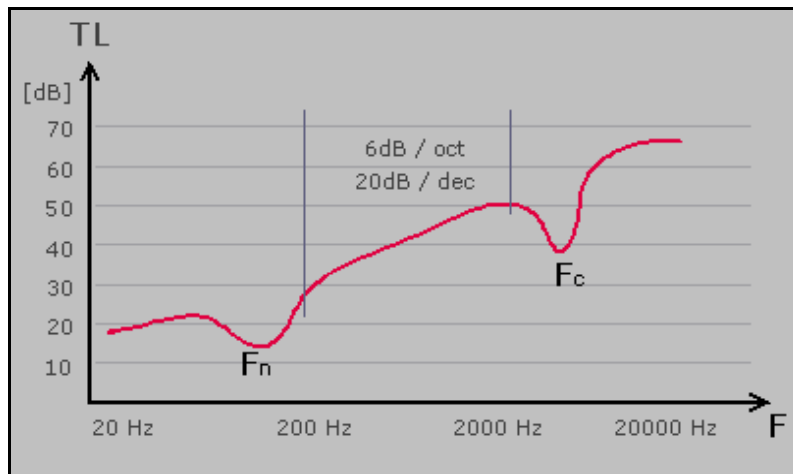


Fig.2

În practică, aceste frecvențe speciale din caracteristicile de fonoizolație ale materialelor sunt cele care de multe ori fac dificilă obținerea unor valori optime pentru parametrii de izolație fonică ai unei încăperi, deoarece ambele frecvențe se situează uzual în zone ale spectrului audibil sensibile pentru urechea umană (frecvențe mediu-joase respectiv mediu-înalte), fonoizolația slabă din respectivele zone fiind ușor sesizată. În consecință, pentru a avea valori ale TL mari într-o plajă cât mai largă din banda audio, **trebuie ca aceste frecvențe de rezonanță să fie "împinse" cât mai înspre capetele benzii de audiofrecvență**, lucru ce nu este foarte ușor, din cauza dependenței lor de parametrii comuni ce nu permit calcularea lor independentă. Spre exemplificare, frecvența naturală (F_n) a unui perete de rigips depinde de masa pe unitatea de suprafață a stratului de rigips, astfel încât crescând grosimea peretelui (pentru o densitate dată) va scădea și frecvența lui naturală de rezonanță, ducându-se înspre capătul inferior al spectrului audibil, dar în același timp frecvența critică (F_c) a peretelui va scădea cu creșterea grosimii peretelui (crește rigiditatea lui), ajungând într-o zonă și mai sensibilă pentru urechea umană.

Fonoizolarea : sugestii practice

Cunoscând valorile izolației fonice necesare și ținând cont de principiile teoretice prezentate mai sus, se pot determina materialele și modul lor de folosire în construcția pereților încăperii. Acest lucru presupune consultarea unor tabele ce conțin măsurători în condiții de laborator ai parametrilor acustici ale materialelor folosite uzual, precum și măsurători a diferite combinații constructive ale acestor materiale. Condițiile de pe "teren" diferind de cele din laborator, sunt necesare mai multe corecții și ajustări față de situațiile ideale, din start trebuind adăugate în ecuație și scurgerile de sunet prin căile secundare amintite anterior. În plus, pe lângă criteriile tehnice de realizare, trebuie să se țină seama și de altele, cum ar fi condițiile financiare (bugetul existent), disponibilitatea comercială a materialelor sau chiar criterii estetice. Experiența practică va conta foarte mult în alegerea celor mai bune soluții tehnice, pentru că fiecare situație concretă necesită abordări diferite și vor trebui făcute mai multe compromisuri în alegerea parametrilor constructivi ai elementelor fonoizolatoare (pereti, podea, tavan, uși, geamuri, etc.) astfel încât, în final, să se obțină structuri fonoizolatoare cât mai eficiente, cu un nivel de fonoizolație cât mai uniform în frecvență și mai apropiat de valorile dorite de-a lungul întregului spectru audibil.

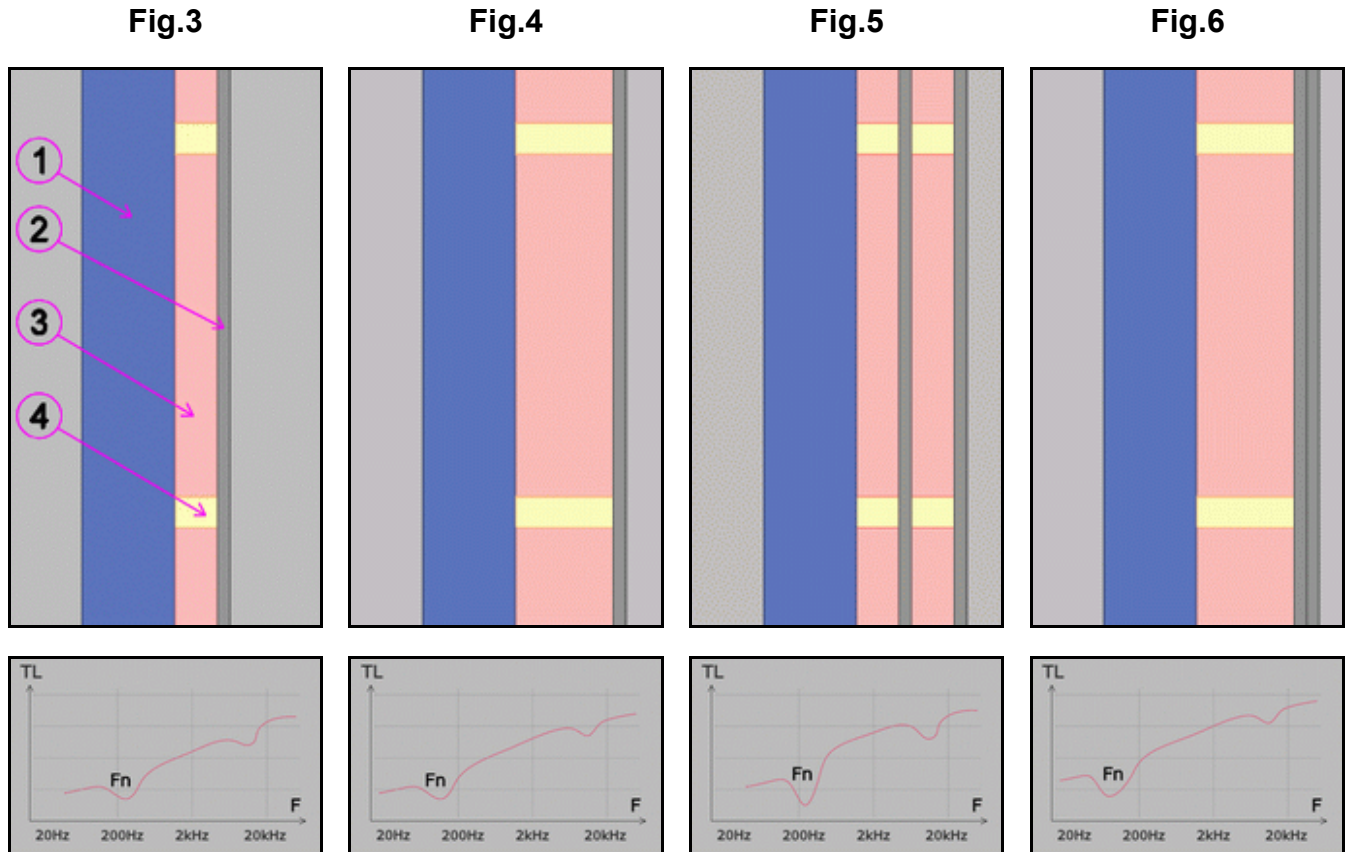
Pereții

Pentru a putea obține valori cât mai mari ale fonoizolației, pereții încăperilor trebuie să aibă o masă cât mai mare pe unitatea de suprafață. Cu cât **sunt mai denși și mai groși cu atât mai bine**, cu precizarea că **trebuie să aibă și factorul intern de amortizare suficient de mare**. Spre exemplu, un perete de oțel comparat cu un perete de plumb de aceeași masă pe unitatea de suprafață se va comporta mult mai prost ca fonoizolator, datorită factorului de amortizare intern mic, ce va duce la transferul mai ușor al vibrațiilor sonore prin el. Cele mai eficiente sunt zidurile groase de piatră, cărămidă sau beton, care au frecvența naturală (**F_n**) și frecvența critică (**F_c**) foarte coborâte, la capătul inferior al benzii audio.

Dacă valorile prezentate de un asemenea zid nu sunt suficiente pentru o anumită aplicație, se pot adăuga straturi adiționale din materiale dense, precum rigips, placaj, PAL, etc. Masa acestor straturi adiționale trebuie să fie însă suficient de mare (comparabilă cu cea a zidului original) pentru a modifica substanțial TL-ul peretelui, altfel munca este în zadar. Drept urmare, **folosirea materialelor cu densitate redusă (precum polistirenul expandat, buretele (profilat sau nu), cofrajele de ouă, etc.) în scopul izolării fonice a unei încăperi este contraindicată** (pot fi folosite cu anumite rezultate însă la optimizarea acusticii încăperii, după cum se va vedea mai încolo).

O metodă mai eficientă de a folosi aceste straturi suplimentare constă în montarea lor la o anumită distanță de suprafața peretelui original, cu ajutorul unui schelet de lemn sau metal. Aerul din spațiul rezultat între zid și stratul adițional se comportă ca un element elastic, crescând mult **TL**-ul sistemului complex astfel format, chiar dacă masa stratului adăugat nu este atât de mare. Combinația dintre cei doi pereți și stratul de aer dintre ei formează practic un filtru acustic centrat pe o frecvență care este frecvența naturală (**F_n**) a peretelui complex și care depinde în primul rând de masele celor doi pereți și de distanța dintre ei. În apropierea acestei frecvențe ansamblul va avea o groapă în caracteristica **TL**, deci este indicat ca această frecvență să fie cât mai scăzută ca să iasă din banda audio. Groapa fiind cu atât mai adâncă cu cât factorul de amortizare al filtrului creat este mai mic (adică cu cât rezonanța sistemului la frecvența respectivă este mai mare), cel mai bun mijloc de a crește acest factor este folosirea unui material fonoabsorbant în spațiul dintre pereți, care va amortiza oscilațiile aerului la frecvența de rezonanță și pe deasupra va modifica și comportarea aerului, mărindu-i volumul aparent, ceea ce va duce la micșorarea frecvenței de rezonanță.

Ca un exemplu concret și foarte întâlnit în practică, în **Fig.3** de mai jos este ilustrat un asemenea perete compus (secțiune, vedere de sus), format dintr-un perete de beton (**1**) și un strat adițional de rigips (**2**), montat cu ajutorul unor șipci verticale de lemn (**4**) la o anumită distanță de primul, între ele fiind introdusă vată minerală (**3**) pentru a amortiza rezonanțele sistemului. Dacă distanța dintre pereți se mărește (**Fig.4**), frecvența naturală (**F_n**) a sistemului scade și rezultatul este că **TL** per ansamblu va crește, datorită faptului că legea masei va începe de la o frecvență mai coborâtă și **TL** va avea "spațiu" să crească mai mult. În momentul în care însă este inserat un al doilea strat de rigips între cei doi pereți (**Fig.5**), se formează două subsisteme acustice, fiecare având o frecvență naturală proprie dată de masa celor doi pereți ce-l formează și de distanța dintre ei. Aceste două frecvențe sunt de valori mai ridicate și destul de apropiate, astfel că, cele două gropi alăturându-se, rezultă o caracteristică **TL** a întregului sistem cu o groapă mare la o frecvență mai ridicată decât în cazul din **Fig.4**. Deși, la valori mai mari decât această frecvență, caracteristica **TL** va avea un comportament mai bun datorită masei suplimentare introduse de peretele intermediar, rezultatul per ansamblu este mai prost decât înainte pentru că groapa în **TL** este mai sus în frecvență și este mai sesizabilă de urechea umană. Un mod mai eficient de folosire a acestui al doilea strat de rigips este prezentat în **Fig.6**, unde pe lângă distanța mare dintre pereți vom avea și o masă mai mare în ecuație (cele două straturi de rigips sunt considerate ca un singur strat de grosime echivalentă), rezultând o frecvență naturală mult mai joasă, iar **TL** va avea cele mai bune valori dintre cele patru cazuri. (**Observație:** graficele **TL** prezentate au doar un rol explicativ și nu reprezintă măsuratori reale).



În acest ultim caz (**Fig.4**) se pot adăuga și mai multe straturi de rigips, masa echivalentă a peretelui crescând astfel și ducând la reducerea și mai mult a frecvenței naturale a sistemului. Trebuie precizat faptul că dacă s-ar folosi un strat de rigips de același tip dar de grosime echivalentă cu cele suprapuse, nivelul de fonoizolație al peretelui ar fi mai slab pentru că frecvența critică (**F_c**) a acestui strat gros ar fi mai scăzută decât a celor subțiri, datorită rigidității mai mari cauzate de grosimea mare. Din același motiv (împiedicarea creșterii rigidității și deci scăderea **F_c**), straturile suprapuse este recomandat să fie prinse cu șuruburi una de alta și nu lipite între ele cu adeziv (caz în care s-ar comporta ca un strat de grosime echivalentă).

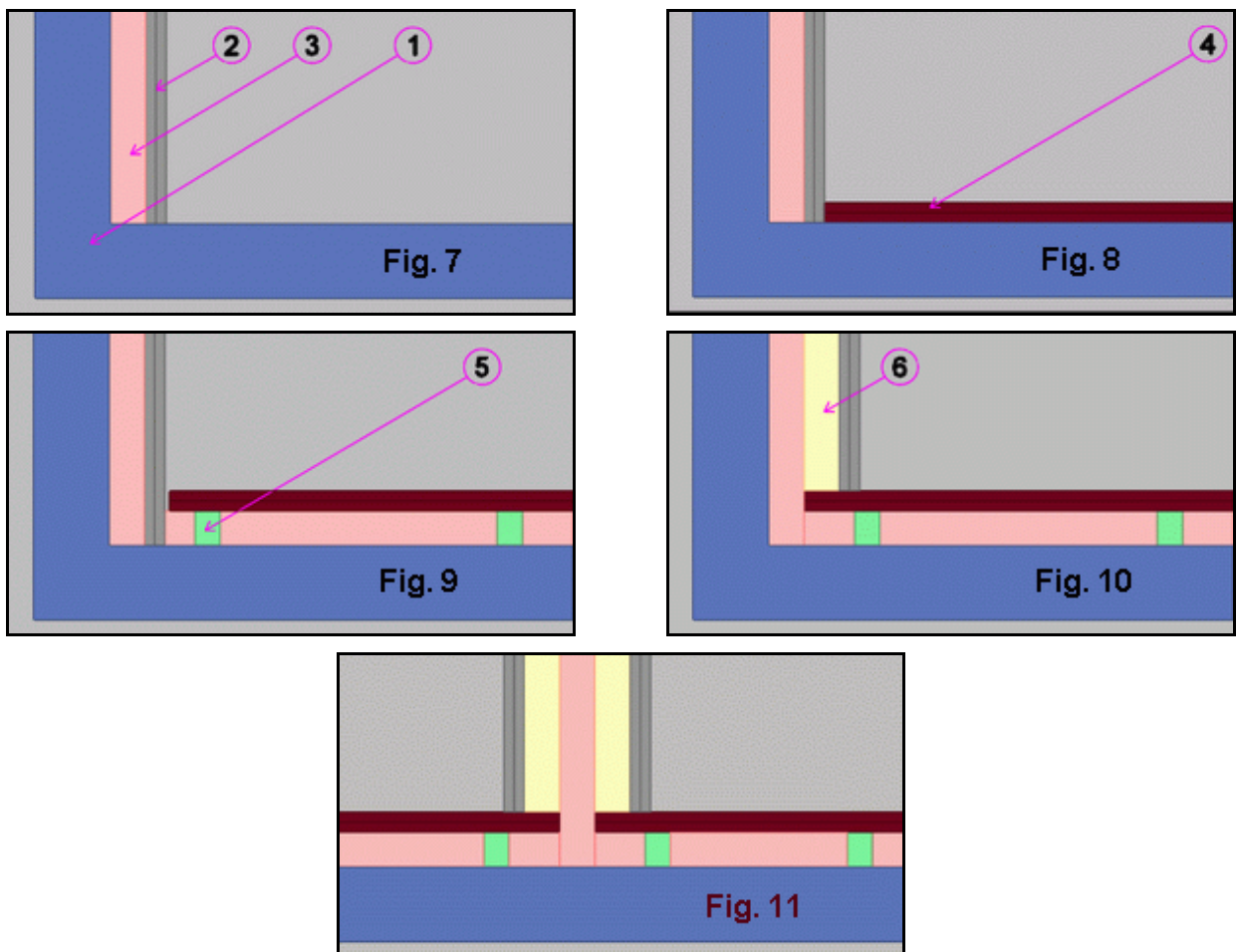
Primul perete (**1**) fiind dintr-un material masiv (foarte rigid și foarte gros), frecvența lui critică este foarte joasă, nefiind practic importantă în această situație. Dacă însă și peretele (**1**) este din rigips (un strat sau mai multe suprapuse), va intra în calcul și frecvența critică a acestuia.

Principala slăbiciune a exemplului prezentat mai sus constă în faptul că șipcile (**4**) de interconectare a celor doi pereți formează o cale suplimentară și mai ușoară de transmitere a undelor sonore prin sistem, ce va duce la deteriorarea valorilor teoretice ale **TL** pentru acesta, fiind de fapt un scurtcircuit acustic pentru perete. Există metode mai avansate de realizare a

acestui schelet de susținere, care reduc într-o anumită măsură pierderile, dar cea mai eficientă soluție o reprezintă decuplarea mecanică totală a celor două părți ale pereților, fiecare având o bază de susținere proprie, realizată prin tehnica podelelor flotante, ce va fi prezentată în continuare.

Podeaua

Poate cea mai importantă componentă a granițelor acustice ale unei încăperi, podeaua este și cel mai greu de adus la nivelele necesare de fonoizolare. Din cauza faptului că principalul ei rol este acela de susținere a conținutului încăperii (mobilier, aparatură, oameni, etc), asta îi impune anumite condiții de rigiditate și masă ce pun dificultăți în calea obținerii unor valori mari pentru TL în tot spectrul audibil de frecvență. În plus, fiind direct conectată cu toți pereții încăperii (funcționând și ca tavan pentru încăperea dedesubt, dacă încăperea se găsește la un nivel superior al unei clădiri) va fi factorul principal de transmitere pe căi structurale a vibrațiilor de la toate sursele sonore care se sprijină (direct sau indirect) pe ea.



Continuând exemplul dat în secțiunea dedicată realizării pereților, în **Fig.7** se poate vedea secțiunea laterală a îmbinării dintre o podea de beton și un perete de beton (1) suplimentat cu placi de rigips (2) pe un schelet de lemn ce nu se vede în imagine din cauza vatei minerale (3) ce umple spațiile goale.

Primul pas pentru a îmbunătăți caracteristica **TL** a podelei (**Fig.8**) ar fi creșterea masei adăugând o podea suplimentară (**4**) formată din straturi dintr-un material dens, dar și suficient de dur ca să poată face față traficului prin încăpere, de exemplu placaj gros sau PAL. Problema este că, dacă ținem cont de legea masei, pentru a crește **TL**-ul cu 6dB (ceea ce nu este foarte mult) ar trebui să adăugăm o masă egală cu cea a podelei inițiale, acest lucru fiind cu siguranță impractic în majoritatea cazurilor. Pentru situațiile frecvente în care este nevoie de creșteri cu mult mai mari (20-30dB), această metodă este inacceptabilă, cantitatea de material necesară ar ocupa mult prea mult spațiu util din încăpere, iar greutatea suplimentară ar putea afecta integritatea structurală a clădirii.

O soluție mai eficientă constă în introducerea unui strat de aer între podeaua originală și cea adăugată, folosindu-se niște elemente de suspensie (**5**) și umplând cu vată minerală stratul de aer pentru a amortiza rezonanțele (**Fig.9**). În acest fel vom obține o barieră acustică complexă (**podea flotantă**) ce lucrează ca un filtru pentru undele sonore ce lovesc podeaua, blocându-le mult mai bine decât ar fi făcut-o cele două podele prin simpla lor suprapunere. Se mențin aceleași reguli (discutate în cazul pereților) pentru frecvența critică (**F_c**) și frecvența naturală (**F_n**) a sistemului, dar intervine un element important în plus și anume circuitul de scurgere a vibrațiilor între cele două podele prin elementele de suspensie.

Pentru a nu deteriora efectul izolator al ansamblului podea-aer(vată)-podea, suspensiile trebuie să aibă proprietăți fonoizolatoare comparabile cu acesta. Se folosesc în acest scop bucăți din cauciucuri speciale sau arcuri de oțel, a căror parametrii sunt precis calculați, un calcul greșit putând duce la performanțe chiar mai slabe decât în cazul podelei simple.

Una dintre cerințele suspensiilor este să aibă frecvența naturală (**F_n**) cât mai mică și asta se obține în primul rând prin comprimarea lor cât mai puternică (dar numai până la o anumită limită de rezistență, peste care materialul începe să se deterioreze repede în timp), aplicându-se o greutate cât mai mare asupra lor. Deci podeaua flotantă împreună cu ceea ce există în încăpere trebuie să fie cât mai grele, cu observația că, pentru a avea o frecvență **F_n** cât mai stabilă, este indicat ca elementele prezente permanent (podea, mobilier, aparatură, etc) să aibă o pondere mult mai mare în acest total decât cele temporare (instrumente muzicale, oameni,...).

Construirea pereților interiori pe podeaua flotantă cu ajutorul unui schelet (**6**) de lemn sau metal ca în **Fig.10** ajută la acest lucru, prin adăugarea greutății lor la totalul ce va comprima suspensiile. În plus, foarte important, se obține astfel o decuplare totală a pereților interni de cei externi, minimizându-se în acest mod scurgerile sonore prin infrastructura clădirii. Dacă condițiile permit, se recomandă turnarea din beton a podelei flotante.

În situația în care este necesară construcția unui perete despărțitor într-o încăpere, de exemplu când se dorește împărțirea unei camere în două pentru a obține o sală de înregistrare și o cameră de mixaj într-un studio de înregistrare, metoda podelelor flotante și a pereților separați pentru fiecare cameră este cea mai performantă. După cum se vede în **Fig.11**, fiecare încăpere are propria podea flotantă (calculule suspensiilor trebuind făcute pentru fiecare cameră în parte), propriii pereți interiori și (după cum se va vedea mai încolo) propriul tavan fals ce se sprijină doar pe pereții interiori. În acest fel, cele două încăperi vor fi complet separate și transferul de unde sonore dintr-o parte într-alta va fi minim.

Tavanul

Tavanul este practic un perete orizontal, așa că tot ce s-a discutat anterior despre pereți este valabil și pentru tavan. În exemplul dat acolo (**Fig.3**), peretele **(1)** va fi înlocuit de tavanul original al încăperii, iar peretele **(2)** va deveni tavanul fals. Principiile de transmitere a undelor sonore fiind aceleași, concluziile trase din acele situații (**Fig.3-Fig.6**) rămân valabile și aici.

Ceea ce se schimbă puțin sunt metodele practice prin care se poate îmbunătăți situația în privința scurgerilor sonore prin scheletul de prindere. Există dispozitive speciale de conectare a tavanului fals la cel original, care au rolul de a decupla mecanic cele două tavane prin intermediul unor elemente elastice și de a limita astfel transmisia vibrațiilor sonore prin sistemul de prindere. Apar și în acest caz problemele pe care le-am discutat la suspensiile de la podele, aceste dispozitive de prindere trebuind să fie cât mai tensionate (până la o anumită limită de rezistență) pentru a avea o frecvență naturală (**F_n**) de rezonanță cât mai coborâtă. Pentru asta, tavanul va trebui să aibă o greutate cât mai mare, deci va fi construit din straturi cât mai dense și mai groase (panouri de rigips, PAL, placaj gros, etc). Aici gravitația ne sare în ajutor, la greutatea plăcilor tavanului adăugându-se și greutatea scheletului de prindere a acestora, plus greutatea materialului absorbant pus între cele două tavane pentru a amortiza rezonanțele. De obicei producătorii acestor dispozitive dau indicații privind greutatea optimă/suportată de fiecare element, fiind ușor de calculat numărul lor necesar pentru o anumită situație, în funcție de greutatea tavanului ce trebuie suspendat.

Cea mai fericită situație apare în cazul unei camere flotante, în care pereții interiori sunt separați total de cei exteriori, tavanul fals putând fi foarte ușor construit direct pe acești pereți interiori, fără a avea vreun contact mecanic cu tavanul superior, eliminându-se astfel complet problema transmisiei sunetului prin structura de prindere.

Geamurile

Deși sunt foarte utile pentru o încăpăre (din motive evidente), din punct de vedere acustic geamurile sunt însă doar un rău necesar, pentru că proprietățile lor fonoizolante sunt foarte greu de adus la nivelul dat de pereții din care fac parte (și în plus au în general efecte negative asupra acusticii interioare a încăperilor, datorită reflexiilor acustice pe care le generează).

Respectând legile enunțate la începutul capitolului, nivelul de fonoizolație al unui panou de sticlă va depinde de mai mulți parametri (dimensiuni, densitate, factor intern de amortizare, etc), cel mai relevant fiind grosimea lui. Cu cât sticla este mai groasă, cu atât masa ei pe unitatea de suprafață va fi mai mare și în consecință va avea o frecvență naturală de rezonanță (**F_n**) mai scăzută, caracteristica **TL** devenindu-i mai bună. Pe de altă parte, sticla fiind un material foarte rigid și având un factor de amortizare intern destul de scăzut, odată cu creșterea grosimii panoului va scădea și frecvența sa critică (**F_c**), ceea ce va duce la deteriorarea caracteristicii **TL** la frecvențe medii și înalte. Spre exemplu, sticla normală de 4mm grosime are **F_c** de aprox. 2.5kHz iar cea de 6mm coboară până pe la 1.5kHz, o zonă deja foarte sensibilă pentru urechea umană.

O soluție la această problemă este folosirea sticlei laminate, care constă în două sau mai multe straturi de sticlă de grosimi mai mici lipite între ele cu ajutorul unui strat subțire de plastic transparent, ce ajută la creșterea factorului de amortizare intern (energia vibrațiilor se disipă în plastic prin frecarea dintre straturi) și la creșterea frecvenței critice. Rezultatul este că, deși panoul de sticlă va fi mai gros, beneficiind astfel de o frecvență naturală mai mică, **F_c** va avea valori mai mari, apropiate de cele corespunzătoare grosimii straturilor de sticlă componente.

Indiferent de tipul și mărimea sticlei folosite, contează foarte mult felul de prindere a ei în ramă și calitatea etanșării golurilor dintre sticlă și ramă. Orice orificiu care va lăsa aerul să treacă dintr-o parte într-alta a geamului va lăsa să treacă și undele sonore purtate de acesta. În **Fig.12** se observă un sistem simplu de prindere a unui panou de sticlă **(1)** într-o ramă de lemn **(2)** fixată într-un perete de beton **(3)**. Marginile sticlei nu au contact direct cu rama, ci prin intermediul unei garnituri de etanșare **(4)** în formă de U, din cauciuc, neopren sau alt material elastic rezistent.

Cea mai consistentă îmbunătățire a fonoizolației unui asemenea geam se poate obține prin folosirea a două panouri de sticlă separate de un strat de aer (**Fig.13**). În spațiul dintre sticle, pe rama geamului, se va aplica un strat de material fonoabsorbant **(5)** pentru a amortiza într-o anumită măsură rezonanțele din cavitate. Aplicând din nou regulile descrise la capitolul pereților, caracteristica **TL** a sistemului format de cele două panouri de sticlă și stratul de aer dintre ele va depinde în principal de distanța dintre panouri și de masa lor pe unitatea de suprafață. Frecvența naturală (**F_n**) a geamului astfel obținut poate fi coborâtă prin creșterea grosimii panourilor de

sticlă folosite și prin mărirea distanței dintre ele. Dar cum sticlă de grosimi mai mari de 8-10mm este greu de găsit în comerț (fiind destul de scumpă) și în plus trebuind luat în considerare faptul că prin creșterea grosimii sticlei frecvențele critice (F_c) proprii ale panourilor vor scădea, nu se poate merge prea departe în acest sens (chiar considerând și varianta folosirii sticlei laminată, care va ameliora într-o anumită măsură situația). Va rămâne așadar ca metodă principală pentru coborârea F_n creșterea distanței dintre panourile de sticlă, până la limitele permise de situația concretă, în majoritatea cazurilor aceste limite fiind impuse de grosimea pereților din care face parte geamul.

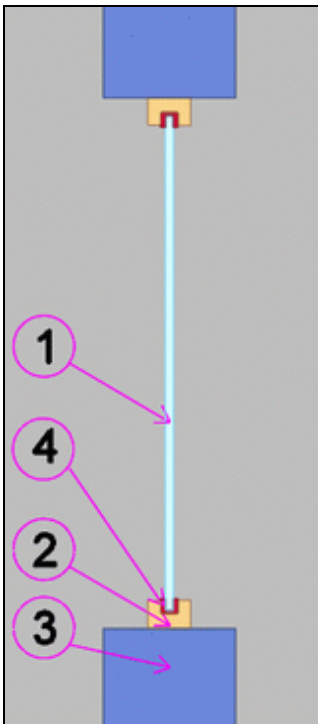


Fig.12

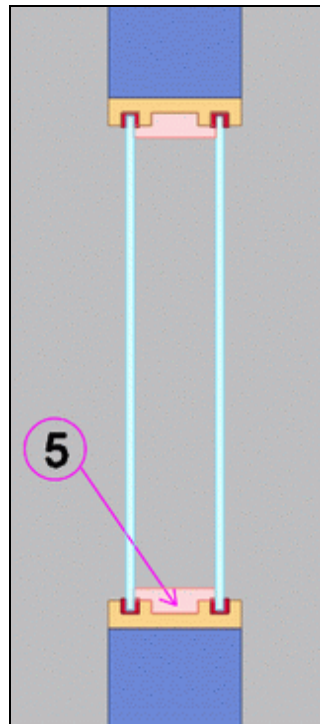


Fig.13

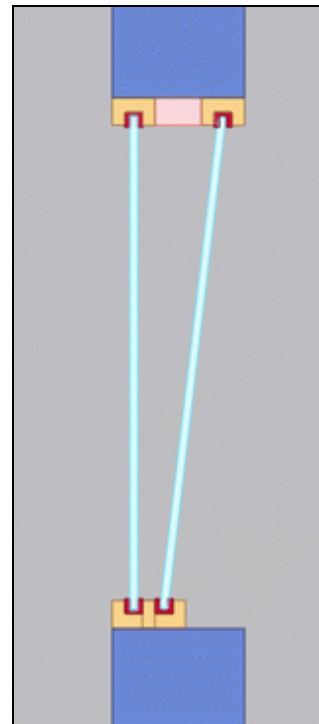


Fig.14

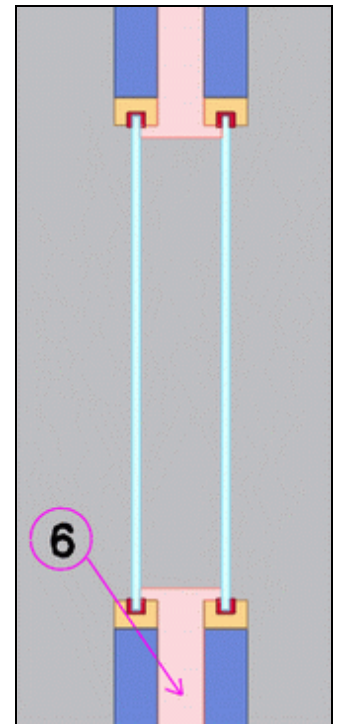


Fig.15

Inclinarea unuia dintre panourile de sticlă (**Fig.14**) este indicată doar din motive ce țin de optimizarea acusticii unei încăperi (și doar în anumite situații) și nu are beneficii evidente în sporirea gradului de izolare fonică a aceluia geam. Faptul că prin distrugerea paralelismului dintre cele două plăci de sticlă se ameliorează rezonanțele dintre ele (rezonanțele nu dispar ci doar se distribuie pe o bandă mai largă de frecvențe) contează mai puțin decât faptul că se micșorează sensibil distanța medie dintre panouri, ceea ce duce la creșterea frecvenței naturale (F_n) a geamului și deci la înrăutățirea caracteristicii **TL**.

O situație foarte des întâlnită este cea a folosirii geamurilor de tip termopan, care constau de obicei din două foi de sticlă (laminată sau nu) de grosime 4-6 mm, separate de un strat de aer de 15-16 mm. Frecvența naturală (F_n) a unui astfel de geam are valori între 200 și 300 Hz, lucru

deloc recomandat în situația în care trebuie izolată o sursă sonoră cu energie spectrală bogată în această bandă de frecvențe.

Contrar așteptărilor, adăugarea unui al treilea panou de sticlă între cele două nu este o soluție prea indicată. Deoarece spațiul dintre panourile de sticlă se micșorează, crește frecvența naturală de rezonanță (**F_n**) a sistemului (vezi și **Fig.5** de la secțiunea dedicată pereților), astfel încât chiar dacă la frecvențe superioare se îmbunătățește un pic caracteristica **TL** a geamului, la frecvențe joase (mai ales în jurul **F_n**) apare o înrăutățire, per total rezultând o degradare a **TL**.

Rama de prindere a panourilor de sticlă este în multe cazuri punctul slab al unui geam, devenind o cale auxiliară de transfer a vibrațiilor sonore și scurtcircuitând practic bariera acustică formată de cele două panouri de sticlă și aerul cuprins între ele. Din acest motiv este preferabilă situația din **Fig.15**, în care peretele pe care este montat geamul este format din două straturi distincte, cu material fonoabsorbant între ele (**6**) pentru a amortiza rezonanțele, fiind posibilă construirea de rame separate pentru fiecare panou de sticlă și prinderea lor numai de partea de perete corespunzătoare. Decuplarea mecanică a celor două panouri ale geamului obținută în acest fel va elimina scurgerile auxiliare ale sunetului prin alte căi decât calea sticlă-aer-sticlă și va garanta obținerea unor valori mult mai ridicate pentru **TL**-ul geamului respectiv.

O mare atenție trebuie acordată geamurilor care se deschid, sistemul lor de închidere și etanșare putând fi un factor important de deteriorare a fonoizolației, dacă nu este făcut cu grijă. Se vor folosi închizători solide, preferabil cu mai multe puncte de prindere, iar îmbinările dintre geam și ramă vor fi bine etanșate cu chedere de cauciuc sau alte materiale vâsco-elastice.

Ușile

La fel ca în cazul geamurilor, ușile sunt necesare pentru comunicarea dintre încăperi, dar reprezintă puncte foarte vulnerabile ale izolației fonice în acele încăperi. Spre deosebire de geamuri însă, ușile sunt mai ușor de îmbunătățit în privința proprietăților lor fonoizolante, deoarece nu suntem limitați de folosirea unui singur material (sticla). Pentru ca o ușă să aibă un nivel de fonoizolație apropiat de cel al peretelui din care face parte, ea trebuie să îndeplinească două condiții importante :

- 1 - să aibă masa pe unitatea de suprafață cât mai mare (comparabilă cu cea a peretelui)
- 2 - să aibă un sistem de închidere/etanșare cât mai bun, inclusiv în zona podelei.

Pentru îndeplinirea primului punct, soluția este relativ simplă și presupune construirea corpului ușii din materiale cât mai dense, precum PAL, rigips, metal (preferabil din mai multe straturi pentru a nu avea o frecvență critică prea mică). Factorul intern de amortizare contează și aici mult, astfel că o ușă dintr-un singur strat gros de oțel nu va fi cea mai fericită alegere. Există

Însă multe produse profesionale sub forma unor uși foarte grele din metal (oțel, plumb,...) dar care au interiorul amortizat, de exemplu cu ajutorul unui strat de nisip, sau spume speciale. Ca soluție mai ieftină, se pot adapta și uși normale prin adăugarea de straturi adiționale din materialele amintite mai sus, iar în interiorul lor (care de obicei este gol) se introduce vată minerală pentru amortizarea rezonanțelor. Trebuie ținut seama în acest ultim caz de greutatea maximă pe care o suportă balamalele existente, pentru că la greutatea adițională prea mari ele s-ar putea să cedeze.

Partea de etanșare a ușii este cea care în majoritatea cazurilor generează problemele, atât la construcția cât și în funcționarea ei. Dacă sistemul de închidere a ușii nu este suficient de solid încât să țină ușa cât mai aproape de rama ei și dacă îmbinarea dintre ele nu este etanșă, aerul se va scurge dintr-o parte într-alta a ușii prin orice fisură minusculă va găsi, transportând cu el și undele sonore (o fisură de numai 0.5mm de-alungul perimetrului unei uși este echivalentă cu o gaură de 5x5cm în ușă!). Soluția constă în aplicarea de fâșii din neopren, cauciuc sau alte materiale vâsco-elastice la locurile de îmbinare dintre corpul ușii și rama ei, împreună cu folosirea unui sistem de închidere cât mai puternic (eventual cu mai multe puncte de prindere în ramă) care să comprime foarte bine materialul de etanșare. Rezultate și mai bune se pot obține prin dublarea îmbinărilor adăugându-se încă o "terasă" la nivelul ușii și a ramei sale.

Situația camerei flotante impune în acest caz folosirea a câte două uși separate, fiecare cu rama proprie conectată doar la peretele ce-i corespunde, pentru a minimiza în acest fel scurgerile structurale dintre pereți. Varianta cea mai practică de conectare între două încăperi presupune folosirea unui mic spațiu de tranziție (Eng=**sound lock**) echivalent cu un hol micuț, prevăzut la ambele capete cu uși (caz în care ele nu trebuie să fie chiar așa de performante).

Folosirea ușilor cu sticlă de tip termopan nu este nici aici foarte recomandată, deoarece deși au în general îmbinările foarte bine etanșate (și unele modele sunt dotate cu sisteme de închidere destul de performante), ele păcătuiesc prin distanța mică dintre straturile componente și prin greutatea mică pe unitatea de suprafață, ce determină frecvențe naturale de rezonanță destul de ridicate, făcându-le ineficiente la izolarea undelor sonore de joasă frecvență, precum semnalele muzicale generate de difuzoarele dintr-un studio sau dintr-o cameră de audiție.

O atenție deosebită trebuie acordată montării ramei în deschiderea din perete, orice spațiu gol rămas trebuind să fie etanșat foarte bine, nu cu spuma uzual folosită la montarea geamurilor (are densitatea foarte mică), ci cu mortar în cazul pereților din beton sau cărămidă, respectiv cu un chit siliconic pentru pereții din rigips sau placaj. Nu trebuie uitat nici faptul că gaura cheii dintr-o ușă este o cale de scurgere pentru sunet, așa că orice asemenea orificiu va fi atent etanșat.

Optimizarea răspunsului acustic al interioarelor

Intr-o încăpere bine izolată fonic, aproape toată energia sonoră emisă de sursele de sunet din ea rămâne înăuntru, neputând să găsească o cale de a ieși în exterior. Dacă din punctul de vedere al separării sonore a interiorului față de exterior acest lucru este foarte bun, din punctul de vedere al răspunsului acustic al încăperii (adică al calității audiției într-o asemenea încăpere) poate fi un lucru destul de nefavorabil, în special pentru încăperile mici (sub 100 m³). Pentru a motiva această afirmație, este necesară prezentarea a trei extrem de importante fenomene ce au loc în interiorul unei încăperi cu pereții reflectivi, în care o sursă generează unde sonore.

Reverberația sunetului

Când o undă generată de o sursă sonoră (de exemplu o voce umană sau un difuzor) dintr-o încăpere ajunge la un perete (sau alt obstacol mare din calea ei), o parte din energia ei este absorbită de materialul din care este realizat peretele (și transformat în căldură sau eliminat prin partea opusă), iar restul se reflectă precum o rază de lumină într-o oglindă, propagându-se într-o altă direcție până ajunge la un nou obstacol, unde procesul se repetă. În cazul unei încăperi goale, sunetul se reflectă din perete în perete, până la extincția totală cauzată de absorbțiile repetate. Efectul astfel rezultat se numește **reverberație** a sunetului și este caracterizat de **timpul de reverberație** (în literatura de specialitate notat cu **T60** - timpul în care, de la încetarea emisiei unei surse sonore dintr-o încăpere, nivelul reflexiilor generate scade cu 60 dB față de sunetul original, adică devine a mia parte din el). Cu cât pereții sunt mai netezi și mai duri, iar procentul de undă reflectat de perete este mai mare, cu atât vor trebui mai multe reflexii până să se stingă sunetul, timpul de reverberație fiind cu atât mai mare. Deasemenea, cu cât camera este mai mare și distanțele dintre pereți mai mari, cu atât și **T60** va avea valori mai ridicate.

O mare parte din aceste reflexii ale sunetului original se suprapun peste el, astfel că ceea ce percepe un receptor sonor (fie el un ascultător uman sau un microfon) într-un punct din încăpere nu reprezintă fidel originalul, ci este o **distorsiune acustică** a acestuia. Se poate spune așadar că, cu cât cantitatea de reflexii suprapuse peste sunetul direct este mai mică, cu atât "recepția" va fi mai lipsită de distorsiuni acustice, deci mai corectă și în consecință, cu cât timpul de reverberație dintr-o încăpere este mai mic, cu atât percepția unei surse sonore de către un ascultător uman aflat în aceeași încăpere va fi mai fidelă, respectiv înregistrările sonore realizate în interiorul ei vor fi mai bune.

Realitățile fizice și psiho-acustice impun însă anumite restricții asupra valorilor acestui timp de reverberație. S-a observat astfel că valorile optime pentru **T60** dintr-o încăpere depind

foarte mult de activitățile desfășurate uzual în ea. O sală de înregistrare "moartă", cu un timp de reverberație foarte scurt, este foarte potrivită pentru înregistrarea vocii umane în cazul citirii unui text, dar aceeași sală poate crea disconfort unor instrumentiști care cântă în ea, derutând prin sunetul "sec", amortizat, al instrumentelor acustice și devenind în scurt timp foarte obositoare. Pe de altă parte, crescând prea mult acest timp de reverberație, sunetele pot deveni repede neinteligibile într-o cameră mică, dar într-o încăpere mai mare, cu același timp de reverberație, ele pot căpăta o sonoritate plăcută (datorită unui număr mai mic de reflexii și deci de alterări a sunetului original, dar la un interval mai mare de timp între ele). Spre exemplu, pentru o cameră a cărei principale utilizări este înregistrarea unor voci umane (vorbite, nu cântate), **T60** optim (pentru o cât mai bună inteligibilitate a cuvintelor) este de 0,2-0,3 secunde, pe când pentru un studio de înregistrare a unei orchestre simfonice (care este o cameră mult mai spațioasă), acesta poate ajunge până la 1-1.5 secunde.

Un aspect important al surselor sonore de audiofrecvență ce trebuie evidențiat este că ele pot emite nu doar o singură frecvență, ci un întreg spectru de frecvențe, care poate merge de la cele mai joase (aproximativ 20 Hz) și până la cele mai înalte frecvențe pe care omul le poate auzi (aprox. 20.000 Hz). Sunetele emise de o sursă reală (de exemplu un instrument muzical, o voce umană sau un difuzor) conțin o mulțime de unde sonore pure (sinusoidale) cu frecvențe și amplitudini diferite, care sunt percepute însă de urechea umană ca o sumă, dozajul dintre aceste componente definind compoziția spectrală a semnalului complex (cu alte cuvinte timbrul lui). Dacă interferențe precum reflexiile din pereți modifică amplitudinile componentelor, se va modifica și timbrul semnalului original. Ca urmare, comportarea sunetului emis de o sursă sonoră într-o încăpere trebuie analizată și în funcție de frecvența undelor sonore.

După cum s-a văzut mai sus, fenomenul de reverberație este direct influențat de proprietățile fonoabsorbante ale pereților, tavanului și a podelei încăperii, precum și a altor posibile obstacole din interiorul ei (mobiliier, echipamente, oameni,...). Cu cât acestea absorb mai mult, cu atât undele sonore vor fi absorbite mai repede (după mai puține reflexii) iar timpul de reverberație asociat va fi mai mic. Datorită faptului că proprietățile de fonoabsorbție ale materialelor variază în frecvență (de exemplu unele materiale absorb mai bine frecvențele înalte, pe când altele absorb mai mult frecvențele medii sau joase) și timpul de reverberație al unei încăperi are diferite valori pentru unde sonore de frecvențe diferite, **T60** pentru o încăpere reală fiind deci o funcție de frecvență. Acest fenomen este foarte important în practică, pentru că afectează direct calitatea percepției de către un receptor sonor a unui semnal sonor redat de o sursă de sunet în încăpere. Dacă absorbția sonoră din încăpere este uniformă în frecvență și timpul de reverberație are valori apropiate pentru toate zonele spectrului audio, sunetul original redat de sursa de sunet se va suprapune cu reflexiile din jur și va fi îmbogățit spectral într-un

mod plăcut urechii umane, astfel că între anumite limite ale acestui timp de reverberație (depinzând în principal de dimensiunile încăperii) se va considera că încăperea are o acustică bună. Dacă însă există benzi de frecvență din spectrul audibil pentru care acest timp de reverberație are valori considerabil mai mari sau mai mici decât în restul spectrului, acestea vor determina o alterare neliniară a spectrului semnalului original, făcându-l în general dificil de perceput corect, chiar neinteligibil în unele cazuri. Spre exemplu, într-o încăperea cu absorbție multă a frecvențelor înalte dar cu exces de reverberație în zona frecvențelor mediu-joase, o voce umană va fi foarte greu de înțeles, deoarece consoanele (care sunt sunete de frecvențe înalte) vor fi atenuate iar vocalele (de frecvențe medii și mediu joase, fiind mult amplificate și lungite de reverberație) le vor acoperi, făcând cuvintele neinteligibile.

Așadar, pentru a avea un răspuns acustic cât mai bun, **timpul de reverberație al unei încăperi trebuie să aibă valori apropiate pentru tot spectrul de audiofrecvență**. Controlul timpului de reverberație (pentru o încăperea cu dimensiunile fixe) se face modificând proprietățile fonoabsorbante ale suprafețelor din interiorul ei. În acest scop, pe pereții și tavanul încăperii se vor aplica straturi adiționale din diferite materiale fonoabsorbante (precum vată minerală sau spume acustice speciale), cu caracteristicile de absorbție în frecvență astfel alese încât, ajustând suprafețele de aplicare pentru fiecare material în parte, să se ajungă la valorile dorite pentru **T60**, în toată banda de audiofrecvență. Deoarece sunt mai greu de absorbit, pentru frecvențele joase sunt acceptate valori ceva mai mari ale **T60** decât pentru frecvențele medii și înalte, astfel că variația optimă a timpului de reverberație dintr-o încăperea de-a lungul spectrului audio ar trebui să aibă alura curbei din **Fig.16**.

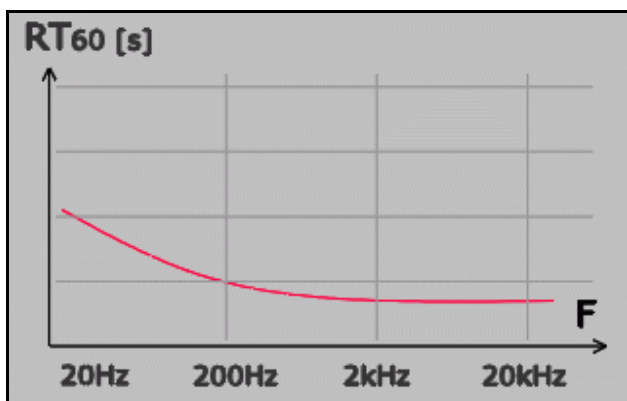


Fig.16

Principiul absorbției undelor sonore constă în faptul că moleculele de aer ce transportă unda sonoră pătrund printre fibrele materialului absorbant, se ciocnesc de acestea și pierd energie cinetică (ce se transformă în căldură), astfel că rămân cu mai puțină energie de mișcare și în consecință undele sonore rezultate au o amplitudine mai mică. Cu cât fibrele sunt mai dese și opun mai multă rezistență circulației aerului, cu atât absorbția va fi mai bună, până la un punct în care aerul nu mai poate circula bine prin material, acesta devenind treptat reflectiv la undele

sonore, blocându-le trecerea. De aceea produse precum polistirenul expandat sau buretele cu porii închiși nu au proprietăți fonoabsorbante bune, ele nepermițând moleculelor de aer să treacă printre fibrele lor și să piardă energie prin ciocnire. Viteza cu care moleculele de aer trec printre fibre contează foarte mult, cu cât este mai mare, cu atât pierderile de energie cinetică sunt mai mari și deci absorbția undelor este mai bună. Din acest motiv, materialul fonoabsorbant trebuie amplasat în zonele în care moleculele de aer din unda sonoră au viteza maximă, adică unde oscilația are amplitudinea maximă.

O undă sonoră este caracterizată de o lungime de undă, reprezentând distanța parcursă de frontul undei în intervalul în care are loc o oscilație completă. Pentru o undă sonoră ce cade perpendicular pe un perete, amplitudinea maximă apare în intervalul de un sfert din lungimea ei de undă față de suprafața peretelui. Asta înseamnă că, pentru a avea o absorbție eficientă la o anumită frecvență, materialul fonoabsorbant amplasat pe un perete trebuie să aibă o grosime de cel puțin un sfert din lungimea de undă corespunzătoare acelei frecvențe (implicit, toate frecvențele mai mari de această valoare vor îndeplini condiția). Într-o situație reală, undele sonore dintr-o încăpere vor cădea sub unghiuri diferite pe materialele absorbante, pargurgând o distanță mai mare printre fibre, astfel că o valoare practică mai rezonabilă poate ajunge pâna la o zecime din lungimea de undă. În concluzie, putem spune că, **pentru a absorbi eficient undele sonore cu valori mai mari de o anumită frecvență, un material absorbant aplicat pe un perete trebuie să aibă grosimea de cel puțin o zecime din lungimea de undă corespunzătoare acestei frecvențe.** În practică acest lucru se traduce prin faptul că, spre exemplu, un strat de vată minerală gros de 5cm aplicat pe un perete nu poate absorbi eficient unde sonore cu frecvențe mai joase de 600-700Hz. În loc de folosirea unui strat de o anumită grosime aplicat pe perete, pentru o economie de material se poate folosi și un strat mai subțire, distanțat de perete astfel încât grosime totală incluzând aerul să fie cea necesară, pierderile în eficiență nefiind prea mari. Se observă deci că, chiar în cazul folosirii unor straturi foarte groase de materiale fonoabsorbante (10-15cm) care sacrifică mult din spațiul unei încăperi mici, nu se produce o absorbție eficientă mai jos de 200-250 Hz, undele de frecvență mai joasă necesitând folosirea altor metode de absorbție.

Trebuie făcută următoarea precizare : timpul de reverberație este o mărime statistică și trebuie să fie măsurat în condițiile în care în încăpere s-a stabilit un câmp omogen de reflexii sonore (numit **câmp sonor difuz**, Eng=**diffuse soundfield**), caracterizat de faptul că undele sonore din tot spectrul audibil se propagă uniform în toate direcțiile și au amplitudini egale în toate punctele din încăpere la un moment dat. Dar această stare, în special pentru frecvențele joase, este practic imposibil de obținut în încăperile mici (specifice studiourilor de înregistrare și camerelor de audiție), deoarece apar anumite fenomene (despre care se va vorbi în paginile

următoare) ce împiedică acest lucru. Din această cauză, măsurarea precisă a timpului de reverberație la frecvențe joase este greu de realizat, făcând destul de dificilă sarcina determinării cantității de materiale fonoabsorbante necesare tratamentului acustic al unei asemenea încăperi.

Undele staționare

Pentru încăperile mici, cu laturi de ordinul a câțiva metri, lungimile de undă ale frecvențelor joase emise de sursele sonore devin comparabile cu dimensiunile acestor camere (spre exemplu lungimea de undă corespunzătoare frecvenței de 100Hz este de 3,44m).

Încăperile tipice au forma paralelipipedică (cu pereții opuși paraleli), astfel că o undă sonoră perpendiculară pe unul dintre pereți se va reflecta în peretele opus tot perpendicular, de acolo revenind în punctul de reflexie al primului perete și tot așa până la extincția ei. Pentru frecvența la care distanța dintre cei doi pereți paraleli este egală cu jumătate din lungimea de undă a oscilației ($L/2$), unda sonoră directă venind de la sursă spre un perete se va suprapune în antifază cu reflexia ei din acel perete, rezultând o așa numită **undă staționară** (Eng=**standing wave**), care pare că nu se deplasează, fiind de fapt un echilibru dinamic între două unde care se deplasează în sensuri opuse. În urma acestui fapt, la mijlocul distanței dintre pereți, undele se vor anula, iar la suprafața pereților presiunea lor sonoră se va însuma, rezultând o distribuție fixă de minime și maxime a presiunii sonore corespunzătoare undei de-a lungul acestei distanțe (mai precis un minim la mijloc și două maxime la capetele ei), în cele minime sunetul anulându-se, iar în cele maxime dublându-se ca amplitudine.

Diagrama din **Fig.17** ilustrează acest fenomen, curba roșie reprezentând simbolic variația presiunii sonore a undei de-a lungul distanței dintre cei doi pereți. În realitate, datorită faptului că reflexiile din pereți au amplitudini ceva mai mici decât unda directă (în funcție de proprietățile fonoabsorbante ale pereților), anularea nu se va face complet și nici dublarea nu va fi exactă (presiunea sonoră crește cu mai puțin de 6dB). Această frecvență se numește **frecvența fundamentală de rezonanță** asociată acelei dimensiuni a camerei, iar timpul de reverberație corespunzător ei este mult prelungit datorită autoîntreținerii sunetului, devenind de fapt timpul de amortizare a rezonanței respective.

Pe lângă această frecvență, undele staționare mai apar și la frecvențele ce sunt multipli întregi ai fundamentalei (numite **frecvențe armonice**), care determină la rândul lor apariția de-a lungul distanței dintre cei doi pereți, la intervale egale, a unor zone cu presiuni maxime și minime, în număr tot mai mare odată cu creșterea gradului armonicii (n minime și $n+1$ maxime). În **Fig.18** și **Fig.19** sunt reprezentate situațiile pentru armonicile a doua ($n=2$) și a treia ($n=3$).

Trebuie făcută observația că aceste reprezentări grafice sunt foarte simplificate, în realitate distribuțiile de presiune se desfășoară în trei dimensiuni și necesită un model de reprezentare mult mai complicat.

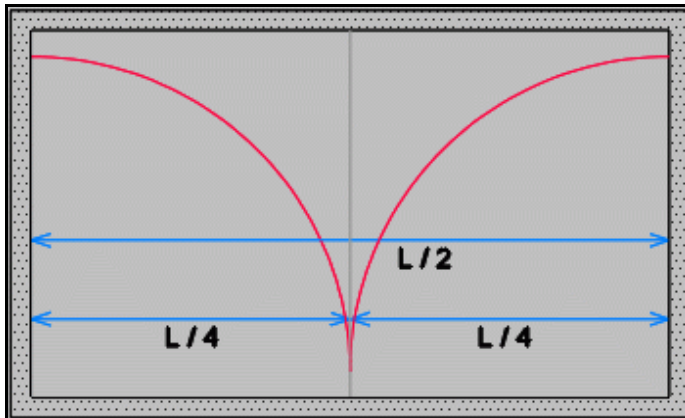


Fig.17

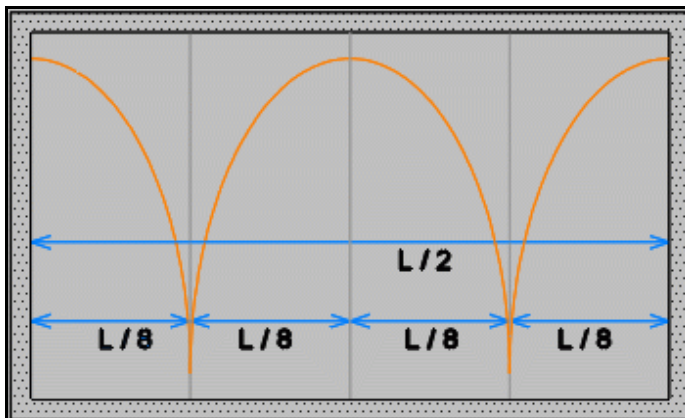


Fig.18

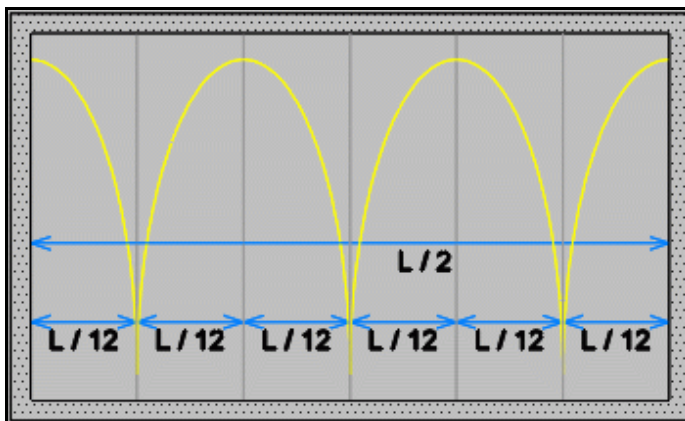


Fig.19

Cum o încăpere paralelipedică are trei seturi de pereți paraleli (luând în considerare și tavanul cu podeaua) și deci trei dimensiuni la care pot apărea unde staționare, vor exista trei seturi de frecvențe de rezonanță asociate lor (3 fundamentale plus 3 seturi de armonice). Toate aceste frecvențe de rezonanță corespunzătoare apariției undelor staționare între perechi de pereți paraleli se mai numesc și **modurile axiale** ale încăperii. Și ca lucrurile să fie și mai complicate, undele staționare se pot forma și între patru pereți, frecvențele de rezonanță asociate (fundamentale plus armonice) reprezentând **modurile tangențiale** ale încăperii, ba chiar și între toți cei șase pereți (rezultând **modurile oblice**). Suma tuturor modurilor încăperii,

axiale+tangențiale+oblice, formează **structura modală** a încăperii, iar importanța practică a acesteia se va vedea în cele ce urmează.

Să presupunem că într-o încăpăre paralelipipedică există o sursă de sunet și un receptor (un ascultător uman sau un microfon). Dacă sursa emite o undă sonoră de frecvență egală cu frecvența de rezonanță fundamentală corespunzătoare a doi pereți opuși, iar receptorul este plasat la mijlocul distanței dintre ei, el nu va percepe aproape de loc unda sonoră pentru că se află exact într-un punct de minim. Deplasându-se treptat înspre unul dintre pereți, receptorul va percepe tot mai tare unda, până când, ajungând chiar lângă perete, o va percepe foarte tare (comparativ cu nivelul ei original) pentru că se va afla într-un punct de maxim. Dacă sursa va emite o undă de altă frecvență, corespunzătoare unei armonici a fundamentalei, numărul de poziții dintre cei doi pereți cu minime și maxime ale presiunii sonore va crește proporțional cu gradului armonicii, crescând astfel și numărul locurilor în care receptorul nu va percepe unda, respectiv o va percepe foarte tare. Dacă însă sursa va emite o undă sonoră cu o frecvență diferită de orice frecvență de rezonanță (fundamentală sau armonică) asociată distanței dintre pereți, receptorul va percepe unda la același nivel de-a lungul întregii distanțe, deoarece nu se formează o undă staționară la acea frecvență (unda în acest caz se numește **undă călătoare**, (Eng=**traveling wave**) și deci nu apar zone de amplificare sau atenuare a ei. În cazul în care sursa va emite toate cele trei unde simultan, receptorul va recepționa o sumă a acestor trei unde și a reflexiilor lor, sumă ce se va modifica în funcție de poziția în care se va găsi el între cei doi pereți, fiecare componentă schimbându-și nivelul după legile descrise mai sus.

Extrapolând exemplul la o situație mai concretă, presupunem că sursa de sunet este un difuzor ce redă un program muzical într-o cameră, iar receptorul este un subiect uman care ascultă acest program. Ținând cont de faptul că semnalul complex redat de difuzor este practic o sumă de semnale sinusoidale de diferite frecvențe și amplitudini, dintre care unele vor fi suficient de aproape de valorile unor moduri ale încăperii încât să determine formarea undelor staționare și deci a unor zone de minim și maxim a presiunii sonore pentru frecvențele respective, ascultătorul va constata, deplasându-se prin încăpăre, că există locuri unde anumite note muzicale (din registrul grav) se aud mult mai slab decât celelalte note sau, dimpotrivă, mai tare și cu rezonanțe neplăcute, semnalul sonor original fiind din această cauză recepționat incorect în acele locuri. Dacă în cazul unei încăperi domestice, în care se ascultă ocazional muzică, acest lucru nu este o problemă prea gravă, în situația unei camere dedicate audiției muzicale de înaltă fidelitate sau în situația unei camere de mixaj dintr-un studio de înregistrare, recepționarea unui semnal incorect (comparativ cu originalul redat de difuzor) este un handicap major pentru ascultător.

Aceeași problemă afectează și sălile de înregistrare din studio, unde sursele sonore sunt vocile umane sau instrumentele muzicale, iar receptorii sunt microfoanele folosite la înregistrare. Reflexiile din pereții și obiectele apropiate sursei sau microfonului se vor suprapune peste semnalul direct, rezultatul fiind o captare alterată a semnalelor emise de surse.

Pentru încăperile mici, aceste probleme apar în intervalul spectral de la 30-40 Hz până pe la 200-250 Hz, interval în care modurile sunt destul de depărtate între ele pe axa frecvențelor, "gropile" în intensitatea sunetului pe care le determină fiind din această cauză percepute distinct. La frecvențe mai mari, zonele de minim și maxim devin foarte apropiate, efectele asupra sunetului devenind practic neglijabile. Fenomenul se agravează când două sau toate trei dimensiunile încăperii sunt foarte apropiate ca valoare, coincid sau sunt una multiplul celeilalte, caz în care mai multe moduri se suprapun, iar minimele și maximele corespunzătoare lor se accentuează, devenind și mai deranjante.

Un prim pas în reducerea acestor efecte îl reprezintă **determinarea unor dimensiuni optime ale încăperii** pentru care frecvențele de rezonanță rezultate să aibă o distribuție cât mai uniformă în spectrul de frecvență. Există formule matematice pe baza cărora se pot calcula raporturile optime dintre cele trei dimensiuni, fiind posibilă scalarea unei încăperi după necesități sau posibilități. Această măsură poate fi aplicată eficient doar în faza de proiectare și construcție a unei noi clădiri, încercarea de ajustare a dimensiunilor unei camere deja existente fiind în general destul de costisitoare, rezultatele nejustificând întotdeauna efortul.

O altă metodă de rezolvare a acestei probleme constă în alegerea poziției ascultătorului astfel încât să nu coincidă cu nici un minim sau maxim asociat vreunui mod important al încăperii, nici o frecvență din spectrul semnalului redat de sursă nefiind astfel modificată prea mult în amplitudine. Deasemenea, dacă sursa sonoră va fi amplasată în puncte cât mai apropiate de minimele unor moduri importante ale camerei, acele rezonanțe vor fi mai puțin amorsate, iar redarea frecvențelor corespunzătoare din programul sonor va fi aproape neafectată de undele staționare. Concluzionând, putem spune că următorul pas în rezolvarea problemelor modale îl constituie **alegerea celor mai bune poziții din încăpere** pentru difuzoare și ascultător (în camera de mixaj / audiție), respectiv pentru instrumentele acustice și microfoanele necesare captării lor (în sala de înregistrare). În cazul receptorilor sonori (a ascultătorului sau microfonului) aceste poziții trebuie să fie cât mai depărtate de zonele de presiune minimă sau maximă determinate de frecvențele de rezonanță ale încăperii, pentru a evita variațiile prea mari în intensitate a sunetului de la o frecvență la alta. În cazul surselor sonore (difuzoarele, instrumente muzicale acustice, vocea umană), pozițiile trebuie să fie cât mai apropiate de zonele de presiune minimă pentru a excita cât mai puțin frecvențele de rezonanță ale încăperii, reducând astfel distorsiunile acustice asociate. Deși există formule matematice și diagrame pentru determinarea

acestor puncte, alegerea lor este foarte dificilă datorită multiplelor frecvențe de rezonanță ce trebuie luate în calcul. În majoritatea cazurilor se ajunge la soluții de compromis, ce implică folosirea unor mijloace adiționale de atenuare a rezonanțelor la aceste frecvențe.

Al treilea și poate cel mai important pas în atenuarea efectelor undelor staționare asupra undelor sonore dintr-o încăpere constă în **creșterea absorbției pereților la frecvențele problematice**. Cu cât un perete va absorbi mai mult dintr-o undă, cu atât el va reflecta mai puțin din ea și procentajul în care unda reflectată se va însuma cu unda directă va fi mai mic, ceea ce va duce la reducerea nivelului maximelor și minimelor de presiune de-a lungul distanței dintre pereți și implicit la scăderea distorsiunilor acustice datorate undelor staționare din încăpere. Creșterea absorbției încăperii la frecvențele joase și mediu-joase (la care apar undele staționare deranjante) se poate obține prin aplicarea pe pereți și tavan a unor materiale ce au absorbție bună la aceste frecvențe. Problema care se ridică este că, după cum s-a văzut mai devreme, pentru ca un strat de material fonoabsorbant să absoarbă eficient undele sonore la o anumită frecvență, grosimea sa trebuie să fie de cel puțin o zecime din lungimea de undă a fasciculului sonor. Dar, pentru frecvențele din intervalul 20-200 Hz, asta ar însemna grosimi de peste un metru, ceea ce desigur nu reprezintă deloc o soluție practică, astfel că se folosesc în acest scop niște dispozitive mai speciale. Denumite în mod generic **trape pentru bași** (Eng=**bass traps**), aceste dispozitive se împart în două mari categorii:

- **dispozitive absorbante de bandă largă** (ce au o absorbție moderată dar într-o bandă de frecvențe destul de largă)
- **dispozitive rezonatoare** (ce au o eficiență mai mare, dar lucrează într-un spectru îngust, centrat în jurul unei frecvențe reglabile)

Dacă primele sunt destul de ușor de realizat și instalat, existând chiar și versiuni comerciale, fabricate de firme specializate, cele din urmă sunt mai greu de construit și mai ales de instalat corect, pentru că ele trebuie "acordate" la răspunsul încăperii și asta presupune efectuarea de măsurători acustice minuțioase, necesitând experiență în domeniu (o calibrare greșită a rezonatorului poate introduce probleme suplimentare în răspunsul acustic al încăperii, în loc să le repare pe cele existente). Pentru o funcționare cât mai eficientă, amplasarea trapelor pentru bași se face de regulă în locurile unde se acumulează cea mai multă energie de frecvență joasă, aceste locuri fiind colțurile și muchiile încăperilor. Se începe de obicei cu amplasarea unor absorbanți de bandă largă, pentru a atenua grosul rezonanțelor din încăpere, după care, în funcție de necesități și posibilități, se adaugă dispozitive rezonatoare calibrate individual pe frecvențele ce sunt încă problematice în răspunsul acustic.

Efectul "filtru pieptene"

Pe lângă rezonanțele proprii fiecărei încăperi, mai există o cauză foarte serioasă a alterării sunetelor dintr-o cameră : interferența dintre sunetul direct generat de o sursă sonoră și obiectele din vecinătatea ei. Acest efect depinde direct de poziția sursei și a receptorului față de pereții încăperii, spre deosebire de fenomenul undelor staționare care este propriu camerei și independent de sursa sonoră (doar inițiat de ea).

Orice sursă sonoră este caracterizată de o **directivitate**, adică de o anumită putere de radiație pentru fiecare direcție din spațiu, în funcție de frecvența unei sonore radiate. Pentru o sursă reală (neideală), de tipul unei boxe audio, cu cât unda are o frecvență mai înaltă, cu atât unghiul (mai bine zis conul) de radiație va fi mai îngust, concentrat în fața sursei, în restul direcțiilor puterea de radiație fiind tot mai scăzută din cauza blocării undelor de către corpul sursei. Cu cât frecvența lor este mai joasă, cu atât lungimea undelor devine mai mare și ele nu mai sunt blocate de corpul sursei, unghiul de radiație mărindu-se de jur împrejurul ei. În practică, de pe la 300-400 Hz în jos, sursele sonore pot fi caracterizate printr-o redare uniformă în toate direcțiile, ele fiind considerate **omnidirecționale**.

Din acest motiv, undele sonore de joasă frecvență emise într-o încăpere de sursa de sunet (**S**) reprezentată în desenul din **Fig.20** se vor propaga atât înainte, înspre receptorul (**R**), cât și în alte direcții, lovindu-se de pereți sau de alte obiecte din apropiere. Pentru fiecare poziție a sursei și a receptorului, va exista câte un punct pe un perete în care unda se va reflecta și (după un anumit decalaj de timp față de unda directă) va ajunge la receptor, combinându-se cu unda directă. Unda directă va parcurge distanța **Dd** până la receptor, iar unda reflectată în punctul **X** va parcurge o distanță totală **Dr** până la receptor. Diferența dintre distanțele parcurse de cele două unde până la receptor este **Dr-Dd**. Dacă această diferență este egală cu jumătate din lungimea de undă (sau un multiplu impar al jumătății), cele două oscilații sonore vor fi în antifază și prin suprapunere aproape că se vor anula (anularea nu este completă pentru că unda reflectată a pierdut din amplitudine pe traseu). Dacă diferența este un multiplu par al jumătății lungimii de undă, unda reflectată se va suprapune peste unda directă crescându-i amplitudinea.

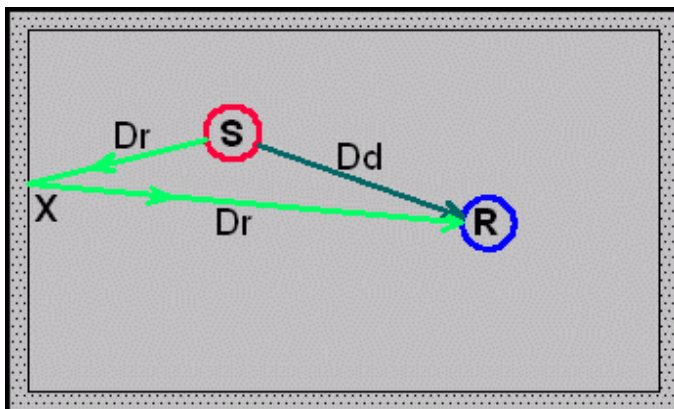


Fig.20

Când în loc de o undă sonoră simplă (sinusoidală), sursa va emite o undă complexă constând într-o sumă a mai multe unde simple de diferite frecvențe, fiecare dintre acestea se va comporta diferit în punctul receptorului. Unele se vor anula aproape complet, altele vor fi amplificate, iar restul vor avea valori variabile între cele două extreme, totul în funcție de raportul dintre diferența de traseu parcurs ($D_r - D_d$) și lungimea de undă proprie fiecărei componente. Cum lungimea de undă este invers proporțională cu frecvența unei oscilații, se poate deduce că suprapunerea unei complexe reflectate peste unda complexă directă va determina modificarea spectrală a undei directe, ca și cum aceasta ar fi fost trecută printr-un filtru având o succesiune regulată de minime și maxime ale amplificării în funcție de frecvență (**Fig.21**). Acest tip de filtru se mai numește și "**filtru pieptene**" (Eng=**comb filter**), datorită "dinților" din caracteristica sa de transfer, iar efectul pe care îl exercită asupra semnalului sonor se numește **filtrare de tip pieptene** (Eng=**comb filtering**).

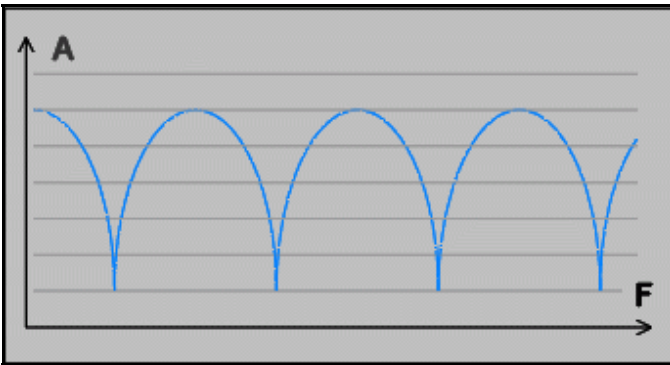


Fig.21

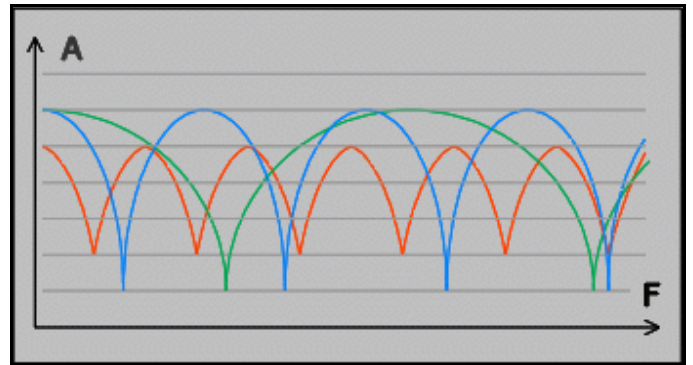


Fig.22

Prin calcul matematic se poate arăta că, cu cât decalajul temporal dintre cele două unde este mai mic, cu atât numărul de maxime și minime este mai mic, "gropile" și "dealurile" din caracteristica de transfer fiind mai depărtate și mai pronunțate (**Fig.22** curba verde), ceea ce va determina o distorsiune acustică mai pronunțată a semnalului original generat de sursă. Desemenea, ținând cont de faptul că amplitudinea unei unde sonore se micșorează tot mai mult pe măsură ce se depărtează de sursă, cu cât diferența ($D_r - D_d$) dintre distanța parcursă de unda reflectată și cea parcursă de unda directă este mai mare, cu atât unda reflectată va fi mai slabă decât unda directă în punctul de întâlnire și "dinții" pieptenului vor scădea (**Fig.22** curba roșie), astfel încât efectul de pieptene va fi mai puțin influent.

În exemplul de mai sus am luat în considerare doar reflexia dintr-un perete, dar într-o cameră normală, pentru fiecare poziție a sursei și a receptorului, există reflexii din toți pereții (incluzând tavanul și podeaua) care generează fiecare câte un asemenea filtru acustic (fiecare perete situându-se la o anumită distanță de sursă și receptor). Mai mult, exemplele discutate se referă doar la **reflexii primare** (sursă->perete->receptor), dar există altele care ajung la receptor după două sau mai multe reflectări în pereți, contribuind și ele într-o mai mică măsură la

alterarea semnalului original emis de sursă. Semnalul recepționat de receptor este din această cauză afectat de mult mai multe filtre, care însumate compun un filtru acustic cu o curbă de transfer foarte complexă. Într-o situație reală concretă, precum cea dintr-o cameră de audiție, acest fenomen se va traduce prin faptul că un program muzical redat de un difuzor va ajunge la urechile unui ascultător cu spectrul modificat din cauza reflexiilor din pereți sau a altor obiecte reflective din apropierea difuzorului (mobiliier, echipamente, etc). Aceeași problemă va afecta și situația dintr-o sală de înregistrare, în care semnalul captat de microfon se va înregistra cu spectrul modificat față de originalul emis de sursă (voce, instrument muzical, etc).

Înainte de orice încercare de găsi o rezolvare a problemei reflexiilor, trebuie scoasă în evidență o proprietate a urechii umane (descrișă de "**Efectul HAAS**") care face ca două sunete auzite la un interval mai mic de aprox. 15 ms să fie percepute ca unul singur, iar dacă intervalul este mai mare ele vor fi percepute distinct. În baza acestui efect psihoacustic, se poate considera că, dacă decalajul temporal dintre unda sonoră directă de la sursă și unda reflectată din perete sau alt obiect din jur, în poziția receptorului, este mai mare de 15-16ms, cele două unde vor fi percepute separat, dispărând astfel efectul filtrului pieptene asupra urechii. Ținându-se cont și de faptul că o diferență mare între amplitudinile undelor va reduce semnificativ denivelările din caracteristica filtrului pieptene, s-a stabilit următoarea regulă empirică :

Pentru minimizarea distorsiunilor acustice de tip filtru pieptene ale răspunsului acustic în poziția receptorului, orice undă reflectată a cărei întârziere față de unda directă este mai mică de 15ms trebuie să aibă nivelul mai mic cu cel puțin 10dB față de unda directă.

Un mod de a îndeplini această condiție este creșterea diferenței dintre distanțele parcurse de unda directă și de undele reflectate. Pentru asta, **sursa de sunet și receptorul trebuie așezate cât mai departe de pereți sau alte obstacole reflective**. Această distanțare se poate face doar între anumite limite, depinzând de factori precum așezarea mobilierului în cameră sau distribuția de minime și maxime de presiune sonoră datorate undelor staționare din încăperea.

Un alt mod constă în reducerea amplitudinii undelor reflectate și se poate realiza prin două metode : prin **fonoabsorbție** sau prin **difuzie sonoră**.

În prima metodă, punctele de reflexie problematice vor fi tratate cu **materiale fonoabsorbante**, ce vor absorbi o parte din energia undei care se reflectă în perete (în funcție de dimensiunile și de parametrii de absorbție fonică ai materialului), astfel că la receptor va ajunge doar o fracțiune din unda inițială, suprapunându-se într-o mai mică măsură cu unda directă. **Fig.23** ilustrează acest lucru, în punctul de reflexie de pe perete fiind amplasată o bucată de material fonoabsorbant (**Abs**), ce absoarbe o parte din energia undei reflectate.

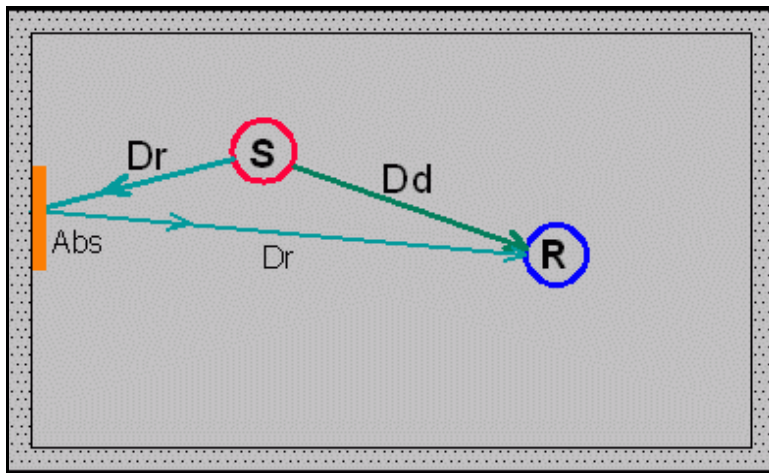


Fig.23

Există însă situații în care metoda absorbției nu este așa potrivită, de exemplu când o încăpere astfel tratată este prea "moartă" pentru aplicația ce se desfășoară în ea. În acest caz se folosește o altă metodă de reducere a nivelului reflexiilor, numită **difuzie** sonoră. Difuzia este un fenomen oarecum complementar absorbției, constând în spargerea frontului unei sonore în mai multe părți de intensitate mai mică și trimiterea acestora în direcții cât mai dispersate în spațiu. Dispozitivele acustice care realizează această operație se numesc **difuzeri** (Eng=**diffuser**) și sunt construite în diferite forme, de la simple panouri curbate, până la structuri alcătuite din fante cu adâncimi calculate după serii numerice, care provoacă dispersii foarte mari ale undelor reflectate, într-o bandă de frecvențe cât mai largă. Folosirea difuzerilor într-o încăpere (**Fig.24**) permite atenuarea reflexiilor deranjante fără a reduce prea tare timpul de reverberație al camerei, energia sonoră fiind distribuită omogen în încăpere și nu transformată în căldură prin absorbție.

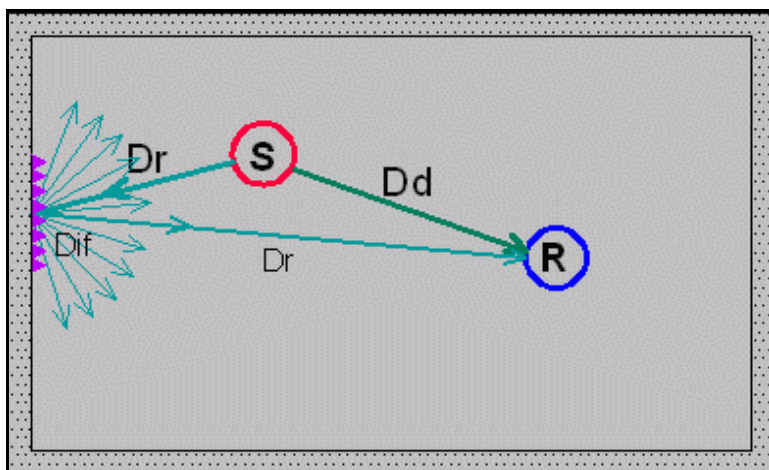


Fig.24

Pentru a obține un răspuns acustic cât mai echilibrat și mai potrivit unei anumite aplicații (studio de înregistrare, cameră de audiție, sală de conferințe, etc), toate cele trei fenomene acustice prezentate mai sus trebuie luate în considerație și atent analizate pentru fiecare situație în parte, în vederea luării celor mai adecvate măsuri de atingere a parametrilor acustici doriți.