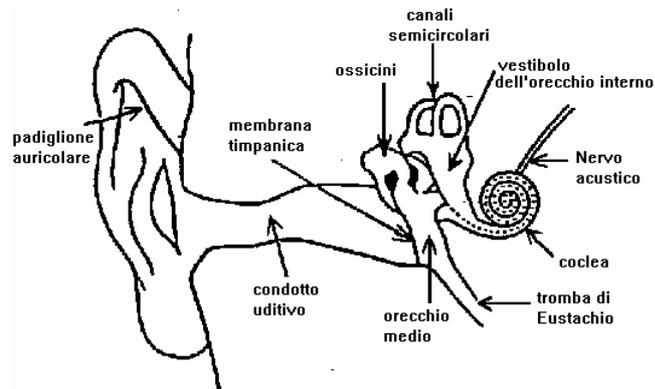


## CAPITOLO 11

# SENSAZIONE SONORA

### 11.1 La sensazione sonora e l'orecchio

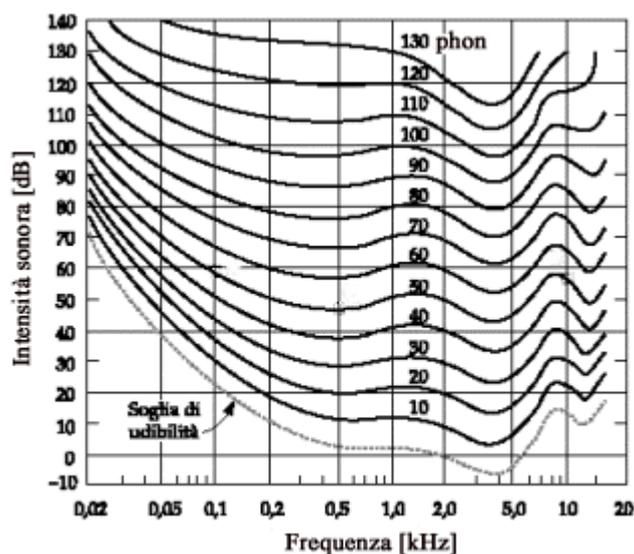
Come nel caso della luce visibile, anche la percezione sonora coinvolge sia aspetti fisici che aspetti psicofisici dipendenti dalla fisiologia dell'orecchio (vedi figura).



In riferimento alla figura, una perturbazione sonora attraverso il condotto uditivo perviene alla **membrana timpanica** (*orecchio esterno*). Questa membrana, in stato di leggera tensione, vibra trasmettendo le vibrazioni per via meccanica (catena di tre ossicini) ad una seconda membrana assai meno estesa, detta **finestra ovale**. In questa parte dell'orecchio (*orecchio medio*) vi è ancora aria. Al di là della finestra ovale (*orecchio interno*), vi è un tubo a spirale (coclea) pieno di liquido in cui vi sono **cellule sensibili** alle perturbazioni di pressione (cellule cigliate). Quando la finestra ovale vibra, il liquido eccita le cellule cigliate che provvedono a trasmettere lo stimolo nervoso al cervello. La percezione della frequenza (altezza) di un suono è legata al fatto che frequenze diverse eccitano differenti porzioni di cellule.

L'orecchio umano è capace di percepire suoni caratterizzati da frequenze comprese nell'intervallo 20-20000 [Hz]. L'orecchio, tuttavia, manifesta sensibilità diversa al variare della frequenza del suono. Per approfondire questo argomento si può effettuare la seguente esperienza. Ad un ascoltatore si fanno sentire, mediante due cuffie, alternativamente, un **tono puro** di 1000 [Hz] (*tono di riferimento*) con livello di intensità sonora prefissato, e un **tono puro** a frequenza diversa. L'ascoltatore dovrà regolare il livello di intensità di questo secondo tono fino a quando non giudicherà equivalenti tra loro le sensazioni

provate e, cioè, stimerà i due suoni **ugualmente intensi**. A variare poi della frequenza del secondo tono si può costruire la curva di *isosensazione*, (con il suono di riferimento), o isofonica. L'unità di misura della sensazione sonora è detta *phon* e coincide (numericamente) con il **livello fisico di pressione sonora a 1000 [Hz]**, che provoca la stessa sensazione del suono in esame. Se il suono di riferimento è, ad esempio, caratterizzato da un livello fisico di pressione sonora di **20 [dB]** a 1000 [Hz] i livelli di intensità sonora dei suoni (puri) che alle diverse frequenze producono la stessa sensazione di intensità soggettiva (20 [phon]) individuano l'isofonica 20 [phon] come rappresentato in figura.



In figura è riportato il **diagramma di Fletcher e Munson** (suoni puri) che sintetizza i risultati d'esperienze compiute su un numero considerevole d'ascoltatori. È opportuno precisare che la sensazione prodotta da un suono non è direttamente proporzionale al livello numerico dei relativi **phon**, ad esempio, un livello d'intensità soggettiva pari a **60 [phon]** non è giudicato **doppio** di uno di **30 [phon]**. In generale sopra i **40 [phon]**, per raddoppiare la sensazione soggettiva provata occorre passare su un'isofonica **10 [phon]** più elevata.

Per effettuare valutazioni quantitative è stata introdotta una scala delle intensità soggettive *S* *proporzionale al giudizio soggettivo*, espressa in unità dette **son**. Il valore in **son** di un suono è valutato in relazione al numero di phon **L** del suono in base alla seguente relazione:

$$S = 2^{[L(\text{phon}) - 40] / 10} \quad [\text{son}]$$

Come si può osservare, la relazione prevede  $S = 1$  in corrispondenza di  $L = 40$  [phon] e si ha  $S = 2$  (e cioè un raddoppio) per  $L = 50$  [phon].

Sulla base dell'audiogramma normale si può, quindi, attribuire un livello di sensazione sonora ad un tono puro. Nella realtà ci si trova, tuttavia, comunemente a dover valutare suoni complessi (ove sono presenti più frequenze) e rumori. In questi casi il problema di una valutazione del livello di sensazione acustica si complica notevolmente, anche in conseguenza di fenomeni di mascheramento di alcuni suoni da parte di altri a diversa frequenza.

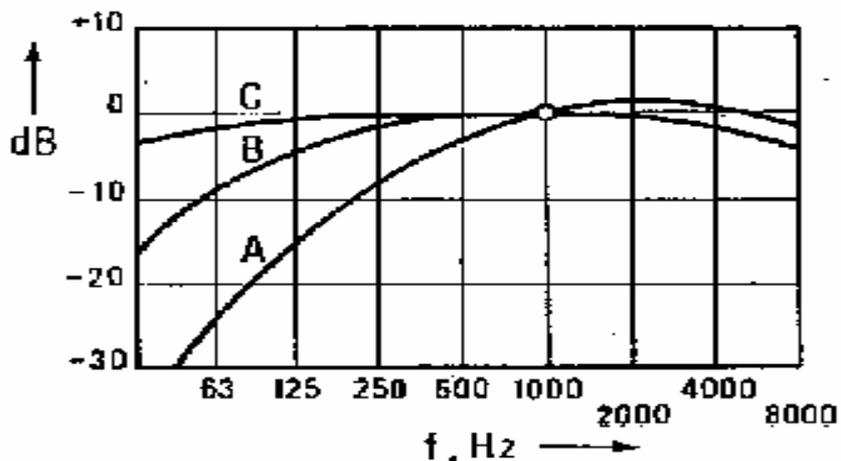
## 11.2 Valutazione dei suoni complessi

Al fine di valutare la sensazione complessivamente derivante dalla percezione di un suono complesso o di un rumore, si può procedere, in linea di principio, in due modi:

- la *prima metodologia*, che spesso non conduce a risultati univoci, viene impiegata per la valutazione dell'**intensità soggettiva** (in **son**) impiegando un'analisi dello spettro del rumore in banda di ottava o di terzo di ottava;
- una *seconda metodologia*, di ben più ampio impiego, fa riferimento ad uno strumento di rilevazione dei rumori che in qualche modo simuli la risposta dell'orecchio umano.

Il secondo approccio prevede l'uso di un **fonometro**, e cioè di un apparecchio di misura in cui il segnale acustico misurato dallo strumento subisca un'opportuna correzione atta a simulare il più possibile il comportamento dell'orecchio umano: in altre parole, per le frequenze ove la sensibilità è maggiore, i valori saranno assoggettati ad una correzione positiva; mentre per le frequenze ove la sensibilità dell'orecchio umano è minore, la correzione sarà negativa. Questa operazione di correzione (pesatura) è attuata mediante particolari filtri dall'elettronica dello strumento.

In figura sono riportate tre modalità diverse di pesatura indicate con **A**, **B**, **C**, che simulano la risposta dell'orecchio umano in corrispondenza a tre diversi livelli di sensazione sonora e cioè in corrispondenza a valori nell'intorno rispettivamente di **40**, **60**, **80** [phon] (vedi audiogramma normale).



Per ragioni di semplicità nella pratica odierna si utilizza solo la scala **A**. Il risultato della misura di un rumore e cioè il livello complessivo di pressione sonora, pesato con la curva **A** è indicato in **dB(A)**. Tale valore fornisce un'indicazione **approssimativa** della sensazione acustica. Nella seguente tabella è riportato lo spettro in banda di ottava di alcuni comuni rumori con il corrispondente livello in **dB(A)**.

Sorgente	Frequenza centrale di banda $f_c$ [Hz]								Livello sonoro [dB(A)]
	63	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k	
Autocarro a 5 m	89	86	81	77	73	70	67	64	80
Aspirapolvere a 1 m	48	66	69	73	79	73	73	72	82
Decollo Jet a 3 km	90	95	100	98	95	88	80	75	99
Conversazione a 1 m	-	60	75	78	75	65	55	38	78

Inoltre poiché quasi mai si hanno rumori di natura stazionaria nel tempo si è stabilito di riferirsi, in questi casi, al **livello equivalente** e cioè al livello sonoro che, nell'**intervallo di misura T**, corrisponde all'intensità acustica media del rumore.

Ad esempio, il livello continuo equivalente fisico relativo all'intervallo temporale d'osservazione **T** è espresso da:

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \left[ \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{p^2(\tau)}{p_{rif}^2} \cdot d\tau \right]$$

Ovviamente, è possibile considerare anche  $L_{Aeq}$  e, cioè, un livello equivalente in scala **A** e scrivere:

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log \left[ \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{p_A^2(\tau)}{p_{rif}^2} \cdot d\tau \right]$$

### 11.3 Criteri di tollerabilità del rumore

È ormai da tempo accertato che gli effetti dannosi del rumore sull'uomo rappresentano un problema assai sentito dalla società sia per i risvolti sociali ed economici che per la crescente diffusione del fenomeno. Gli effetti prodotti dal rumore sull'organismo umano sono molteplici e diversi in relazione alle caratteristiche del fenomeno sonoro, ai tempi e alle modalità d'esposizione ed anche alla risposta soggettiva degli individui interessati. Una graduazione degli effetti porta a riconoscere diversi livelli classificabili come:

- **fastidio o annoyance**, allorché si avverte una sensazione generica di disagio prodotta dall'intrusione del rumore;
- **disturbo uditivo**, quando si riscontra un'obiettiva alterazione delle condizioni psicofisiche;
- **danno uditivo**, quando si verifica una alterazione, totalmente o parzialmente permanente, che può essere accertata da un punto di vista clinico.

In generale, non è possibile parlare d'assuefazione al rumore poiché l'esposizione prolungata produce effetti d'accumulazione che determinano danni crescenti nel tempo. La presunta assuefazione è indice dell'avvenuta riduzione delle capacità uditive e quindi una minore sensibilità agli stimoli dannosi del rumore. Non è possibile stabilire univocamente né un procedimento di rilevazione della causa del disturbo (rumore e sue caratteristiche) e neppure una metodologia di indagine atta a riscontrare il danno prodotto sull'uomo. Non vi è dubbio, tuttavia, che gli elementi che hanno maggiore incidenza sul disturbo acustico siano il livello di pressione sonora e il tempo di esposizione.

Al fine di introdurre criteri per valutare la tollerabilità o meno dei rumori, occorrerà anche tener conto della durata del rumore, del suo andamento temporale, continuo, intermittente, a carattere impulsivo (ad esempio martellamento) ed inoltre anche del rumore di fondo dovuto ad altre sorgenti acustiche. Il problema di specificare opportuni criteri di tollerabilità assume grande importanza sul piano legislativo e legale.

I criteri di tollerabilità utilizzati nella pratica fanno riferimento alla:

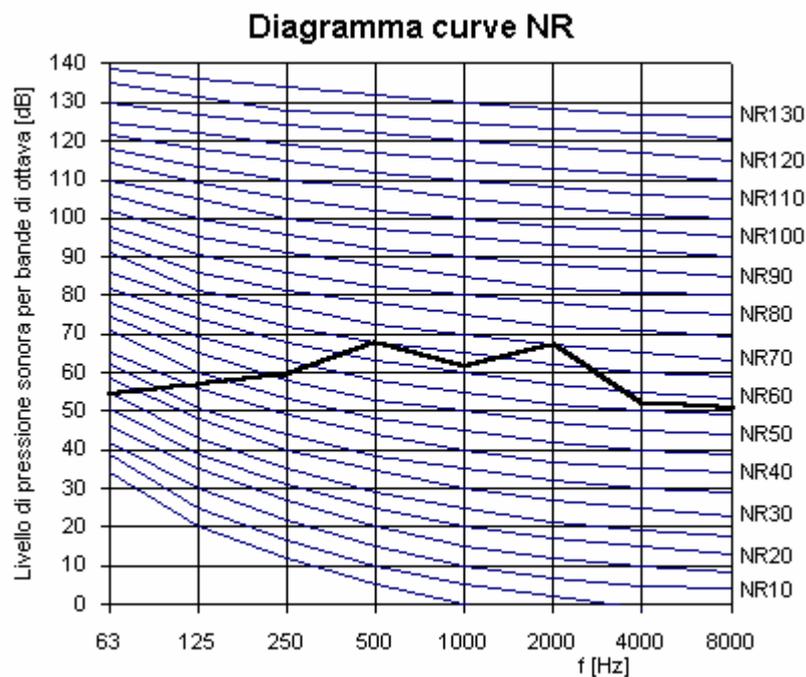
- ✓ misura del rumore come livello equivalente in dB(A) fornita dal fonometro;
- ✓ attribuzione di un indice al rumore che può essere immediatamente desunto dalla forma del suo spettro sonoro.

Nel primo caso si fa riferimento essenzialmente alla pesatura attuata dalla scala fonometrica dello strumento; nel secondo caso, invece, oltre ad attribuire un indice

numerico **NR** (Noise Rating) ad un particolare spettro si può anche evidenziare in quali bande di frequenza un eventuale intervento di correzione acustica sia più conveniente.

Come si può osservare dal diagramma, ad ogni curva, simile a quella dell'audiogramma normale, è assegnato un indice. Le modalità di utilizzazione di questi diagrammi prevedono di riportare lo spettro sonoro del rumore in esame sul diagramma stesso. Al rumore si attribuisce un indice pari a quello caratterizzante la curva di riferimento NR sovrastante lo spettro misurato.

A titolo di esempio, nella figura si è tracciato lo spettro di un rumore misurato in banda d'ottava; l'indice **NR** che lo individua è **NR = 70** come si può osservare dalla figura.



È importante notare come l'indice **NR** del disturbo potrebbe essere notevolmente ridotto se fosse possibile intervenire con interventi tecnici sui singoli livelli sonori della banda 2000 [Hz] e 500 [Hz].

Nella tabella seguente sono riportati valori accettabili per l'indice di valutazione **NR** e del livello sonoro in **scala A** nel caso di tipiche destinazioni d'uso. Indicazioni di questo tipo potranno, ad esempio, essere richieste in un capitolato d'appalto.

<b>Destinazione</b>	<b>Indice NR</b>	<b>Livello sonoro [dB(A)]</b>
Sale per concerti, teatri	NR 25	25-30
Appartamenti, scuole, ospedali	NR 30	30-40
Sale per conferenze	NR 35	30-35
Soggiorno	NR 40	35-40
Uffici, ristoranti	NR 50	40-45
Officine, laboratori	NR 60	35-40

#### **11.4 Cenni sulla normativa per il rumore nelle aree urbane**

La **legge n° 447** del 1995 “*Legge quadro sull'inquinamento acustico*” ha definito gli indirizzi generali entro i quali la Stato e Regioni devono emanare tutta una serie di decreti attuativi in tema d'inquinamento acustico nell'ambiente esterno e nell'ambiente abitativo. Gli argomenti affrontati nei decreti spaziano dai **valori limite d'immissione nell'ambiente esterno complessivi e da singole sorgenti, valori limiti d'attenzione e qualità, tecniche di rilevamento dell'inquinamento acustico** e anche prescrizioni al riguardo dei **requisiti acustici passivi degli edifici**.

Si può accennare ai i livelli massimi per **immissione sonora nell'ambiente esterno e negli ambienti abitativi**. Al riguardo dell'ambiente esterno il territorio comunale deve essere preventivamente suddiviso in **6 zone** riconoscibili dalla classe di destinazione d'uso che ad ognuna compete. Tale atto “**zonizzazione acustica**” è un atto **tecnico-politico di governo** del territorio poiché ne disciplina l'uso e ne vincola le modalità di sviluppo. A ciascuna zona sono, quindi, attribuiti **i limiti massimi di immissione sonora** da parte di tutte le sorgenti presenti espressi in termini del livello equivalente **L<sub>Aeq</sub>** limite diurno e notturno.

La tabella che segue riporta le zone e i limiti fissati.

**Limiti massimi  $L_{Aeq}$  [dB(A)]**

<b>Classi di destinazione d'uso del territorio</b>		<b><math>L_{Aeq}</math> Tempo diurno</b>	<b><math>L_{Aeq}</math> Tempo notturno</b>
<b>I</b>	<b>Aree particolarmente protette</b>	<b>50</b>	<b>40</b>
<b>II</b>	<b>Aree prevalentemente residenziali</b>	<b>55</b>	<b>45</b>
<b>III</b>	<b>Aree di tipo misto</b>	<b>60</b>	<b>50</b>
<b>IV</b>	<b>Aree di intensa attività umana</b>	<b>65</b>	<b>55</b>
<b>V</b>	<b>Aree prevalentemente industriali</b>	<b>70</b>	<b>60</b>
<b>VI</b>	<b>Aree esclusivamente industriali</b>	<b>70</b>	<b>70</b>

Per quanto riguarda, invece, la valutazione del disturbo, causato da immissione sonore **negli ambienti abitativi**, la normativa prevede il riferimento ad un **criterio differenziale** inteso come differenza tra il livello di rumore ambientale e il livello di rumore residuo. Il **livello di rumore ambientale** è il livello equivalente che si misura con la sorgente disturbante in funzione durante un intervallo di tempo T, mentre il **livello di rumore residuo** corrisponde al livello sonoro equivalente che si misura durante un intervallo di tempo T in assenza della sorgente o sorgenti disturbanti.

Le differenze da non superare tra i citati livelli sono rispettivamente pari a **+ 5 dB(A)** per il periodo diurno e **+ 3 dB(A)** per quello notturno.

## 11.5 Cenni sulla propagazione del suono in assenza e in presenza di ostacoli.

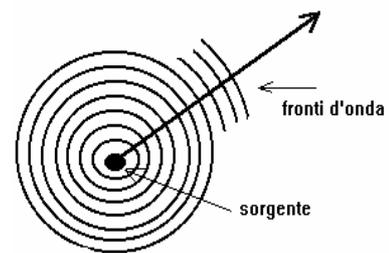
Aspetti importanti in campo urbanistico, ad esempio, per valutare il livello di pressione sonora prodotto da sorgenti presenti all'interno di una zona residenziale (industrie, linee ferroviarie, autostrade ecc.).

### 11.5.1 Propagazione in campo libero

In figura è rappresentata una **sorgente sonora puntiforme isotropa** che, pertanto, emette onde sonore secondo superfici sferiche.

Si noti che un elemento del fronte d'onda, a sufficiente distanza dalla sorgente (in assenza d'ostacoli), può essere considerato come un'onda piana che si muova in

linea retta, la cui propagazione può essere rappresentata graficamente mediante raggi sonori normali ai fronti d'onda stessi, come rappresentato nella precedente figura.



### 11.5.2 Propagazione del suono in presenza di ostacoli

Quando un'onda sonora interagisce con ostacoli si verificano alcuni importanti fenomeni dipendenti dalla lunghezza d'onda del suono e dalle dimensioni dell'ostacolo:

- diffrazione;
- riflessione;
- rifrazione.

#### ● **Diffrazione**

Si supponga di considerare inizialmente onde marine anziché sonore. Si consideri, da punto di vista qualitativo, la situazione rappresentata nelle figure a) e b) e cioè la diga di un porto investita da onde di un mare in tempesta. Se nella diga è presente un'apertura di ampiezza  $d$ , il comportamento, oltre la diga, delle onde (lunghezza d'onda  $\lambda$ ) risulta notevolmente diverso in relazione al rapporto  $d/\lambda$ . Quando il rapporto  $d/\lambda$  è numericamente grande (e cioè l'apertura  $d$  è grande rispetto alla lunghezza d'onda  $\lambda$ ) la situazione si presenta come rappresentato in figura a, mentre nel caso opposto come rappresentato nella figura b.

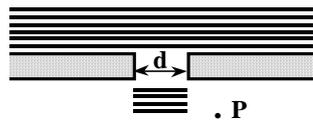


Figura a

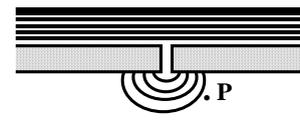
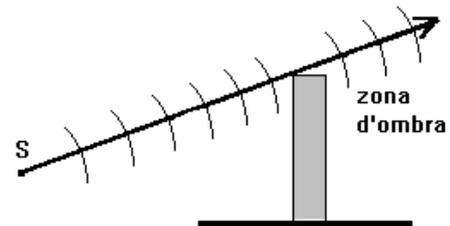


Figura b

Nel **primo caso** ( $d \gg \lambda$ ) la propagazione delle onde oltre l'apertura può essere descritta geometricamente in modo molto semplice mediante raggi vettori. In particolare, la diga proietta "un'ombra" pressoché netta come rappresentato nella figura (a), per cui nel punto **P** le acque possono essere considerate calme.

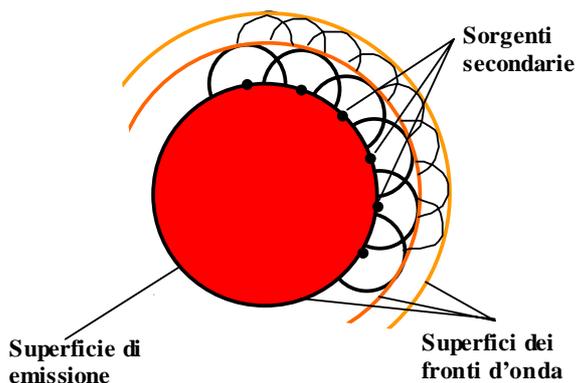
Nel **secondo caso** ( $d \cong \lambda$ ), quando cioè le dimensioni dell'apertura sono paragonabili alla lunghezza d'onda delle onde incidenti, l'apertura stessa diventa un insieme di punti origine di onde sferiche secondarie. Pertanto, non si forma più una significativa "ombra" di calma esercitata dalla diga: le perturbazioni ondose aggirano l'ostacolo.

Questi fenomeni di diffrazione sono comuni a tutti i tipi di onde e, pertanto, si verificano anche nel caso delle onde sonore. Nella situazione rappresentata in figura (che si riferisce al caso in cui la lunghezza d'onda  $\lambda$  di un'onda sonora sia molto più piccolo delle dimensioni dell'ostacolo) la propagazione delle onde sonore viene ad essere nettamente delimitata con formazione della zona d'ombra ove il suono non è percepibile.



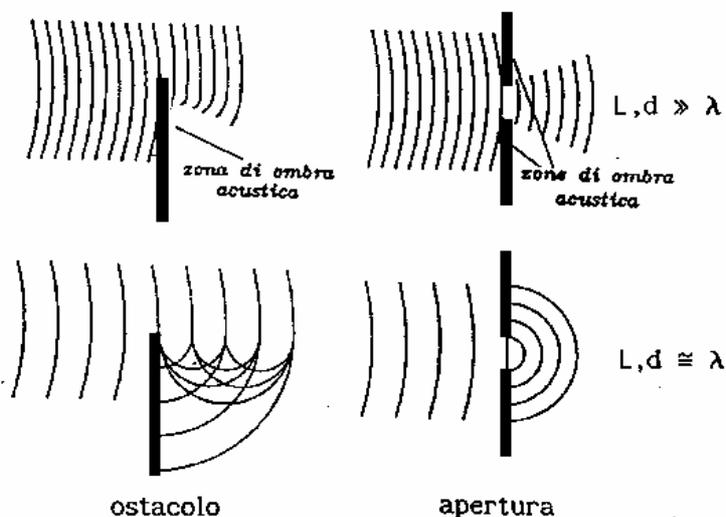
In genere, almeno per i suoni che rientrano nel campo medio-basso delle frequenze udibili, quando cioè le lunghezze d'onda risultano paragonabili alle dimensioni geometriche dell'ostacolo, la zona d'ombra risulta molto meno definita rispetto al caso rappresentato in figura, proprio in conseguenza del fenomeno della diffrazione.

Quando la diffrazione condiziona la propagazione delle onde acustiche in modo apprezzabile, lo studio della propagazione non può più essere condotto tracciando linee e segmenti (approccio tipico **dell'acustica geometrica**) anche se può essere ancora svolto mediante un procedimento grafico (**principio di Huygens**). In particolare, ogni punto della zona interessata alla propagazione delle onde può essere considerato una sorgente puntiforme secondaria emettente fronti d'onda sferici.

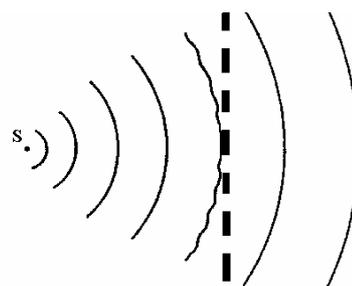


L'involuppo di questi formerà il fronte d'onda complessivo, ciascun punto del quale a sua volta può essere ancora considerato una sorgente puntiforme; un esempio di questo tipo di costruzione è rappresentato in figura a lato.

Applicando questo tipo di procedimento ad un ostacolo su cui incidano onde sonore, si potranno ottenere, a seconda della lunghezza d'onda delle onde sonore, in relazione alle dimensioni dell'ostacolo (ove, ad esempio,  $L$  rappresenta l'altezza di un muro e  $d$  l'ampiezza di un'apertura nel muro stesso), comportamenti diversi, come illustrato in figura.

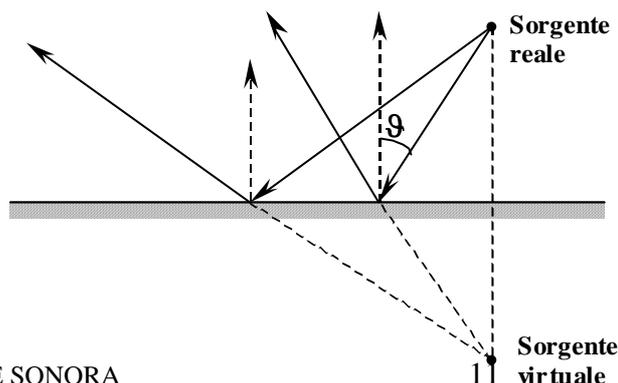


Se poi, infine, un'onda sonora interagisce con ostacoli le cui dimensioni fisiche siano decisamente inferiori alla lunghezza d'onda, l'ostacolo può essere considerato trasparente, in altre parole è come se non esistesse.



**Riflessione**

Se le dimensioni dell'ostacolo sono grandi rispetto alla lunghezza d'onda dell'onda sonora e le irregolarità presenti sulla superficie sono molto

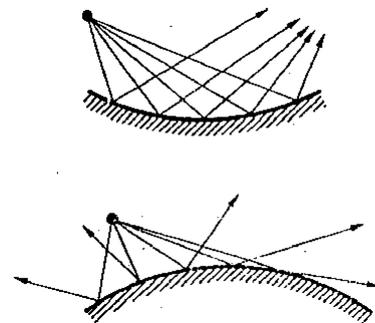


piccole sempre rispetto alla lunghezza d'onda, e cioè la superficie stessa appare "liscia", le leggi che descrivono la riflessione delle onde sonore sono simili a quelle già note che regolano la riflessione delle onde elettromagnetiche e luminose.

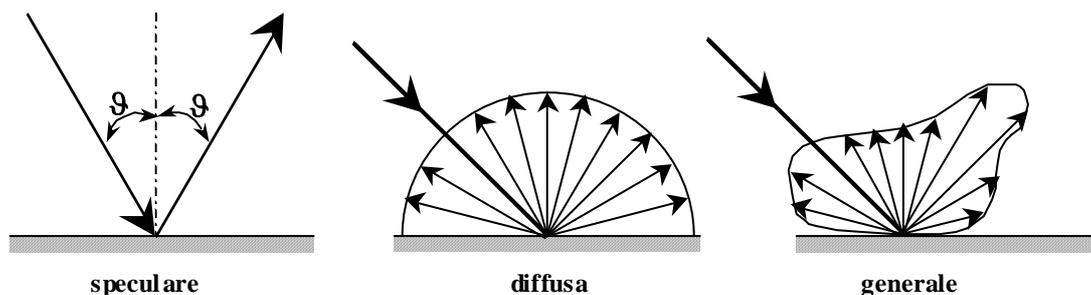
In particolare, come rappresentato in figura, sempre mediante la schematizzazione dei raggi sonori, il raggio riflesso forma lo stesso angolo  $\theta$  con la normale alla superficie del raggio incidente e i due raggi giacciono sullo stesso piano.

Si parla, quindi, di riflessione speculare o regolare. Si osservi come l'onda riflessa si propaghi come se fosse emessa da una sorgente virtuale simmetrica rispetto alla sorgente riflettente. In questi casi, in cui  $\lambda$  è molto minore delle dimensioni lineari dell'ostacolo, si possono studiare i fenomeni di propagazione mediante i semplici metodi grafici dell'acustica geometrica).

È interessante considerare il caso di una riflessione regolare su superfici lisce rispettivamente concave o convesse. Si osservi come, nel primo caso, si verifichi una concentrazione dei fronti d'onda, mentre nel secondo caso si abbia una loro dispersione su un'area più ampia.



Se la superficie non è sufficientemente liscia (sempre relativamente alla lunghezza d'onda delle onde sonore incidenti), la riflessione non è più di tipo regolare, bensì diffusa, come nell'esempio schematizzato in figura.



Nei riguardi della riflessione è ancora opportuno ricordare che il comportamento delle superfici reali risulta sempre intermedio tra le due situazioni limite già note e cioè tra la riflessione speculare su una superficie liscia e la riflessione perfettamente diffusa, qualora la superficie risulti opportunamente "rugosa". Si precisa che ovviamente i termini "liscia" e "rugosa" vanno intesi in senso relativo e cioè in relazione alla lunghezza d'onda delle onde sonore.

## ● Rifrazione

Un'onda sonora, rappresentata mediante un raggio sonoro, in conseguenza del passaggio tra un mezzo ed un altro, subisce anche un fenomeno di rifrazione, intendendo per questo una deviazione dei raggi sonori stessi, come rappresentato in figura.

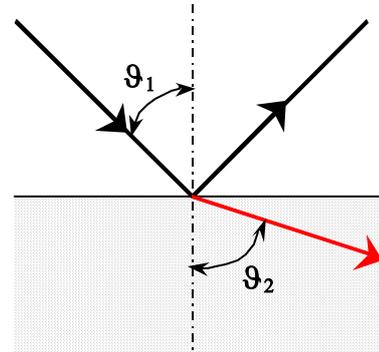
La rifrazione sonora segue una legge analoga a quella dell'ottica geometrica, ovvero:

$$\frac{\text{sen}\vartheta_1}{\text{sen}\vartheta_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

ove:

$c_1, c_2$  rappresentano le velocità del suono nei due mezzi.

Fenomeni di rifrazione possono verificarsi nel passaggio tra due strati d'aria a diversa temperatura.



## ESERCIZI ED ESEMPI

- 1) Si vuole ottenere il complessivo livello di pressione sonora  $L_p(A)$  ( in scala **A** ) di un rumore a partire dai seguenti livelli di pressione sonora fisica  $L_{pi}$  misurati in banda d'ottava. Si consideri lo spettro di rumore riportato nella seguente tabella:

$f_c$ [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
$L_{pi}$ [dB]	76	65	59	57	53	47

Applicando in ogni ottava la riduzione di livello prevista dalla curva **A** si ottiene:

$f_c$ [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
$L_{pi}(A)$ [dB]	60	56.4	55.8	57	54.2	48

A questo punto si possono comporre i livelli sonori corretti  $L_{pi}(A)$  delle varie bande per ottenere il livello globale complessivo in scala **A**. In base alla definizione di livello sonoro e cioè

$$L_p = 10 \text{ Log } \frac{p^2}{p_{rif}^2}$$

per ogni banda **i** si ottengono i singoli valori  $p_i^2(A)$ :

$$p_i^2(A) = p_{rif}^2 \cdot 10^{L_{pi}(A)/10}$$

Poiché complessivamente si ha:

$$p^2(A) = \sum p_i^2(A)$$

risulta:

$$L_p \text{ [dB(A)]} = 10 \text{ Log } \frac{p^2(A)}{p_{rif}^2} = 10 \text{ Log } \frac{\sum p_i^2(A)}{p_{rif}^2} = 10 \text{ Log } \left( \sum 10^{\frac{L_{pi}(A)}{10}} \right) = 64 \text{ [dB(A)]}.$$

**N.B.** Oltre ai livelli  $L_{pi}$  sul fonometro si possono leggere direttamente i livelli corretti  $L_p(A)$ .