

# 3.

## **INQUINAMENTO ACUSTICO DOVUTO AL TRAFFICO STRADALE**

### **3.1. INTRODUZIONE**

Il suono è una perturbazione fisica, prodotta da una sorgente sonora, che, propagandosi in un mezzo elastico (gassoso, liquido o solido), provoca una variazione di pressione atta a essere rilevata dall'orecchio umano o da uno strumento acustico. Il rumore può essere definito, invece, come un suono non desiderato o meglio un suono che, nel campo delle frequenze udibili, disturba la quiete o la percezione dei segnali desiderati, provoca fastidio o danno alla salute. Dal punto di vista fisico entrambi i fenomeni hanno caratteristiche del tutto simili, al punto che un suono, gradevole per alcuni, può essere percepito come rumore da altri; possiamo, perciò, affermare che al momento della percezione un suono diventa rumore se causa nell'ascoltatore effetti indesiderati.

La distinzione tra suoni e rumori, per quanto detto, non è ben definita, infatti ambedue possono essere descritti come dei fenomeni periodici complessi dati dalla somma di diversi fenomeni periodici semplici, ognuno dei quali è caratterizzato da una determinata frequenza di oscillazione.

Il fenomeno ondulatorio fa sì che le varie particelle del mezzo in cui il suono si trasmette, che solitamente è l'aria, vibrino localmente propagando la perturbazione alle particelle vicine attraverso delle compressioni e rarefazioni dello strato d'aria adiacente la singola particella. Mentre la successione delle fasi di compressione e rarefazione dello strato d'aria si propaga verso l'esterno, costituendo il moto d'onda, le singole particelle mantengono all'incirca la loro posizione originale.

### **3.2. PROPRIETÀ DEL SUONO**

Nella descrizione del fenomeno sonoro occorre considerare alcune proprietà fisiche caratteristiche delle onde, quali la frequenza, la lunghezza d'onda, la pressione, l'intensità acustica, importanti ai fini della caratterizzazione del suono stesso e della sensazione uditiva. Perché un suono venga percepito, infatti, non è sufficiente che sia costituito da frequenze comprese nel campo di udibilità, esso deve anche possedere una sufficiente pressione sonora. Analizziamo più in dettaglio le principali proprietà.

La *frequenza*  $f$  di un'onda sonora è definita come il numero di oscillazioni nell'unità di tempo e si misura in hertz (Hz). Essa caratterizza la tonalità di un suono (basse frequenze tipiche dei suoni gravi, alte frequenze tipiche dei suoni acuti). Il campo di frequenze che interessano la percezione uditiva dell'orecchio umano va da 16/20 a 16000/20000 Hz. Al di sopra dei 20000 Hz si estende la banda degli ultrasuoni, al di sotto dei 16 Hz quella degli infrasuoni.

Il *periodo*  $T$  è l'inverso della frequenza, si misura in secondi e rappresenta il tempo necessario affinché le particelle compiano un'oscillazione completa.

La *lunghezza d'onda* è la distanza percorsa dall'onda sonora durante un'oscillazione completa, si indica con  $\lambda$  e si misura in metri; è legata alle altre

proprietà delle onde dalla relazione:  $\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T$

dove  $f$  è la frequenza in hertz,  $c$  rappresenta la velocità di propagazione delle onde sonore o velocità del suono, funzione del modulo elastico del mezzo in cui le onde si trasmettono e della sua densità (nell'aria, alla temperatura di 20 °C,  $c \approx 344$  m/s).

Per *pressione sonora* si intende la variazione di pressione prodotta dal fenomeno acustico rispetto al valore statico. Essa si può caratterizzare considerandone il valore RMS (ampiezza quadratica media) o valore efficace, che è la radice quadrata dei quadrati degli spostamenti mediati in un periodo, secondo la seguente relazione:

$$p_{(RMS)} = \sqrt{\frac{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + \dots + p_N^2}{N}}$$

Per un'onda sinusoidale il valore efficace è pari a 0.707 volte il valore

massimo, ovvero:  $p_{\text{eff}} = \frac{p_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$

L'entità della sensazione uditiva dipende, oltre che dalla frequenza e dalla pressione, dall'intensità del suono, definita come la quantità di energia che attraversa nell'unità di tempo l'unità di superficie disposta normalmente alla direzione di propagazione dell'onda incidente.

Nello studio del controllo del rumore i valori della pressione sonora variano su range piuttosto ampi, per cui è sorta la necessità di esprimere queste grandezze in scala logaritmica, considerando non il valore della grandezza in assoluto, ma il suo livello rispetto ad un valore di riferimento, in accordo, peraltro, con svariate esperienze che hanno messo in evidenza come la sensazione uditiva sia proporzionale al logaritmo dell'intensità dello stimolo acustico impattante.

Il livello, per definizione, è il logaritmo del rapporto tra una data quantità e una quantità di riferimento della stessa specie. In pratica si assume come livello di una grandezza acustica il valore che si ottiene moltiplicando per 10 il logaritmo in base 10 del rapporto tra il valore della grandezza presa in considerazione e un valore di riferimento; così facendo le grandezze acustiche possono essere espresse da livelli in decibel (dB) al di sopra o al di sotto del livello di riferimento.

Il livello di potenza sonora  $L_w$  di una sorgente può essere espresso come livello in decibel attraverso la relazione:  $L_w = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{W_0} \right)$  dB, dove  $W$  è la potenza sonora della sorgente in watt e  $W_0$  è la potenza di riferimento pari a  $10^{-12}$  W.

Il livello di pressione sonora  $L_p$  in decibel, corrispondente ad una certa pressione  $p$ , è definito dalla relazione:  $L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{p_0} \right)$  dB,

dove  $p$  è la pressione efficace,  $p_0$  la pressione sonora di riferimento, pari a  $20 \mu\text{Pa}$  (soglia di udibilità a 1000 Hz) qualora il mezzo di propagazione sia l'aria. Si può, quindi, affermare:

$$L_p = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{20} \right) \text{ dB}$$

Una pressione sonora, ad esempio, di  $20 \mu\text{Pa}$  corrisponde a un livello di pressione sonora di 0 dB, una di  $40 \mu\text{Pa}$  a un livello di 6 dB, una di  $200 \mu\text{Pa}$  a un livello di 20 dB. Raddoppiando, quindi, un qualsiasi valore di pressione sonora si ottiene un aumento nel livello di pressione sonora di 6 dB, moltiplicando per 10 un qualunque valore di pressione sonora si ottiene un incremento nel livello di 20 dB.

### 3.2.1. *Somma del livello sonoro di due o più fonti di rumore*

Il livello sonoro derivante da due o più fonti di rumore non è costituito dalla somma algebrica dei singoli livelli sonori di ogni fonte presa isolatamente. Risulta evidente, d'altra parte, come l'insieme di  $n$  fonti di pari livello individuale non possa essere identico, dal punto di vista acustico, a quello di una sola sorgente.

Considerando, per semplicità, il caso di due sole sorgenti, si tratta di aggiungere un fattore correttivo  $D$  (dB) al livello sonoro più alto delle due sorgenti prese separatamente. Tale coefficiente correttivo dipende dalla differenza dei livelli sonori delle due fonti, come esplicitato dal diagramma in figura 3.1, che riporta il termine  $D$  in funzione, appunto, della differenza tra i due livelli.

Si può facilmente notare che più la differenza è elevata, minore è il valore del coefficiente correttivo  $D$  ovvero, al crescere di tale differenza, il livello complessivo si avvicina sempre più al livello del suono più forte.

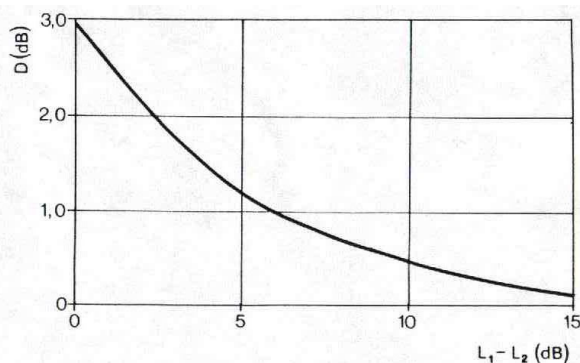


Figura 3.1 – Diagramma per la composizione di due livelli sonori  $L_1$  ed  $L_2$ .

Il livello sonoro globale relativo alle due sorgenti di rumore  $L_{1+2}$  si ottiene sommando il fattore  $D$  al livello della fonte più rumorosa:  $L_{1+2} = L_1 + D$ , con  $L_1 > L_2$ . Qualora sia da calcolare il livello risultante da  $n$  fonti di rumore, si può procedere a gradini, effettuando prima la composizione di due suoni, quindi quella del suono composto con uno dei rimanenti, e così via; basta, cioè, ripetere  $n$  volte il procedimento descritto.

### 3.3. LA PERCEZIONE DEI SUONI E DEI RUMORI

Nell'ambito delle grandezze sonore, oltre ai parametri oggettivi, cioè misurabili fisicamente con uno strumento, occorre mettere in conto le grandezze di tipo soggettivo, cioè legate ai meccanismi fisiologici della percezione uditiva. In particolare interessa valutare, a partire dal livello sonoro oggettivo, il livello soggettivo corrispondente (loudness). Quando si considerano grandezze di tipo soggettivo occorre fare riferimento all'ascoltatore medio, determinato su base statistica su un campione di una popolazione costituita da individui giovani privi di difetti dell'udito.

Un parametro soggettivo particolarmente importante, è dato dall'intensità sonora della sensazione uditiva. Tale parametro è legato al livello di pressione sonora e alla composizione spettrale del rumore (questo spiega perché due suoni di diversa frequenza e pari intensità vengono percepiti di intensità diversa dall'orecchio); per la valutazione di tale parametro si fa riferimento al livello di

intensità soggettiva misurato in *phon*. Il phon rappresenta l'effetto di 1 decibel alla frequenza di riferimento di 1000 hertz, frequenza alla quale i valori espressi in decibel o in phon si equivalgono.

Sulla base di numerose esperienze sono state costruite e normalizzate le *isofoniche*, cioè le curve di eguale sensazione acustica; l'insieme delle isofoniche, delimitato inferiormente dalla soglia di udibilità, corrispondente a 1 phon, e superiormente da quella del dolore, corrispondente a 120-130 phon, costituisce il cosiddetto *audiogramma normale* (Fig. 3.2).

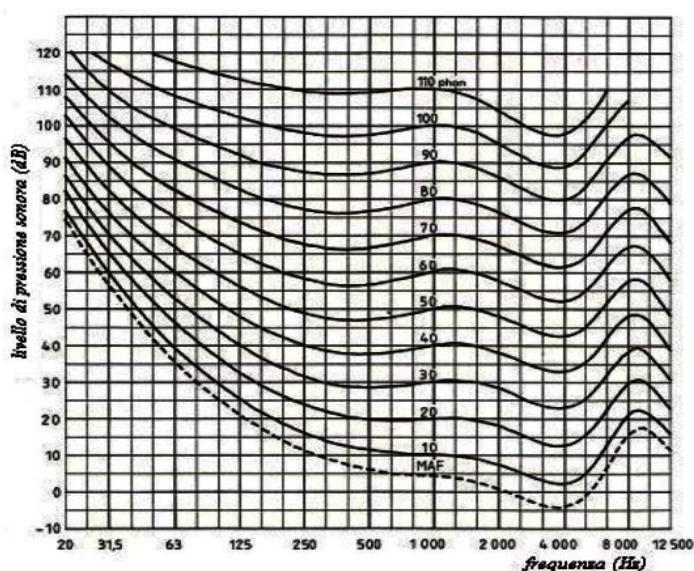


Figura 3.2 - Audiogramma normale: curve di eguale intensità della sensazione uditiva (isofoniche) per suoni puri percepiti in campo libero.

Tali curve mettono in relazione la frequenza di toni puri ed il corrispondente livello di pressione sonora a parità di sensazione acustica (*loudness*). Esaminando il loro andamento, si deduce che la massima sensibilità dell'orecchio si ha per frequenze comprese tra 1000 e 6000 Hz, e che questa poi decresce sia per le basse frequenze che per le alte; un appiattimento, inoltre, delle isofoniche superiori rispetto a quelle inferiori mette in luce la minore sensibilità, dovuta ad una azione protettiva dell'organo uditivo, ai valori elevati della pressione sonora.

L'insieme dei suoni percepibili dall'orecchio umano è racchiuso in una ampia area dell'audiogramma normale delimitata dalle soglie di udibilità e del dolore (Fig. 3.3).

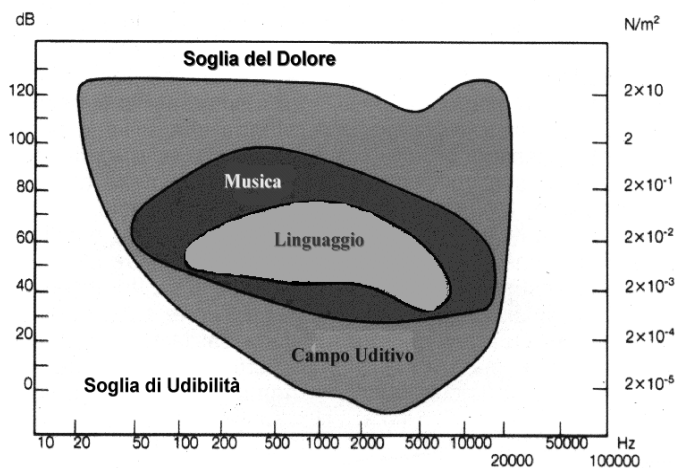


Figura 3.3 – Aree dell'audiogramma normale racchiudenti i segnali udibili, musicali e vocali.

La scala dei phon, tuttavia, non è del tutto soddisfacente, in quanto non rappresenta a pieno la corrispondente variazione della percezione soggettiva (un raddoppio, ad esempio, del livello di intensità soggettiva non corrisponde ad un raddoppio dell'intensità percepita), per cui è stata introdotta una nuova unità di misura meglio legata fisiologicamente alla percezione soggettiva, il *son*. Per stabilire una correlazione tra le due grandezze si assegna il valore di 1 son all'intensità della sensazione uditiva corrispondente a un livello di intensità soggettiva di 40 phon (fig. 3.4); ogni incremento, o decremento, di 10 phon nel livello equivale a un raddoppio, o un dimezzamento, nella scala dei son.

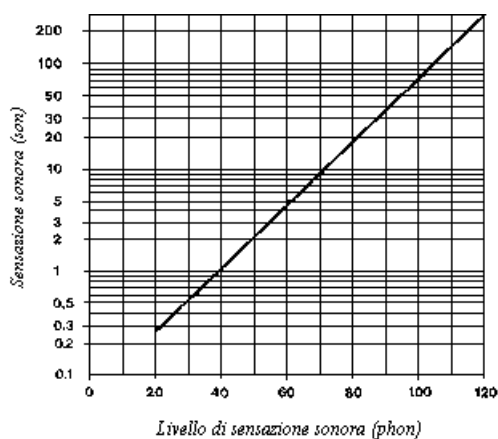


Figura 3.4 - Relazione tra sensazione sonora [son] e livello di sensazione in [phon].

### 3.3.1. I livelli sonori ponderati

L'orecchio umano, come detto precedentemente, non è sensibile in egual misura a tutte le frequenze. Per questo motivo, anche se il livello di pressione sonora di due diversi rumori può essere lo stesso, può darsi che il primo sia giudicato più fastidioso del secondo se la potenza sonora del primo è concentrata in una zona di frequenze in cui l'orecchio è più sensibile.

Al fine di valutare la sensazione derivante da un rumore viene di solito utilizzato un misuratore del livello di pressione sonora. In tale strumento, detto *fonometro*, la pressione sonora viene trasformata in un segnale elettrico, che subisce una pesatura opportuna, tendente a seguire l'andamento delle isofoniche dell'audiogramma normale all'inverso, nel senso che, per frequenze di maggiore sensibilità dell'orecchio, la pesatura è positiva e l'importanza dei suoni in quell'intervallo viene esaltata, mentre per frequenze al di sopra e al di sotto la pesatura è negativa e l'importanza viene diminuita.

Nei misuratori di livello sonoro sono incluse quattro curve di ponderazione A, B, C, e D che approssimano rispettivamente le isofoniche 40, 70 e 100 phon e la curva isodisturbo 40 noy (il noy rappresenta la rumorosità percepita, ovvero l'accettabilità di un rumore il cui livello di pressione sonora sia di 40 dB). L'unità di misura è sempre il decibel ma, tuttavia, è uso comune far seguire al simbolo dell'unità di misura adottata la lettera relativa alla curva di peso usata, per esempio dB(A) per indicare il livello sonoro ponderato A.

Delle curve di ponderazione suddette la curva di peso A è quella più utilizzata nella valutazione del disturbo e del danno derivanti dall'esposizione al rumore, la curva B è ormai caduta in disuso, mentre la curva D viene utilizzata per la valutazione del disturbo da rumore aeronautico.

Nella figura 3.5 sono riportate, oltre alle curve di ponderazione A, B, C, D, alcune curve di recente concezione e, precisamente, le curve E e SI, quest'ultima utilizzata per meglio apprezzare l'interferenza del rumore sulla parola.

I moderni fonometri sono, inoltre, predisposti per dare risposte secondo particolari costanti di tempo: *slow*, con tempo di integrazione di 1000 ms, *fast*, con tempo di integrazione di 125 ms, *impulse*, con tempo di integrazione di 35 ms.

Per simulare la velocità di risposta del nostro udito viene utilizzata la costante di tempo *fast*. Misure eseguite con la curva di ponderazione A e con costante di tempo *fast* consentono di riprodurre con buona approssimazione l'esperienza sonora dei ricettori.

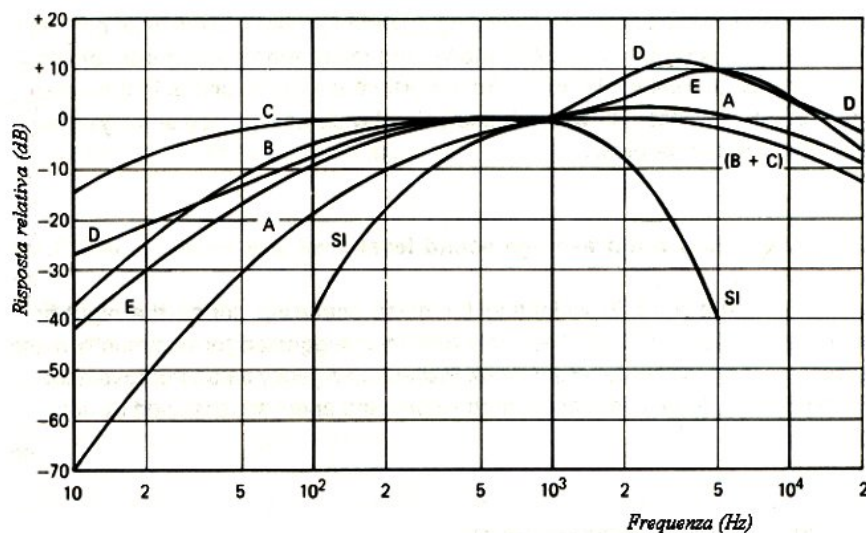


Figura 3.5 – Curve di ponderazione normalizzate per misuratori di livello sonoro.

### 3.4. EFFETTI DEL RUMORE

L'inquinamento acustico produce una diretta influenza negativa sul benessere fisico e psichico della popolazione soggetta e, di conseguenza, rappresenta un fattore da tenere sotto controllo e che bisogna ricondurre, qualora risulti necessario, entro opportuni limiti di tollerabilità adottando appropriati accorgimenti.

La reazione al rumore è legata principalmente all'intensità del suono e alla sua durata, vale a dire all'esposizione dell'individuo al rumore, che produce sull'organismo umano una serie di effetti catalogabili in specifici e non specifici.

I danni specifici sono quelli direttamente connessi con l'organo dell'udito e sono valutabili in termini di perdita temporanea, o permanente, della facoltà uditiva o di difficoltà di percezione del parlato.

I danni non specifici, con reazioni transitorie, o durature, interessano una sfera più ampia dell'organismo producendo spesso aumento della pressione sanguigna, sindrome da stress di tipo cronico, disturbi psichici, sintomi psicosomatici, disturbi comportamentali e attitudinali.

La consapevolezza degli effetti negativi che il rumore può avere sulla salute, o sul benessere, dell'individuo, provoca nello stesso una generica sensazione di fastidio (*annoyance*), di disturbo che può esprimersi in un senso di disagio, un sentimento di scontentezza.



### 3.4.1. *Gli effetti specifici del rumore*

Gli effetti specifici del rumore sono quelli che interessano direttamente la funzione uditiva e comprendono il mascheramento, l'affaticamento e la sordità professionale.

Il *mascheramento* produce la perdita della percezione uditiva di un suono (mascherato) a causa della presenza un altro suono (mascherante); questo effetto dipende dalla frequenza dei due suoni e dai loro livelli sonori. Si può definire una *soglia di mascheramento* che è la pressione sonora alla quale il suono mascherato comincia ad essere percepito. L'effetto di tale fenomeno si manifesta con una riduzione dell'intensità soggettiva rispetto al valore che essa avrebbe in assenza del suono mascherante. Particolarmente fastidiosi sono i rumori a banda larga, come ad esempio il rumore prodotto dal traffico veicolare, che, se di livello elevato, rendono impossibile la conversazione. Del mascheramento bisogna tenere conto, in particolare, nella scelta dei segnali di allarme e delle sirene dei mezzi di pronto intervento, che, dovendo essere chiaramente percepiti, devono superare nettamente il rumore di fondo.

L'*affaticamento uditivo* comprende tutti quegli effetti uditivi temporanei conseguenti all'esposizione agli stimoli sonori. È valutato attraverso la misura dell'innalzamento della soglia di udibilità alcuni minuti dopo la fine all'esposizione; questo spostamento temporaneo della soglia di udibilità viene indicato con l'acronimo TTS (Temporary Threshold Shift). Tale fenomeno è direttamente correlato al livello di esposizione sonora e aumenta con la durata di questa seguendo una legge logaritmica; inoltre, esso si localizza soprattutto intorno ad alcune frequenze del campo udibile che, nel caso di rumori a banda larga, corrispondono a 4000 Hz. Il recupero completo della funzione uditiva avviene normalmente entro qualche ora, tranne che per TTS superiori ai 40 dB, quando occorrono diversi giorni di riposo.

La *sordità professionale* è la diminuzione permanente della funzione uditiva dovuta all'azione prolungata del rumore durante l'attività professionale. È anche definita con il termine ipoacusia, da non confondere con la presbioacusia, cioè la perdita naturale dell'udito a causa dell'invecchiamento dell'organismo, fenomeno, quest'ultimo, che può essere accelerato per esposizioni a livelli di pressione sonora superiori ai 60 dBA per più della metà del tempo in cui si è svegli.

Nell'evoluzione della sordità professionale possiamo individuare alcuni stadi successivi. Il primo corrisponde all'instaurarsi di un deficit uditivo permanente, conseguenza di una prolungata esposizione al rumore e che interessa

principalmente la frequenza di 4000 Hz. In questa prima fase si avvertono fastidi alla fine della giornata lavorativa, che però scompaiono il giorno successivo alla ripresa del lavoro.

Il secondo stadio corrisponde al periodo di latenza totale del fenomeno, durante il quale si aggrava il deficit uditivo a 4000 Hz e alle frequenze superiori. In questa fase le frequenze principali per la comprensione del parlato non sono toccate e non ci si accorge di nulla se non nell'ascolto della musica.

Il terzo stadio è quello di latenza subtotale, quando si incomincia ad avvertire difficoltà nella percezione delle comunicazioni verbali, poiché il deficit uditivo si estende anche a 2000 Hz.

L'ultimo stadio è quello della sordità manifesta, quando il danno uditivo è evidente, poiché la conversazione diventa difficile e l'individuo deve aiutarsi, per la comprensione del parlato, con la lettura delle parole sulle labbra dell'interlocutore. Va tenuto presente che i danni dovuti alla sordità professionale possono essere evitati limitando l'esposizione al rumore e sottoponendo gli individui esposti a controlli audiometrici periodici. Nel caso specifico dei mezzi di trasporto è da escludere l'insorgenza di effetti specifici del rumore, fra i quali l'otolesione, in quanto non si verificano mai, salvo forse in alcuni mezzi industriali, livelli di rumorosità aventi un valore superiore agli 80 dBA.

#### ***3.4.2. Gli effetti non specifici del rumore***

Gli effetti non specifici del rumore sono quelli che interessano l'organismo umano nel suo complesso.

Il sistema cardiovascolare è interessato dal rumore, perché questo produce effetti di vasocostrizione dei precapillari la cui durata è strettamente collegata a quella del rumore. Variazioni improvvise del livello sonoro producono modificazioni del ritmo cardiaco e della pressione arteriosa. Questi effetti sono particolarmente evidenti all'inizio dell'esposizione a rumori impulsivi ed alla fine dell'esposizione a rumori di tipo continuo. Il rumore, inoltre, agisce in varie maniere sul rendimento, sulla qualità e durata del sonno, stato fisiologico caratterizzato dalla perdita più o meno completa, ma reversibile, della coscienza. Si verifica, infatti, che, a causa del rumore (bastano valori di livello sonoro superiori ai 35 dBA), si ha un ritardo nel raggiungimento del sonno profondo, che sembra essere il periodo più importante al fine del recupero delle attività psicofisiche; aumentano, quindi, i periodi di sonno leggero, e i periodi di veglia, a scapito del sonno pesante.

Il livello sonoro del rumore ha notevoli effetti sul sonno. Questi effetti sono di difficile quantificazione perché legati alla profondità del sonno, di per se stessa molto variabile, e, inoltre, perché strettamente collegati al livello di rumore di fondo al quale il soggetto è abituato e al tipo del rumore o al significato che il rumore può avere per esso (sensazione di pericolo, fastidio generico, ecc.). Non di minore importanza sono alcune caratteristiche del soggetto quali l'età (gli anziani sono più sensibili dei giovani), la personalità (emotività, ansietà e tensione nervosa), lo stato socio-professionale.

Gli altri effetti fisiologici del rumore sull'uomo corrispondono in generale alla reazione di allarme dell'organismo soggetto a una generica aggressione e sono:

- la risposta elettro-dermale, variazione della resistenza elettrica della pelle in conseguenza dello stimolo sonoro, legata a un aumento della sudorazione e controllata dal sistema nervoso simpatico;
- la modifica del ritmo e dell'ampiezza della respirazione;
- la modifica dei movimenti e delle secrezioni gastriche;
- gli effetti sul sistema visivo con dilatazione della pupilla per qualche secondo, dopo l'esposizione a rumori impulsivi, e restringimento del campo visivo, nel caso di esposizione prolungata al rumore;
- gli effetti sul sangue, con diminuzione rapida del tasso di potassio e aumento della glicemia nel periodo successivo all'esposizione al rumore.

Data la notevole importanza degli effetti del rumore sulla visione ai fini della sicurezza stradale, si ritiene opportuno approfondire l'argomento.

### ***3.4.3. Interazioni uomo-strada-veicolo***

Numerose ricerche hanno messo in evidenza che esiste un'interferenza negativa, imputabile al livello di rumorosità, sulla funzione visiva del conducente di un autoveicolo. Più precisamente è stata clinicamente accertata una particolare incidenza sulla visione stereoscopica, sulla capacità di riconoscimento dei colori, sulla visione crepuscolare e notturna. L'affaticamento dovuto al rumore è direttamente collegato ad una caduta del livello di prestazione globale del conducente; in particolare, rumori con livello di pressione sonora intorno a valori di 70-75 dBA influenzano negativamente determinate aree occipitali responsabili della visione, producendo spesso sui soggetti esaminati un fenomeno chiamato midriasi (dilatazione abnorme della pupilla), che può favorire i fenomeni di abbagliamento all'uscita delle gallerie o in caso di incrocio con altre autovetture, influenza le capacità connesse alla percezione delle distanze relative aumentando, in definitiva, le probabilità di incidenti stradali.

Il fenomeno della midriasi, che si può manifestare anche per livelli sonori più bassi, ma perduranti nel tempo, dà origine ad un disturbo che si esplica in una penalizzazione della facoltà di accomodamento dell'occhio, della percezione del rilievo e, fattore molto importante per la marcia veicolare, della valutazione delle distanze relative tra due corpi in movimento a velocità diverse.

### 3.5. IL RUMORE IN AMBITO URBANO

Le sorgenti di rumore sono caratterizzate, come tutte le altre sorgenti sonore, dalla potenza emessa e dalla distribuzione della potenza emessa nelle varie direzioni.

Un'idea della intensità acustica prodotta da varie sorgenti si può ricavare dalla tabella 3.1.

Intensità acustica di alcuni rumori tipici	
Sorgente	Livello (dB)
Soglia di udibilità	0
Respiro normale	10 (appena udibile)
Voce bisbigliata	20
Ufficio silenzioso	50
Conversazione tra due persone	60
Interno di ufficio rumoroso	70 (disturbante)
Traffico stradale	80
Autotreno (a 15 m)	90 (pericolo per esposizione prolungata)
Metropolitana	100
Complesso rock – discoteca	110
Martello pneumatico	120 (soglia del dolore)
Decollo di un piccolo aereo	140

Tabella 3.1 – Intensità acustica di tipiche sorgenti di rumore.

Le sorgenti di rumore possono essere interne all'ambiente disturbato (elettrodomestici, macchinari da ufficio), esterne all'ambiente (rumori provenienti da locali attigui) o esterne all'eventuale edificio preso in esame (rumori stradali, industriali). A tal proposito esse possono essere raggruppate in quattro principali categorie:

1. Industrie inserite nel contesto urbano o nelle immediate vicinanze;
2. Costruzioni civili (cantieri temporanei per la costruzione o per la manutenzione degli edifici e delle infrastrutture);
3. Apparecchi di uso domestico;

4. Mezzi di trasporto (rumore da traffico urbano, autostradale, ferroviario, aereo).

Il rumore industriale, anche se affligge relativamente poche persone, produce livelli di pressione sonora maggiori e copre un intervallo di tempo ben più ampio. Molte industrie, infatti, sono operative 24 ore al giorno, 7 giorni alla settimana.

Il rumore prodotto dai cantieri, dalle attrezzature per la costruzione di opere civili o, per esempio, per la manutenzione di una infrastruttura di trasporto, è probabilmente il più intenso cui è sottoposta la comunità. Tale tipo di rumore è, di solito, accettato dalla gente, in quanto si ritiene necessario per lo sviluppo della città e costituisce solo una parentesi di disturbo nello svolgimento delle usuali attività. I rumori domestici, poi, cui siamo tutti sottoposti, sono presenti in ogni edificio, e sono causati da elettrodomestici, impianti idraulici, impianti termici, ascensori, ecc. Tali fonti di rumore producono, in genere, un livello sonoro di gran lunga inferiore rispetto a quello prodotto dalle altre sorgenti; tuttavia, i tempi di esposizione dei soggetti patenti sono più lunghi che negli altri casi.

Per quanto riguarda, infine, il rumore dovuto ai mezzi di trasporto, escludendo le zone in prossimità di ferrovie ed aeroporti, la principale sorgente di rumorosità ambientale è imputabile al traffico urbano. Esso degrada la qualità dell'ambiente circostante perché molto spesso si raggiungono livelli tali da interferire con le attività degli abitanti (ad esempio livelli di pressione sonora superiori ai 60 dBA all'esterno di un edificio sono già fastidiosi, in quanto rendono difficoltosa la conversazione tra due persone dotate di udito normale).

Le sorgenti principali causa del rumore da traffico sono i veicoli che, anche se notevolmente diversificati fra loro per le diverse prestazioni e per le diverse destinazioni d'uso (veicoli commerciali, mezzi di trasporto pubblico, mezzo proprio), poiché adottano tutti motori alternativi a combustione interna producono una sensazione uditiva abbastanza simile, differenziandosi invece nel livello globale di emissione.

Il livello di emissione è inoltre influenzato dalle condizioni di circolazione (traffico scorrevole e traffico cittadino), che a loro volta dipendono dalle velocità e dalle accelerazioni dei singoli veicoli, al crescere delle quali cresce anche il rumore, dallo stile di guida (una guida aggressiva comporta mediamente un aumento di rumorosità di circa 5 dBA), e, infine, dalle proprietà di assorbimento acustico della superficie stradale.

Un discorso a parte va fatto per i dispositivi di segnalazione acustica dei veicoli che, al contrario di quanto normalmente accade, dovrebbero essere utilizzati con

la massima moderazione e solamente ai fini della sicurezza stradale, e, in particolare, per le sirene dei veicoli di pronto intervento, per le quali la non immediata localizzazione della provenienza del segnale di allarme, rende difficoltosa la manovra di via libera, con la conseguente permanenza del rumore, già abbastanza sgradevole, per un tempo più lungo del necessario.

### 3.6. RUMORE E VIBRAZIONI NEL SINGOLO VEICOLO

All'origine del rumore veicolare possiamo individuare varie sorgenti, componendo i livelli delle quali si ottiene il livello globale, che rientrano in due principali categorie:

- ◆ quelle correlate con il numero di giri del motore (power train);
- ◆ quelle correlate con la velocità del veicolo su strada.

Nella prima categoria, che è indipendente dalla seconda, rientrano il motore, l'impianto di aspirazione e scarico, la ventola di raffreddamento, gli alberi di trasmissione, il cambio, le pompe idrauliche e i generatori elettrici. Nella seconda, invece, rientrano il rumore provocato dall'interazione pneumatici-strada e il rumore aerodinamico (Fig. 3.6).

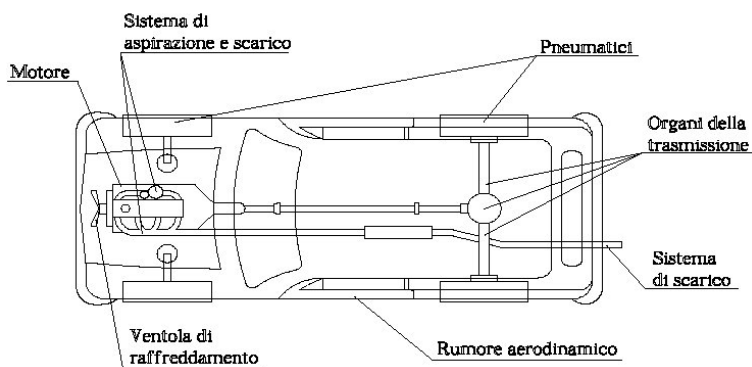


Figura 3.6 – Principali sorgenti di rumore in un autoveicolo.

Il rumore del motore è principalmente dovuto all'aspirazione dell'aria, alla combustione nella camera di scoppio, alla emissione dei gas combusti, agli accoppiamenti meccanici (punterie, ingranaggi, trasmissioni a catena, ecc.), alle vibrazioni (causate dai carichi variabili determinati dalla pressione dei gas, alle forze d'inerzia, all'azione delle masse rotanti e di quelle in moto relativo) ed alle vibrazioni indotte nella carrozzeria.

Il rumore da rotolamento dipende, sostanzialmente, dalla velocità del veicolo e dalle caratteristiche e condizioni del manto stradale (rugosità, tipo di inerti e granulometrie utilizzate, grado di ammaloramento, proprietà di assorbimento acustico), mentre le caratteristiche del pneumatico (dimensione, carico, pressione di gonfiaggio, disegno del battistrada, grado di usura), il peso del veicolo e la sua accelerazione, hanno una minore influenza. Tale rumore è essenzialmente causato dall'impatto del battistrada sulla superficie ("rumore di impatto"), dalla vibrazione dell'aria compressa fra i tasselli del battistrada per effetto della deformazione elastica del pneumatico ("pompaggio dell'aria") e dal cosiddetto "slip and stick" (aggrappamento del pneumatico sugli inerti dello strato superficiale della pavimentazione stradale). Le emissioni generate dal rumore di rotolamento si trovano in genere al di sotto dei 1000 Hz, cioè nel campo delle basse frequenze; sul bagnato il livello di rumore è più alto di circa 5-10 dBA. Il rumore aerodinamico è dovuto all'impatto della vettura contro l'aria ed è funzione, oltre che della velocità, del profilo della carrozzeria; esso copre di norma frequenze comprese tra i 500 e i 3000 Hz ed è particolarmente fastidioso perché interferisce con la voce parlata, il cui livello oscilla fra i 45 e i 60 dBA.

In generale, a basse velocità, quali quelle del traffico urbano, il motore e il sistema di aspirazione e scarico costituiscono le sorgenti di rumore predominanti, mentre a velocità maggiori di 50-60 km/h aumenta sensibilmente il contributo del rumore di rotolamento dei pneumatici. Per velocità superiori agli 80 km/h il rumore del motore alla massima potenza è mascherato dal rumore di rotolamento e, quando si superano i 100 km/h, anche da quello aerodinamico.

La struttura del veicolo (telaino, carrozzeria), pur non costituendo essa stessa una sorgente di rumore, è messa in vibrazione sia dal motore che dalle irregolarità del manto stradale (accelerazioni verticali trasmesse attraverso il sistema delle sospensioni), per cui diventa tale principalmente all'interno del veicolo e contribuisce al livello globale di rumorosità emessa. Secondo indagini svolte dalla CEE risulterebbe che il 45% è causato dallo scappamento, il 30% dal motore, il 10% dalla aspirazione, il 10% dalla ventola e solo il 5% dall'attrito con la superficie stradale.

Nell'ambito dei problemi connessi con il rumore ambientale appare poi opportuno raggruppare le sorgenti di rumore in poche classi individuate solo dal livello globale prodotto ad una determinata distanza, per velocità normalmente verificantesi nelle aree urbane. Sotto questo aspetto i vari tipi di veicoli possono essere classificati, a seconda del rumore emesso, in veicoli pesanti (autocarri,

autotreni, autoarticolati, autobus) con picchi di emissione di 90-95 dBA, veicoli leggeri (automobili, autoveicoli con meno di nove posti a sedere compreso il conducente) con picchi di 75-80 dBA e veicoli a due ruote (motocicli e motociclette) con picchi di 80-90 dBA; tali valori sono riferiti ad una distanza di circa 4 metri. L'elevata rumorosità delle motociclette è principalmente dovuta alle caratteristiche del tubo di scappamento e al fatto che il motore è privo di schermi.

Concludendo, un ruolo importante ai fini dell'inquinamento acustico è giocato dallo stato di manutenzione dei veicoli circolanti, in quanto l'usura meccanica provoca un progressivo aumento di rumorosità in alcune componenti, quali ad esempio il sistema di scarico e l'impianto frenante.

### 3.7. INFLUENZA DELLA VELOCITÀ SUL RUMORE VEICOLARE

Un parametro che influisce notevolmente sul livello di rumore emesso da un veicolo è la velocità. Ciò è messo in evidenza, per le varie categorie di veicoli, dalla figura 3.7, che mostra i range dei livelli di rumore in funzione della velocità.

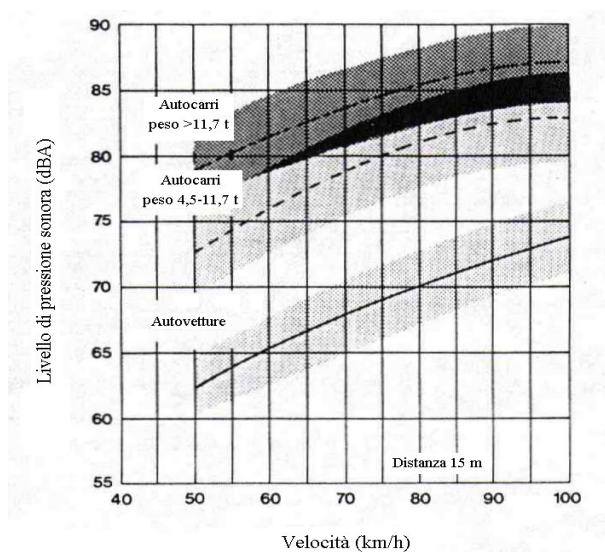


Figura 3.7 - Valori medi del rumore dovuto a varie categorie di veicoli in funzione della velocità.

Un incremento della velocità di marcia comporta un aumento del rumore emesso dai veicoli, più accentuato per le autovetture; aumentando, infatti, la velocità da 50 a 100 km/h, si ha un incremento nel livello di rumore di 4-5 dBA.

Un'analoga trattazione condotta negli USA giunge, sostanzialmente, alle stesse conclusioni partendo da un raggruppamento dei vari tipi di veicoli in quattro



categorie a secondo della potenza del motore. La classificazione è riportata nella tabella 3.2 insieme ai valori medi dei range dei livelli di rumore propri di ciascun raggruppamento.

Gruppo	Descrizione	Potenza (hp)	N° giri/min	Range di rumore dB(A)
1	Veicoli industriali pesanti	200 – 350	1000 – 2600	10
2	Veicoli industriali leggeri	80 – 200	1000 – 3000	15
3	Furgoni	30 – 80	1000 – 4500	20
4	Automobili	40 – 50	1000 – 6000	30

Tabella 3.2 - Valori medi degli intervalli di rumore per diverse categorie di veicoli.

Gli intervalli dei livelli di rumorosità prodotta dai vari gruppi nel proprio range operativo di numero di giri del motore, sono mostrati nella figura 3.8. Si può notare come, considerando lo stesso numero di giri, ad esempio 2000 giri/min, i mezzi pesanti (200-350 hp) siano lievemente più rumorosi rispetto ai medi e piccoli autocarri, mentre all'aumentare della velocità di rotazione del motore le differenze si riducono notevolmente.

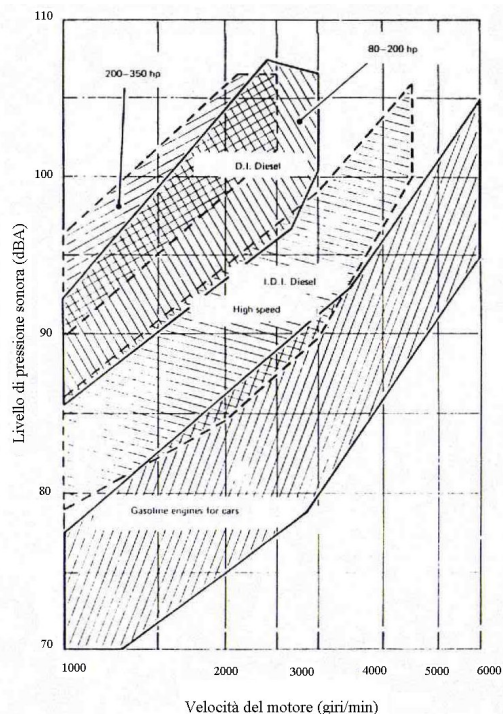


Figura 3.8 – Intervalli dei livelli di rumore prodotto dalle varie categorie di veicoli.

Questi dati spiegano la ragione per cui i veicoli commerciali nel traffico urbano, dove le velocità sono relativamente moderate, producono livelli di rumore maggiori rispetto alle altre categorie, mentre nel traffico autostradale, a velocità notevolmente superiori, i livelli di rumore sono comparabili.

### 3.8. LEGISLAZIONE SUI VEICOLI A MOTORE

Uno dei principali fattori che hanno dettato lo sviluppo dell'industria veicolare è, senza dubbio, quello economico. Gli attuali criteri di progettazione sono, infatti, prevalentemente orientati alla riduzione dei consumi energetici senza, tuttavia, penalizzare altre prestazioni, quali, ad esempio, la velocità di marcia.

Per queste ragioni in campo commerciale il motore diesel ha soppiantato quello a benzina, consentendo una notevole riduzione dei consumi di carburante; ulteriori miglioramenti sono stati ottenuti riducendo il peso del veicolo a parità di carico trasportabile, per cui i motori sono divenuti più piccoli e leggeri permettendo maggiori velocità. I motori diesel, di contro, operano a pressioni di combustione più elevate e numero di giri più alto rispetto a quelli a benzina, e ciò si traduce in un aumento di vibrazioni e di emissione sonora. Quest'ultima è regolamentata da legislazioni nazionali ed internazionali che ne stabiliscono i limiti massimi per ogni categoria di veicoli.

La prima Direttiva specifica nell'ambito del Mercato Comune Europeo è stata promulgata nel febbraio 1970 e man mano aggiornata (Tab. 3.3).

<b>Direttiva</b>			<i>70/157</i>	<i>77/212</i>	<i>81/334</i>	<i>84/424</i>
<b>Data di attuazione</b>			<i>1970</i>	<i>1.10.1982</i>	<i>1.10.1985</i>	<i>1.10.89</i>
<b>Categoria veicolo</b>	<b>Peso (t)</b>	<b>Potenza (kW)</b>	<b>Livelli di rumore (dBA)</b>			
Autovetture			82	80	80	77
Furgoni, minibus	<2		84	81	81	78
Furgoni, minibus	2-3.5		84	81	81	79
Autobus	>3.5	<150	89	82	82	80
Autobus	>3.5	>150	91	85	85	83
Autocarri	>3.5	<75	89	86	86	81
Autocarri	>3.5	75-150	89	86	86	83
Autocarri	>3.5	>150	91	88	88	84

Tabella 3.3 - Massimi livelli di rumore ammessi dalla CEE per le varie categorie di veicoli.

Le normative sopra citate tendono ad una progressiva diminuzione dei livelli sonori massimi consentiti, il che impone alle industrie costruttrici di veicoli un miglioramento dei loro prodotti anche in termini di prestazioni acustiche.

Osservando la precedente tabella è facile notare come, fra le varie categorie veicolari, non siano tenuti in conto i veicoli a due ruote, che pure hanno un peso non trascurabile nell'inquinamento acustico ambientale. In Italia, a differenza di molti altri Paesi europei, non è in vigore alcuna normativa per il controllo del fonoinquinamento prodotto dai ciclomotori e dai motocicli, ma solo alcuni limiti validi al momento dell'omologazione (pari a 83 dBA).

Anche dopo il recepimento della Direttiva 47/24 CE del 17 giugno 1997, ad un ciclomotore sarà consentito di inquinare quanto, e in alcuni casi più, di un'automobile (Tab. 3.4).

<i>Direttiva CE 47/24</i>	
<b>Categoria veicolo</b>	<b>Inquinamento acustico (dBA)</b>
Ciclomotore	66-76
Moto sopra i 50 c.c.	80
Autovetture	72

Tabella 3.4 – Limiti massimi all'omologazione per varie categorie di veicoli.

### **3.9. CRITERI DI VALUTAZIONE DEL DISTURBO DA RUMORE**

Il problema della valutazione del disturbo da rumore non è di facile soluzione, vista la dipendenza da innumerevoli fattori fra cui le caratteristiche oggettive del rumore (livello di pressione sonora, spettro di frequenza, durata temporale, presenza nelle ore notturne), le caratteristiche urbanistiche (presenza o meno di edifici ai margini di una strada) e ambientali (presenza di vegetazione, barriere naturali), le caratteristiche psicofisiologiche dell'individuo disturbato, varie circostanze accessorie (natura dell'attività che viene disturbata come, ad esempio, lettura, lavoro, riposo, sonno).

Misure istantanee del livello di pressione sonora non sono significative perché non facilmente associabili alle reazioni soggettive. La soluzione, pertanto, è volta alla determinazione di indici numerici che, partendo dalle caratteristiche oggettive del rumore e tenendo conto di alcuni fattori soggettivi caratterizzanti le sensazioni medie dell'individuo, consentano di rappresentare la rumorosità ambientale e, di conseguenza, il disturbo arrecato alla comunità. Fra i numerosi indici proposti verranno presi in considerazione solo quelli maggiormente utilizzati.

#### **3.9.1. Il livello sonoro equivalente**

Prefissato un intervallo di tempo di osservazione, il livello sonoro equivalente è il livello stazionario cui compete, nell'intervallo considerato, la stessa energia del

rumore di livello variabile da analizzare; in altre parole, esso rappresenta il livello di pressione sonora di un suono costante che, nel predetto intervallo di tempo, espone l'individuo disturbato alla stessa energia acustica di quella che si ha considerando l'effettiva variabilità del suono. Da un punto di vista analitico si effettua la media energetica dei livelli istantanei di rumore rilevati nel tempo di osservazione:

$$L_{eq} = 10 \cdot \log_{10} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \right] \text{ dBA}$$

essendo  $T$  [s] l'intervallo di tempo di riferimento,  $p(t)$  [Pa] la pressione sonora in valore efficace,  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$  la pressione sonora di riferimento.

Con questo criterio si sostituisce al reale valore fluttuante del livello di pressione sonora, misurato durante un tempo di osservazione  $T$ , un valore costante e continuo ( $L_{eq}$ ), che rappresenta un indice di valutazione degli effetti del rumore.

### 3.9.2. Il livello equivalente diurno-notturno

Il livello equivalente diurno-notturno  $L_{dn}$  (Day-Night Level), è basato sulla giustificata convinzione che lo stesso rumore ambientale disturbi maggiormente di notte rispetto al giorno. Definito, allora, il periodo diurno come l'intervallo di tempo compreso fra le ore 6.00 e le 22.00, e, conseguentemente, quello notturno fra le 22.00 e le 6.00, si è pensato di penalizzare di 10 dB gli eventi rumorosi notturni. Il valore di  $L_{dn}$ , adottando una ponderazione in scala A e riferendosi alle 24 ore, è definito dalla seguente espressione:

$$L_{dn} = 10 \cdot \log_{10} \frac{1}{24} \cdot \left[ 15 \cdot (10^{0.1L_d}) + 9 \cdot (10^{0.1(L_n+10)}) \right] \text{ dBA}$$

dove  $L_d$  e  $L_n$  [dBA] rappresentano rispettivamente i livelli equivalenti di rumore diurno e notturno (corretto di +10 dB).

### 3.9.3. Il "Community Noise Equivalent Level" (CNEL)

Tale indice è del tutto analogo al livello equivalente diurno-notturno, ma prevede, oltre alla penalizzazione di +10 dBA per le ore notturne, una penalizzazione di +3 dBA per le ore comprese fra le 19.00 e le 22.00.

Analiticamente è espresso dalla relazione:

$$\text{CNEL} = 10 \cdot \log_{10} \frac{1}{24} \cdot \left[ 12 \cdot (10^{0.1L_d}) + 3 \cdot (10^{0.1(L_s+3)}) + 9 \cdot (10^{0.1(L_n+10)}) \right] \text{ dBA}$$

nella quale  $L_d$  rappresenta il livello equivalente di rumore diurno (ore 6.00-19.00),  $L_s$  quello serale (ore 19.00-22.00),  $L_n$  quello notturno (ore 22.00-6.00).

In sostanza l'indice CNEL è il livello equivalente sulle 24 ore penalizzato in differente misura per i periodi serale e notturno.

#### **3.9.4. L'analisi statistica dei livelli**

Quando si ha a che fare con rumori statisticamente variabili nel tempo, come ad esempio avviene nel traffico stradale, la conoscenza del valore medio del livello sonoro può non essere sufficiente a descrivere a pieno il fenomeno acustico in esame. In tali casi è molto utile la rappresentazione della distribuzione cumulativa dei livelli, che consiste in una curva individuante in ordinate la percentuale di tempo, rispetto all'intero intervallo di misura, in cui ciascun livello, indicato in ascisse, è stato superato. Risulta così abbastanza semplice leggere direttamente dalla curva il valore dei livelli statistici cumulativi ( $L_N$ ) superati per una certa percentuale di tempo (ad esempio  $L_{80}$  rappresenta il livello di rumore superato per l'80% del tempo di osservazione).

Nella valutazione del disturbo derivante dal rumore del traffico veicolare i livelli statistici cumulativi più comunemente impiegati sono  $L_{0,1}$ ,  $L_1$ ,  $L_5$ ,  $L_{10}$  (rumorosità di picco),  $L_{50}$  (rumorosità media o livello mediano),  $L_{90}$ ,  $L_{95}$ ,  $L_{99}$  (rumorosità di fondo).

#### **3.9.5. Il "Noise Pollution Level" (NPL)**

Tale indice è basato sulla considerazione che un rumore che persiste per un certo intervallo di tempo dipende, oltre che dal livello energetico medio, da altre caratteristiche peculiari dello stesso rumore, come ad esempio la presenza di fluttuazioni del livello sonoro nel tempo di osservazione considerato. In effetti, in base all'esperienza comune, è possibile constatare come, a parità di livello, un rumore che presenti notevoli fluttuazioni risulti più disturbante rispetto ad un altro.

Analiticamente l'indice è definito dalla relazione:

$$L_{NP} = L_{eq} + k \cdot \sigma \quad \text{dBA}$$

dove  $L_{eq}$  è il livello sonoro equivalente medio nell'intervallo di tempo considerato,  $\sigma$  è il valore della deviazione standard relativa alla distribuzione statistica dei livelli istantanei,  $k$  è una costante ordinariamente assunta pari a 2.56. Il periodo temporale rispetto a cui calcolare  $L_{NP}$  deve essere abbastanza omogeneo

sia per quanto riguarda il verificarsi degli eventi sonori che per le attività svolte dai soggetti disturbati; ad esempio, si può fare riferimento al periodo diurno e al periodo notturno.

L'indice  $L_{NP}$  si presta poco bene ad un calcolo in tempo reale, in quanto per valutare la deviazione standard occorre acquisire tutti i campioni che cadono nell'intervallo di tempo scelto.

### **3.9.6. Il "Traffic Noise Index" (TNI)**

Appositamente studiato per il traffico veicolare, fu proposto da Griffiths e Langdon che, eseguendo una serie di indagini nel tessuto urbano di Londra nel 1968, constatarono come il disturbo dovuto alla rumorosità da traffico urbano fosse strettamente correlato, oltre che con il livello della rumorosità di fondo, anche con l'ampiezza delle fluttuazioni tra picchi e fondo, parametro definito dalla differenza  $L_{10} - L_{90}$  e detto "clima di rumore".

L'indice, basato sull'analisi statistica dei livelli sonori ponderati secondo la curva A, su un periodo temporale di 24 h, è definito dalla seguente relazione:

$$TNI = 4 \cdot (L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30 \text{ dBA}$$

dove  $(L_{10}-L_{90})$  definisce, come detto sopra, il clima di rumore e quantifica la variabilità del rumore stesso,  $L_{90}$  costituisce il livello del rumore di fondo, mentre il terzo termine rappresenta un fattore empirico di correzione e normalizzazione della formula. La grande influenza del primo termine dell'indice non consente di applicare il TNI al di fuori dell'ambito urbano su strade a traffico fluente.

### **3.9.7. I rumori dovuti a singoli eventi**

In alcuni casi occorre valutare il disturbo arrecato alla comunità da eventi rumorosi di durata limitata nel tempo, ma che si verificano ripetutamente nel corso della giornata. Quando si verifica un singolo evento che produce un rumore di breve durata, ma chiaramente identificabile rispetto al rumore di fondo, come, ad esempio, il passaggio di un veicolo industriale pesante, il livello sonoro sale rispetto al rumore di fondo all'approssimarsi del mezzo, raggiunge un valore massimo e poi decresce fino ad assestarsi nuovamente intorno ai valori tipici del rumore di fondo esistente. La grandezza utilizzata in tali casi è detta SEL (Single Event Level), e rappresenta il livello di segnale continuo della durata di 1 secondo che possiede lo stesso contenuto energetico dell'evento sonoro considerato.

Analiticamente il SEL si esprime nella seguente forma:

$$SEL = 10 \cdot \log_{10} \cdot \frac{1}{T_{\text{rif}}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} 10^{0.1 \cdot L_A(t)} dt \quad \text{dBA}$$

dove  $L_A(t)$  è il livello sonoro istantaneo ponderato A,  $T_{\text{rif}}$  è il tempo di riferimento, assunto convenzionalmente pari a 1 secondo.

Nella pratica, è molto spesso usata la seguente formula:

$$SEL = 10 \cdot \log_{10} \cdot \int_{t_1}^{t_2} 10^{0.1 \cdot L_A(t)} dt \quad \text{dBA}$$

nella quale  $t_1$  e  $t_2$  individuano l'intervallo di tempo durante il quale  $L_A(t)$  non scende più di 10 dBA al di sotto del livello massimo raggiunto dall'evento.

Il SEL di per sé non costituisce un indice di valutazione, ma la sua commisurazione rappresenta un criterio alternativo, rispetto a quello basato sulle formule di regressione, per il calcolo del livello equivalente continuo, del livello sonoro diurno-notturno e di altri indici simili.

Il livello sonoro equivalente relativo ad un intervallo di tempo  $T$ , durante il quale si verificano  $n$  eventi singoli, ciascuno caratterizzato da un proprio SEL, si ottiene dalla seguente espressione:

$$L_{\text{eq}} = 10 \cdot \log_{10} \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^n 10^{0.1 \cdot SEL_i} \quad \text{dBA}$$

Se poi ciascun evento possiede lo stesso valore di SEL, il livello sonoro equivalente per  $n$  eventi che si verificano nell'intervallo di tempo  $T$  è dato da:

$$L_{\text{eq}} = 10 \cdot \log_{10} \frac{1}{T} \cdot n \cdot 10^{0.1 \cdot SEL} \quad \text{dBA}$$

Ipotizzando una suddivisione dei veicoli in categorie omogenee relativamente alle emissioni acustiche e sulla base dei corrispondenti valori mediati di SEL, è possibile calcolare il  $L_{A\text{eq}}$  derivante dal contributo sonoro di differenti categorie di mezzi di trasporto, attraverso la formula:

$$L_{\text{eq}} = 10 \cdot \log_{10} \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^n n_i \cdot 10^{0.1 \cdot SEL_i} \quad \text{dBA}$$

dove  $n_i$  rappresenta il numero di veicoli della  $i$ -esima categoria che passano davanti al punto di osservazione durante il periodo di tempo considerato (espresso in secondi).

Alla luce di quanto appena esposto, appare opportuno richiamare alcune definizioni, individuando i parametri valutativi maggiormente utilizzati per la caratterizzazione del disturbo da rumore, specie in ambiente abitativo e nell'ambiente esterno:

- *rumore ambientale*: è il livello sonoro equivalente generato da tutte le sorgenti esistenti in un dato luogo e durante un determinato tempo;
- *rumore specifico*: è il livello sonoro equivalente che può essere attribuito ad una determinata sorgente;
- *rumore residuo*: è il livello sonoro equivalente in assenza di specifiche sorgenti disturbanti;
- *rumore di fondo*: è il livello sonoro superato nel 95% del tempo considerato ( $L_{95}$ ).

### **3.10. NORMATIVA ITALIANA SUL RUMORE AMBIENTALE**

In Italia le norme legislative in materia di disturbo da rumore sulla comunità sono contenute nel Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 1° marzo 1991 (G.U. 8/3/91 S.G. n. 57) intitolato “Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell’ambiente esterno”.

Tale decreto fornisce i parametri in base ai quali adeguare le emissioni acustiche delle diverse sorgenti sonore, fisse e mobili, presenti nel territorio.

Dato il carattere transitorio del DPCM 1/3/91, nel 1995 il Parlamento ha prodotto un nuovo strumento legislativo costituito da una legge quadro sull’inquinamento acustico (la n. 447 del 26/10/95 G.U. n. 254 del 30/10/95) che sancisce i principi fondamentali di regolamentazione della materia e che, a sua volta, affida a una serie di decreti attuativi la completa normazione dell’argomento.

Fatta questa breve premessa si ritiene opportuno analizzare singolarmente i due strumenti legislativi.

#### ***3.10.1. DPCM 1/3/91 – “Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell’ambiente esterno”***

Il decreto si compone di sette articoli e due allegati tecnici.

Nell’art. 1 viene citata la legislazione di riferimento, in particolare ci si basa sugli allegati A, per le definizioni tecniche, e B, per le tecniche di rilevamento. Viene esplicitamente specificato che sono escluse dal campo di applicazione del decreto le sorgenti sonore che producono effetti esclusivamente all’interno degli ambienti di lavoro (oggetto di legislazione a parte) e le aree e le attività aeroportuali, per le quali si rimanda a norme specifiche. Vengono citate anche le attività temporanee (cantieri edili, manifestazioni pubbliche, ecc.), che,



eventualmente in deroga ai limiti stabiliti dal decreto, debbono essere autorizzate dai Sindaci, sentito il parere della ASL competente.

Nell'art. 2, con riferimento a due tabelle allegate al decreto, il territorio viene suddiviso in sei classi, per ciascuna delle quali vengono fissati, in relazione alla diversa destinazione d'uso, i valori massimi di livello sonoro equivalente per il giorno e per la notte. Le denominazioni delle suddette classi e dei rispettivi limiti sono riassunti nella tabella 3.5.

Classi di destinazione d'uso del territorio		L <sub>Aeq</sub> (diurno)	L <sub>Aeq</sub> (notturno)
I	Aree particolarmente protette	50	40
II	Aree prevalentemente residenziali	55	45
III	Aree di tipo misto	60	50
IV	Aree di intensa attività umana	65	55
V	Aree prevalentemente industriali	70	60
VI	Aree esclusivamente industriali	70	70

Tabella 3.5 - Limiti massimi del livello sonoro equivalente relativi alle classi di destinazione d'uso del territorio di riferimento.

Per le zone non esclusivamente industriali, oltre ai limiti massimi sopra riportati, sono anche stabilite le seguenti differenze tra il livello equivalente del rumore ambientale e quello del rumore residuo (criterio differenziale): 5 dBA per il periodo diurno e 3 dBA per quello notturno. La misura deve essere effettuata all'interno delle abitazioni e nel tempo di osservazione del fenomeno acustico specifico.

Nell'art. 3 vengono previste le norme transitorie di adeguamento. Le imprese interessate possono, entro sei mesi dall'entrata in vigore del presente decreto, presentare alla Regione un piano di risanamento, della durata massima di trenta mesi, indicando le modalità di adeguamento e il tempo a tal fine necessario.

L'art. 4 prevede i compiti per le Regioni, che devono emanare direttive per la predisposizione da parte dei Comuni di piani di risanamento acustico del territorio, in accordo con la suddivisione in classi di cui all'art. 2.

L'art. 5 stabilisce che il rilascio di concessione edilizia dei nuovi impianti industriali deve essere subordinato alla presentazione di una idonea documentazione di previsione di impatto acustico ambientale.

L'art. 6, in attesa della suddivisione in zone secondo quanto previsto all'art. 2 dei territori comunali, prevede, per le sorgenti sonore fisse, i limiti di tollerabilità riportati nella tabella 3.6.

Zonizzazione	Limite diurno - $L_{Aeq}$	Limite notturno - $L_{Aeq}$
Tutto il territorio nazionale	70	60
Zona A (DM n.1444/68)	65	55
Zona B (DM n.1444/68)	60	50
Zona esclusivamente industriale	70	70

Tabella 3.6 – Limiti di accettabilità del livello sonoro equivalente per sorgenti sonore fisse.

Viene altresì previsto il criterio differenziale per le zone non esclusivamente industriali con le stesse modalità previste dall'art. 2.

L'art. 7, infine, precisa che gli allegati A e B (rispettivamente “definizioni” e “strumentazione e modalità di misura del rumore”) e le tabelle 1 e 2 (rappresentanti la suddivisione in classi del territorio e i valori massimi del livello sonoro equivalente per tali classi) fanno parte integrante del decreto.

### **3.10.2. Legge quadro sull'inquinamento acustico n. 447 del 26/10/95**

La legge quadro n. 447 del 26/10/95, entrata in vigore il 29 dicembre 1995, contiene i principi ispiratori alla lotta all'inquinamento acustico, ne individua le fonti di finanziamento ma demanda a dei decreti tecnici attuativi. La legge estende il proprio ambito di applicazione, rispetto a quanto fatto nel DPCM 1/3/91, che comunque è riconosciuto in tutta la sua validità, a tutte le sorgenti di rumore, comprese le sorgenti mobili terrestri ed aeree. Un aspetto molto importante cui si fa riferimento è quello del tecnico competente al quale il Comune affida il compito di effettuare le misurazioni di sorgenti fisse o mobili, di predisporre i piani di risanamento acustico e di svolgere attività di controllo sulla applicazione della riforma.

Entrando nello specifico, la legge toglie ogni dubbio interpretativo circa quali siano le sorgenti mobili definendo (art. 2 lettera c) come sorgenti fisse “le infrastrutture stradali, ferroviarie, aeroportuali, marittime, i parcheggi, le aree adibite alla movimentazione di merci, ad attività sportive e ricreative, i depositi di mezzi di trasporto di persone e di merci” e come sorgenti mobili tutte le altre. Pertanto saranno sorgenti mobili gli autoveicoli e i convogli ferroviari in movimento sulle relative infrastrutture.

Negli articoli 3, 4, 5, 6 vengono individuate rispettivamente le competenze dello Stato, delle Regioni, delle Province e dei Comuni.

All'articolo 7 comma 1 si precisa che il Piano Comunale di Risanamento acustico deve essere coordinato con il Piano Urbano del Traffico e, inoltre, nei

Comuni con popolazione superiore a 50000 abitanti, la Giunta Comunale è tenuta a presentare al Consiglio Comunale una relazione biennale sullo stato acustico del Comune.

I progetti sottoposti a V.I.A. (art. 8) devono essere redatti in conformità alle esigenze di tutela dall'inquinamento acustico delle popolazioni interessate. I soggetti titolari dei progetti, o di opere quali strade, autostrade, ferrovie, discoteche, impianti sportivi e ricreativi, ecc., predispongono, su richiesta dei Comuni, una relazione di impatto acustico relativa alla realizzazione o alla modifica dell'opera. L'articolo 9 evidenzia che, qualora esista una eccezionale e urgente necessità di tutela della salute pubblica, o dell'ambiente, il Presidente del Consiglio dei Ministri ha facoltà di interrompere i servizi pubblici essenziali, mentre il Sindaco, il Presidente della Provincia, il Presidente della Giunta Regionale, il Prefetto, il Ministro dell'Ambiente, possono adottare, come disposizione ai fini del contenimento, o dell'abbattimento, delle emissioni sonore, l'inibitoria parziale, o totale, di determinate attività.

Nell'articolo 10 vengono istituite varie sanzioni amministrative che, a seconda dei casi, possono raggiungere i 20 milioni; il 70% delle somme derivanti dall'applicazione delle sanzioni deve essere devoluto ai Comuni per il finanziamento dei Piani di Risanamento.

L'articolo 13 stabilisce che le Regioni hanno facoltà di concedere contributi ai Comuni e alle Province per l'organizzazione di un sistema di monitoraggio e di controllo, nonché per le misure previste dai Piani di Risanamento. Si precisa, inoltre (art. 14), che al Comune spettano la funzione del controllo relativamente alle emissioni prodotte dal traffico veicolare e dalle sorgenti fisse, da macchinari rumorosi per attività svolte all'aperto, ecc.

L'ambito applicativo della legge quadro è molto ampio, includendo le nozioni (art. 2) di ambiente abitativo e di ambiente esterno, di sorgenti di rumore fisse e mobili e stabilendo la distinzione tra valori limite di emissione e di immissione (assoluti e differenziali). Questa legge può essere considerata come un altro importante, ma non risolutivo, passo verso una efficace lotta all'inquinamento acustico ambientale poiché individua con precisione le responsabilità dei privati, degli Enti locali e del Governo in materia.

### **3.11. METODICHE DI ABBATTIMENTO DEL RUMORE**

Oltre alle cause dirette dell'inquinamento da rumore, quali la continua crescita in numero delle sorgenti sonore (a causa dell'incremento della motorizzazione),

ne esistono altre indirette, come, ad esempio, la tendenza a costruire edifici con caratteristiche non adeguate a contribuire ad un sufficiente abbattimento del livello sonoro, la continua espansione delle aree urbane, l'edificazione indiscriminata in zone ad alta densità abitativa, con conseguente addensamento delle sorgenti sonore.

Per tali ragioni occorre attuare strategie atte a controllare (tramite opportuni monitoraggi) e a ridurre (se si superano i limiti imposti dalla legge) la rumorosità ambientale; tali strategie, a seconda del fine, si classificano in due categorie:

- *interventi attivi*, finalizzati alla riduzione dell'emissione sonora delle sorgenti di rumore;
- *interventi passivi*, indirizzati ad ostacolare la propagazione del suono dalla sorgente al ricevitore.

### **3.11.1. Riduzione del rumore emesso dal veicolo**

Il rumore emesso da un veicolo è dovuto a numerose sorgenti (motore, sistema di aspirazione e scarico, trasmissione, pneumatici, ecc.) il cui contributo dipende dalle condizioni di marcia e dal tipo di veicolo, per cui la scelta di interventi atti a ridurre l'emissione sonora è condizionata da fattori legati alla natura del processo di fabbricazione dello stesso.

Per quanto riguarda il motore gli interventi possono essere orientati a modificare la risposta strutturale del propulsore alla eccitazione, oppure all'impiego di schermi e di incapsulamenti. Attraverso l'impiego di strutture più rigide per il motore e smorzando le vibrazioni dei numerosi carter (coppa olio, coperchio punterie, ecc.), è possibile ottenere una riduzione media di rumore di circa 3 dBA. La tecnica di incapsulare il motore con materiale fonoassorbente consente significative riduzioni del rumore dell'ordine di 10-15 dBA, ma comporta diversi problemi, quali aumento del peso del veicolo, difficoltà di scambio termico tra il motore e l'ambiente esterno, nonché una ridotta accessibilità al propulsore per la manutenzione. In alternativa possono adoperarsi schermi che isolano le zone più rumorose del motore.

Risulta indispensabile l'adozione di dispositivi di silenziamento per il sistema di aspirazione e scarico dei gas combusti all'esterno, che consentono di raggiungere riduzioni di rumore dell'ordine di 15-25 dBA per il sistema di scarico e di 10-15 dBA per quello di aspirazione.

Ulteriori riduzioni possono ottenersi effettuando periodiche revisioni della carrozzeria e messe a punto del motore.

Per quanto concerne i pneumatici, questi devono soddisfare alcuni requisiti al fine di garantire, al veicolo sul quale sono montati, sicurezza e comfort; tali qualità sono purtroppo in contraddizione tra loro: infatti, ad esempio, per ottenere una buona aderenza sul bagnato è preferibile avere una elevata macrotestitura, che consente un rapido smaltimento dell'acqua, ma che, al tempo stesso, è la responsabile principale del rumore da rotolamento. I pneumatici più silenziosi sono quelli a nervature longitudinali; se il battistrada, inoltre, è usurato il livello di rumorosità può aumentare fino a 10 dBA.

Una soluzione alternativa a quelle sopra elencate, che porterebbe ad una drastica riduzione dei livelli di rumore da traffico, specialmente in ambito urbano, potrebbe essere rappresentata dall'adozione di veicoli con motore elettrico.

### ***3.11.2. Regolamentazione del traffico veicolare***

Il livello del rumore da traffico stradale dipende, oltre che dalla rumorosità intrinseca di ciascun veicolo, anche da altri fattori legati alla composizione del flusso veicolare e alle caratteristiche geometrico-ambientali della strada su cui questo transita. Interventi mirati su tali fattori consentono di ottenere significative riduzioni del rumore in tempi relativamente brevi e costi non eccessivi.

Occorre tenere presente che la relazione tra il numero di veicoli in transito e il corrispondente livello di rumore è di tipo logaritmico: un dimezzamento del flusso veicolare comporta una riduzione di rumore pari a 3 dBA.

Inoltre, in merito alla composizione del flusso di veicoli, bisogna evidenziare che il rumore prodotto dai mezzi pesanti è di circa 9-10 dBA più alto di quello emesso dalle autovetture (normalmente un solo mezzo pesante genera un livello di rumore pari a quello di otto automobili). Tale differenza è più accentuata su strade in pendenza e in situazioni che comportano brusche e frequenti variazioni della velocità (semafori, incroci, traffico congestionato), mentre diminuisce all'aumentare della velocità.

È necessario, pertanto, contenere la percentuale di mezzi pesanti sia per la loro maggiore rumorosità intrinseca sia perché, marciando a velocità più basse rispetto agli altri veicoli, sono spesso causa di congestione. Qualora la percentuale di tali automezzi superi il 10% del complesso dei veicoli transitanti, risulta indispensabile agire in primo luogo su di essi se vogliono ottenersi considerevoli riduzioni del livello di rumore.

A tale scopo un efficace provvedimento potrebbe consistere nella deviazione dei veicoli pesanti su vie di circonvallazione o su percorsi alternativi, evitando,

almeno in certi periodi della giornata, gli attraversamenti del nucleo urbano; potrebbero essere, altresì, previsti divieti di transito durante le ore notturne o nelle giornate festive, deviazioni dalle zone a carattere esclusivamente residenziale, consentendone l'accesso solo ai residenti. Per le vie a traffico veloce, invece, potrebbero essere adottati sensi unici di marcia e la sincronizzazione dei semafori.

Un parametro da tenere sotto controllo è rappresentato dalla velocità media del flusso veicolare. È importante che essa non subisca, come di norma avviene nelle aree urbane, o in situazioni di congestione, variazioni rapide e frequenti, in quanto le accelerazioni e decelerazioni dei veicoli producono fluttuazioni del livello di rumore che influiscono negativamente sul disturbo indotto alla popolazione. A tal fine il provvedimento più ovvio potrebbe essere l'imposizione di limiti di velocità, da integrare, dove si ritenga necessario, con ostacoli artificiali che ne garantiscano il rispetto (ad esempio dossi artificiali di rallentamento).

Altri interventi di regolamentazione del traffico, infine, sono rappresentati dalla creazione di isole e vie pedonali, di piste ciclabili, di ampi parcheggi in prossimità delle zone con divieto di transito. Sarebbe auspicabile, ai fini di una efficace riduzione dei livelli di rumorosità, un utilizzo quanto più limitato possibile del mezzo proprio a favore dei mezzi di trasporto pubblico, o di veicoli elettrici, o, ancora, di velocipedi, il che contribuirebbe notevolmente anche alla mitigazione dell'inquinamento atmosferico.

### **3.11.3. Pavimentazione drenante - fonoassorbente**

Negli ultimi anni la tecnica della pavimentazione drenante-fonoassorbente si è andata sempre più sviluppando grazie soprattutto all'uso di bitumi modificati che hanno consentito di ottenere miscele bituminose caratterizzate da una struttura alveolare con elevata percentuale dei vuoti, senza, tuttavia, penalizzare le caratteristiche di resistenza del conglomerato stesso.

L'elevata porosità dello strato superficiale così realizzato consente un buon drenaggio delle acque che, permeando all'interno del manto su cui scorre il traffico, vengono convogliate nei pozzetti di raccolta tramite un piano di scorrimento impermeabile. Lo strato drenante, inoltre, grazie alla sua ridotta macrotessitura (si parla di "rugosità al negativo"), si comporta come setto fonoassorbente, in quanto le onde sonore penetrando all'interno dei pori vi si riflettono infinite volte trasformandosi in energia termica.

Dal punto di vista della efficacia i vuoti possono essere di tre tipi: vuoti *attivi*, intercomunicanti tra loro, permettono la raccolta e il drenaggio dell'acqua, vuoti

*semiattivi*, hanno la sola funzione di trattenere l'acqua, vuoti *inattivi*, non sono altro che le inclusioni d'aria non in contatto fra loro. Per ottenere una buona capacità drenante del manto di usura è necessario che la percentuale di vuoti attivi sia almeno pari al 20%, o più, e che gli inerti contengano un'alta percentuale di pietrischetto e una bassa percentuale di sabbia.

Lo strato superficiale drenante, a causa della sua struttura alveolare, presenta diversi problemi, fra cui la bassa resistenza nei confronti delle azioni generate dai carichi di traffico e la diminuzione della porosità per effetto dell'intasamento dei vuoti provocato dalle polveri e dalla compattazione dovuta al traffico.

Al primo inconveniente si è ovviato con l'utilizzo di bitumi modificati (bitume con aggiunta di polimeri, fibre o gomma) che hanno consentito di ottenere conglomerati bituminosi con una maggiore resistenza a fatica, a compressione e a trazione, a fessurazione, agli sgranamenti e all'invecchiamento, un migliore comportamento alle basse temperature ed una minore suscettività termica. Gli additivi utilizzati possono essere polimeri naturali (gomma, cellulosa, ecc.) o sintetici (prodotti di processi petrolchimici), ma i tipi maggiormente utilizzati sono gli elastomeri termoplastici SBS (Stirene-Butadiene-Stirene), i plastomeri EVA (Etilene-Vinile-Acetano) e i copolimeri EPB (Etilene-Propilene-Butadiene).

Per quanto concerne il secondo problema, esperienze effettuate in Francia hanno evidenziato che quanto più il traffico è leggero tanto più rapido e irreversibile è il fenomeno di intasamento del conglomerato bituminoso aperto, mentre nel caso di traffico intenso e pesante il rotolamento dei pneumatici, per l'effetto di pompaggio, alternando fasi di compressione e aspirazione, pulisce il manto d'usura anche in profondità (capacità autopulente dello strato superficiale). Tuttavia, per mantenere il più a lungo possibile la permeabilità, è opportuno programmare degli interventi di manutenzione appropriati consistenti, di solito, in iniezioni di acqua in pressione seguite da una potente aspirazione. Per limitare, invece, possibili fenomeni di saturazione, dovuti ad eventi atmosferici di particolare intensità, è stata proposta, e realizzata in alcune strade del centro di Firenze soggette a intenso traffico, una pavimentazione ottenuta dalla sovrapposizione di due strati drenanti con diverse composizioni granulometriche: una (inerte basaltico con pezzatura massima 4/6 miscelato con sabbie, filler calcareo e bitume modificato) per lo strato superiore in grado di svolgere le funzioni di filtro, l'altra (inerti poliedrici con pezzatura 10/16), caratterizzata da una maggiore capacità drenante, avente la funzione di collettore principale.

Il tappeto drenante - fonoassorbente, utilizzato con ottimi risultati sia in ambito autostradale che su strade urbane a traffico intenso, soddisfa i due requisiti fondamentali di sicurezza e comfort: sicurezza perché venendo eliminato il velo d'acqua sullo strato superficiale si riduce la nebulizzazione e si hanno minori spruzzi d'acqua, si ha un aumento della resistenza allo slittamento in caso di pioggia, con riduzione del rischio di aquaplaning, si evita l'abbagliamento da riflesso sulla pavimentazione bagnata, con una conseguente migliore visibilità notturna; comfort in quanto, oltre alla riduzione del rumore di rotolamento, a causa dell'assorbimento delle vibrazioni, si evita il fenomeno delle riflessioni multiple (i cosiddetti riverberi) fra pneumatici e strada, o fra il pianale del veicolo e la pavimentazione, e l'energia che penetra nel conglomerato si dissipa gradualmente per rifrazione fra i granuli di pietrisco garantendo, in definitiva, una riduzione media della rumorosità di circa 3-4 dBA rispetto al tradizionale manto in conglomerato bituminoso chiuso.

In commercio vi sono dei conglomerati bituminosi confezionati con inerti di argilla espansa, in percentuale compresa tra il 15-20 %, che permettono un abbattimento del rumore di circa 4-5 dBA rispetto ad una miscela che ne risulti priva. L'argilla espansa viene anche impiegata come componente del calcestruzzo per la realizzazione di diversi manufatti fra cui le barriere fonoassorbenti.

#### **3.11.4. Le barriere antirumore artificiali**

L'adozione di barriere antirumore costituisce l'intervento tecnico più efficace e più comune per la difesa dell'ambiente dal rumore, prescindendo dagli interventi di tipo amministrativo quali, ad esempio, limitazioni di velocità, deviazioni del traffico, vincoli di orari, ecc.

Esistono due principali tipologie di barriere: *fonoisolanti*, muri compatti che non vengono attraversati dalle onde sonore, e *fonoassorbenti*, pareti sottili aventi la faccia rivolta verso la sorgente forata e l'altra chiusa, all'interno delle quali vi è un materiale molto poroso (come la lana di vetro), che costringe l'onda acustica a subire tante riflessioni trasformandosi in calore.

Le capacità di fonoisolamento e di fonoassorbimento sono in antitesi tra loro, in quanto strutturalmente un materiale risulta tanto più isolante quanto maggiore è la sua massa; di conseguenza, un buon isolante è un materiale ad alta densità, come il ferro, il calcestruzzo, il legno, mentre un materiale assorbente è un materiale a bassa densità e poroso, poiché, come detto precedentemente, deve consentire all'energia sonora di trasformarsi in energia termica e disperdersi tra le



sue fibre. Quindi le proprietà fonoisolanti e fonoassorbenti di una barriera acustica sono intrinseche delle stesse barriere e non dipendono dalla geometria del luogo in cui vengono installate.

A tali manufatti non sono richieste solo protezioni acustiche, ma anche una buona resistenza alla corrosione, elevate caratteristiche meccaniche, una ridotta riflessione luminosa e un aspetto estetico che ne permetta l'integrazione nel paesaggio.

Vi sono tipologie realizzate con materiale unico prevalentemente fonoisolante, quali legno, cemento, polimetilmetacrilato (Pmma), e altre con proprietà fonoisolanti e fonoassorbenti, realizzate in lamiera. Tali tipologie possono essere utilizzate singolarmente o accoppiate secondo varie combinazioni, come, ad esempio, cemento + lamiera + Pmma; cemento + Pmma; cemento + lamiera; lamiera + Pmma. Il pannello di base in cemento assicura buone caratteristiche meccaniche e buona resistenza alla corrosione. L'impiego del Pmma si sta sempre più diffondendo grazie alla sua caratteristica di trasparenza, offrendo a chi viaggia una minore sensazione di chiuso. I pannelli in lamiera di alluminio stanno soppiantando quelli in lamiera zincata per un più lento processo di corrosione a causa dell'esposizione agli agenti atmosferici. Alcune delle barriere acustiche sono realizzate in plastica riciclata, proveniente per metà da rifiuti industriali e per l'altra metà da rifiuti domestici (specialmente bottiglie); il prodotto finale è un pannello con elevate prestazioni fonoisolanti e fonassorbenti: il lato rivolto verso la fonte di rumore è traforato con una serie di buchi tondi, in un rapporto vuoto per pieno del 43%, che permettono di ottenere elevate prestazioni di isolamento acustico, mentre il materiale fonoassorbente è costituito da un pannello in lana di roccia di spessore idoneo. Tali pannelli sono imputrescibili, inerti agli agenti chimici e atmosferici e resistenti al fuoco, agli shock termici e meccanici; sono, inoltre, trattati con i raggi U.V., per garantire la tenuta del colore.

Un'altra tipologia di barriera, che risponde bene ai criteri di inserimento ambientale, è quella ottenuta per integrazione tra elementi costruiti dall'uomo e le piante; si parla in tale caso di *barriere miste* o *biomuri*. Tra queste trova posto il cosiddetto "mw - soundkiller" costituito da due reticolati d'acciaio (rete elettrosaldata) zincato a fuoco su pali di 60 cm che li mantengono separati, che formano una parete ad alto grado di assorbimento acustico. Sul terriccio col quale si riempie lo spazio tra le grate verticali viene impiantata della vegetazione coprente, che si riproduca con facilità e sempreverde, in genere l'acer campestre, il frassino, l'edera, il biancospino, ecc.

Questo tipo di parete, che occupa soltanto 60 cm in larghezza e può arrivare ad una altezza di 8 m, risulta molto utile dove vi siano problemi di spazio, come in centro città o sulle autostrade. Dovranno, naturalmente, essere previsti, al fine di mantenere efficiente la protezione, piani di manutenzione annuale che comprendano interventi quali nuove piantagioni, potatura, sarchiatura, controlli.

Nella valutazione dei benefici ottenibili con una barriera antirumore è fondamentale calcolare l'attenuazione in relazione alla distanza dell'area da proteggere, funzione principalmente dell'altezza utile dello schermo tenendo conto che avvicinando la protezione alla sorgente si ottiene un maggior rendimento.

L'energia sonora emessa dai veicoli in movimento si propaga, nel caso di una strada con elevato flusso di traffico, sotto forma di onde cilindriche che hanno per asse quello della strada stessa. La barriera costituisce un ostacolo alla propagazione del suono verso il ricettore, riflettendo buona parte dell'energia indietro; altra parte scavalca la protezione (energia diffratta) oppure la attraversa se l'isolamento del manufatto non è adeguato (energia diretta).

L'aliquota di energia sonora che scavalca la barriera, o che passa ai suoi lati se è di lunghezza non adeguata, è legata alle dimensioni fisiche del manufatto (altezza rispetto al piano stradale, spessore), nonché ad altre grandezze dimensionali (distanza dalla sorgente, distanza dal punto di ricezione, altezza del punto di ricezione rispetto al piano stradale), mentre risulta indipendente dalle caratteristiche acustiche di isolamento. Qualora vi siano edifici su entrambi i lati della strada è importante conoscere la quantità di energia sonora che viene riflessa indietro verso la sorgente e, al fine di ottenere una consistente riduzione di tale aliquota di energia, si rende fonassorbente la faccia del pannello rivolta verso la sorgente.

L'effetto schermante delle barriere, riferendosi alla sola energia diffratta dal bordo superiore del manufatto e nel caso di sorgente puntiforme, può essere opportunamente calcolato. Nelle situazioni più comuni, in pratica, si calcolano riduzioni del rumore comprese tra 2 e 20 dBA.

Il primo elemento da prendere in considerazione ai fini del calcolo effettivo di una barriera è l'altezza minima del manufatto sulla congiungente centro strada-massima altezza dell'edificio da proteggere, ottenibile dalla relazione:

$$h_{\min} = \frac{H}{e} \cdot (0.5L + B) \text{ m}$$

dove (Fig. 3.9):

- H = distanza tra il piano stradale e la sommità dell'edificio disturbato;

- $e$  = distanza tra la mezzeria della strada e la parete più vicina dell'edificio disturbato;
- $L$  = larghezza della strada;
- $B$  = distanza tra il ciglio stradale e la barriera antirumore.

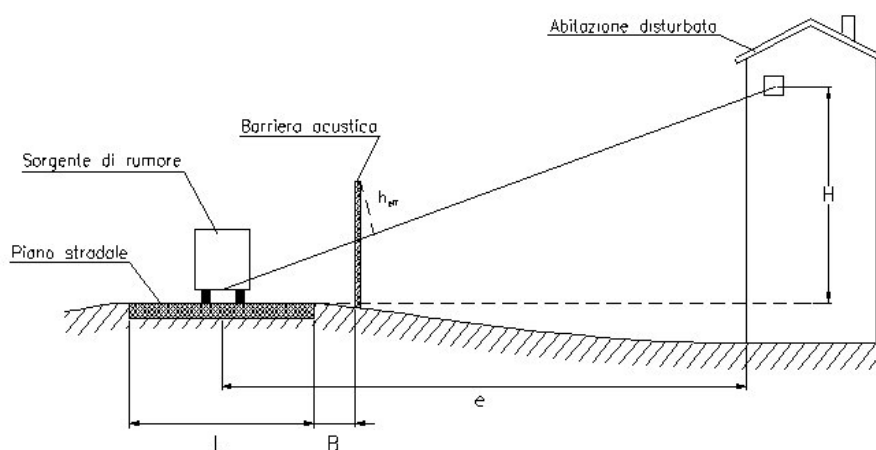


Figura 3.9 – Schema per il calcolo dell'altezza di una barriera antirumore.

Successivamente, noto il valore di  $e$  ed imponendo l'entità della riduzione del livello di rumore desiderata ( $\Delta L_m$ ), è possibile calcolare, tramite un opportuno diagramma avente in ascisse  $h_{eff}$  ed in ordinate  $\Delta L_m$ , l'altezza effettiva ( $h_{eff}$ ) da aggiungere a quella minima ( $h_{min}$ ) per ottenere l'altezza totale ( $h_t$ ). Per ricavare invece la lunghezza minima della barriera si ricorre ad un altro diagramma dove, partendo da dati noti (sempre  $\Delta L_m$  ed  $e$ ), si può leggere sulle ordinate il valore in metri della lunghezza minima ( $d_{min}$ ) ricercata.

Concludendo, perché una barriera antirumore sia efficace essa deve intercettare la congiungente tra sorgente di rumore e sito disturbato.

### 3.11.5. Le barriere vegetali

Come più volte accennato nei precedenti paragrafi, l'onda sonora viene smorzata, disperde cioè la sua energia, quando è costretta ad un cammino irto di ostacoli, dove subisce una serie di urti, degradandosi in calore. Questo percorso di ostacoli può essere costituito dai canalicoli delle porosità superficiali delle pavimentazioni drenanti, dai fori e dalle cavità delle barriere artificiali, e anche dalle superfici delle foglie dei rami e rametti della vegetazione.

Nel caso del rumore stradale le frequenze presenti sono molteplici e la sorgente non può considerarsi puntiforme, per cui la protezione vegetale non sempre risulta efficace in quanto, spesso, difetta di continuità nello spazio e perché la sua struttura può cambiare nel tempo a causa delle diversità che hanno le essenze nel corso dell'anno.

Le barriere vegetali hanno però altri pregi nei confronti del miglioramento ambientale sia dal punto di vista estetico che della stabilità dei terreni; inoltre, si hanno anche benefici legati all'assorbimento di particolari sostanze inquinanti prodotte dal traffico.

In ogni caso, con le barriere vegetali si può arrivare ad abbattimenti di 5-10 dBA a seconda della specie, dell'altezza, della densità e della posizione della barriera; a tal proposito buoni risultati sono stati ottenuti combinando alberi e cespugli messi a dimora in fasce di 6-7 m di profondità, parallelamente alla strada.

### **3.12. I MODELLI DI PREVISIONE DEL RUMORE**

Gli indici dei livelli di rumorosità precedentemente menzionati rappresentano degli efficaci mezzi per la valutazione del disturbo generato dal traffico veicolare e possono essere determinati ricorrendo a procedure strumentali più o meno complesse. Le metodiche strumentali costituiscono importanti mezzi di verifica di una situazione di fatto, ma è desiderabile, nel campo della pianificazione urbanistica e territoriale, poter disporre di criteri che consentano una predeterminazione dei livelli di rumore causati dal traffico stradale in base ad elementi che possono essere previsti o imposti in sede di programmazione o di progettazione. Pertanto, come in molte altre applicazioni ingegneristiche, si ricorre a modelli matematici che simulano l'ambiente stradale, lo spazio circostante, la produzione e lo smorzamento del rumore.

Di questi modelli, basati sia su formule di regressione che sull'integrazione dei contributi energetici dovuti a singoli eventi sonori, ne sono stati messi a punto parecchi, ciascuno con sue caratteristiche di validità (per ambiente urbano ed extraurbano, per tipo di traffico, ecc.).

I modelli di previsione dei livelli di rumore, sotto elencati, sono stati scelti fra quelli disponibili per la loro maggiore capacità di adattamento ai vari casi e la semplicità di applicazione; essi risultano così denominati:

- A. Metodo di Burgess;
- B. Metodo di Griffiths e Langdon;
- C. Metodo del CNR – Istituto di Acustica “O.M. Corbino”;

- D. Metodo del C.S.T.B.;
- E. Metodo dell'EMPA;
- F. Metodo di Cosa e Nicoli.

### 3.12.1. Metodo di Burgess

Il metodo di Burgess tiene conto di parametri caratterizzanti il traffico veicolare (n° di veicoli/ora che passano attraverso il sito di misura, composizione del traffico), nonché della distanza fra la sorgente di rumore e il ricevitore. La formula è stata applicata per la prima volta a Sydney, in Australia, ed è caratterizzata dalla seguente espressione:

$$L_{eq} = 55.5 + 10.2 \cdot \log Q + 0.3 \cdot p - 19.3 \cdot \log d \quad \text{dBA}$$

dove:

- Q = flusso orario (veic/h);
- p = percentuale di veicoli pesanti;
- d = distanza (in metri) fra il centro della carreggiata e il punto di osservazione posto sul ciglio.

Il termine 55.5, che compare nella formula, rappresenta il rumore di fondo nella città di Sydney.

### 3.12.2. Metodo di Griffiths e Langdon

La formula di Griffiths e Langdon mette in relazione il livello sonoro medio  $L_{50}$  con una funzione del clima di rumore ( $L_{10}$ - $L_{90}$ ), secondo l'espressione che segue:

$$L_{eq} = L_{50} + 0.018 \cdot (L_{10} - L_{90})^2 \quad \text{dBA}$$

I livelli statistici cumulativi sono stati calcolati utilizzando le formule ricavate sperimentalmente da Benedetto e Spagnolo attraverso un'indagine eseguita a Torino nel 1977:

$$L_{10} = 61 + 8.4 \cdot \log Q + 0.15 \cdot p - 11.5 \cdot \log d \quad \text{dBA}$$

$$L_{50} = 44.8 + 10.8 \cdot \log Q + 0.12 \cdot p - 9.6 \cdot \log d \quad \text{dBA}$$

$$L_{90} = 39.1 + 10.5 \cdot \log Q + 0.06 \cdot p - 1.3 \cdot \log d \quad \text{dBA}$$

dove Q, p, d assumono lo stesso significato che nella formula di Burgess.

Le espressioni di cui sopra sono valide per condizioni di traffico fluente ( $500 < Q < 5000$  veic/h) e per una percentuale di veicoli pesanti non superiore al 35%.

### 3.12.3. Metodo del CNR – Istituto di Acustica “O.M. Corbino”

Tale metodo si basa sull'espressione di Cannelli, Gluck e Santoboni, che prende in considerazione i parametri geometrico-ambientali e di traffico del sito.

$$L_{eq} = 35.1 + 10 \log(Q_l + 8Q_p) + 10 \log\left(\frac{25}{d}\right) + \Delta L_v + \Delta L_f + \Delta L_b + \Delta L_s + \Delta L_g + \Delta L_{vb} \quad \text{dBA}$$

dove:

- ◆  $Q_{l0}$  = flusso orario di veicoli leggeri (autovetture, veicoli commerciali leggeri e veicoli a due ruote);
- ◆  $Q_p$  = flusso orario di veicoli pesanti (veicoli da trasporto pubblico e veicoli commerciali di peso superiore a 4.8 tonn);
- ◆  $d$  = distanza fra il punto di osservazione e la mezzeria stradale (in metri);
- ◆  $\Delta L_v$  = parametro correttivo che tiene conto della velocità media del flusso del traffico (Tab. 3.7);
- ◆  $\Delta L_f$  = parametro di correzione determinato dalla riflessione del rumore sulla facciata vicina al punto di osservazione, pari a 2.5 dBA;
- ◆  $\Delta L_b$  = parametro di correzione determinato dalla riflessione del rumore sulla facciata opposta al punto di osservazione, pari a 1.5 dBA;
- ◆  $\Delta L_s$  = parametro che tiene conto del tipo di manto stradale (Tab. 3.8);
- ◆  $\Delta L_g$  = parametro correttivo relativo alla pendenza longitudinale (Tab. 3.9);
- ◆  $\Delta L_{vb}$  = parametro che si applica nei casi limite di traffico, come in presenza di semafori e velocità di flusso assai bassa (Tab. 3.10).

Velocità media del flusso di traffico (km/h)	$\Delta L_v$ (dBA)
30 – 50	0
60	+1.0
70	+2.0
80	+3.0
100	+4.0

Tabella 3.7 – Correzione per le diverse velocità medie del deflusso.

Tipo di manto stradale	$\Delta L_s$ (dBA)
Conglomerato bituminoso liscio	-0.5
Conglomerato bituminoso ruvido	0
Cemento	+1.5
Manto lastricato scabro	+4.0

Tabella 3.8 – Correzione per il tipo di manto stradale.

Pendenza (%)	$\Delta L_g$ (dBA)
5	0
6	+0.6
7	+1.2
8	+1.8
9	+2.4
10	+3.0
Per ogni ulteriore unità percentuale	+0.6

Tabella 3.9 – Correzione per la pendenza longitudinale della strada.

Situazione di traffico	$\Delta L_{vb}$ (dBA)
In prossimità di semafori	+1.0
Velocità del flusso veicolare < 30 km/h	-1.5

Tabella 3.10 – Correzione per casi limite di traffico.

In questo metodo, a differenza di quelli sopra esaminati, il traffico pesante è trattato a parte, e ad ogni veicolo pesante si attribuisce il valore di otto veicoli leggeri, tenendo così in conto la differente rumorosità delle due categorie di automezzi. Tale coefficiente di correlazione è stato ottenuto sperimentalmente confrontando il  $L_{eq}$  medio dei veicoli pesanti con il  $L_{eq}$  medio di quelli leggeri; la differenza fra i due  $L_{eq,m}$  è risultata pari a 8,9 dBA, valore che in termini energetici corrisponde a circa otto volte l'energia unitaria media emessa da un veicolo leggero.

Con una procedura analoga (tarata in corrispondenza della cintura urbana della città di Catania) è stato possibile differenziare il contributo all'inquinamento acustico dovuto ai veicoli a due ruote (ciclomotori, motocicli, ecc.). In definitiva, si è visto come, in funzione della velocità di marcia, vari significativamente il coefficiente di equivalenza tra mezzi leggeri e mezzi a due ruote. In particolare, per velocità medie di marcia inferiori a 40 km/h, tale coefficiente risulta pari a 5, per poi assumere un valore di 10 per velocità superiori. Pertanto, se indichiamo con  $Q_m$  il flusso orario di veicoli a due ruote, possiamo dedurre le due seguenti espressioni modificate del modello del CNR:

$$L_{eq} = 35.1 + 10 \cdot \log(Q_l + 5 \cdot Q_m + 8 \cdot Q_p) + 10 \cdot \log\left(\frac{25}{d}\right) + \Delta L_v + \Delta L_f + \Delta L_b + \Delta L_s + \Delta L_g + \Delta L_{vb}$$

per  $V < 40$  km/h

$$L_{eq} = 35.1 + 10 \cdot \log(Q_1 + 10 \cdot Q_m + 8 \cdot Q_p) + 10 \cdot \log\left(\frac{25}{d}\right) + \Delta L_v + \Delta L_f + \Delta L_b + \Delta L_s + \Delta L_g + \Delta L_{vb}$$

per  $V > 40$  km/h.

#### 3.12.4. Metodo del C.S.T.B.

Il Centre Scientifique et Technique des Batiments francese suggerisce una formula di previsione del livello continuo equivalente basata esclusivamente sui valori del livello sonoro medio  $L_{50}$  ed avente la seguente espressione:

$$L_{eq} = 0.65 \cdot L_{50} + 28.8 \quad \text{dBA}$$

Il valore di  $L_{50}$ , calcolato tenendo conto solo della portata oraria, è dato da:

$$L_{50} = 11.9 \cdot \log Q + 31.4 \quad \text{dBA}$$

per strade urbane e per autostrade con flussi inferiori ai 1000 veic/h;

$$L_{50} = 15.5 \cdot \log Q - 10 \cdot \log L + 36 \quad \text{dBA}$$

per strade urbane fiancheggiate da edifici elevati (sezioni ad "U"), dove  $L$  è la larghezza della strada in corrispondenza del sito di misura, espressa in metri.

#### 3.12.5. Metodo dell'EMPA

Il metodo dell'EMPA (Normativa Svizzera) tiene conto, oltre che dei parametri normalmente considerati (composizione del traffico e distanza tra sorgente e ricettore), anche della velocità media dei veicoli. L'equazione che consente di ottenere il livello sonoro equivalente è di seguito riportata:

$$L_{eq} = 42 + 10 \cdot \log \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{V}{50} \right)^3 \right] \cdot \left[ 1 + 20 \cdot p \cdot \left( 1 - \frac{V}{150} \right) \right] \right\} + 10 \cdot \log Q - 10 \cdot \log d \quad \text{dBA}$$

dove:

- ◆  $Q$  = flusso veicolare (veic/h);
- ◆  $p$  = percentuale di mezzi pesanti;
- ◆  $d$  = distanza sorgente ricevitore (m);
- ◆  $V$  = velocità media del deflusso (km/h).

#### 3.12.6. Metodo di Cosa e Nicoli

Il criterio di predeterminazione del livello continuo equivalente elaborato da Cosa e Nicoli, si basa sulla commisurazione del contributo energetico dei singoli eventi sonori che si verificano in un intervallo di tempo  $T$ , ed utilizza come elemento di calcolo il SEL (Single Event Level).



Ipotizzando una suddivisione dei veicoli in categorie omogenee relativamente alle emissioni acustiche e sulla base dei corrispondenti valori mediati di SEL, è possibile calcolare il  $L_{eq}$  derivante dal contributo sonoro di differenti categorie di mezzi di trasporto, attraverso l'espressione:

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^n n_i 10^{0.1 \cdot SEL_i} \quad \text{dBA}$$

dove  $n_i$  rappresenta il numero di veicoli della  $i$ -esima categoria che transitano davanti al punto di osservazione durante l'intervallo di tempo  $T$  considerato.

Per quanto concerne i valori mediati di SEL, Cosa e Nicoli hanno utilizzato i dati da loro rilevati nella città di Roma attraverso un'indagine acustica, mentre altri autori hanno proposto differenti espressioni di SEL medio, riferite a tre categorie di veicoli, secondo quanto segue:

- *per veicoli leggeri (motocicli e ciclomotori):*

$$SEL = 79.2 - 6.7 \cdot \log \left( \frac{L}{H} \right) \quad \text{dBA} \quad \text{con } L/H \leq 1.5;$$

- *per veicoli medi (autovetture):*

$$SEL = 77 - 5.7 \cdot \log \left( \frac{L}{H} \right) \quad \text{dBA} \quad \text{con } L/H \leq 1.5;$$

- *per veicoli pesanti (veicoli industriali leggeri e pesanti):*

$$SEL = 87.3 - 6.9 \cdot \log \left( \frac{L}{H} \right) \quad \text{dBA} \quad \text{con } L/H \leq 2.5.$$

dove:

- $L$  = distanza, in metri, fra gli edifici frontistanti (sezioni ad "U"), oppure valore pari al doppio della distanza fra la mezzeria della carreggiata e il fabbricato posto su un solo lato (sezioni ad "L"), oppure larghezza della strada (sezioni aperte, cioè assenza di edifici);
- $H$  = altezza dell'edificio più basso, rilevata in corrispondenza del punto di misura, in metri.

Per valori di  $L/H$  superiori ai limiti sopra citati, il valore di SEL è rispettivamente di 79.2 dBA per i veicoli leggeri, 77 dBA per quelli medi e 87.3 dBA per quelli pesanti.

Riassumiamo in un'unica tabella (Tab. 3.11) le espressioni analitiche dei modelli matematici esaminati.

A	BURGESS	$L_{eq} = 55.5 + 10.2 \cdot \log Q + 0.3 \cdot p - 19.3 \cdot \log d$
B	GRIFFITHS E LANGDON	$L_{eq} = L_{50} + 0.018 \cdot (L_{10} - L_{90})^2$ $L_{10} = 61 + 8.4 \cdot \log Q + 0.15 \cdot p - 11.5 \cdot \log d$ $L_{50} = 44.8 + 10.8 \cdot \log Q + 0.12 \cdot p - 9.6 \cdot \log d$ $L_{90} = 39.1 + 10.5 \log Q + 0.06p - 1.3 \log d$
C	CNR	$L_{eq} = 35.1 + 10 \cdot \log(Q_1 + 5 \cdot Q_m + 8 \cdot Q_p) + 10 \cdot \log\left(\frac{25}{d}\right) + \Delta L_v + \Delta L_r + \Delta L_b + \Delta L_s + \Delta L_g + \Delta L_{vb}$ per $V < 40$ km/h $L_{eq} = 35.1 + 10 \cdot \log(Q_1 + 10 \cdot Q_m + 8 \cdot Q_p) + 10 \cdot \log\left(\frac{25}{d}\right) + \Delta L_v + \Delta L_r + \Delta L_b + \Delta L_s + \Delta L_g + \Delta L_{vb}$ per $V > 40$ km/h
D	CSTB	$L_{eq} = 0.65 \cdot L_{50} + 28.8$ $L_{50} = 11.9 \cdot \log Q + 31.4$ (strade ad "L") $L_{50} = 15.5 \cdot \log Q - 10 \cdot \log L + 36$ (strade ad "U")
E	EMPA	$L_{eq} = 42 + 10 \cdot \log \left[ \left[ 1 + \left( \frac{V}{50} \right)^3 \right] \cdot \left[ 1 + 20 \cdot p \cdot \left( 1 - \frac{V}{150} \right) \right] \right] + 10 \cdot \log Q - 10 \cdot \log d$
F	COSA E NICOLI	$L_{eq} = 10 \cdot \log \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n n_i \cdot 10^{0.1SEL_i}$ $SEL = 77 - 5.7 \cdot \log\left(\frac{L}{H}\right)$ (veicoli leggeri - $L/H \leq 1.5$ ) $SEL = 87.3 - 6.9 \cdot \log\left(\frac{L}{H}\right)$ (veicoli pesanti - $L/H \leq 2.5$ )
<p>NOTA: Q = flusso (veic/h); Q<sub>1</sub> = flusso leggero (veic/h); Q<sub>p</sub> = flusso pesante (veic/h); Q<sub>m</sub> = flusso veicoli a due ruote; p = % veicoli pesanti; d = distanza sorgente-ricevitore (m); V = velocità media (km/h); ΔL<sub>v</sub>, ΔL<sub>r</sub>, ΔL<sub>b</sub>, ΔL<sub>s</sub>, ΔL<sub>g</sub>, ΔL<sub>vb</sub> = parametri correttivi che dipendono da: velocità, riflessione del suono, manto stradale, pendenza della strada, casi limite di traffico; n<sub>i</sub> = n° veicoli della i-esima categoria nell'intervallo di tempo considerato; L = larghezza strada (m); H = altezza dell'edificio più basso (m).</p>		

Tabella 3.11 – Modelli previsionali esaminati.

### 3.13. RUMORE PRODOTTO DAI MEZZI DI TRASPORTO SU ROTAIA

La causa principale del rumore dei mezzi di trasporto su rotaia, sulla maggior parte del campo di velocità è l'interazione tra le ruote ed il binario.

La principale sorgente di rumore è localizzabile nella zona (ellisse di Hertz) in cui avviene l'interazione ruota – rotaia e nella quale viene rilasciata l'energia accumulata a seguito della deformazione elastica dei due sistemi a contatto. Il rilascio di tale energia innesca vibrazioni meccaniche che, trasferite al mezzo

aereo circostante, danno luogo ad onde sonore. Il rumore di rotolamento è poi incrementato dalla rugosità (microdifetti) delle superfici a contatto e dall'eventuale presenza di deformazioni locali (macrodifetti): *sfaccettature* della superficie delle ruote e *marezzatura* delle rotaie (Fig. 3.10).

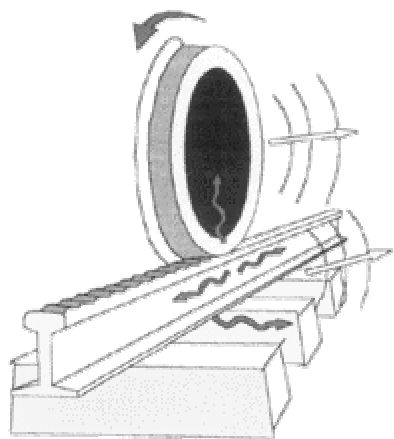


Figura 3.10 – Propagazione del rumore e delle vibrazioni generati dal contatto ruota-rotaia.

Bassi valori di rugosità delle ruote e dei binari sono mantenuti da macchine speciali di molatura delle ruote e di rettifica dei binari; si tratta di accorgimenti tecnici tendenti ad evitare valori di rugosità eccessivamente elevati, i quali produrrebbero livelli sonori ponderati A sostanzialmente più elevati.

In riferimento alle caratteristiche di rumorosità legate al contatto ruota – binario, la tabella 3.12 mette in evidenza gli effetti del tipo e della condizione delle ruote e delle rotaie a lato di un binario saldato continuo (privo di giunzioni).

Con riferimento al caso dei binari saldati, occorre poi notare come esista in letteratura una relazione analitica, ottenuta sperimentalmente, che consente di valutare il livello sonoro equivalente ponderato A di un convoglio – passeggeri in funzione della velocità:

$$L_A = 74 + 30 \cdot \log_{10} \frac{V}{V_0} \quad \text{dB(A)}$$

dove  $V$  è la velocità del convoglio e  $V_0$  è una velocità di riferimento il cui valore si assume pari a 60 km/h.

I valori di  $L_A$  direttamente valutabili sul campo e poi normalizzati (cioè rapportati ad uno scenario in cui il treno ha una lunghezza che supera di 3 volte la

distanza di misura mentre la distanza di misura standard è pari a 30 m dalla linea centrale del binario) ricadono nel 90 % dei casi nel campo di esistenza definito dalla relazione precedente con una tolleranza di  $\pm 6$  dB.

Condizione più rumorosa	Condizione meno rumorosa	Valore tipico del $\Delta L_{eq}$ (differenza di livello sonoro equivalente tra la condizione più rumorosa e la corrispettiva meno rumorosa)
Rotaia saldata rugosa	Rotaia saldata liscia	4 dB(A)
Ruote rugose	Ruote lisce	5 dB(A)
Rotaia ondulata	Rotaia non ondulata	10 dB(A)
Ruote con appiattimenti	Ruote veramente lisce	12 dB(A)
Rotaie imbullonate: (a) Carrozze passeggeri (b) Vagoni merci <sup>(1)</sup> (c) Vagoni merci <sup>(2)</sup>	Rotaie saldate: (a) Carrozze passeggeri (b) Vagoni merci <sup>(1)</sup> (c) Vagoni merci <sup>(2)</sup>	7 dB(A) 2 dB(A) 6 dB(A)
<sup>(1)</sup> binario principale <sup>(2)</sup> binario secondario		
Scambio	Senza scambio	6 dB(A)
Ruote normali	Ruote con trattamento di smorzamento viscoelastico	1 dB(A)
Ruote normali	Ruote con trattamento di smorzamento ad anello elastico	1 dB(A)
Ruote comuni	Ruote provviste di corone resilienti	2 dB(A)

Tabella 3.12 - Effetti delle caratteristiche di ruote e di rotaie sul rumore a lato di un binario diritto.

Nel caso di binari a giunzioni bullonate è stata ricavata un'altra relazione, per la quale possono ripetersi considerazioni del tutto analoghe a quelle relative al caso di binari saldati:

$$L_A = 81 + 30 \cdot \log_{10} \frac{V}{V_0} \quad \text{dB(A)}$$

Accanto alla sorgente primaria, si considerano quelle secondarie e occasionali.

Alla prima categoria di sorgenti impattanti è riconducibile il rumore proprio dei motori a trazione, degli apparecchi ausiliari di raffreddamento (ventilatori), il

rumore di scarico dei gas combusti (nel caso di trazione diesel) e il rumore di strisciamento dei pantografi sulla linea aerea per la captazione della corrente (nel caso di trazione elettrica).

Il rumore aerodinamico dovuto al moto del veicolo non contribuisce in modo significativo al rumore che si avverte vicino al binario per vetture rivestite con materiale assorbente a velocità minori di 240 km/h; può essere un fattore importante per velocità più elevate.

Alle sorgenti occasionali è riconducibile il rumore di tipo impulsivo generato durante il passaggio sui giunti di rotaia e su scambi e incroci, e il rumore originato durante il moto in curve di raggio stretto e durante l'azione di frenatura.

Il rumore principale prodotto dalle carrozze che viaggiano su binari curvi con raggio minore di 100 m è uno stridio dovuto, essenzialmente, allo scorrimento (che si aggiunge al rotolamento) delle ruote sui binari <sup>(1)</sup>.

I fattori che influenzano la generazione dello stridio comprendono il raggio della curva, la velocità del veicolo, la geometria e la rigidità del vagone, lo smorzamento della ruota e le caratteristiche d'attrito delle superfici a contatto.

Il rumore emesso da un treno in movimento ha un'elevata direttività, risulta infatti quasi tutto contenuto all'interno di un cono con asse ortogonale al binario (emissione di dipolo). In pratica si considera che la singola sorgente sonora (corrispondente con la zona di contatto ruota – rotaia) si comporta come un dipolo acustico con angolo di apertura di 60°.

Il rumore originato dal transito dei rotabili ferroviari, che si propaga all'aperto attraverso l'atmosfera, decresce, in genere, di intensità all'aumentare della distanza tra sorgente e ricettore.

---

<sup>(1)</sup> Lo scorrimento avviene per i seguenti motivi:

- Una carrozza convenzionale mantiene i propri assi paralleli, pertanto, in curva, le ruote sono forzate a scorrere perpendicolarmente alla direzione del rotolamento.
- Nel corso della curva la ruota esterna compie un "cammino" maggiore di quello effettuato dall'interna, ma le ruote rotolano lungo la stessa distanza perchè sono collegate al medesimo asse; la differenza è costituita dallo scorrimento della ruota parallelo alla direzione del rotolamento.
- Una brusca frenata o accelerazione può provocare lo scorrimento anche sul binario diritto.
- Il bordino della ruota tocca il binario allorché la ruota è posizionata di sbieco rispetto ad esso; si può raggiungere questa inclinazione nelle curve brusche.
- Una rotaia con funzione di controllo viene a volte installata sulle curve vicino alla rotaia interna. Essa aiuta a guidare la vettura lungo la curva facendo pressione sulle facce delle ruote verso il centro della curva; in questo modo si produce strofinio.

Il processo di attenuazione dei livelli sonori con la distanza è dovuto a diversi fattori:

- divergenza geometrica delle onde acustiche;
- assorbimento dell'aria;
- assorbimento del suolo.

Il primo fattore, sempre presente, è connesso al fatto che con l'allontanarsi del punto di ricezione dalla sorgente aumenta la superficie dell'onda su cui si va a distribuire l'energia acustica emessa dal mezzo.

L'assorbimento dell'aria è una funzione piuttosto complessa della frequenza e della distanza sorgente – ricevitore; dipende inoltre dalla temperatura e dall'umidità relativa dell'atmosfera.

La presenza di vento costituisce un'azione perturbatrice sulla propagazione sonora in modo tale che la ricezione in un punto può essere favorita od ostacolata a seconda che ci si trovi sottovento o sopravvento. Tale comportamento è dovuto al fatto che in ogni punto della superficie d'onda la perturbazione si trasmette con una velocità che è la risultante vettoriale della velocità di propagazione in aria calma e della velocità del vento nel punto considerato.

Un comportamento simile a quello del vento lo produce il gradiente di temperatura. Un gradiente negativo di temperatura determina un incurvamento dei raggi sonori verso il suolo, al contrario un gradiente positivo di temperatura produce l'effetto contrario (Fig. 3.11).

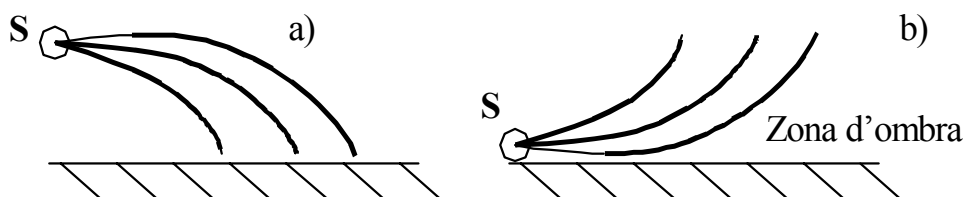


Figura 3.11 - Rifrazione del suono per propagazione sottovento o in condizioni di gradiente termico negativo (caso a) e per propagazione sopravvento o in condizioni di gradiente termico positivo (caso b).

L'attenuazione dei livelli sonori correlata alle proprietà fonoassorbenti e fonoriflettenti del terreno viene definito *effetto suolo*. Tale fenomeno dipende in modo complesso dalla frequenza, dall'altezza media della sorgente e del ricevitore sul terreno  $(h_s+h_r)/2$  e dal tipo di terreno presente tra sorgente e ricevitore.

L'effetto suolo comprende sia l'attenuazione del rumore nel caso di propagazione in presenza di terreno fonoassorbente che l'incremento dell'energia acustica che arriva all'osservatore in presenza di suolo fonoriflettente, cioè ad esempio nel caso di pavimentazioni mattonate, di cemento o di asfalto tradizionale.

Per il rumore ferroviario la presenza simultanea di tre meccanismi di attenuazione è compendiabile in una semplice espressione di tipo semiempirico che fornisce la diminuzione del livello sonoro  $\Delta L$  con la distanza  $d$ :

$$\Delta L = -k \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \text{ dB(A)}$$

essendo  $d_0$  una distanza di riferimento (in genere 25 m),  $k$  un parametro che dipende dalla lunghezza del convoglio, pari a 15 nel nostro caso.

I processi di attenuazione del livello di pressione sonora appena descritti sono gli unici che intervengono nel caso di propagazione in campo aperto, privo di ostacoli e con sede ferroviaria a raso.

In generale, tuttavia, le situazioni che normalmente si incontrano sono molto più complesse. Tale complessità si può riferire sia alla posizione della sorgente rispetto al livello di terreno circostante (sede ferroviaria su rilevato, su viadotto o in trincea), sia alla presenza di ostacoli che si frappongono tra sorgente e ricettori.

La presenza di un ostacolo limita e/o modifica la propagazione delle onde sonore producendo un'attenuazione del livello di rumore funzione della posizione del punto ricettore e delle caratteristiche fisiche e geometriche dell'ostacolo.

La riduzione del rumore emesso da una qualsiasi sorgente sonora si può effettuare intervenendo su:

- Sorgente.
- Ricettori.
- Modalità di propagazione.

Le azioni sulle **sorgenti**, che, per quelle fisse, portano di solito a risultati incoraggianti specialmente in termini di dB(A) abbattuti rispetto ai costi, trovano scarsa applicabilità nel caso di rotabili ferroviari.

Il rumore ferroviario è essenzialmente un rumore di rotolamento emesso, per di più, da due sistemi rigidi a contatto con elevato potere radiativo. Le caratteristiche intrinseche del sistema di moto non consentono di utilizzare materiali diversi dall'acciaio, né è possibile, per ragioni di sicurezza di esercizio, schermare completamente la coppia ruota – rotaia.

D'altra parte i risultati ottenuti a riguardo in ricerche condotte da alcune reti ferroviarie europee non sono stati particolarmente incoraggianti. La schermatura fin quasi al limite della superficie superiore della rotaia comporta una diminuzione di 3 – 4 dB(A). Solo con l'incapsulamento completo della ruota si possono raggiungere circa 8 dB(A) di riduzione; valore indubbiamente interessante ma che comporta una serie di inconvenienti, primo tra tutti l'eccessivo surriscaldamento degli organi di frenatura sulle ruote. Sono state, inoltre, effettuate indagini sul comportamento di ruote e rotaie ricoperte, ad esclusione naturalmente delle superfici di rotolamento, da materiali antivibranti allo scopo di ridurre il potere radiativo. I risultati hanno mostrato una riduzione del livello sonoro emesso di appena 2 – 3 dB(A).

Se la riduzione del rumore ferroviario mediante interventi sulle sorgenti è tecnicamente di difficile realizzazione, oltre che poco conveniente, è tuttavia opportuno non incrementare ulteriormente i livelli sonori all'origine. Tale risultato è sicuramente ottenibile impiegando idonei sistemi di armamento (ballast, traversine in c.a.p., rotaia a profilato lungo saldato) soprattutto nei tratti di linea che attraversano zone urbanizzate e mediante una periodica attività di manutenzione del binario e dei rotabili (molature delle rotaie e riprofilatura dei cerchioni).

La riduzione della velocità di transito dei rotabili produce dei buoni effetti attenuativi del rumore, ma tale possibilità si può prendere in considerazione in limitate zone particolarmente sensibili al fonoinquinamento ferroviario per evitare disagi nel servizio di trasporto offerto.

Sempre nel contesto degli interventi mitigativi associati alle sorgenti inquinanti, occorre ricordare che, accanto ai convogli "tradizionali", che sfruttano cioè il contatto ruota – binario, esistono particolari organizzazioni di trasporto "pseudo – ferroviarie" che prevedono la presenza di treni composti da carrozze passeggeri con pneumatici in gomma operanti nel servizio di trasporto urbano su percorsi ad essi riservati. Benché i sistemi con pneumatici in gomma di solito non producano stridio, i loro livelli di rumore sono paragonabili a quelli dei sistemi con ruote in acciaio su binari saldati.

Per manovre su binario diritto sotto i 64 km/h, i sistemi con ruote in gomma producono dei livelli sonori normalizzati ponderati A sui lati del binario entro i  $\pm 6$  dB(A) di quelli forniti dall'equazione precedentemente riportata, relativa a ruote in acciaio su binari continui saldati. I livelli sonori ponderati A normalizzati in questo campo sono anche conformi a quelli riscontrati per gli autocarri e i filobus.



Un miglior isolamento acustico degli edifici prossimi ad una linea ferroviaria (**ricettori**) è senza dubbio possibile con l'adozione di particolari infissi. Va però tenuto conto che tale soluzione ha efficacia limitata a quei periodi dell'anno e a quelle zone in cui le condizioni climatiche impongono di tenere chiusi gli infissi.

Gli interventi sulle **modalità di propagazione** dell'energia sonora riguardano essenzialmente l'impiego di barriere fonoassorbenti o fonoriflettenti montate parallelamente ai binari.

### ***3.13.1. Inquinamento acustico in ambito urbano: la presenza delle stazioni ferroviarie***

In ambito urbano, ai fini del disturbo causato dal rumore ferroviario, non si può prescindere dal considerare la presenza delle **stazioni ferroviarie** proprio in prossimità dei centri abitati.

Le sorgenti di rumore durante l'entrata del treno in stazione e la partenza da questa comprendono il contatto tra ruota e binario, la frenatura meccanica, gli impulsi d'aria rilasciati dal sistema di frenatura, le operazioni relative all'apertura e alla chiusura delle porte, il condizionamento dell'aria, i sistemi ausiliari del treno. Il livello sonoro dell'ambiente viene poi influenzato dall'influenza di altre sorgenti come ad esempio i sistemi di manipolazione dell'aria, le scale mobili ed il traffico stradale.

Per raggiungere dei livelli sonori accettabili nelle stazioni è solitamente necessario controllare alla sorgente il rumore dovuto al contatto ruota – rotaia e minimizzare mediante trattamenti fonoassorbenti il rumore riflesso trasmesso per via aerea. In taluni casi si usano delle barriere basse insieme ai trattamenti fonoassorbenti.

Di regola le stazioni sotterranee senza alcun trattamento fonoassorbente e con binari a travi e pietrisco presentano livelli sonori ponderati A da 5 a 15 dB(A) più bassi delle stazioni simili ma con binari senza pietrisco, e ciò a causa dell'assorbimento sonoro fornito dal pietrisco stesso. Un soffitto fonoassorbente soprastante la piattaforma della stazione produce una riduzione nel livello sonoro ponderato A da 5 a 15 dB(A) sulla piattaforma (rispetto alle stazioni senza trattamento fonoassorbente). La corretta collocazione del materiale fonoassorbente è illustrata nella figura 3.12.

I materiali fonoassorbenti usati nelle stazioni devono ottemperare a certi requisiti speciali: basso potere riflettente, resistenza ad azioni vandaliche, pulibilità, resistenza alla fiamma, manutenibilità, basso costo, resistenza al

danneggiamento dell'acqua e, in molti casi, delle temperature di congelamento. I materiali acustici devono resistere bene alle correnti d'aria e alle sovrappressioni dovute al moto del treno e devono essere compatibili con le normali operazioni di manutenzione e d'ispezione sui binari.

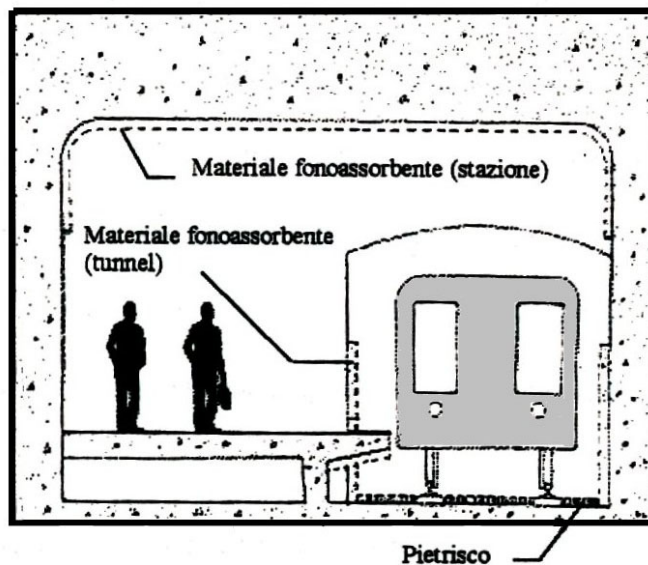


Figura 3.12 - Collocazione ottimale del materiale fonoassorbente nel caso di stazione e tunnel sotterranei.

L'assorbimento sonoro fornito dai binari con pietrisco ha un vantaggio su molti trattamenti acustici in quanto il pietrisco è situato in vicinanza delle sorgenti di rumore; inoltre esso non viene danneggiato dai lavoratori o dalle loro attrezzature. Certi materiali in fibra minerale applicabili a spruzzo sono convenienti per usi riguardanti le pareti del tunnel. Le altezze di trattamento sono generalmente comprese tra 1.8 e 3 m.

### 3.14. IL FENOMENO DELLE VIBRAZIONI

Viene definita vibrazione un fenomeno ondulatorio, generalmente a bassa frequenza, trasmesso attraverso un mezzo solido, liquido o gassoso.

Le vibrazioni possono essere valutate in tre diverse modalità:

- ◆ in termini di spostamento (variazione della posizione di un corpo o di una particella e che è abitualmente misurata a partire dalla media delle posizioni assunte dal corpo o dalla particella stessa oppure dalla posizione di quiete);

- ◆ in termini di velocità (variazione dello spostamento rispetto ad un punto di riferimento, in un determinato intervallo di tempo);
- ◆ in termini di accelerazione (vettore che indica la variazione della velocità in un determinato intervallo di tempo).

Per le vibrazioni, la soglia di percezione si trova in una banda compresa tra 0.01 e 0.06g (g = accelerazione di gravità).

Il fenomeno delle vibrazioni dovute ai trasporti costituisce un argomento altamente tecnico. Le vibrazioni via terra, originate dal passaggio dei mezzi di trasporto su gomma (camion, autobus, ecc.) o su rotaia (treni, tram) sono dovute sia alle oscillazioni impresse dal motore al mezzo, sia agli scuotimenti ed alle irregolarità del piano stradale o alle giunzioni delle rotaie; l'intensità della vibrazione dipende dalla dimensione e dalla forma dell'irregolarità del terreno e dalla velocità e dal peso del veicolo.

Reazioni umane ed effetti fisici dipendono in particolare dalla velocità massima delle particelle (esprimibile in mm/sec) (Tab. 3.13).

Velocità [mm/sec]	Reazioni umane	Effetti sulle costruzioni
<b>0 – 0.15</b>	Impercettibile	Nessuno
<b>0.15 – 0.30</b>	Limite di percezione	Nessuno
<b>2.0</b>	Intrusione	Limite massimo da non superare per antichi monumenti
<b>2.5</b>	Inizio del fastidio	Nessun rischio per la normale edilizia
<b>5.0</b>	Fastidio	Limite massimo da non superare per evitare danni architettonici
<b>10 – 15</b>	Fastidio e disagio a volte intollerabili	Danni architettonici e possibili danni strutturali

Tabella 3.13 – Reazioni umane ed effetti sulle costruzioni a varie velocità di vibrazione.

Il livello di tolleranza di una vibrazione in zone residenziali corrisponde ad una velocità massima di 0.15 – 0.30 mm/sec in quanto, una vibrazione, pur piccola ma percettibile, è considerata intrusiva.

La frequenza delle vibrazioni non ha praticamente alcun significativo effetto sulla percezione umana per velocità inferiori ai 3 – 4 mm/sec; per velocità superiori invece la percezione aumenta sensibilmente all'aumentare della frequenza (Fig. 3.13).

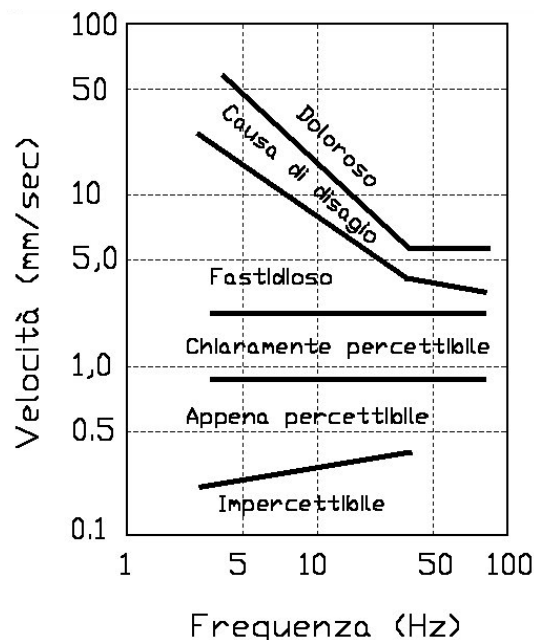


Figura 3.13 – Relazione tra percezione umana, velocità e frequenza delle vibrazioni.

Particolare attenzione incomincia ad essere data pure alle vibrazioni che si propagano via aria: esse sono chiamate anche infrasuoni. Esse derivano da onde sonore a bassa frequenza (inferiore a 100 Hz) provenienti quasi unicamente dai motori dei veicoli, soprattutto da quelli diesel; si ritiene che tali vibrazioni non danneggino gli edifici: il loro effetto principale e più intrusivo è dato dal far vibrare finestre e porte.

Queste onde obbediscono alle leggi del suono, ma poiché presentano basse frequenze e grandi lunghezze d'onda, si attenuano relativamente poco con la distanza e con l'isolamento sonoro.

Le vibrazioni via terra possono essere facilmente ed efficacemente attutate mediante una serie di accorgimenti costruttivi, quali:

- ◆ isolare l'edificio dalla sorgente di vibrazioni, interponendo tra sorgente e ricettore una struttura "elastica" sufficientemente approfondita nel terreno (intercapedine in c.a., diaframma in pietrame a secco, ecc.);
- ◆ approfondire il piano di fondazione dell'edificio rendendolo meno sensibile alle onde vibratorie;
- ◆ irrigidire la struttura dell'edificio spostando tutte le risonanze strutturali oltre l'intervallo di frequenza in cui sono comprese le sollecitazioni.

Osserviamo infine che, al contrario delle vibrazioni via terra, le vibrazioni via aria sono di difficile eliminazione: questo deve rappresentare un motivo ulteriore di controllo del traffico in aree urbane.

Un effetto benefico di riduzione delle vibrazioni si può avere sostituendo, nei mezzi di trasporto pubblico, i motori diesel con i motori elettrici.

Nell'ambito delle infrastrutture ferroviarie urbane, occorre prendere in considerazione i percorsi ferroviari che si sviluppano in sotterraneo.

Per tali mezzi di trasporto occorre analizzare il percorso seguito dalle vibrazioni ingenerate dal contatto ruota – binario: le vibrazioni vengono trasmesse alle strutture del tunnel e quindi al suolo che le circonda; si propagano poi, attraverso il suolo, ai fabbricati adiacenti facendone vibrare i pavimenti e le pareti, e producendo un irraggiamento secondario del rumore nelle stanze.

Esiste una relazione approssimata che consente di valutare il livello sonoro ponderato A, in scantinati posti a distanze da 1 a 20 metri rispetto alla parete del tunnel:

$$L_A = 59 - 20 \cdot \log_{10} \frac{r}{r_0} \pm 10 \quad \text{dB(A)}$$

in cui  $r$  è la distanza in metri dalla parete del tunnel alla parete del fabbricato e  $r_0$  è la distanza di riferimento (1 m). I dati su cui si basa la formula sopra riportata rappresentano un ampio campo di tipi, condizioni e velocità delle carrozze, tipi e condizioni di binari, tipologie di fabbricati e di tunnel, tipi di suolo.

I parametri che influenzano i livelli di vibrazione del tunnel comprendono:

- ✓ **Velocità del treno:** per velocità comprese nel campo di 24 e 113 Km/h, un raddoppio nella velocità del treno determina un aumento da 4 a 6 dB nei livelli di accelerazione di vibrazione del tunnel e del terreno;
- ✓ **Carico assiale:** un raddoppio nel carico assiale produce un aumento da 2 a 4 dB nei livelli di vibrazione delle pareti del tunnel, indipendentemente dalla velocità del treno e da come è stato costruito il binario;
- ✓ **Sospensione delle carrozze:** i livelli di vibrazione dei tunnel sono indipendenti dai sistemi di sospensione delle carrozze utilizzati nei moderni veicoli di transito su rotaie;
- ✓ **Ruote resilienti:** i livelli di vibrazione dei tunnel nel campo di frequenza da 40 a 250 Hz possono essere ridotti di circa 4 dB adottando ruote resilienti;
- ✓ **Massa non elastica:** il dimezzamento della massa non elastica produce una riduzione di 6 dB nei livelli di vibrazione del terreno. La massa non elastica

è la parte di massa del carrello che non è isolata dal binario. Può comprendere le ruote e gli assi, a meno che non siano isolati, il cambio e i motori di trazione;

- ✓ **Condizioni del sistema ruota – rotaia:** gli ammassamenti sulle ruote, i giunti delle rotaie non compatti, la rugosità sulle rotaie possono aumentare i livelli di vibrazione da 10 a 20 dB; la rugosità delle ruote o delle rotaie di tipo liscio e senza giunti e in assenza di ammaccature sulle ruote, può aumentare tali livelli da 3 a 10 dB. I livelli di vibrazione del tunnel per binari con scambi e punti d'incrocio sono da 10 a 15 dB superiori a quelli per binari continui;
- ✓ **Collegamenti a rotaie resilienti** (travi supportate da materiale resiliente): se la rigidità del collegamento della rotaia divisa per lo spazio tra due collegamenti adiacenti viene raddoppiata, i livelli di vibrazione del tunnel sopra i 50 Hz aumentano di 6 dB;
- ✓ **Solette flottanti:** le solette che fungono da letto del binario e da supporto resiliente (chiamate “solette flottanti”) o le solette continue fuse in opera (con sezioni individuali sino a 21 m di lunghezza), o una serie di solette prefuse da 0.7 a 1.5 m riducono notevolmente le vibrazioni trasmesse alle strutture del tunnel;
- ✓ **Profondità del materiale di zavorra:** variare la profondità del pietrisco posto sotto le travi fra 30 e 70 cm non ha alcun effetto sui livelli di vibrazione delle pareti del tunnel;
- ✓ **Materiale di zavorra:** il materiale in gomma posto tra il pietrisco e le fondazioni del tunnel produce una significativa diminuzione dei livelli di vibrazione nel tunnel (maggiori di 5 dB) per frequenze sopra ai 63 Hz;
- ✓ **Costruzione del tunnel:** il tipo di struttura del tunnel e la sua massa influenzano i livelli di vibrazione nel tunnel e sul terreno. Raddoppiare lo spessore medio di parete utilizzando i medesimi materiali porta a riduzioni nei livelli di vibrazione delle pareti del tunnel da 5 a 18 dB.