

PROPAGAZIONE DEL RUMORE IN AMBIENTE ESTERNO

Massimo GARAI (1), Michel BERENGIER (2)

(1) Dipartimento di Ingegneria Energetica, Nucleare e del Controllo Ambientale (DIENCA), Università di Bologna

(2) Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes (Francia)

1. Introduzione

Nelle valutazioni di impatto acustico e dei relativi interventi di mitigazione, spesso non ci si può esimere dal compiere un gran numero di calcoli relativi alla propagazione sonora in ambiente esterno. La legge quadro 447/95 ed i suoi decreti attuativi impongono di calcolare o un livello equivalente ponderato A, L_{Aeq} , o il cosiddetto livello di valutazione del rumore aeroportuale, L_{VA} . In entrambi i casi la scelta del metodo di calcolo è sostanzialmente lasciata all'utilizzatore. La proposta di direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio sul rumore ambientale (2000) raccomanda di calcolare in ogni caso il livello giorno-sera-notte, L_{den} , ed il livello di rumore notturno, L_{night} , unificando la scelta dei descrittori acustici. La stessa proposta di direttiva europea va poi oltre la legislazione italiana nel raccomandare anche i metodi di calcolo dei descrittori (allegato II); tuttavia, su questo punto essa appare condizionata da compromessi. Infatti tali metodi sono, almeno provvisoriamente, i seguenti:

- per il rumore di attività produttive: il metodo normalizzato ISO 9613-2 (1996);
- per il rumore degli aeromobili in prossimità di aeroporti: il metodo europeo descritto nel documento 29 ECAC-CEAC (1997);
- per il rumore da traffico veicolare: il metodo di calcolo ufficiale francese NMPB (1997);
- per il rumore da traffico ferroviario: il metodo di calcolo ufficiale olandese (1996).

Appare subito problematico far convivere metodi (e programmi di calcolo) differenti fra loro e basati su approssimazioni molto diverse senza nemmeno avere un riferimento per poterli combinare nella valutazione di un caso complesso, come per esempio un aeroporto in vicinanza di un'autostrada e di una ferrovia.

Dal punto di vista scientifico, invece, è chiaro che i fenomeni che governano la propagazione del rumore in ambiente esterno sono sempre i medesimi. Pertanto, nel seguito verrà sinteticamente delineato lo stato dell'arte delle conoscenze in materia da un punto di vista fisico, sottolineando di volta in volta la miglior attitudine di questo o quel modello "raccomandato" a descrivere un particolare aspetto.

2. Equazione fondamentale

L'equazione fondamentale alla quale la quasi totalità dei modelli utilizzati è in pratica riconducibile è del tipo:

$$L_p = L_W + D_I - A_d - A_a - A_g - A_b - A_n - A_v - A_s - A_h \quad (1)$$

dove:

L_p : livello sonoro nella posizione del ricevitore;

L_W : livello di potenza sonora della sorgente;

D_I : indice di direttività della sorgente;

A_d : attenuazione per divergenza geometrica;

A_a : attenuazione per assorbimento atmosferico;

A_g : attenuazione per effetto del suolo;

A_b : attenuazione per diffrazione da parte di ostacoli (barriere);

A_n : attenuazione per effetto di variazioni dei gradienti verticali di temperatura e di velocità del vento e della turbolenza atmosferica;

A_v : attenuazione per attraversamento di vegetazione;

A_s : attenuazione per attraversamento di siti industriali;

A_h : attenuazione per attraversamento di siti residenziali.

Le grandezze di cui sopra sono espresse in decibel, ed eventualmente sono valutate in bande di 1/3 d'ottava o ponderate "A". Il periodo temporale di riferimento dovrebbe essere sempre il medesimo per tutte.

In questa sede non si insisterà sulla determinazione del livello di potenza sonora e dell'indice di direttività della sorgente, per i quali si rimanda alla serie delle norme ISO 374x ed alla Direttiva 2000/14/CE (2000). Basti dire che: la norma ISO 9613-1 ed il documento 29 ECAC-CEAC considerano solo sorgenti puntiformi; il metodo francese NMPB prevede la decomposizione della sorgente stradale lineare in "tronconi acusticamente omogenei" che vengono successivamente rimpiazzati da sorgenti puntiformi equivalenti; il metodo olandese si basa su di una decomposizione simile.

3. Attenuazione per divergenza geometrica

L'attenuazione per divergenza geometrica tra due posizioni alle distanze r_1 e r_2 , rispettivamente, dalla sorgente sonora può essere scritta come:

$$A_d = 20g \lg \frac{r_2}{r_1} \quad (2)$$

dove $g = 1$ per onde sferiche (sorgente puntiforme) e $g = 1/2$ per onde cilindriche (sorgente lineare). Le due condizioni corrispondono ad un'attenuazione di 6 dB o 3 dB per rad-doppio della distanza dalla sorgente. Distribuzioni finite di sorgenti puntiformi o lineari incoerenti sono comunemente usate per modellare l'impatto acustico di sorgenti estese quali impianti industriali, autostrade, ferrovie (Tatge, 1972; Sutherland, 1975).

4. Attenuazione per assorbimento atmosferico

Le onde sonore che si propagano attraverso l'aria sono attenuate a causa di due fenomeni:

- dissipazione termica e viscosa nell'aria;
- rilassamento quantistico dovuto ai modi rotazionali e vibrazionali delle molecole.

Il primo fenomeno è funzione della temperatura e della pressione atmosferica, il secondo anche dell'umidità relativa dell'aria. Inoltre, l'assorbimento atmosferico dipende fortemente dalla frequenza del suono e dalle condizioni atmosferiche.

Attraverso una combinazione di analisi teoriche e misurazioni sperimentali si è giunti ad una definizione abbastanza accurata dell'attenuazione per assorbimento atmosferico di toni puri (ISO 9613-1:1993). Questa è esprimibile come:

$$A_a = -20 \lg \left[\frac{p(r)}{p(0)} \right] = -20 \lg [e^{-ar}] = \alpha r \quad (3)$$

dove $p(r)$ è la pressione sonora dopo avere percorso una distanza r ; $p(0)$ è la pressione sonora iniziale a $r = 0$; a è il coefficiente di attenuazione in Np/m; α è il coefficiente di attenuazione in dB/m ($= 8,686a$). Si veda anche la figura 1.

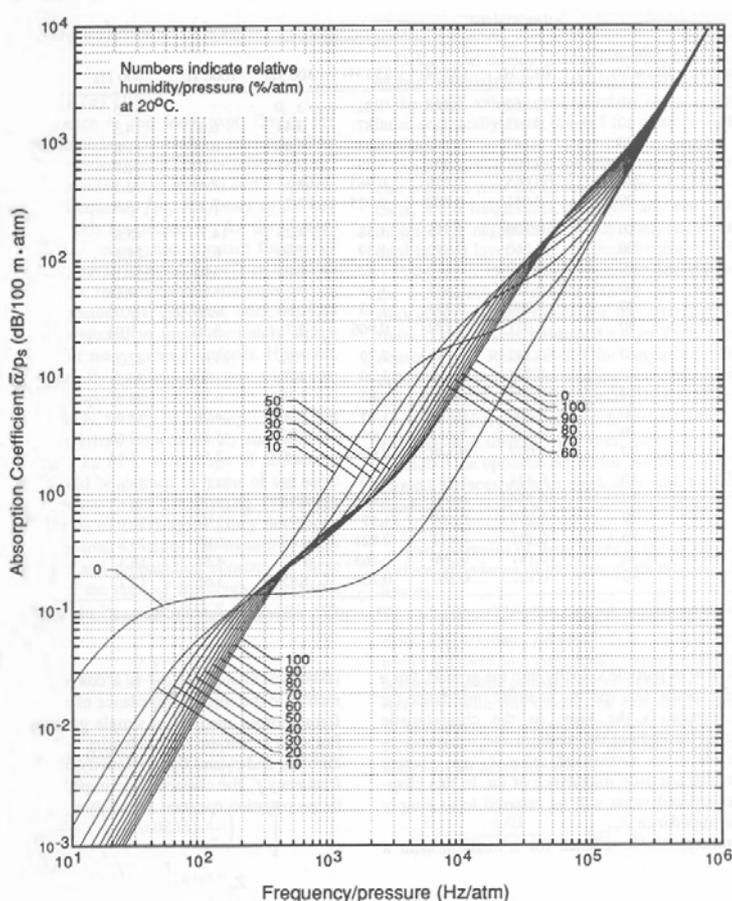


Figura 1. Coefficiente di attenuazione per il calcolo dell'assorbimento atmosferico in funzione della frequenza e dell'umidità relativa. I valori sono generalizzati in funzione della pressione e della temperatura dell'aria nei limiti di validità dell'approssimazione dei gas perfetti (da Sutherland e Daigle, 1997).

5. Attenuazione per effetto del suolo

Quando l'atmosfera è omogenea e in quiete, la propagazione sonora in presenza del suolo, considerato come un piano ad impedenza acustica assegnata, dipende dalla combinazione tra le onde che si propagano direttamente dalla sorgente al ricevitore e le onde che si interagiscono con il suolo (figura 2). Il campo di pressione acustica prodotto da una sorgente puntiforme stazionaria S è dato, sottintendendo una dipendenza temporale in $\exp(-i\omega t)$, dalla seguente espressione approssimata della soluzione dell'equazione di Helmholtz (L'Espérance et al., 1992):

$$p = \frac{A_1}{r_1} \exp(ikr_1) + \frac{Q \cdot A_2}{r_2} \exp(ikr_2) \quad (4)$$

dove A_1 e A_2 sono le ampiezze dell'onda diretta e di quella riflessa; k è il numero d'onda ($2\pi f/c$); r_1 e r_2 sono i percorsi dei raggi sonori diretto e riflesso, rispettivamente (figura 2); Q è il fattore di riflessione del suolo per onde sferiche:

$$Q = R_p + (1 - R_p) F(w) \quad (5)$$

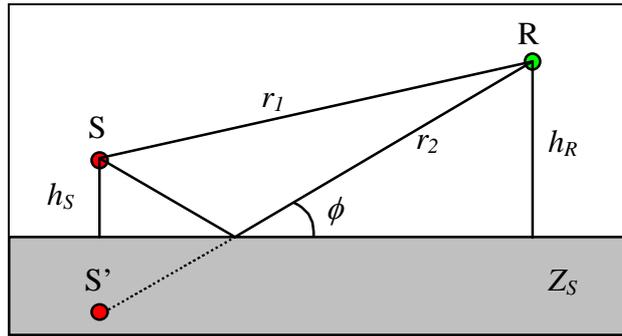


Figura 2. Geometria per lo studio dell'attenuazione per effetto del suolo.

R_p è il fattore di riflessione per onde piane, funzione dell'impedenza acustica della superficie; il termine $(1 - R_p) F(w)$ tiene conto dei contributi delle cosiddette onde “di terra” e “di superficie”. La funzione $F(w)$, che tiene conto dell'interazione tra i fronti d'onda curvi e la superficie di impedenza finita, si determina con l'equazione:

$$F(w) = 1 + i\pi^{1/2} w \cdot \exp(-w^2) \operatorname{erfc}(-iw) \quad (6)$$

dove w è una variabile complessa chiamata “distanza numerica” (Rudnick, 1947). La sua espressione è diversa in funzione del tipo di reazione della superficie del suolo (locale o estesa); per gran parte delle superfici, le ipotesi di reazione locale sono sufficienti ed allora w si può approssimare come (Chessell, 1977):

$$w^2 = i \frac{kr_2 [\sin\phi + 1/Z_S]^2}{2 \cdot 1 + (1/Z_S)\sin\phi} \quad (7)$$

Per caratterizzare il valore complesso Z_S dell'impedenza acustica specifica delle superfici a reazione locale, si utilizza spesso il modello di Delany e Bazley (1970):

$$Z_S = \left[1 + 0,051 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,75} \right] + i \left[0,077 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,73} \right] \quad (8)$$

dove Z_S è funzione della sola resistività al flusso d'aria, σ . Lo spessore della struttura è considerato come infinito. Alcuni tipici valori di σ sono i seguenti: da 2 a 3×10^5 Pa·s/m² per una superficie erbosa; 10^8 Pa·s/m² per un manto stradale bituminoso.

Nel caso delle pavimentazioni stradali porose (cosiddette “fonoassorbenti”), Z_S è calcolabile mediante un nuovo modello fenomenologico recentemente sviluppato in Francia (Bérenghier, Hamet, 1997). Questo modello considera gli scambi viscosi e termici interni alla struttura. E' necessario conoscere in questo caso i quattro principali parametri fisici del modello che sono: la resistività al flusso d'aria σ , la porosità Ω , la tortuosità q^2 e lo spessore ℓ . Per tipiche pavimentazioni stradali porose, l'ordine di grandezza dei valori dei parametri citati è: $\sigma = 10^4$ Pa·s/m², $\Omega = 15$ %, $q^2 = 2$ e $\ell = 0,04$ m. Per quelle a grande porosità, i valori sono: $\sigma = 2 \cdot 10^3$ Pa·s/m², $\Omega = 25$ %, $q^2 = 3,5$ e $\ell = 0,04$ m. I valori di questi parametri possono essere ottenuti in diversi modi, sia tramite procedure dirette di misurazione (ISO 9053:1991 per σ e banco di prova, tipo quello dell'LCPC (1997), per Ω), sia, per quanto riguarda q^2 , mediante una procedura indiretta, basata sulla misurazione del coefficiente di assorbimento acustico ad incidenza normale in un tubo di Kundt (ISO 10534-1:1996) od in campo libero (ISO/FDIS 13472-1:2000).

L'attenuazione dovuta all'effetto del suolo viene definita come:

$$A_g = 20 \lg \left| \frac{\frac{A_1 \exp(ikr_1) + \frac{Q \cdot A_2 \exp(ikr_2)}{r_2}}{r_1}}{\frac{A_1 \exp(ikr_1)}{r_1}} \right| \quad (9)$$

Il valore della pressione sonora media $\langle p^2 \rangle$ si può ottenere dall'equazione (4) come:

$$\langle p^2 \rangle = \frac{A_1^2}{r_1^2} + |Q|^2 \cdot \frac{A_2^2}{r_2^2} + \frac{2|Q| \cdot A_1 \cdot A_2}{r_1 r_2} \cos[2\pi f(\tau_2 - \tau_1) + \gamma] \quad (10)$$

dove $(\tau_2 - \tau_1)$ rappresenta la differenza temporale tra il segnale diretto e quello riflesso e γ esprime la fase del fattore di riflessione per onde sferiche [$Q = |Q| \cdot \exp(i\gamma)$].

La figura 3 riporta un esempio di calcolo dell'attenuazione dovuta all'effetto del

suolo per una tipica superficie erbosa localmente reagente, schematizzata con il modello di Delany e Bazley (1970) e $\sigma = 250 \text{ kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$. L'altezza della sorgente, $h_s = 0,3 \text{ m}$, corrisponde a quella del tubo di scappamento di un'autovettura. Come si vede, l'effetto è fortemente selettivo in frequenza.

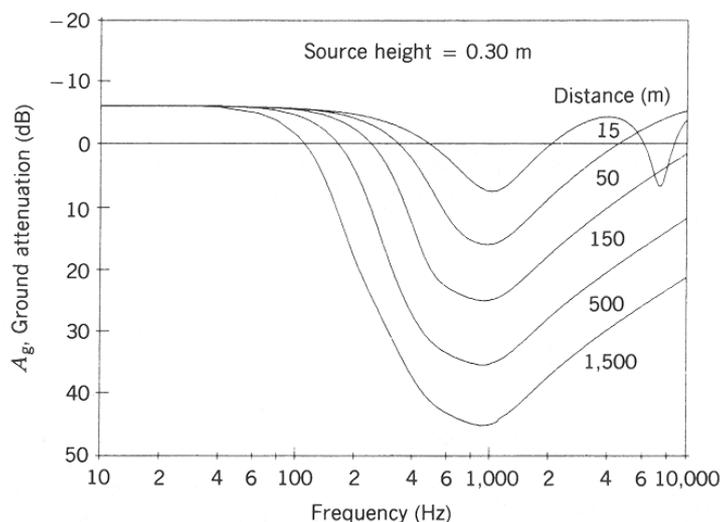


Figura 3. Attenuazione per effetto del suolo calcolata per una tipica superficie erbosa ($\sigma = 250 \text{ kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$) e per varie distanze in orizzontale tra sorgente e ricevitore. Altezza del ricevitore $h_r = 1,2 \text{ m}$. Altezza della sorgente $h_s = 0,3 \text{ m}$ (da Sutherland e Daigle, 1997).

La norma ISO 9613-2:1996 suddivide il calcolo dell'attenuazione dovuta all'effetto del suolo in tre termini, A_s , A_m ed A_r , caratteristici rispettivamente della zona attorno alla sorgente, della zona intermedia e della zona attorno al ricevitore. Ognuno di questi viene calcolato per mezzo di approssimazioni, anche piuttosto drastiche, della teoria sopra richiamata; in particolare, non viene utilizzata la grandezza fisica Z_s , sostituita da un cosiddetto "ground factor" G che assume valori reali compresi tra 0 (terreno acusticamente "duro") ed 1 (terreno acusticamente "poroso"). I calcoli sono condotti direttamente in bande d'ottava oppure sui valori globali in scala di ponderazione "A". I risultati non sono troppo in errore per sorgenti sonore a larga banda ed incidenza radente. Il metodo descritto nel documento 29 ECAC-CEAC (1997) utilizza espressioni semiempiriche che raggruppano gli effetti della divergenza geometrica, dell'assorbimento atmosferico e dell'effetto del suolo per le specifiche sorgenti sonore considerate, e cioè gli aeromobili. I calcoli vengono condotti sui valori globali in scala di ponderazione "A". Il metodo di calcolo ufficiale francese NMPB (1997) per il rumore da traffico stradale riprende la formulazione della ISO 9613-2.

6. Attenuazione per diffrazione da parte di ostacoli

Nella pratica si usa chiamare *barriera acustica* un ostacolo naturale o un dispositivo per la riduzione del rumore che si interpone sul percorso di propagazione diretta per via aerea del suono dalla sorgente al ricevitore. L'efficienza globale di una

barriera acustica viene espressa tramite la grandezza *insertion loss*, IL , definita come la differenza di livello di pressione sonora tra la situazione *ante operam* ($L_{p,B}$) e la situazione *post operam* ($L_{p,A}$):

$$IL = L_{p,B} - L_{p,A} \quad (11)$$

L'apparente semplicità della definizione nasconde in realtà un complesso intreccio di fenomeni fisici, che vale la pena di esporre in maggior dettaglio (Garai, 2000).

6.1. Trattazioni ondulatorie

Per definizione, una barriera acustica è un ostacolo solo parziale alla propagazione per via aerea del suono: la quota di energia sonora che la attraversa è normalmente trascurabile rispetto a quella che la aggira per diffrazione. Considerate le altezze delle barriere praticamente realizzabili e le lunghezze d'onda dei suoni nello spettro dell'udibile, è chiaro che normalmente la barriera viene "scavalcata" a molte frequenze dalle onde sonore. Queste ultime subiscono un'attenuazione tanto maggiore quanto minore è la loro lunghezza d'onda. In altre parole, l'attenuazione prodotta da una barriera è fortemente funzione della frequenza.

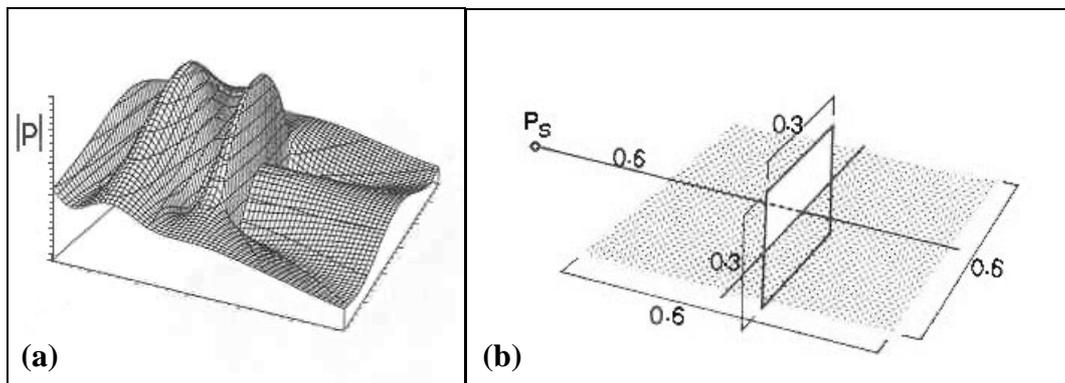


Figura 4. Ampiezza del campo di pressione sonora attorno ad una barriera quadrata con superfici riflettenti. (a): rappresentazione grafica dei valori calcolati per $\lambda = 0,3$ m. (b): configurazione geometrica del problema; le distanze sono in metri; la sorgente puntiforme è in P_s (adattato da (Kawai, T. Terai, 1990)).

La grandezza attenuazione non deve essere confusa con la grandezza *insertion loss*: si definisce *attenuazione* (del bordo superiore) di una barriera l'espressione:

$$Att_{1/2}(f) = 10 \lg \left| \frac{p_{barr}(f)}{p_{free}(f)} \right|^2 \quad (12)$$

dove $p_{barr}(f)$ e $p_{free}(f)$ sono gli spettri del campo di pressione sonora esistenti nello stesso punto in presenza della barriera ed in assenza della stessa, rispettivamente; la definizione fa astrazione dagli effetti di bordo (vale per una barriera infinitamente lunga) e dalla presenza del suolo.

Per prevedere in maniera rigorosa l'attenuazione prodotta dalla diffrazione sul bordo superiore di una barriera, si ricorre a formulazioni matematiche integrali, equivalenti più o meno direttamente alla formula originale di Fresnel-Kirchhoff. Si tratta di espressioni complesse che richiedono tempi di calcolo non indifferenti anche su computer potenti e che per questo sono tuttora confinate all'ambito della ricerca. I risultati, ricavati per ogni singola frequenza, sono in genere molto dettagliati (figura 4).

6.2. Approssimazioni geometriche

Le formulazioni rigorose non sono adatte per il comune lavoro di progettazione; pertanto vari autori hanno cercato metodi semplificati di più facile utilizzo. La soluzione rigorosa per onde sferiche dipende da quattro parametri adimensionali indipendenti (Kawai et al., 1977). Maekawa (1968) ha semplificato tale formulazione fino a ricavare una stima approssimata dell'attenuazione in funzione di un solo parametro, il *numero di Fresnel*:

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} \quad (13)$$

dove δ è la differenza geometrica tra il percorso di propagazione diretta in assenza della barriera e il minimo percorso delle onde diffratte sopra il bordo superiore della barriera (figura 5); λ è la lunghezza d'onda. Grazie ad un meticoloso lavoro sperimentale con segnali impulsivi, Maekawa ha poi costruito un famoso grafico che riporta i valori assoluti dell'attenuazione in funzione del numero di Fresnel (figura 5).

Kurze e Anderson (1971) hanno ricavato una formula che approssima i dati sperimentali su quasi tutto l'intervallo di valori di N riportato nel grafico di Maekawa:

$$Att_{1/2} = 5 + 20 \lg \left[\frac{\sqrt{2\pi|N|}}{\tanh \sqrt{2\pi|N|}} \right] \quad (14a)$$

$$Att_{1/2} = 0 \text{ per } N < -0,2 \quad (14b)$$

$$Att_{1/2} \leq 24 \quad (14c)$$

Per piccoli valori di N la (14a) mostra una discrepanza di $\pm 1,5$ dB con i dati di Maekawa, per cui viene completata con la posizione (14b). La (14c) esplicita un limite che nella pratica non viene mai superato, a causa soprattutto della turbolenza atmosferica (si veda il punto 8 seguente).

Anche gli algoritmi contenuti nella normativa ISO 9613-2:1996, sono basati su di un'approssimazione geometrica sostanzialmente equivalente a quelle di Maekawa e

Kurze-Anderson, con l'inclusione dell'effetto del suolo descritta al seguente punto 6.3. Invece, il documento 29 ECAC-CEAC (1997) non considera l'effetto delle barriere, date la natura delle specifiche sorgenti in gioco (aeromobili in volo). Il metodo francese NMPB riprende, in maniera più accurata, la formulazione ISO.

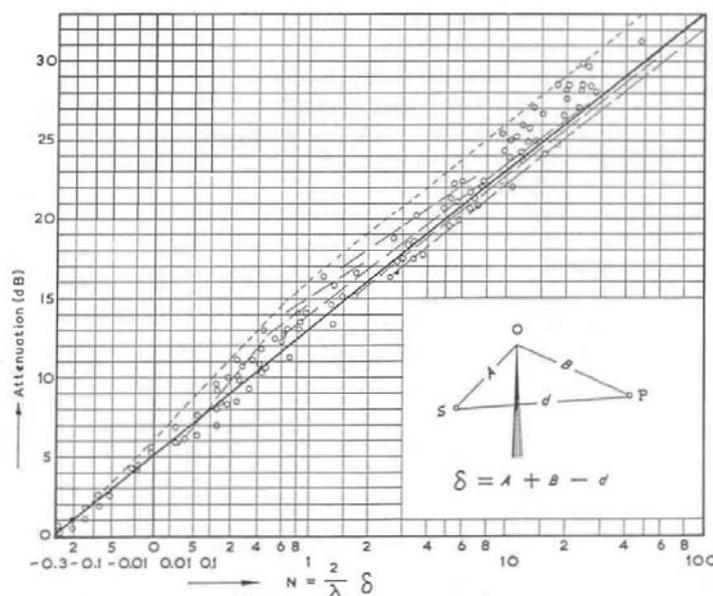


Figura 5. Grafico di Maekawa (1968). Si deve utilizzare la curva continua spessa.

6.3. Effetti combinati della barriera e del suolo

L'effetto del suolo si manifesta anche durante i percorsi parziali delle onde sonore dalla sorgente al bordo superiore della barriera e da tale bordo al ricevitore. Per tenere conto di questo fatto, l'attenuazione finale al ricevitore deve perciò essere calcolata combinando gli effetti della diffrazione e della riflessione sul suolo. Secondo Isei et al. (1980), ciò si può fare sostituendo la formula (12) con la formula (15):

$$Att_g(f) = A_g + A_b = 10 \lg \left| \frac{p_{barr}(f)}{p_{ground}(f)} \right|^2 \quad (15)$$

dove $p_{barr}(f)$ e $p_{ground}(f)$ sono gli spettri complessi del campo di pressione sonora esistenti nello stesso punto in presenza della barriera ed in assenza della stessa, rispettivamente, ma sempre considerando la presenza del terreno, ovvero l'effetto del suolo.

Il campo acustico prodotto da una sorgente puntiforme in presenza della barriera e del terreno è dato da (Isei et al., 1980):

$$P_{barr} = P_{SR} + P_{TR} + P_{SX} + P_{TX} + P_{UR} + P_{UX} \quad (16)$$

dove S è la sorgente sonora, R è il ricevitore, T è la sorgente virtuale rispetto al suolo, X è il ricevitore virtuale rispetto al suolo, U è la sorgente virtuale rispetto alla barriera (figura 6a). Le due lettere a pedice di ogni termine al secondo membro della (16) indicano la sorgente e il ricevitore relativi. I termini che comprendono una sorgente o un ricevitore virtuali includono anche l'effetto del suolo secondo le equazioni (4)-(7).

Il calcolo dell'attenuazione (15) in funzione dei campi acustici complessi può essere approssimato in maniera semplice, secondo Maekawa, applicando il suo metodo grafico due volte, una per il ricevitore reale R ed una per il ricevitore virtuale X (figura 6b) e quindi sommando logaritmicamente le due attenuazioni parziali:

$$Att_g = 10 \lg [10^{Att_R/10} + 10^{Att_X/10}] \quad [\text{dB}] \quad (17)$$

Le due attenuazioni parziali vanno prese con il segno negativo (Maekawa, 1968). Chiaramente in questo modo si perdono le informazioni di fase relative alle diverse onde sonore e quindi l'approssimazione di Maekawa è accettabile solo per rumori incoerenti ed a larga banda. Più in generale, si noti che i metodi in approssimazione geometrica, come quello di Maekawa, non sempre tengono adeguatamente conto della cancellazione dell'effetto del suolo conseguente alla costruzione della barriera. Infatti, prima della costruzione della barriera l'effetto del suolo associato alla propagazione sonora in campo libero può produrre in certe bande di frequenza una forte attenuazione (terreni acusticamente "soft"; cfr. figura 3). La costruzione della barriera blocca la propagazione delle onde radenti al terreno e quindi "cancella" l'effetto del suolo. Se l'attenuazione apportata dalla barriera non compensa l'effetto perduto del suolo, il risultato è un aumento del livello sonoro! Questa conclusione, apparentemente paradossale, è confermata da diversi autori: si veda per esempio (Nicolas et al., 1983).

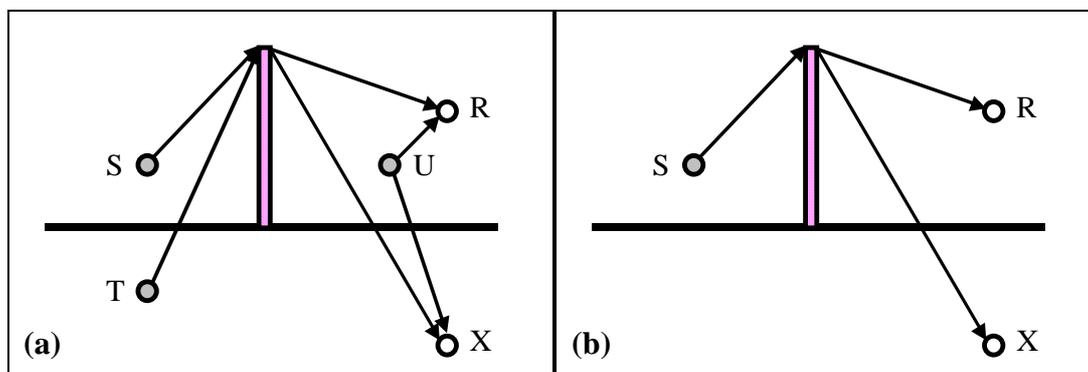


Figura 6. Sorgenti e ricevitori, reali o virtuali, per il calcolo dell'attenuazione di una barriera posta sul suolo. (a): metodo di Isei et al. (1980) (b): metodo di Maekawa (1968).

6.4. Barriere di lunghezza finita

Per barriere reali di lunghezza finita, occorre tenere conto anche delle onde sonore diffratte dai bordi laterali della barriera, le quali possono essere a loro volta riflesse sul terreno. In linea di principio, il problema può essere trattato in analogia a quanto esposto al paragrafo precedente. Per esempio, L'Esperance (1989) scrive il campo risultante al ricevitore come somma di otto termini, dei quali i primi quattro corrispondono ai primi quattro della formula (16) e gli altri quattro descrivono la diffrazione sui due bordi laterali e la relativa riflessione sul suolo. Anche il metodo di Maekawa prevede un'iterata applicazione del grafico per tenere conto dei bordi laterali della barriera.

In pratica, la diffrazione sui bordi laterali può degradare le prestazioni della barriera. Occorre perciò assicurarsi che al ricevitore l'energia delle onde sonore diffratte dai bordi laterali sia trascurabile rispetto a quella delle onde sonore che scavalcano superiormente la barriera. Kurze e Anderson hanno calcolato quale deve essere il minimo semiangolo di vista, dalla posizione del ricevitore, di una barriera finita per produrre un'attenuazione minore al più di 1 dB di quella della corrispondente barriera infinitamente lunga (1971). Il risultato per una sorgente lineare incoerente infinitamente lunga è riportato in figura 7.

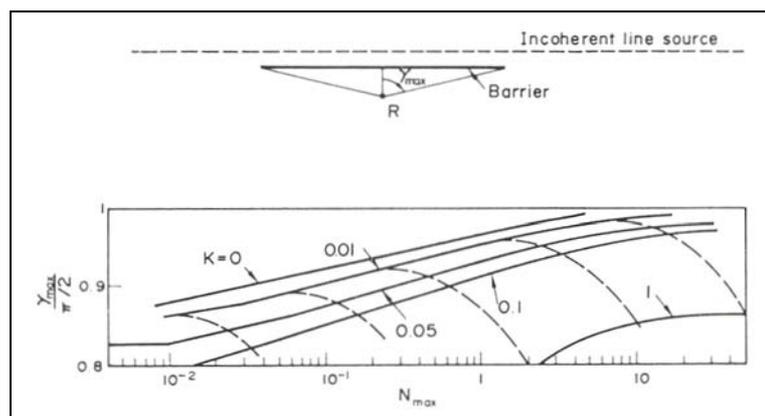


Figura 7. Semiangolo γ_{max} sotto il quale viene vista dal ricevitore una barriera finita per produrre un'attenuazione minore al più di 1 dB di quella della corrispondente barriera infinitamente lunga. K è il coefficiente di attenuazione del suono nell'aria per la più vicina sorgente puntiforme (da Kurze e Anderson, 1971).

7. Propagazione in ambiente esterno ed effetti meteorologici

Qualche anno fa, quando si desiderava predire i livelli sonori prodotti da una sorgente posta in ambiente esterno, si teneva conto soltanto degli effetti delle varie tipologie di suolo e dei diversi ostacoli che venivano a schermare la sorgente stessa. Invece, non si consideravano nel calcolo le condizioni meteorologiche, che hanno anch'esse un effetto significativo sulla propagazione del rumore quando la distanza fra la sorgente sonora ed il ricettore supera un centinaio di metri. Questo effetto cresce con la distanza e diventa tanto più importante quanto più la sorgente od il ricettore sono vicini dal suolo. Per esempio, è stata misurata una variazione di rumore di circa 20 dB(A) a 600 m di distanza dalla sorgente solo a causa delle condizioni meteorologiche (CERTU et. al., 1997). Per quanto riguarda livelli sonori medi su lunghi periodi (ad esempio 24 ore),

queste variazioni sono meno importanti, ma rimangono ugualmente considerevoli.

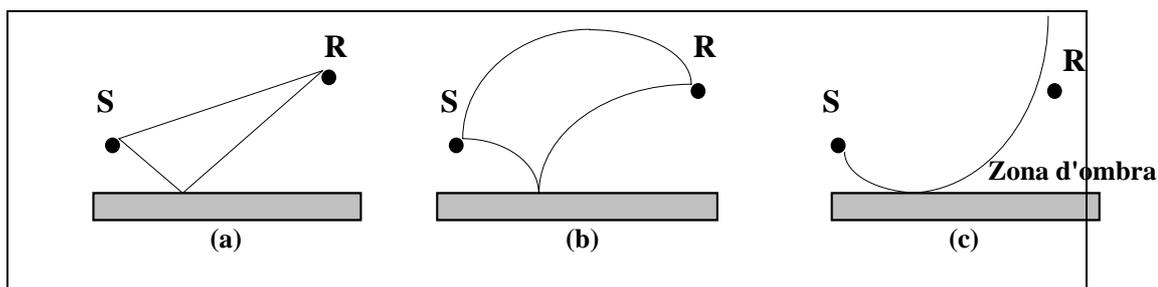


Figura 8. Andamento dei raggi sonori per diverse situazioni di gradiente verticale di velocità del suono. (a): $\partial c/\partial h = 0$. (b): $\partial c/\partial h > 0$. (c): $\partial c/\partial h < 0$.

Questo effetto discende direttamente dal gradiente verticale della velocità del suono, $\partial c/\partial h$. In un'atmosfera omogenea, dove la velocità del suono è dovunque la stessa, il gradiente è nullo ed i raggi sonori sono rettilinei (figura 8a). In realtà, certi effetti atmosferici (vento, soleggiamento, manto nuvoloso) producono un gradiente $\partial c/\partial h$ che induce un fenomeno di rifrazione, vale a dire che i raggi sonori si curvano verso il suolo ($\partial c/\partial h > 0$) (figura 8b) o verso il cielo ($\partial c/\partial h < 0$) (figura 8c). L'attenuazione delle onde sonore in vicinanza del suolo viene pertanto modificata, così come il livello sonoro a grande distanza della sorgente. Due tipi di fattori meteorologici producono degli effetti importanti: i fattori termici ed aerodinamici. In sintesi:

- un cielo nuvoloso senza vento, corrisponde ad una situazione di gradiente verticale di velocità del suono nullo ($\partial c/\partial h = 0$), questa situazione è chiamata "omogenea";
- un vento a favore od un'inversione termica (di notte con cielo sereno per esempio), corrispondono ad una situazione di gradiente verticale di velocità del suono positivo ($\partial c/\partial h > 0$); questa situazione è chiamata "favorevole alla propagazione";
- un vento contrario od un giorno molto soleggiato senza vento, corrispondono ad una situazione di gradiente verticale di velocità del suono negativo ($\partial c/\partial h < 0$); questa situazione è chiamata "sfavorevole alla propagazione".

In realtà, questi fattori si combinano e i loro effetti possono sommarsi o, al contrario, compensarsi. E' importante notare che le condizioni di propagazione in atmosfera omogenea s'incontrano raramente.

Per illustrare in un modo semplice l'effetto delle variazioni delle condizioni atmosferiche sulla propagazione del rumore ad una certa distanza, la figura 9 riporta in sintesi i risultati di alcune sperimentazioni condotte durante parecchie stagioni in un sito aperto (pianura di "La Crau" nel Sud della Francia, vicino ad Arles), con una sorgente punti-forme che emetteva un rumore a banda larga con potenza massima nelle bande d'ottava centrate su 500 Hz e 1 kHz, posta 6 m sopra il livello del terreno naturale, e diversi ricettori posti a varie distanze dalla sorgente (da 0 a 640 m) ed a 1,50 m e 6 m di altezza. Le prime conclusioni sono:

- lo scarto tipo dei livelli sonori cresce con la distanza;
- la variazione dei livelli sonori è più importante per i gradienti negativi che per i gradienti positivi;
- gli effetti meteorologici divengono importanti, e dunque devono essere inclusi nei modelli di calcolo, a partire da distanze superiori ad un centinaio di metri.

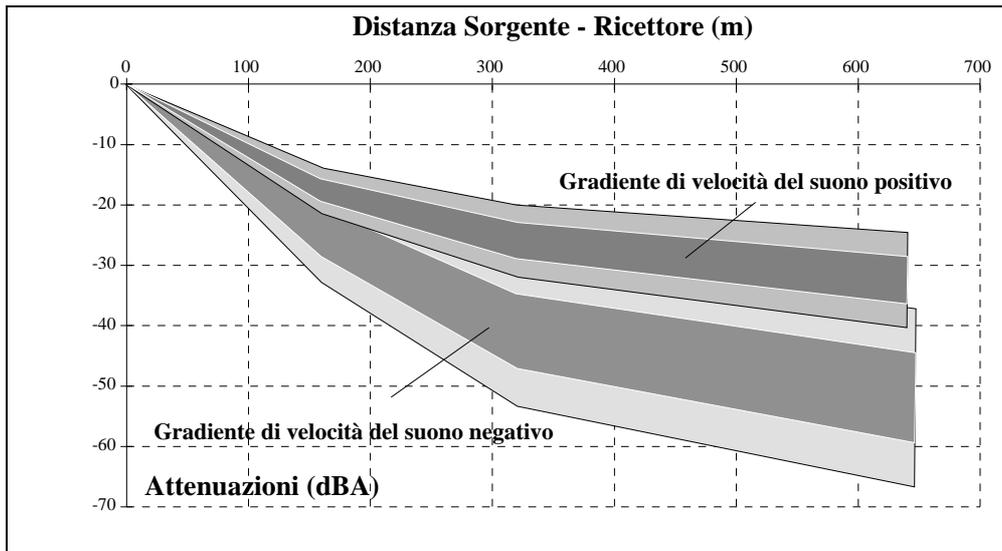


Figura 9. Dispersione dei livelli sonori in funzione del segno del gradiente verticale di velocità del suono (da Bérengier e Garai, 2000).

7.1. La norma ISO 9613-2

La norma ISO 9613-2 riferisce tutte le formule approssimate che danno i vari termini di attenuazione ad una situazione meteorologica base, quella “sottovento”, cioè in condizioni favorevoli alla propagazione, così definita:

- direzione del vento entro un angolo di $\pm 45^\circ$ dalla direzione sorgente \rightarrow ricevitore;
- velocità del vento compresa tra 1 m/s e 5 m/s, misurata ad un’altezza compresa tra 3 m e 11 m dal suolo.

La norma specifica che le stesse approssimazioni valgono anche per condizioni di moderata inversione termica, come durante una notte senza vento con cielo sereno.

Le formule date permettono di ottenere un livello equivalente “sottovento”, $L_{fT}(DW)$, per bande d’ottava; da questo viene poi ricostruito il livello globale in scala di ponderazione “A”, $L_{AT}(DW)$; da quest’ultimo viene infine calcolato il livello equivalente a lungo termine, $L_{AT}(LT)$, come:

$$L_{AT}(LT) = L_{AT}(DW) - C_{met} \quad (18)$$

Il termine correttivo C_{met} dovrebbe tenere conto delle variazioni meteorologiche durante un periodo a lungo termine e viene calcolato con le equazioni (19a) e (19b):

$$C_{met} = 0 \quad \text{se } d_p \leq 10(h_s + h_r) \quad (19a)$$

$$C_{met} = C_0 \left[1 - 10(h_s + h_r)/d_p \right] \quad \text{se } d_p > 10(h_s + h_r) \quad (19b)$$

dove h_s è l’altezza dal suolo della sorgente; h_r è l’altezza dal suolo del ricevitore; d_p è la distanza in orizzontale dalla sorgente al ricevitore; C_0 è un fattore in decibel che di-

pende dalle statistiche meteorologiche locali. Per esempio, se per il 50% del periodo d'interesse si riscontrano condizioni favorevoli alla propagazione mentre per il 50% restante l'attenuazione globale aumenta di 10 dB, C_0 vale approssimativamente +3 dB. In pratica, C_0 varia tra 0 dB e +5 dB e solo eccezionalmente supera i +2 dB.

La norma ISO 9613-2 dichiara indicativamente un'accuratezza di ± 3 dB per il livello globale a lungo termine, $L_{AT}(LT)$, prodotto da sorgenti a banda larga. La norma è applicabile per distanze tra sorgente e ricevitore non superiori a 1 km.

7.2. Il nuovo metodo francese NMPB

Per rispondere alle esigenze della nuova regolamentazione francese, negli anni 1995-1996 è stato sviluppato un nuovo modello di propagazione del suono per condizioni omogenee e favorevoli, detto NMPB (CERTU et al., 1997). In esso si considerano soltanto le condizioni che danno i livelli sonori più alti, e dunque la scelta si riduce alle sole equazioni che riguardano condizioni meteorologiche omogenee e favorevoli. Il primo caso è già stato considerato al punto 5. Il secondo è esposto qui di seguito.

7.2.1. Propagazione in condizioni "favorevoli"

Nel caso di un gradiente verticale di velocità del suono positivo, si può scrivere un'equazione simile alla (12) considerando che i raggi sonori compiano dei percorsi curvi (L'Espérance et al., 1992). Quando il valore del gradiente è importante o quando la distanza fra la sorgente e il ricevitore è abbastanza grande, parecchi raggi sonori possono raggiungere il ricevitore R (figura 10). Allora, il valore medio della pressione sonora $\langle p^2 \rangle$ viene espresso dalla somma dei contributi di ogni percorso:

$$\langle p^2 \rangle = \sum_{i=1}^N \frac{A_i^2 \cdot |Q_i|^2}{r_i^2} + 2 \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} \frac{A_i |Q_i| \cdot A_j |Q_j|}{r_i r_j} \cdot \cos \left[2\pi f (\tau_j - \tau_i) + \arg \left(\frac{Q_j}{Q_i} \right) \right] \quad (20)$$

A_i e A_j includono le attenuazioni dovute all'assorbimento del suono nell'aria; r_i e τ_i corrispondono rispettivamente alle lunghezze ed ai tempi di percorso dei raggi sonori curvi; N è il numero totale dei percorsi, che include quello diretto; Q_i è il fattore di riflessione per onde sferiche, funzione dell'angolo di riflessione ϕ_i e del numero di riflessioni n_i . $Q_i = [Q(\phi_i)]^{n_i}$. Per il percorso diretto si considera $Q_i = 1$.

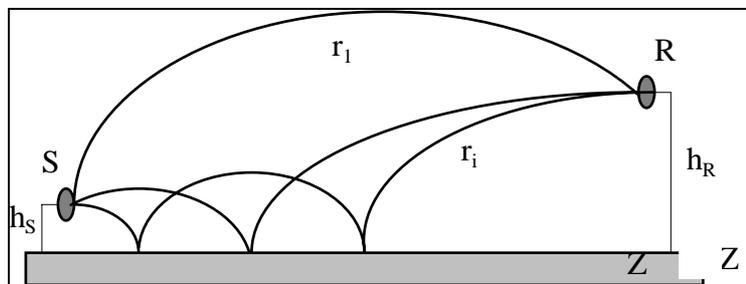


Figura 10. Geometria del problema nel caso di propagazione in condizioni favorevoli.

In tutte queste equazioni, gli effetti di turbolenza possono essere introdotti mediante una scala di turbolenza L ed un indice di fluttuazione della rifrazione acustica $\langle \mu^2 \rangle$ (Daigle, 1979). Nella tabella 1 sono riportati i valori delle differenze di livello sonoro tra condizioni omogenee e favorevoli, per diverse situazioni geometriche, tanto per le misurazioni quanto per le previsioni teoriche. Per le distanze corrispondenti alle misure e-splicitate nella tabella 1, è stato introdotto nel calcolo un valore di $\langle \mu^2 \rangle$ pari a $6 \cdot 10^{-6}$.

Tabella 1. Confronto misurazioni/previsioni - Differenze fra condizioni omogenee e favorevoli - Sito di "La Crau" (Francia).

| Distanza Sorgente/Ricettore (m) | Altezza del ricettore (m) | Misurazione (dB(A)) (media \pm scarto tipo) | Previsione teorica (dB(A)) |
|---------------------------------|---------------------------|---|----------------------------|
| 160 | 6,0 | $0 \pm 1,1$ | +0,1 |
| | 1,5 | $2,5 \pm 1,5$ | -0,1 |
| 320 | 6,0 | $-0,3 \pm 1,4$ | -0,4 |
| | 1,5 | $4,6 \pm 1,4$ | +4,2 |
| 640 | 6,0 | $3,7 \pm 2,7$ | +2,5 |
| | 1,5 | $8,5 \pm 2,8$ | +8,3 |

I risultati presentati confermano che:

- l'effetto del gradiente positivo corrispondente alle condizioni favorevoli cresce con la distanza e decresce coll'altezza;
- l'ampiezza del campo di variazione cresce ugualmente con la distanza;
- la previsione fornita dai modelli teorici è abbastanza buona quando si tratta di valori medi.

7.2.2. Livello sonoro a lungo termine

Il livello sonoro calcolato con il modello NMPB permette di valutare l'impatto di un progetto stradale o di altre sorgenti sonore tenendo conto delle condizioni meteorologiche realmente osservabili durante un lungo periodo (parecchi anni). Un tale livello sonoro è chiamato "a lungo termine (L_{LT})". Esso risulta dalla totalità delle condizioni meteorologiche osservabili in un dato sito ed è ottenuto dalla somma dei contributi energetici dei livelli sonori registrati per le condizioni atmosferiche omogenee e favorevoli, ponderati secondo le loro occorrenze relative nel sito considerato:

$$L_{LT} = 10 \lg \left[p \cdot 10^{\frac{L_F}{10}} + (1 - p) \cdot 10^{\frac{L_H}{10}} \right] \quad (21)$$

dove il livello L_F è rappresentativo delle condizioni favorevoli osservate durante la frazione "p" del periodo considerato ($0 \leq p \leq 1$) ed il livello L_H è relativo alle condizioni omogenee osservate nella rimanente frazione $(1 - p)$. I livelli sonori osservati in condizioni sfavorevoli sono ricondotti ai livelli in condizioni omogenee.

Per valutare la frazione "p" di occorrenza delle condizioni favorevoli in un dato si-

to, il modello NMPB propone diverse alternative, in ordine decrescente di preferenza:

- utilizzare le tavole e le carte fornite in allegato al metodo, costruite sulla base dei rilievi di lungo periodo (da 10 a 30 anni) di 40 stazioni meteorologiche distribuite sul territorio francese; i dati sono validi per siti relativamente piatti con scarsa vegetazione alta, pochi ostacoli alla propagazione, assenza di grandi masse d'acqua (laghi o fiumi) ed altitudine inferiore a 500 m;
- utilizzare dati meteorologici locali, purché siano basati su rilievi di lungo periodo (da 10 a 30 anni);
- utilizzare dati meteorologici locali, raccolti appositamente per la valutazione da compiere e per un periodo assolutamente non inferiore ad un anno;
- utilizzare le tavole e le carte fornite in allegato al metodo, anche se il sito da studiare non corrisponde ai criteri di validità dell'allegato stesso, magari adottando valori "di sicurezza" approssimati per eccesso.

La suddetta formulazione permette di prevedere i livelli sonori equivalenti L_{Aeq} (6:00-22:00) e L_{Aeq} (22:00-6:00) in conformità ai regolamenti vigenti in Francia. I calcoli sono condotti nelle seguenti fasi:

- scomposizione delle sorgenti di rumore in sorgenti puntiformi elementari;
- determinazione del livello di potenza acustica di ogni sorgente;
- ricerca dei percorsi di propagazione fra ogni sorgente ed il ricettore (percorsi diretti, ri-flessi, e/o di diffrazione);
- per ogni percorso di propagazione:
 - calcolo dell'attenuazione per condizioni favorevoli alla propagazione,
 - calcolo dell'attenuazione per condizioni omogenee,
 - calcolo del livello sonoro a lungo termine L_{LT} partendo dai livelli L_F , L_H e della frazione di occorrenza temporale di condizioni favorevoli "p",
 - accumulo dei livelli sonori di lungo termine relativi ad ogni percorso, per calcolare il livello sonoro totale al ricettore.

Per una sorgente puntiforme S_i di potenza L_{AWi} , e per ogni banda d'ottava, il livello sonoro equivalente al ricettore R è ottenuto per ogni condizione meteorologica dalle formule:

$$L_{i,F} = L_{AWi} - A_{i,F} \quad (22)$$

$$L_{i,H} = L_{AWi} - A_{i,H} \quad (23)$$

$A_{i,F}$ e $A_{i,H}$ rappresentano la totalità delle attenuazioni lungo il percorso delle onde sonore per le condizioni: favorevoli alla propagazione e omogenee, rispettivamente. Tali attenuazioni si esplicitano in quattro termini:

$$A_{i,F} = A_{div} + A_{atm} + A_{sol,F} + A_{dif,F} \quad (24)$$

$$A_{i,H} = A_{div} + A_{atm} + A_{sol,H} + A_{dif,H} \quad (25)$$

dove:

A_{div} : attenuazione per divergenza geometrica;

- A_{atm} : attenuazione per assorbimento atmosferico;
 $A_{sol,F}$: attenuazione per effetto del suolo, in condizioni favorevoli;
 $A_{sol,H}$: attenuazione per effetto del suolo, in condizioni omogenee;
 $A_{dif,F}$: attenuazione per diffrazione da parte di eventuali ostacoli, in condizioni favorevoli;
 $A_{dif,H}$: attenuazione per diffrazione da parte di eventuali ostacoli, in condizioni omogenee.

Il livello sonoro a lungo termine, per ogni sorgente puntiforme ed ogni banda di frequenza, è quindi calcolato mediante l'equazione (21). Il livello globale in dB(A) è infine ottenuto dalla somma dei contributi della totalità delle sorgenti puntiformi e dalla somma dei livelli sonori in ogni banda d'ottava.

Le diverse attenuazioni in condizioni favorevoli sono calcolate con la stessa procedura prevista dalla norma ISO 9613-2:1996. Tuttavia, per quanto riguarda la diffrazione così come gli effetti dovuti a variazioni locali della topografia ed alla presenza di strade in trincea o in rilevato, il metodo fornisce elementi di calcolo che risultano carenti nella norma ISO. In condizioni omogenee, le attenuazioni sono calcolate mediante formule desunte dai modelli più complessi in uso nei laboratori di ricerca (Defrance, 1996). L'insieme degli algoritmi proposti in questo nuovo metodo di previsione è stato verificato con l'ausilio dei modelli teorici suddetti.

I risultati forniti da questo nuovo metodo di previsione sono stati validati con alcune misure *in situ*. Non sono ancora molti i dati attualmente disponibili, per il fatto che il metodo impone delle misurazioni a lungo termine. Tuttavia, sono stati selezionati alcuni siti specifici per il confronto. Quattro di essi permettono delle misure di rumore da traffico in campo aperto, con i ricettori distribuiti fra 30 m e 550 m di distanza rispetto al ciglio della strada. I confronti, riferiti a valori di $L_{Aeq,LT}$, sono presentati nella figura 11. In questi quattro siti, il valore medio delle differenze misurazione/previsione è di -1,0 dB(A) con uno scarto tipo di 1,2 dB(A). Questi risultati sono abbastanza buoni per confermare la validità del metodo, anche se appare una piccola tendenza a sottostimare la previsione del livello $L_{Aeq,LT}$ di circa 1 dB(A).

Vengono riportati qui di seguito anche i risultati di validazioni compiute in siti più complessi (Gauvreau, 1999), che presentano un effetto di diffrazione moderato per ricet-tori posti a diverse distanze dalla sorgente (da 15 m a 300 m). I risultati presentati nella figura 12 fanno apparire una tendenza a sopravvalutare la previsione del livello $L_{Aeq,LT}$ di circa 2 dB(A). Ciò è dovuto in gran parte all'ipotesi di ricondurre le condizioni sfavorevoli alla propagazione a condizioni omogenee, anche per i livelli sonori più elevati, ed a una sottovalutazione degli effetti del suolo da entrambe le parti della zona di diffrazione nelle equazioni semplificate.

Ulteriori test di validazione del modello sono in corso per siti molto più complessi (per esempio autostrada sul pendio di una valle e autostrada in viadotto attraverso una valle). Tuttavia, a tutt'oggi i risultati non sono stati ancora pubblicati.

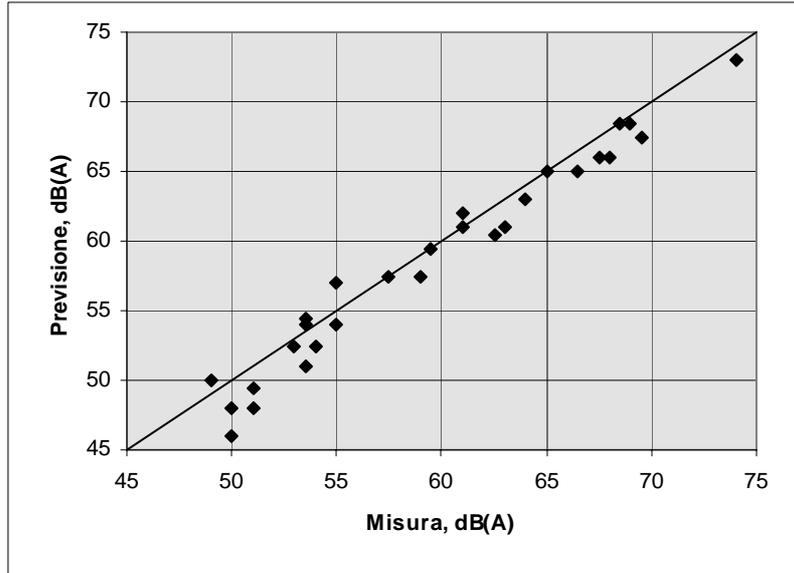


Figura 11. Confronto misurazioni/previsioni per il modello NMPB in quattro 4 siti in campo aperto (da Bérengier e Garai, 2000).

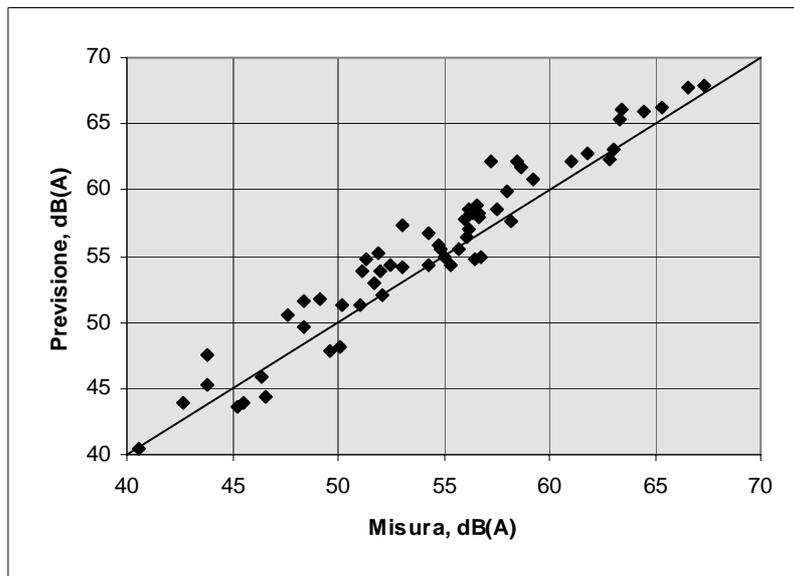


Figura 12. Confronto misurazioni/previsioni per il modello NMPB in due 2 siti con effetti di diffrazione moderati (da Bérengier e Garai, 2000).

8. Effetto della turbolenza atmosferica

L'atmosfera è un mezzo instabile, con continue fluttuazioni, sia nello spazio che nel tempo, di temperatura, velocità del vento, pressione e densità. Quando le onde sonore si propagano attraverso l'atmosfera, queste fluttuazioni diffondono l'energia sonora. Il

campo di pressione sonora complessivo è la somma, in ampiezza e fase, delle onde che si propagano direttamente dalla sorgente al ricevitore e delle onde disperse dalla turbolenza; ne risultano fluttuazioni casuali in ampiezza e fase.

La turbolenza viene in genere schematizzata come una distribuzione di vortici con una scala di turbolenza, L , dell'ordine di qualche metro (Daigle, 1979) ed un indice di fluttuazione della rifrazione acustica $\langle \mu^2 \rangle$ (Sutherland e Daigle, 1997). Per situazioni classiche, $L \approx 1,1$ m e $\langle \mu^2 \rangle$ varia fra 2 e $15 \cdot 10^{-6}$.

Un effetto importante della turbolenza atmosferica è la degradazione dell'attenuazione per effetto del suolo e delle barriere. La prima attenuazione tende ad un valore limite compreso tra 20 dB e 30 dB al crescere della distanza tra sorgente e ricevitore (Sutherland e Daigle, 1997). Per le barriere, l'energia diffusa dalla turbolenza penetra la zona di "ombra acustica" ed impedisce all'attenuazione di crescere oltre un certo limite, indipendente dall'altezza della barriera stessa, che Kurze e Anderson (1971) hanno stimato in 24 dB (cfr. equazione (14c)). Anche un'atmosfera non turbolenta ma disomogenea può produrre una degradazione delle due attenuazioni citate, particolarmente a grande distanza, quando determina l'incurvarsi verso il suolo delle traiettorie sonore (si consideri il ben noto caso di inversione termica notturna).

L'inclusione degli effetti atmosferici nel calcolo è un problema complesso, tuttora oggetto di ricerca. Una formulazione semplice, valida in media su lunghi periodi di tempo, è quella già vista del nuovo metodo francese NMPB, che considera una frazione " p " di occorrenza di condizioni favorevoli alla propagazione ($0 \leq p \leq 1$). Una formulazione recente ed efficace è quella proposta da Muradali e Fyfe (1999), sulla base della quale è stata prodotta la figura 13.

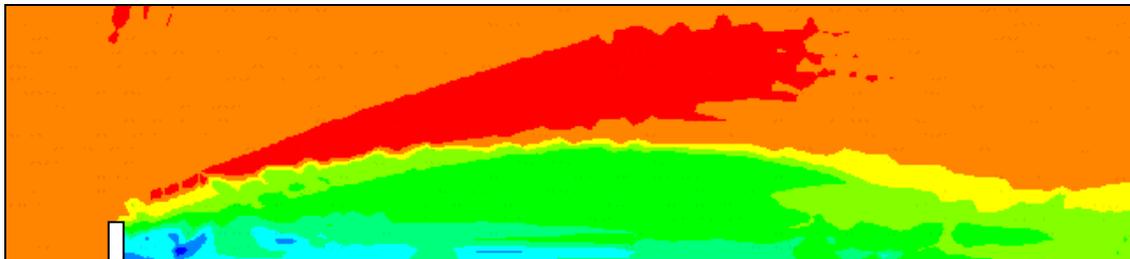


Figura 13. Rappresentazione grafica in sezione dei valori dell'insertion loss di una barriera alta 3 m in presenza di turbolenza atmosferica (sorgente sonora, non mostrata, sulla sinistra). Metodo di calcolo di Muradali e Fyfe (1999).

9. Riflessioni e attraversamento di vegetazione e di siti industriali e residenziali

Sia la norma ISO 9613-2 che il metodo francese NMPB considerano le riflessioni sonore su superfici verticali (per esempio facciate di edifici), limitandosi alla prima riflessione e trattandola in termini di sorgenti immagine.

La norma ISO 9613-2 considera anche altri termini addizionali. L'attenuazione per attraversamento di una fascia vegetazione compatta (che blocchi completamente la visuale) compresa tra 10 m e 200 m è data in forma tabulare. L'attenuazione per attraversamento di un sito industriale (tubi, valvole, cabine, elementi strutturali, ecc.) è data in prima approssimazione in forma tabulare e limitata ad un massimo di 10 dB.

L'attenuazione per attraversamento di un sito residenziale può, almeno in linea di principio, essere valutata applicando ripetutamente le equazioni per la schermatura da parte degli edifici e per la riflessione sulle facciate degli stessi; altrimenti la norma ISO fornisce una stima di massima, limitata ad un massimo di 10 dB, dell'effetto medio prodotto in funzione della densità degli edifici.

10. Conclusioni

Da molti anni il rumore in ambiente abitativo ed esterno è riconosciuto come un importante fattore d'inquinamento dalle popolazioni dei paesi europei. Di più, i diversi regolamenti usciti in questi ultimi anni a seguito dell'adozione delle leggi quadro nazionali hanno fatto emergere nuove situazioni conflittuali tra la collettività ed i cittadini direttamente interessati dall'impatto acustico di autostrade, linee ferroviarie ad alta velocità, aeroporti, ecc. In questo contesto, la capacità di predire con sufficiente accuratezza l'impatto prodotto dalla propagazione del suono in ambiente esterno si rivela essere sempre più indispensabile.

Per ottenere un'accuratezza veramente soddisfacente, i modelli debbono includere in modo preciso i principali fenomeni fisici che si verificano nel corso della propagazione delle onde sonore tra la sorgente ed il ricevitore. Nel presente lavoro è stato presentato lo stato dell'arte della comprensione di tali fenomeni, dando anche un'idea delle potenzialità dei modelli raccomandati dalla proposta di direttiva europea nel rappresentarli. Se ne può concludere che, se si vuole rispondere alla maggior parte dei problemi di rumore esistenti, i modelli debbono essere ulteriormente migliorati e verificati con estese sperimentazioni in campo. Questo è il compito che attende i ricercatori per gli anni successivi.

Bibliografia

Bérenghier M., Garai M. (2000), "Propagazione del rumore da traffico veicolare", Atti del Convegno *Traffico e Ambiente*, Trento, 49-62.

Bérenghier M., Hamet J.F. (1997), "Etude acoustique des milieux poreux: Application aux revêtements drainants", Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, **212**, 65-74.

CERTU, SETRA, LCPC, CSTB (1997), "Bruit des infrastructures routières. Méthode de calcul incluant les effets météorologiques - Version expérimentale, NMPB-Routes-96".

Chessel C.I. (1977), "Propagation of noise along a finite impedance boundary", *J. Acoust. Soc. Am.*, **62**, 825-834.

Commissione delle Comunità Europee (2000), "Proposta di direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio relativa alla determinazione e alla gestione del rumore ambientale", Bruxelles 2000/0194(COD).

Daigle G.A. (1979), "Effects of the atmospheric turbulence on the interference of sound above a finite impedance boundary", *J. Acoust. Soc. Am.*, **65**(1), 45-49.

Defrance J. (1996), “Méthode analytique pour le calcul de propagation de bruit extérieur”, Tesi di dottorato, Université du Maine, le Mans, Francia.

Delany M.E., Bazley E.N. (1970), “Acoustic properties of fibrous absorbent materials”, *Appl. Acoust.*, **3**, 105-116.

Direttiva 2000/14/CE del 08/05/2000, “Ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri concernenti l'emissione acustica ambientale delle macchine ed attrezzature destinate a funzionare all'aperto”.

ECAC-CEAC (1997), “Report on standard method of comparing noise contours around civil airports”.

Embleton T.F.W., Piercy J.E., Olson N. (1976), “Outdoor sound propagation over ground of finite impedance”, *J. Acoust. Soc. Am.*, **59**(2), 267-277.

Garai M. (2000), “Caratteristiche acustiche delle barriere”, Atti del Convegno *Traffico e Ambiente*, Trento, 181-197.

Gauvreau B. (1999), “Influence des conditions micrométéorologiques sur l'efficacité des écrans acoustiques”, Tesi di dottorato, Université du Maine, le Mans, Francia.

Isei T., Embleton T.F.W., Piercy J.E., “Noise reduction by barriers on finite impedance ground”, *J. Acoust. Soc. Am.*, **67**(1), 46-58 (1980).

ISO 9613-1 (1993), “Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere”.

ISO 9613-2 (1996), “Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation”.

ISO 9053 (1991), “Acoustics - Materials for acoustic application - Determination of airflow resistance”.

ISO 10534-1 (1996), “Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 1 : Method using standing wave ratio”.

ISO/FDIS 13472-1 (2000), “Acoustics - Measurement of sound absorption of road surfaces in situ - Part 1: Extended surface method”.

Kawai T., Fujimoto K., Itow T. (1977), “Noise propagation around a thin half-plane”, *Acustica*, **38**, 313-323.

Kawai Y., Terai T. (1990), “The application of integral equation methods to the calculation of sound attenuation by barriers”, *Appl. Acoust.*, **31**, 101-1117.

Kurze U.J., Anderson G.S. (1971), “Sound attenuation by barriers”, *Appl. Acoust.*, **4**, 35-53.

LCPC (1997), “Banc gamma vertical (A322C)”, Le matériel LPC, 58.

L'Espérance A. (1989), "The insertion loss of finite length barriers on the ground", *J. Acoust. Soc. Am.*, **86**(1), 179-183.

L'Espérance A., Herzog P., Daigle G.A., Nicolas J. (1992), "Heuristic model for outdoor sound propagation based on an extension of the geometrical ray theory in the case of a linear sound speed profile", *App. Acoust.*, **37**, 111-119.

Maekawa Z. (1968), "Noise reductions by screens", *Appl. Acoust.*, **1**, 157-173.

Muradali A., Fyfe K.R. (1999), "Accurate barrier modeling in the presence of atmospheric effects", *Appl. Acoust.*, **56**, 157-182.

Nicolas J., Embleton T.F.W., Piercy J.E. (1983), "Precise model measurements versus theoretical prediction of barriers insertion loss in presence of the ground", *J. Acoust. Soc. Am.*, **73**(1), 44-54.

Rudnick I. (1947), "Propagation of an acoustic wave along a boundary", *J. Acoust. Soc. Am.*, **19**, 348-356.

Sutherland L.C. (1975), "Ambient noise level above plane with continuous distribution of random sources", *J. Acoust. Soc. Am.*, **57**, 1540-1542.

Sutherland L.C., Daigle G.A. (1997), "Atmospheric sound propagation", in *Encyclopedia of Acoustics*, edited by M.J. Crocker, John Wiley & Sons, New York.

Tatge R.B. (1972), "Noise radiation by plane arrays of incoherent sources", *J. Acoust. Soc. Am.*, **52**, 732-736.