

COSTRUZIONE DI UN MODELLO DI PREVISIONE DEL RUMORE DA TRAFFICO VEICOLARE

Alessandro Peretti^{a,b}, Giovanni Brambilla^c, Mauro Baiamonte^b, Michele Tonazzo^b, Paolo Spagna^d, Danilo Campaner^e, Roberto Colletto^c, Angelo Farina^f, Gianluca Barbi^g, Andrea Tombolato^h

^a Scuola di Specializzazione in Medicina del Lavoro, Università di Padova

^b Peretti e Associati, Padova

^c Istituto di Acustica "O.M. Corbino", CNR, Roma

^d Comune di Chioggia (Venezia)

^e Comune di Meolo (Venezia)

^f Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Parma

^g Tecnico competente in acustica, Ferrara

^h Tecnico competente in acustica, Padova

1. Premessa

Generalmente i modelli di previsione del rumore da traffico veicolare vengono realizzati a partire da una banca dati dei livelli sonori rilevati in condizioni standard, al passaggio di singoli veicoli di predefinite tipologie e a prefissate velocità. In questo lavoro si propone un'altra metodologia mediante la quale è possibile definire un modello di previsione anche sulla base di un adeguato monitoraggio sul campo, in condizioni reali. Considerato che l'esecuzione di questi monitoraggi è diventata ormai prassi comune, ciascun tecnico è virtualmente in grado di costruirsi un proprio modello di previsione, attinente alla specifica realtà in esame in primo luogo per quanto riguarda il parco veicolare effettivamente circolante. Per venire incontro a tali esigenze, in questa sede viene descritto, passo passo e con finalità didattiche, l'iter procedurale impiegato per realizzare un modello di previsione; tale modello si basa sulle proposte avanzate dal CNR nel 1983 [1] e riprese successivamente da Cocchi et al. [2].

Il modello, da noi sviluppato per l'area urbana di Chioggia e verificato sulla base dei dati con cui il modello stesso era stato costruito [3,4], è stato nuovamente verificato mediante ulteriori dati acquisiti nell'ambito di una seconda indagine svolta nella medesima area urbana. A titolo di prova il modello è stato controllato anche con i dati ottenuti in un recente monitoraggio svolto nella cittadina di Meolo (Venezia).

2. Modalità di indagine

Nel comune di Chioggia sono state effettuate due indagini distinte, la prima nell'estate del 2002, la seconda nell'estate del 2003; sono state esaminate dapprima 18 posizioni e successivamente 12 posizioni, in ambedue i casi emblematiche per quanto riguarda il traffico veicolare. Per ottenere dati ottimali finalizzati alla elaborazione del modello di previsione, si è cercato di effettuare i rilievi fonometrici a 7.5 m dalla mezzera della strada (considerata ai fini acustici a 0.5 m di altezza), ponendo il microfono ad un'altezza dal suolo di 4 m [5] e fissando la distanza tra la proiezione del microfono a terra e l'asse della strada, per quanto possibile, pari a 6.63 m. Di fatto quest'ultima distanza, a causa sia delle strade strette del centro storico che della necessità di porre la strumentazione in siti abitati o recintati, è risultata compresa tra 3.20 e 12.95 m (valore medio 7.77 m, deviazione standard 2.75 m) nella prima indagine

e tra 4.35 e 18.30 m (valore medio 10.27 m, deviazione standard 4.35 m) nella seconda indagine. L'altezza del microfono di 4 m è invece sempre stata rispettata. I rilievi sono stati eseguiti nei giardini, sui poggioli o sulle terrazze, fissando il microfono su un cavalletto o su un braccio snodabile o su un'asta. Le misure fonometriche sono state effettuate con continuità per sette giorni consecutivi rilevando i livelli sonori equivalenti orari ponderati A.

Le misure riguardanti i flussi di traffico veicolare sono state eseguite in corrispondenza delle posizioni fonometriche mediante centraline posizionate a bordo strada e munite di sensori a microonde. Di ogni veicolo in transito su ciascuna delle due corsie sono stati rilevati, ora per ora, la tipologia del mezzo e la velocità, suddividendo tipologia e velocità in 6 classi.

Per quanto riguarda la cittadina di Meolo, è stata esaminata una strada provinciale, sia in estate (con forte traffico turistico) che in autunno, impiegando la stessa metodologia adottata per il comune di Chioggia.

3. Costruzione del modello

3.1 Catalogazione dei siti

A seconda delle loro caratteristiche morfologiche, i siti di misura sono stati catalogati nel seguente modo:

- 1) strade urbane a U (edificato fitto) e superficie stradale asfaltata;
- 2) strade urbane a U (edificato fitto) e superficie stradale in pavé;
- 3) strade urbane a L (edificato medio) e superficie stradale asfaltata;
- 4) strade extraurbane (edificato rado) con traffico veicolare veloce e superficie stradale asfaltata.

Si può osservare che la catalogazione dei siti urbani si riferisce ad una città densamente popolata come Chioggia (nel comune risiedono complessivamente circa 50000 abitanti). Il modello proposto in questo articolo non si presta quindi ad essere utilizzato per piccoli paesi caratterizzati da strade urbane con edificato rado.

3.2 Normalizzazione dei Leq orari rispetto alla distanza

I valori dei livelli equivalenti orari $L_{Aeqh,d}$ rilevati a distanze d sono stati normalizzati rispetto alla distanza prefissata d_0 , pari a 6.63 m (cfr. par. 2). Si è impiegata la relazione del decadimento del livello sonoro per divergenza geometrica valida nel caso di sorgenti lineari (decadimento di 3 dB per raddoppio della distanza):

$$1) \quad L_{Aeqh,d_0} = L_{Aeqh,d} + 10 \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad [\text{dB(A)}]$$

dove d = distanza tra la proiezione del microfono a terra e l'asse della strada [m];
 $d_0 = 6.63$ m.

Tale relazione, che non considera gli effetti del suolo, dell'aria e dei fattori meteorologici, può essere considerata valida per distanze contenute, quali quelle in questione.

La relazione 1 si basa sulla relazione:

$$2) \quad p_{d_0}^2 = \frac{W\rho c}{2\pi d_0 L} = \frac{W\rho c}{2\pi d L} \cdot \frac{d}{d_0} = p_d^2 \cdot \frac{d}{d_0}$$

dove p = pressione sonora [Pa];
 ρ = densità dell'aria [kg/m^3];
 c = velocità del suono [m/s];
 W = potenza sonora [W];
 L = lunghezza della sorgente lineare [m].

3.3 Relazioni di base

Come è noto, il *SEL* (*Single Event Level*) è il livello di un singolo evento sonoro nel caso la sua energia sia uniformemente distribuita in 1 secondo.

In un'ora di misura possono verificarsi più eventi. Qualora il contributo del rumore residuo non sia significativo, le relazioni che legano il L_{Aeqh,d_0} ai livelli degli i -esimi eventi (SEL_i) sono le seguenti:

$$3) \quad 3600 \cdot 10^{0.1L_{Aeqh,d_0}} = \sum n_i \cdot 10^{0.1SEL_i}$$

$$4) \quad L_{Aeqh,d_0} = 10\lg\left(\frac{1}{3600}\right) + 10\lg\left(\sum n_i \cdot 10^{0.1SEL_i}\right) \quad [\text{dB(A)}]$$

dove n_i è il numero di i -esimi eventi.

Per il rumore da traffico veicolare si fa riferimento ai *SEL* delle diverse tipologie di veicoli; nel caso in esame si sono considerati i *SEL* dei motocicli (SEL_m), dei veicoli leggeri (SEL_l) e dei veicoli pesanti (SEL_p). Si è inoltre considerato il *SEL* del rumore residuo (SEL_r):

$$5) \quad 3600 \cdot 10^{0.1L_{Aeqh,d_0}} = n_m \cdot 10^{0.1SEL_m} + n_l \cdot 10^{0.1SEL_l} + n_p \cdot 10^{0.1SEL_p} + 10^{0.1SEL_r}$$

$$6) \quad L_{Aeqh,d_0} = 10\lg\left(\frac{1}{3600}\right) + 10\lg(n_m \cdot 10^{0.1SEL_m} + n_l \cdot 10^{0.1SEL_l} + n_p \cdot 10^{0.1SEL_p} + 10^{0.1SEL_r})$$

dove n_m , n_l , n_p rappresentano il numero di motocicli, di veicoli leggeri (auto e furgoni) e di veicoli pesanti (camion e TIR) transitati in un'ora.

Per meglio evidenziare la correlazione lineare tra l'energia sonora e i flussi di traffico orari n_m , n_l , n_p , le relazioni 5 e 6 possono essere scritte nel modo seguente:

$$7) \quad 3600 \cdot 10^{0.1L_{Aeqh,d_0}} = k_m \cdot n_m + k_l \cdot n_l + k_p \cdot n_p + k_r$$

$$8) \quad L_{Aeqh,d_0} = 10\lg\left(\frac{1}{3600}\right) + 10\lg(k_m \cdot n_m + k_l \cdot n_l + k_p \cdot n_p + k_r) \quad [\text{dB(A)}]$$

dove $k_m = 10^{0.1SEL_m}$, $k_l = 10^{0.1SEL_l}$, $k_p = 10^{0.1SEL_p}$, $k_r = 10^{0.1SEL_r}$.

Nella relazione 8 è possibile raccogliere a fattore comune il termine k_l ; si ottiene il tal modo la relazione:

$$9) \quad L_{Aeqh,d_0} = 10\lg\left(\frac{1}{3600}\right) + 10\lg\left[k_l \left(\frac{k_m}{k_l} \cdot n_m + n_l + \frac{k_p}{k_l} \cdot n_p + \frac{k_r}{k_l}\right)\right] \quad [\text{dB(A)}]$$

La relazione 7 sarà usata nel paragrafo 3.3, la relazione 9 nel paragrafo 3.4.

3.3 Regressione lineare dei dati rilevati

Nella relazione 7 sono noti il livello equivalente orario $L_{Aeqh,d0}$ e i flussi orari di traffico n_m, n_l, n_p (dati misurati sul campo). I valori k_m, k_l, k_p possono essere calcolati mediante regressione lineare, un metodo che consente di minimizzare gli scarti tra i due membri dell'uguaglianza, implementato nei fogli di calcolo. Per quanto riguarda il valore k_r , come si vedrà in seguito, sarà considerato all'interno di un'altra costante (α , cfr. par. 3.5).

Per ottenere valori di k affidabili conviene partire da dati il più possibile uniformi. Per tale motivo sono stati utilizzati solo i dati di una categoria di siti (quella relativa alle strade urbane a U e superficie stradale asfaltata, di cui tra l'altro si aveva una maggiore quantità di valori) relativi alla stessa fascia oraria. In pratica i valori k_m, k_l, k_p sono stati calcolati per ciascuna delle 24 fasce orarie. Dei 24 valori di ogni k è stato considerato il valore che costituisce la moda della distribuzione, ossia il valore più ricorrente.

I valori dei SEL_i (SEL_m, SEL_l, SEL_p) si calcolano tramite la seguente relazione

$$10) \quad SEL_i = 10 \lg k_i \quad [\text{dB(A)}]$$

Nel caso in esame i valori dei SEL_i sono risultati i seguenti:

- $SEL_m = 77.8 \text{ dB(A)}$;
- $SEL_l = 76.2 \text{ dB(A)}$;
- $SEL_p = 83.9 \text{ dB(A)}$.

Da questi dati emerge che il rumore minore è determinato dal passaggio di un veicolo leggero; il livello sonoro associato al passaggio di un motociclo è superiore di 1.6 dB(A), quello associato al passaggio di un veicolo pesante è superiore di 7.7 dB(A).

3.4 Calcolo e impiego dei coefficienti di equivalenza

Nelle relazioni 11 e 12 sono riportati i rapporti k_m/k_l e k_p/k_l . Dalla definizione di k_m, k_l, k_p (cfr. par. 3.2) e dai risultati dei valori di SEL_i (cfr. par. 3.3) si ottiene:

$$11) \quad \frac{k_m}{k_l} = \frac{10^{0.1SEL_m}}{10^{0.1SEL_l}} = 10^{0.1(SEL_m - SEL_l)} = 1.4$$

$$12) \quad \frac{k_p}{k_l} = \frac{10^{0.1SEL_p}}{10^{0.1SEL_l}} = 10^{0.1(SEL_p - SEL_l)} = 5.9$$

Si può osservare che i rapporti k_m/k_l e k_p/k_l indicano, rispettivamente, quanto il SEL relativo al passaggio di un motociclo e al passaggio di un veicolo pesante è maggiore in termini energetici rispetto al SEL relativo al passaggio di un veicolo leggero. Per tale motivo questi rapporti possono essere denominati coefficienti di equivalenza.

Arrotondando i coefficienti di equivalenza a 1.5 e 6, dalla relazione 9 si ottiene la relazione:

$$13) \quad L_{Aeqh,d0} = 10 \lg \left(\frac{k_l}{3600} \right) + 10 \lg \left(1.5 \cdot n_m + n_l + 6 \cdot n_p + \frac{k_r}{k_l} \right) \quad [\text{dB(A)}]$$

3.5 Calcolo della costante α

Come si vede dalla relazione 13, il $L_{Aeqh,d0}$ è dato da:

- un termine $(k_l/3600)$ indipendente dalle variabili rappresentate dai flussi del traffico

(n_m, n_l, n_p) ;

- tre termini ($1.5 n_m, n_l, 6 n_p$) dipendenti da dette variabili;
- un termine (k_r/k_l) indipendente da dette variabili.

La relazione 13 può quindi essere approssimata alla relazione

$$14) \quad L_{Aeqh,d_0} = \alpha + 10 \lg(1.5 \cdot n_m + n_l + 6 \cdot n_p) \quad [\text{dB(A)}]$$

La costante α (espressa in dB(A)) si può facilmente calcolare a partire dai valori di L_{Aeqh,d_0} e dai flussi orari di traffico n_m, n_l, n_p (dati misurati sul campo). Nel caso in esame, tale costante α è stata determinata per ciascuno dei 24 intervalli orari relativi:

- ai siti caratterizzati da strade urbane a L con superficie stradale asfaltata (valore medio 38.8 dB(A));
- ai siti caratterizzati da strade urbane a U con superficie stradale asfaltata (valore medio 40.1 dB(A));
- ai siti caratterizzati da strade urbane a U con superficie stradale in pavé (valore medio 41.6 dB(A));
- ai siti caratterizzati da strade extraurbane con traffico veicolare veloce e superficie stradale asfaltata (valore medio 42.1 dB(A)).

3.6 Definizione del modello di calcolo

La relazione 14 ha ovviamente validità generale; essa si può però riferire ai siti a L, assegnando ad α proprio il valore relativo ai siti a L (38.8) e inserendo la correzione ΔL per le altre tipologie di sito. Considerando anche la normalizzazione dei L_{eq} rispetto alla distanza (relazione 1) si è ottenuto il seguente modello di calcolo:

$$15) \quad L_{Aeqh,d} = 38.8 + 10 \lg(1.5 \cdot n_m + n_l + 6 \cdot n_p) - 10 \lg(d/d_0) + \Delta L \quad [\text{dB(A)}]$$

dove ΔL , dato dalle differenze tra i valori di α dei siti a U con superficie stradale asfaltata, a U con superficie stradale in pavè, extraurbani con superficie stradale asfaltata e il valore di α dei siti a L, assume i seguenti valori:

$$\Delta L = \begin{cases} 0 & \text{per siti a L} \\ 1.3 & \text{per siti a U con superficie stradale in asfalto} \\ 2.8 & \text{per siti a U con superficie stradale in pavè} \\ 3.3 & \text{per siti extraurbani con superficie stradale in asfalto} \end{cases}$$

Nella figura 1 sono riportate le curve dell'andamento dei valori di L_{Aeqh,d_0} in funzione dei flussi di traffico. Le curve si riferiscono a strade urbane a L. Esse sono valide anche per le altre tipologie di strade, qualora i livelli sull'asse delle ordinate vengano incrementati della quantità ΔL .

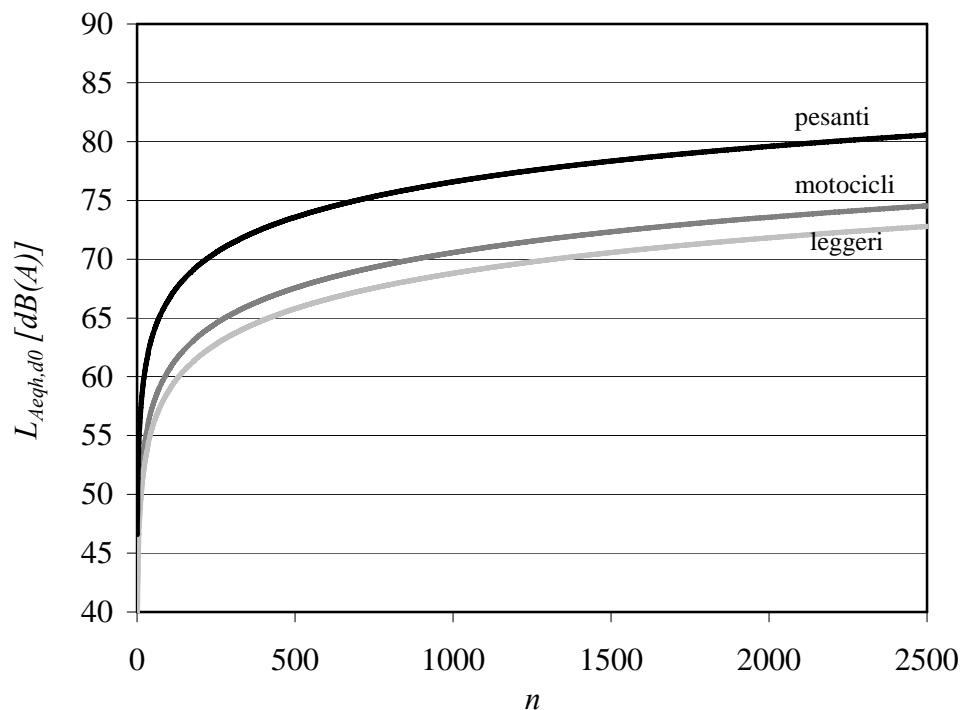


Figura 1 - Andamento del livello equivalente orario riferito a una distanza di 6.63 m dalla mezzeria della carreggiata, determinato mediante il modello di calcolo, al variare dei flussi orari (n) dei motocicli, dei veicoli leggeri e dei veicoli pesanti

4. Verifica del modello

Il modello di calcolo è stato verificato impiegando i dati relativi alla prima indagine (mediante i quali il modello stesso è stato costruito), alla seconda indagine e all'insieme dei dati di ambedue le indagini svolte a Chioggia. Per la verifica si sono confrontati i livelli orari misurati con i livelli orari determinati sulla base del modello di calcolo considerando i flussi di traffico. I coefficienti di correlazione sono risultati compresi (a seconda delle diverse tipologie di sito), tra 0.83 e 0.92 nel caso della prima indagine, tra 0.91 e 0.96 nel caso della seconda, tra 0.84 e 0.93 nel caso dell'insieme di ambedue le indagini. Come si può osservare i coefficienti di correlazione sono molto buoni.

La figura 2 e la tabella 1 si riferiscono a tutte le tipologie di sito e ad entrambe le indagini svolte a Chioggia. Nella figura è riportata la retta di regressione, nella tabella sono riportati gli scarti tra i livelli orari calcolati e i livelli orari misurati.

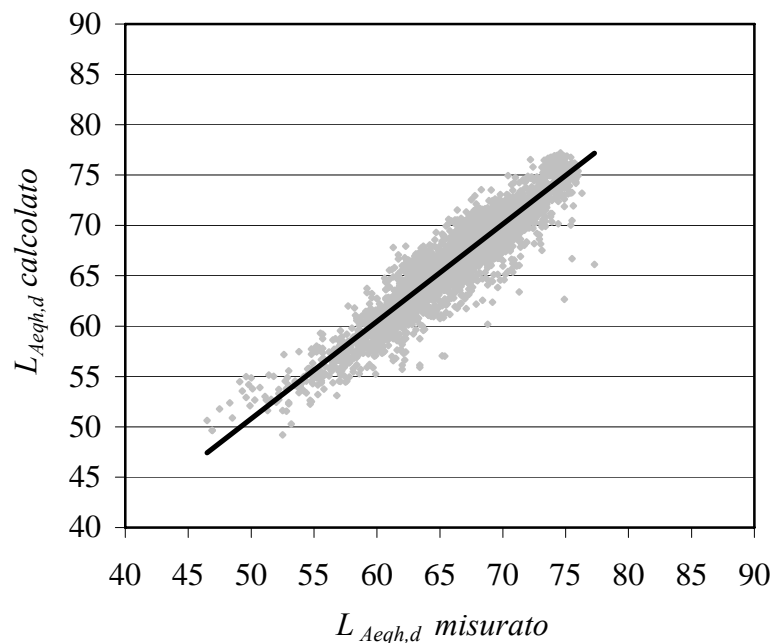


Figura 2 - Retta di correlazione tra i livelli equivalenti orari misurati e i livelli equivalenti orari determinati mediante il modello di calcolo, nel caso di tutte le tipologie di sito e di ambedue le indagini svolte a Chioggia (3807 coppie di dati, $r = 0.935$)

Tabella 1 - Distribuzione percentuale degli scarti tra i livelli equivalenti orari determinati mediante il modello di calcolo e i livelli equivalenti orari misurati in ambedue le indagini svolte a Chioggia (3807 coppie di dati)

<i>Tipo di strada</i>	<i>inferiore a -2 dB(A)</i>	<i>compreso tra -2 e -1 dB(A)</i>	<i>compreso tra -1 e 0 dB(A)</i>	<i>compreso tra 0 e 1 dB(A)</i>	<i>compreso tra 1 e 2 dB(A)</i>	<i>superiore a 2 dB(A)</i>
U asfalto	4%	9%	19%	31%	20%	16%
U pavé	4%	5%	10%	18%	28%	34%
L	16%	14%	21%	27%	17%	5%
extraurbana	7%	20%	42%	22%	5%	4%
totale	9%	12%	22%	26%	19%	13%

Come si può osservare nella figura 2, la correlazione tra i livelli equivalenti orari misurati e i livelli equivalenti orari determinati mediante il modello di calcolo, nel caso di tutte le tipologie di sito e di ambedue le indagini svolte a Chioggia, è molto buona ($r = 0.935$).

Dalla tabella 1 emerge che la differenza tra i livelli equivalenti orari determinati mediante il modello di calcolo e i livelli equivalenti orari misurati in ambedue le indagini risulta, in valore assoluto, inferiore a 1 dB(A):

- nel 50% dei casi per i siti a U con superficie stradale asfaltata;
- nel 28% dei casi per i siti a U con superficie stradale in pavè;
- nel 48% dei casi per i siti a L;
- nel 64% dei casi per i siti extraurbani;
- nel 48% dei casi considerando tutte le tipologie di sito.

Dalla stessa tabella 1 emerge che la differenza tra i livelli equivalenti orari determinati mediante il modello di calcolo e i livelli equivalenti orari misurati in ambedue le indagini risulta, in valore assoluto, inferiore a 2 dB(A):

- nel 79% dei casi per i siti a U con superficie stradale asfaltata;
- nel 61% dei casi per i siti a U con superficie stradale in pavè;
- nel 79% dei casi per i siti a L;
- nel 89% dei casi per i siti extraurbani;
- nel 79% dei casi considerando tutte le tipologie di sito.

Si può osservare che tali scostamenti sono molto bassi. Lo scarto minore si presenta per le strade extraurbane, che generalmente sono caratterizzate da traffico scorrevole; lo scarto maggiore si presenta per le strade a U con superficie in pavè, che possono essere caratterizzate non solo da traffico poco scorrevole (essendo generalmente in centro storico), ma anche da una significativa variabilità delle emissioni sonore prodotte dai veicoli causata dalla disuniformità della superficie stradale.

Per quanto riguarda il monitoraggio svolto presso la strada extraurbana di Meolo in due stagioni differenti, la correlazione tra i livelli equivalenti orari misurati e i livelli equivalenti orari determinati mediante il modello di calcolo è molto buona (279 coppie di dati, $r = 0.958$). La differenza tra i livelli equivalenti orari determinati mediante il modello di calcolo e i livelli equivalenti orari misurati risulta, in valore assoluto, inferiore a 1 dB(A) nel 54 % dei casi e inferiore a 2 dB(A) nel 89 % dei casi.

5. Conclusioni

La misurazione del rumore da traffico veicolare in condizioni reali consente di definire modelli di previsione aventi una buona accuratezza. Per tale motivo è consigliabile che i tecnici non si limitino alla sola rilevazione del rumore, ma utilizzino anche dispositivi in grado di rilevare i flussi veicolari e la loro composizione per tipologie di veicoli, impiegando procedure di indagine appositamente predefinite.

Ovviamente i modelli così costruiti andranno verificati qualora applicati a realtà diverse da quelle nelle quali sono stati realizzati.

Bibliografia

- 1] Cannelli G.B., Gluck K., Santoboni S. *A mathematical model for evaluation and prediction of mean energy level of traffic noise in Italian towns*. *Acustica*, 53, 31, 1983
- 2] Cocchi A., Farina A., Lopes G. *Modelli matematici per la previsione del rumore stradale: verifica ed affinamento del modello CNR in base a rilievi sperimentali nella città di Bologna*. Atti del 19° Convegno Nazionale AIA, Napoli 10-12 Aprile 1991

- 3] Peretti A., Barbi G., Tombolato A., Baiamonte M., Brambilla G., Farina A., Spagna P., Baldo A. *Città di Chioggia: classificazione acustica, misura del rumore da traffico e modellizzazione*. Atti del 9° Convegno di Igiene Industriale “Le Giornate di Corvara”, Corvara (Bolzano) 19-21 marzo 2003, 221-224
- 4] Peretti A., Barbi G., Tombolato A., Baiamonte M., Brambilla G., Farina A., Spagna P., Baldo A. *Acoustic zoning of Chioggia, road traffic noise measurements and mathematical model*. Atti della 5th European Conference on Noise Control, Euronoise, Napoli 19-21 maggio 2003, SS32-455
- 5] Decreto del Ministero dell’Ambiente 16 marzo 1998. *Tecniche di rilevamento e di misurazione dell’inquinamento acustico*