



# RUMORE E VIBRAZIONI

## VALUTAZIONE, PREVENZIONE E BONIFICA IN AMBIENTE DI LAVORO

Modena 20, 21 e 22 ottobre 1994

Atti a cura di

Il rumore nelle gallerie della metropolitana: modelli di previsione,  
verifica sperimentale

*F. Cotana, F. Rossi, L. Santarpia* ..... pag. 881

Attività degli organi del Consiglio Nazionale delle Ricerche sul  
tema rumore e vibrazioni in ambiente di lavoro

*G. Brambilla* ..... « 891

## ASPETTI GIURIDICI E ASSICURATIVI

Problematiche del nuovo regime di riconoscimento delle patologie  
professionali

*G. Spada* ..... « 901

Danno biologico e patologia professionale da rumore

*S. Luberto, P. Zavatti, F. Fagandini* ..... « 911

La sicurezza del lavoro nel Decreto Legislativo 15 Agosto 1991 n.  
277

*R. Guariniello* ..... « 923

## ALLEGATI

DLgs. 277/91 e materiali interpretativi: presentazione

*O. Nicolini, G. Zoboli* ..... « 961

Estratto del DLgs. 277/91 - Rumore ..... « 964

Circolare n. 3/92 (Medico competente)

*Ministero della Sanità* ..... « 979

Parere tecnico-legislativo (Adempimenti di valutazione e  
prevenzione in materia di rumore)

*Ministero del Lavoro e della Previdenza Sociale* ..... « 983

Parere tecnico-legislativo (Valutazione del rischio rumore nelle  
attività edili)

*Ministero del Lavoro e della Previdenza Sociale* ..... « 985

Parere tecnico-legislativo (Art. 45, DLgs. 277/91)

*Ministero di Grazia e Giustizia* ..... « 987

Circolare n. 45/92

*Regione Lazio* ..... « 988

## IL RUMORE NELLE GALLERIE DELLA METROPOLITANA: MODELLI DI PREVISIONE, VERIFICA SPERIMENTALE

F. Cotana (1), F. Rossi, L. Santarpia (2)

(1) Istituto di Energetica, Università di Perugia

(2) Dipartimento di Fisica Tecnica, Università "La Sapienza" - Roma

### SOMMARIO

*Nelle linee ferroviarie sotteranee il passaggio dei treni induce un elevato livello di rumore in galleria e nelle stazioni. A seguito della recente normativa che impone limiti sul livello di esposizione al rumore è importante, in sede di progetto, prevedere il livello di pressione acustica all'interno delle gallerie. A tal proposito si propone l'impiego di due modelli di previsione; il primo si basa sulla teoria classica dell'acustica statistica, il secondo sul metodo del tracciamento dei raggi. Tali modelli sono stati applicati al tratto della metropolitana di Roma, linea A, Barberini-Piazza di Spagna. Una campagna di misure ha consentito di verificare e confrontare i risultati forniti dai due modelli di calcolo. Il confronto dei dati teorici e sperimentali mostra che i due metodi di previsione possono costituire un criterio di stima per il livello di pressione acustica all'interno delle gallerie: il valore sperimentale del livello risulta sempre compreso fra quello stimato dalla teoria statistica e quello ricavato con il metodo del tracciamento dei raggi; tale comportamento si verifica anche a seguito di variazioni di alcuni parametri acustici del sistema considerato.*

### 1. INTRODUZIONE

Nelle linee ferroviarie sotteranee il passaggio dei treni induce un elevato livello di rumore in galleria e nelle stazioni. La recente normativa D.P.C.M. 1 marzo, 1991, impone che non vengano superati alcuni valori di esposizione massima al rumore. Nel caso particolare delle linee della metropolitana è possibile che questi limiti vengano superati per i passeggeri dei treni. Pertanto si rende necessario effettuare una verifica al rumore nella fase di progettazione delle nuove linee. Nella presente nota si è esaminato il caso della linea A, tratto Barberini-Piazza di Spagna.

Si sono utilizzati due modelli di calcolo; il più semplice si basa sulla teoria dell'acustica statistica classica, nel quale il campo sonoro totale si calcola sovrapponendo il campo riverberato uniforme al campo diretto. Tale modello è correttamente applicabile se si considera un tratto di galleria di lunghezza paragonabile a quella del treno; per tratti più lunghi o in corrispondenza di tratti con curve, invece, vengono a cadere alcune ipotesi della teoria statistica, come quella di ambiente confinato con dimensioni paragonabili e

coefficiente di assorbimento uniforme. Il secondo modello di calcolo utilizzato si basa sulla tecnica del tracciamento di raggi e non soffre delle precedenti limitazioni, ma presenta inconvenienti di altra natura approfonditi nel capitolo.5 [1]. Nel presente lavoro entrambi i modelli sono applicati al tronco della metropolitana di Roma, linea A, tratto Barberini Piazza di Spagna; si sono effettuate inoltre alcune misure sul campo, che hanno consentito di verificare quale dei due modelli interpreti meglio i dati sperimentali.

## ***2. DESCRIZIONE DEL SISTEMA FISICO***

### ***2.1. La galleria***

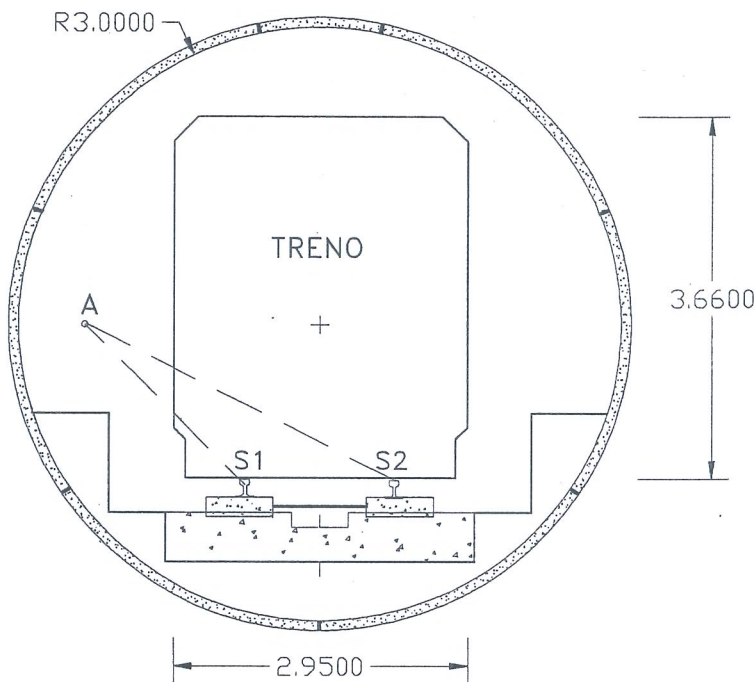
In figura 1 è riportata la sezione di un tratto di galleria della metropolitana di Roma, linea A. La galleria è costituita da una serie di anelli in cemento armato affiancati, diametro interno 6 m, lunghezza 1.2 m; ogni anello è costituito da sette conci delle dimensioni indicate in fig 1. I conci sono ancorati fra loro mediante tiranti d'acciaio; a tale scopo, sulla superficie dei conci sono ricavate particolari nicchie contenenti i bulloni di fissaggio dei tiranti. Il piano di appoggio delle rotaie è costituito da ballast, sul quale sono anche posizionati i sostegni della linea di elettrificazione. La galleria presenta, ai lati, due passerelle in cemento armato, poste sopra un piano rialzato di 0.8 m rispetto a quello delle rotaie. Si è considerato un tratto di galleria lungo 50 m, pari alla lunghezza media di un treno; le dimensioni della sezione esterna delle carrozze sono 3.4 m x 2.95 m ed il treno si muove alla velocità di 50 Km/h. In Tab.1 sono riportati i coefficienti di assorbimento delle superfici, impiegati nella valutazione del livello sonoro, nel campo di frequenze significativo (100-500 Hz). I primi tre valori di Tab.1 sono stati reperiti in Letteratura [3],[4] mentre il coefficiente di assorbimento del treno è stato ottenuto come media pesata fra i coefficienti di assorbimento delle varie superfici che compongono la sagoma esterna del treno. Si è verificato che un errore anche rilevante (+/-20%) sui valori dei coefficienti di assorbimento non pregiudica la validità delle conclusioni, poiché conduce a variazioni del livello calcolato inferiori a 1 dBlin.

### ***2.2. Descrizione delle sorgenti***

In base ai risultati delle misure effettuate in un precedente lavoro [2], ad ogni ruota è associata una sorgente puntiforme di potenza 0.15 W, per una velocità del treno di 50Km/h, posta nel punto di contatto con la rotaia. La distribuzione spettrale è tale per cui il 90% della potenza è compresa nel campo da 100 a 500 Hz.

Il diagramma di radiazione delle sorgenti è stato assunto di tipo sferico; tale ipotesi, irrilevante al fine della valutazione del livello di pressione acustica nei punti di ascolto normalmente occupati dai passeggeri (vedi punto 4.3), consente una notevole semplificazione del modello.

Per la modesta velocità del treno, inoltre, l'effetto Doppler è stato trascurato.



*Fig:1 Sezione della galleria; A è il punto in cui si effettuano le simulazioni, S1, S2 sono le sorgenti acustiche.*

### 3. METODOLOGIA

Nella valutazione teorica del campo acustico all'interno di una galleria per metropolitana si deve tener conto della singolare geometria dell'ambiente e della particolarità delle sorgenti di rumore. La lunghezza dell'ambiente è indefinita e si deve individuare il tratto di galleria all'interno del quale effettuare l'indagine; inoltre la sorgente di rumore è in moto a velocità variabile e l'intensità del rumore prodotto dipende anche dalle condizioni di moto e dai raggi di curvatura delle curve, dove sono diverse le modalità di contatto fra ruota e rotaia. Si è pertanto limitata l'indagine ad alcuni casi specifici, ritenuti significativi, fissando i seguenti parametri:

- velocità del treno 50 Km/h; è la velocità media di percorrenza per la metropolitana di Roma;
- lunghezza del tratto di galleria 50m, lunghezza del treno 50m (è la lunghezza media dei convogli).

Si considera un tratto di galleria di lunghezza pari a quella del treno che la percorre, in modo da esaminare le condizioni peggiori di esercizio; infatti, se si considerasse un tratto di galleria più lungo del treno, si avrebbe una diminuzione del livello di pressione acustica rispetto al caso trattato.

Nell'applicazione della teoria statistica, la quale richiede la presenza di un ambiente completamente delimitato, si è ipotizzato di chiudere arbitrariamente il tratto di galleria con due superfici piane, ortogonali all'asse, alle quali si è attribuito un coefficiente di assorbimento pari ad 1 (caso A) e pari a 0.015 (caso B).

Anche le simulazioni con il metodo del tracciamento dei raggi sono state effettuate distinguendo i casi A e B; in tal modo si è potuto confrontare i risultati dei due modi di calcolo nelle condizioni limite per le aperture terminali del tratto di galleria.

*Tab.1: Coefficienti di assorbimento ed aree delle varie superfici della galleria riferite ad un tratto di lunghezza pari a 50 m.*

Tipo di superficie	Area della superficie (m <sup>2</sup> )	Coeff. di assorb. acustic nel campo 125-500 Hz
Cemento liscio	565	0.015
Passerelle in Cemento	460	0.017
Terreno (Ballast)	150	0.250
Treno	635	0.019
Sezioni terminali della galleria	35	Caso a) 0.015, Caso b)
Valori totali	1845 m <sup>2</sup>	Caso a) 0.036; Caso b) 0.05

#### 4. METODO STATISTICO

##### 4.1. Sviluppo

Si fa riferimento alle relazioni della teoria classica dell'acustica statistica: il livello di pressione acustica in un generico punto, dovuto sia al campo diretto che riverberato, è fornito dalla seguente espressione:

$$L_p = 120 + 10 \cdot \log_{10} \left[ \sum_{i=1}^n W_i \cdot \left( \frac{Q_i}{4\pi \cdot d_i^2} + \frac{4}{R} \right) \right] \quad (1)$$

dove:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i}{(1 - \alpha_m)} \quad (2)$$

La (1) è stata ottenuta in base alle seguenti ipotesi:

- la densità di energia sonora associata al campo riverberante presente all'interno della galleria è uniforme;
- il regime è stazionario;
- la pressione acustica in ogni punto è la somma dei contributi del campo diretto e riverberato;
- la perdita di potenza acustica dovuta all'attenuazione dell'aria è trascurabile;
- il coefficiente di trasmissione delle pareti è nullo;
- il tempo fra due successive riflessioni è dato dal tempo libero medio statistico (formula di Knudsen -  $t_m = 4V/S\alpha$ );

g) le sorgenti acustiche sono di tipo sferico ed in numero pari alle ruote del treno. La (1) tiene conto sia del campo sonoro diretto, sia di quello riverberato, e permette di calcolare il livello di pressione acustica totale, supponendo valido il principio di sovrapposizione degli effetti.

#### 4.2 Discussione delle ipotesi

In virtù della particolare geometria del sistema treno-galleria, l'ipotesi a) del punto 4.1 può perdere la propria validità se si considera un tratto sufficientemente lungo di galleria o un tratto di galleria più lungo delle dimensioni del treno: il volume d'aria in cui avviene la propagazione delle onde acustiche, infatti, è lo spazio compreso fra il treno il guscio interno della galleria; tale volume presenta una dimensione molto più grande delle altre due e non soddisfa l'ipotesi di volume compatto; secondo tale ipotesi, infatti, si deve avere una sostanziale parità fra le dimensioni caratteristiche del volume in cui avviene il fenomeno di propagazione. L'espressione del tempo di percorrenza medio " $t_m$ " riportata in f) è basata anch'essa sull'ipotesi di volume compatto e perde validità quando si considera un tratto lungo di galleria. L'ipotesi g) è rigorosamente valida solamente nel seguente caso teorico: il treno è fermo ma sono comunque presenti delle sorgenti di rumore localizzate nel punto di contatto ruota rotaia; tali sorgenti di rumore debbono avere globalmente la stessa potenza di quella emessa quando il treno è in movimento. Nel caso reale il punto di contatto ruota rotaia ha un moto solidale a quello del treno; si può quindi ipotizzare che tutta la rotaia costituisca la sorgente di rumore con un diagramma di radiazione di tipo cilindrico.

Se negare l'ipotesi g) non produce variazioni apprezzabili sul livello globale di pressione acustica, altrettanto non si può dire per le ipotesi a) ed f) la cui mancata validità fa cadere l'intera teoria statistica; nel caso in esame, sebbene a) ed f) non siano sempre verificate, si è ritenuto comunque importante applicare il modello dell'acustica statistica sia per la sua relativa semplicità, sia per fornire un criterio di confronto per modelli di previsione acustica più sofisticati.

#### 4.3 Risultati

Il livello di pressione acustica è stato calcolato nel punto "A" di fig.1 distinguendo i casi a) e b) di cui al punto 3: In virtù dell'elevata riverberazione dell'ambiente, in entrambi i casi a) e b) il contributo del campo sonoro diretto contribuisce per meno dello 0.5 % sul livello sonoro globale; pertanto l'equazione (1) può essere riscritta come segue:

$$L_p = 120 + 10 \cdot \log_{10} \left[ P_{Tot} \cdot \frac{4}{R} \right] \quad (3)$$

dove con  $P_{Tot}$  si indica la potenza acustica totale nel tratto di galleria.

In base alla (3), valutando "R" con:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i}{1 - \alpha_m} \quad (4)$$

nel caso a) si è ottenuto  $L_p = 111.6$  dBlin, nel caso b)  $L_p = 109.8$  dBlin.

La modesta variazione, inferiore a 3 dB, fra i casi a) e b), ai quali corrispondono valori estremi dei coefficienti di assorbimento delle sezioni terminali, mostra come il loro

contribuito sul livello globale sia assai modesto; pertanto non vale la pena di approfondire le indagini per stabilire valori più corretti dei coefficienti di assorbimento di dette sezioni.

## 5. METODO DEL TRACCIAMENTO DEI RAGGI

### 5.1. Sviluppo

La valutazione del livello equivalente in un punto è stata effettuata considerando un ricevitore costituito da una sfera che ha per centro il punto stesso e per raggio un valor valutato tramite la seguente relazione[4]:

$$r = l_{\max} \cdot \left( \frac{2\pi}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

dove:

$l_{\max}$  = distanza massima percorribile da un raggio prima della prima riflessione;

$n$  = numero di raggi emessi da una sorgente.

Da ogni sorgente vengono lanciati "n" raggi con potenza rispettivamente pari a "P/n" (caso della sorgente omnidirezionale) dove P è la potenza della sorgente; la densità di energia presente all'interno della sfera di ricezione può essere calcolata mediante la seguente relazione:

$$D(x, y, z) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{r_j \cdot \frac{S_j}{c}}{\frac{4}{3} \pi \cdot r^3} \quad (6)$$

in cui:

$$r_j = \left( \frac{P}{n} \right) \cdot (1 - \alpha_1)^{j_1} \cdot (1 - \alpha_2)^{j_2} \cdot (1 - \alpha_3)^{j_3} \dots (1 - \alpha_k)^{j_k} \quad (7)$$

$r_j$  rappresenta la potenza associata al j-esimo raggio che incide sulla sfera; il rapporto  $S_j/c$  è il tempo che il j-esimo raggio impiega per attraversare la sfera, il termine  $(1 - \alpha_k)^{j_k}$  rappresenta il coefficiente di rinvio della k-esima superficie e  $j_n$  è il numero di volte che detta superficie viene colpita.

### 5.2. Modello della galleria

Le simulazioni del campo acustico all'interno della galleria sono state effettuate su un modello geometrico così semplificato: la copertura della galleria viene rappresentata con un cilindro avente diametro e coefficiente di assorbimento pari a quelli della superficie interna della galleria; senza considerare la presenza delle nicchie. Le passerelle sono due piani aventi le stesse caratteristiche acustiche della superficie cilindrica. Il treno è stato modellato come un parallelepipedo delle dimensioni caratteristiche acustiche indicate al punto 2. Le rotaie sono considerate come due barre di ferro di lunghezza pari a quella del tratto di galleria considerato. Il terreno su cui poggiano le rotaie è rappresentato da un piano avente coefficiente di assorbimento pari a 0.25.

### 5.3. Risultati

Nelle figg. 2 e 3 si riporta l'andamento del livello di pressione acustica all'interno della galleria relativo ai casi a) e b) di cui al capitolo 3.

Il piano su cui viene simulato il campo acustico è parallelo al piano delle rotaie, alla quota del punto "A" (fig.1). Nel caso a) si osservano modeste  $\pm 0.5$  dBlin del livello equivalente che, sia al centro sia all'estremità del tratto considerato, risulta pari a  $120.5 \text{ dB}_{\text{lin}}$ . Nel caso b) si osserva che il livello equivalente rimane costante solo nel tratto centrale della galleria e pari a  $120 \text{ dB}_{\text{lin}}$ , mentre all'estremità il valore risulta di  $119 \text{ dB}_{\text{lin}}$ .

I risultati ottenuti nei due casi mostrano la modesta influenza delle pareti di fondo sul livello sonoro nella galleria: nella parte centrale si ha, infatti, una variazione di  $0.5$  dBlin, che raggiunge  $1.5$  dBlin solo in prossimità delle sezioni terminali. Tali modeste variazioni del livello giustificano, ancor più che nel modello statistico, che è sufficiente considerare solo i valori estremi del coefficiente di assorbimento delle pareti virtuali di fondo. In fig.4 si riporta il livello acustico presente in alcuni punti che giacciono in una sezione verticale della galleria; la sezione è stata presa nel punto centrale del tratto di galleria considerato. I valori del livello di fig.4 sono relativi sia al caso a) che al caso b) denotando una quasi nulla influenza delle pareti di fondo sul livello al centro del tratto di galleria.

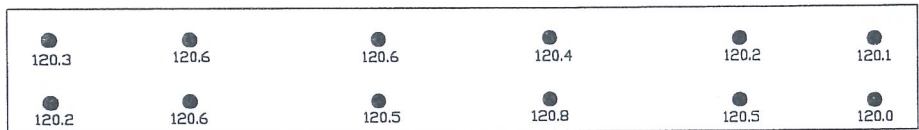


Fig.2: Livello di pressione acustica nei vari punti del tratto di galleria calcolati col metodo del tracciamento dei raggi (pareti di fondo:  $\alpha=0.015$ ).

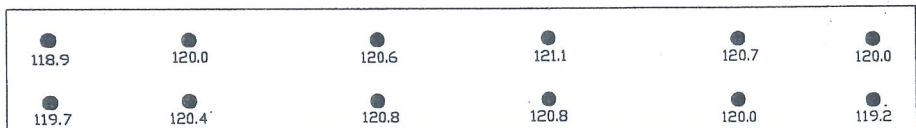


Fig.3: Livello di pressione acustica nei vari punti del tratto di galleria calcolati col metodo del tracciamento dei raggi (pareti di fondo:  $\alpha=1$ )

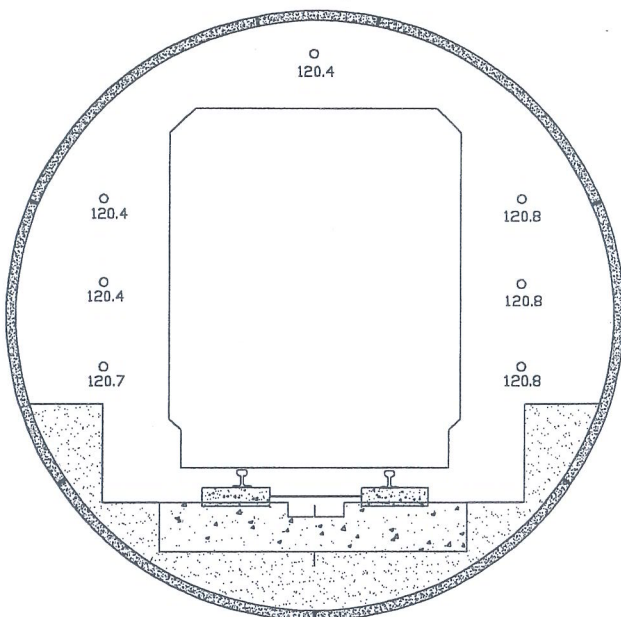


Fig. 4: Livello di pressione acustica nei vari punti della sezione della galleria calcolato col metodo del tracciamento dei raggi.

## 6. DATI SPERIMENTALI

Le misure fonometriche sono state effettuate con un fonometro integratore Larso Davis mod. LD800, cl.1, collegato ad un PC con software di acquisizione e elaborazione, nel tratto di galleria Barberini-P. Spagna della metropolitana di Roma. Le misure sono state fatte contemporaneamente sia all'interno del treno in corso (velocità=50Km/h circa) con finestrini aperti, sia nel punto "A" di fig.1 esterno al treno. Dalla media di tre misure effettuate nel punto "A" e relative a tre successivi passaggi dello stesso treno (velocità costante=50Km/h, lunghezza=50m) si è ottenuto un valore del livello equivalente pari a 118.5 dB<sub>lin</sub>. All'interno del treno nella carrozza centrale nelle stesse condizioni operative, il livello equivalente medio a finestrini aperti risulta pari a 99.5 dB<sub>lin</sub> e 83.5 dB<sub>A</sub>.

## 7. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Nella tabella 2 è riportata una sintesi dei risultati ottenuti dalle simulazioni e dalle misure. A parità di caratteristiche acustiche e geometriche, il modello statistico classico fornisce valori di circa 10 dB<sub>lin</sub> inferiori a quelli del modello ray tracing. In entrambi i casi, il campo sonoro diretto può essere trascurato, poiché contribuisce per meno dell'0.5% sul livello globale.

Nel modello statistico, la variazione del coefficiente di assorbimento delle pareti virtuali di fondo, da 0.015 a 1, influenza in maniera generale i valori su tutta la galleria, che diminuiscono di circa 3 dB<sub>lin</sub>. Nel modello del tracciamento dei raggi, invece, la stessa variazione influenza solo localmente i valori del livello, che varia di circa 1.2 dB<sub>lin</sub> in prossimità delle sezioni terminali e rimane praticamente costante al centro.

Entro i limiti di validità delle ipotesi fatte, i risultati sperimentali mostrano che il modello ray tracing fornisce valori più vicini a quelli reali; in ogni caso, il livello di pressione acustica è sempre compreso fra quello fornito dalla teoria statistica e quello fornito dal metodo del tracciamento dei raggi; tale circostanza si verifica anche se si apportano variazioni ai parametri di calcolo (es. coefficienti di assorbimento e lunghezza della galleria).

La stima per eccesso rispetto ai dati sperimentali fornita dal modello di ray tracing può essere attribuita agli errori introdotti dalle intercettazioni multiple e dai percorsi non validi [1]; nel modello dell'acustica statistica classica, viceversa, il campo riverberante viene calcolato considerando solamente la prima riflessione; si può ritenere giustificata, pertanto, la stima per difetto sul livello di pressione sonora.

*Tab.2: Livelli di pressione acustica in dB<sub>lin</sub> nel punto "A" relativi al modello statistico, al modello ray tracing e alle misure per i valori estremi del coefficiente di assorbimento delle sezioni di chiusura del tratto di galleria.*

Coefficienti assorbimento delle sezioni terminali	Modello teoria statistica classica	Modello del tracciamento dei raggi	Misure
$\alpha=0.015$	111.6	121.2	118.5
$\alpha=1$	109.8	120.2	

## 8. CONCLUSIONI

Nelle linee ferroviarie sotteranee il passaggio dei treni induce un elevato livello di rumore in galleria e nelle stazioni. A seguito della recente normativa che impone limiti sul livello di esposizione al rumore è importante, in sede di progetto, essere in grado di prevedere il livello di pressione acustica all'interno delle gallerie. A tale proposito sono stati applicati al tratto della metropolitana di Roma, linea A, Barberini Piazza di Spagna, due modelli di previsione acustica; il primo si basa sulla teoria classica dell'acustica statistica, il secondo sul metodo del tracciamento dei raggi. Una campagna di misure ha permesso di verificare che la teoria statistica conduce al calcolo di livelli di pressione acustica inferiori rispetto a quelli misurati, mentre il metodo del tracciamento dei raggi conduce a valori di poco superiori. Si è visto, inoltre, che la variazione di alcuni parametri acustici e geometrici nei modelli di calcolo non produce sensibili alterazioni dei livelli di rumore stimati e misurati.

L'impiego dei due metodi di calcolo può costituire quindi un criterio di stima per il livello di pressione acustica all'interno delle gallerie: il livello di pressione acustica reale è sempre compreso fra quello stimato dalla teoria statistica e quello ricavato con il metodo del tracciamento dei raggi; questo comportamento non risente di eventuali modifiche dei parametri acustici.

## 9. ELENCO DEI SIMBOLI

- $c$  = velocità del suono in aria (m/s);  
 $d$  = distanza (m);  
 $D$  = densità di energia sonora ( $J/m^3$ );  
 $L$  = livello di pressione acustica (dBlin);  
 $l_{max}$  = distanza massima percorribile da un raggio prima della prima riflessione (m);  
 $n$  = numero di raggi emessi da una sorgente;  
 $P$  = potenza acustica (W);  
 $Q$  = fattore di direttività della sorgente;  
 $r$  = raggio della sfera ricevente (m);  
 $R$  = costante caratteristica dell'ambiente;  
 $S$  = superficie ( $m^2$ );  
 $t_m$  = tempo libero medio (s);  
 $V$  = volume ( $m^3$ );  
 $W_i$  = potenza sonora della  $i$ -esima sorgente ( $W/m^2$ );  
 $\alpha$  = coefficiente di assorbimento.

## 10. BIBLIOGRAFIA

- [1] H. Lehnert "Systematic Errors of the Ray-Tracing Algorithm", Applied Acoustics n.38 1993, pp.207-221.  
 [2] D.M.Fontana, L.Santarpia, P.Testa, "Modello di previsione dell'attenuazione acustica di barriera singola o doppia per sedi ferroviarie di metropolitane urbane", Rivista Italiana di Acustica Gennaio-Marzo 1993, pp 7-14.  
 [3] G. Dracoulis, "Acoustique Architecturale & Industrielle" Pyc Edition, 256, rue Vaugirard, 75740 Paris Cedex 15, 1985.  
 [4] E.J. Evans, E.N. Bazley, "Sound Absorbing Materials", National Physical Laboratory. Ed. London, Her Majesty's Stationery office, 1964.  
 [5] F. Cotana "A New Statistical Model for Indoor Acoustics Design" Applied Acoustics, in corso di pubblicazione.

