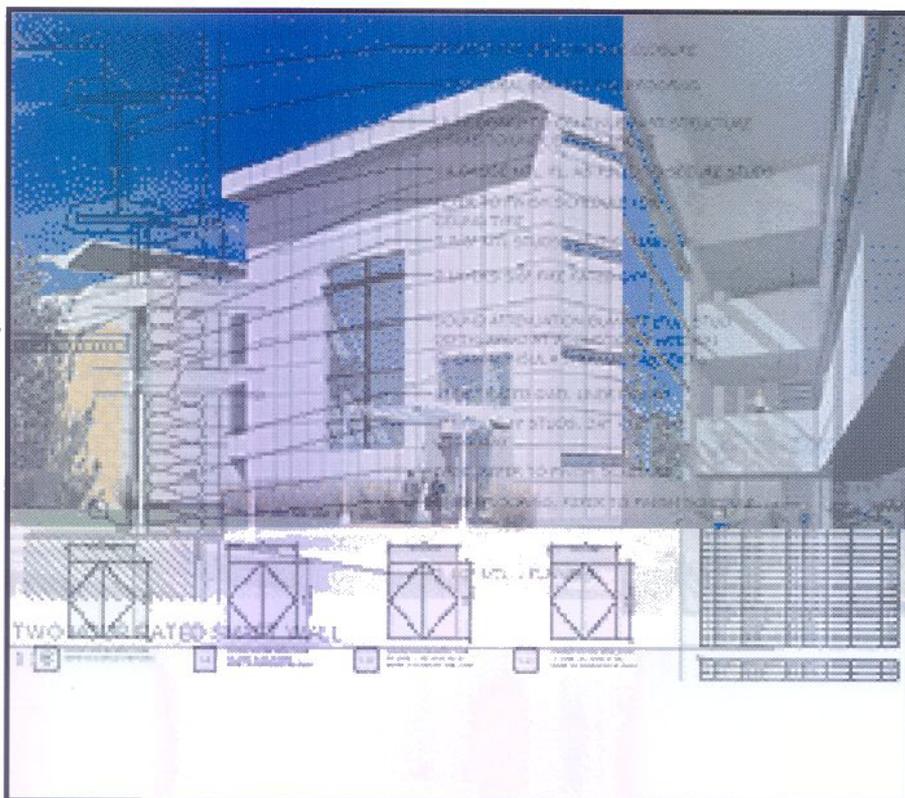


# ANALISI E CALCOLO

ISSN  
1128-3874

ANNO IV - N. 12  
GEN-MAR. 2003  
€ 7,75



Spedizione  
in Abbonamento  
Postale - 45%  
Art. 2 - Comma 20/B  
Legge 662/96  
Filiale di Milano

● **ATTUALITÀ** □ XXXII Convegno Nazionale AIAS ●  
**FORMAZIONE** □ Tecniche agli Elementi Finiti per la  
 rappresentazione di filettature (2a parte) ● **SOFTWARE**  
 □ EDS PLM: prodotti e soluzioni FEM/FEA ●  
**HARDWARE** □ Cray X1™: il più potente supercomputer  
 del mondo ● **CASE HISTORY** □ Propagazione del rumore  
 in ambienti industriali bassi e vasti

# Propagazione del rumore in ambienti industriali bassi e vasti

## Case History

A cura di

Angelo Farina, Dip. Ing. Industriale - Università di Parma  
Giorgio Fornari, SIG Simonazzi SpA, Parma

Nel presente lavoro si è operato su due diversi fronti: rilievi sperimentali e simulazioni numeriche. Nel primo caso si è fatto ricorso ad avanzate tecniche di misura, ivi incluso il rilievo di potenza con tecnica intensimetrica (EN ISO 9614/2) e la misura del decadimento del livello sonoro con la distanza (norma EN ISO 14257).

Si è poi operata la simulazione numerica della propagazione del rumore in uno dei 4 stabilimenti studiati sperimentalmente, facendo uso di un codice di calcolo di tipo "pyramid tracing" [Ramsete]: tale algoritmo è applicabile anche ad ambienti fortemente non Sabiniani, quali quelli qui studiati.

È noto che la propagazione del rumore in ambienti industriali bassi e vasti avviene con modalità sostanzialmente diverse da quelle solitamente verificate in ambienti più regolari; in particolare, le ipotesi dell'acustica statistica (formulazione di Sabine) non sono rispettate, ed il decadimento del livello sonoro con la distanza dalla sorgente esibisce un andamento fortemente divergente da quello ottenibile dalla classica formulazione del campo semi-riverberante.

La conseguenza di quanto sopra è duplice: da un lato, nel caso di rilievi della potenza sonora di macchinari secondo EN ISO 3744/46 e norme derivate, oppure del livello sonoro al posto operatore secondo le norme della serie EN ISO 11200, il fattore di correzione ambientale K viene drasticamente sottostimato allorché lo stesso viene calcolato sulla base delle unità assorbenti stimate a partire dal tempo di riverberazione del locale tramite la formula di Sabine.

Dall'altro, il beneficio ottenibile da interventi di trattamento fonoassorbente dei locali, ed in particolare della copertura, vie-

ne anch'esso fortemente sottostimato, con il risultato che sovente si sconsiglia il trattamento di questi ambienti, quando invece i risultati conseguibili sono notevoli.

Nel presente lavoro si è operato su due diversi fronti: rilievi sperimentali e simulazioni numeriche.

Nel primo caso si è fatto ricorso ad avanzate tecniche di misura, ivi incluso il rilievo di potenza con tecnica intensimetrica (EN ISO 9614/2) e la misura del decadimento del livello sonoro con la distanza (norma EN ISO 14257).

Si è poi operata la simulazione numerica della propagazione del rumore in uno dei 4 stabilimenti studiati sperimentalmente, facendo uso di un codice di calcolo di tipo "pyramid tracing" [1]: tale algoritmo è applicabile anche ad ambienti fortemente non Sabiniani, quali quelli qui studiati.

Dall'analisi dei risultati ottenuti, è stato possibile evidenziare il tipico comportamento degli ambienti industriali bassi e

larghi, e quantificare l'errore che si commette impiegando le classiche relazioni derivate dalla teoria di Sabine per stimare il contributo del campo riverberante al livello sonoro in ciascun punto.

È stato inoltre possibile ricavare una semplice espressione empirica per la stima di un Volume ridotto dell'ambiente, che introdotta nelle relazioni già previste dalle norme ISO per la stima delle unità assorbenti del locale e del fattore di correzione ambientale K, consente di minimizzare l'errore commesso nell'impiego delle stesse, pur consentendo il rispetto formale delle norme ISO.

### Teoria

La classica formulazione teorica valida in ambienti che obbediscono alle ipotesi di Sabine è riassumibile nelle seguenti 3 equazioni:

$$T = 0.16 \cdot \frac{V}{\bar{\alpha} \cdot A} \quad (1)$$

$$L_p(d) = L_w + 10 \cdot \lg \left[ \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot d^2} + \frac{4}{\bar{\alpha} \cdot A} \right] \quad (2)$$

$$K = 10 \cdot \lg \left[ 1 + \frac{4 \cdot S}{\bar{\alpha} \cdot A} \right] \quad (3)$$

In cui  $T$  è il tempo di riverberazione,  $V$  il volume dell'ambiente,  $A$  la superficie totale delle pareti dello stesso,  $\bar{\alpha}$  il coeff. di assorbimento acustico medio,  $d$  la distanza del punto di ascolto dal centro acustico della sorgente, ed  $S$  la superficie di inviluppo utilizzata per la misura del livello di potenza sonora.

Queste relazioni sono fra loro congrue nell'ipotesi che una sorgente puntiforme omnidirezionale, di livello di potenza costante  $L_w$ , venga posta a breve distanza da un pavimento riflettente, cosicché il fattore di direttività  $Q$  risulti pari a 2, e la superficie  $S$  di inviluppo venga assunta uguale a quella di una semisfera di raggio  $d$ .

Tale formulazione è abbastanza accettabile solo in ambienti che obbediscono strettamente alle ipotesi di Sabine, le quali richiedono che le tre dimensioni dell'ambiente siano fra loro confrontabili, che non vi siano ostacoli all'interno del volume, e che il coefficiente di assorbimento acustico delle pareti sia ovunque poco discosto dal valore medio  $\bar{\alpha}$ . In tali ipotesi, il libero cammino medio dei raggi sonori approssima il valore teorico:

$$l.c.m. = \frac{4 \cdot V}{A} \quad (4)$$

Quando viceversa una delle tre dimensioni del locale è significativamente inferiore alle altre 2 (nel nostro caso l'altezza  $h$ ), il libero cammino medio tende a risultare poco maggiore di tale dimensione minima, indipendentemente dal volume complessivo.

Sperimentalmente si verifica che il livello sonoro cala incessantemente all'aumentare della distanza  $d$ , mentre in base alla relazione (2) esso dovrebbe tendere a stabilizzarsi ad un valore costante.

Inoltre si verifica che a distanze dalla sorgente dell'ordine di 5-15m (tipiche di rilievi su macchine di rilevanti dimensioni), il fattore di correzione ambientale  $K$  risulta sottostimato anche di 4-5 dB.

Non sono mancati studi teorici sulla propagazione del rumore in ambienti bassi [2], tuttavia gli stessi erano finalizzati principalmente alla individuazione della legge di decadimento del livello sonoro (espressa in dB per raddoppio della distanza), e non alla stima del fattore di correzione ambientale  $K$ .

## Rilievi sperimentali

Al fine di ottenere sperimentalmente il fattore di correzione ambientale  $K$  in ambienti bassi e vasti, si è adottata una procedura combinata che prevedeva i seguenti punti:

- Impiego di una sorgente omnidirezionale (dodecaedro) di potenza sonora nota (110 dBA), alimentata con rumore rosa
- Misurazione simultanea del livello di potenza sonora della stessa su una superficie di inviluppo standardizzata (5.4x5.4x2.7m), mediante le metodologie EN ISO 3746 (pressione) ed EN ISO 9614/2 (intensimetria)
- Misurazione del decadimento del livello sonoro con la distanza secondo norma EN ISO 14257
- Misura del tempo di riverberazione dell'ambiente secondo EN ISO 3382 (risposta all'impulso ottenuta con tecnica MLS, integrazione all'indietro di Schroeder ed estrapolazione del tratto di decadimento sonoro compreso fra -5 e -25 dB)
- Verifica pratica mediante misurazione in condizioni operative del livello di poten-

za sonora di una o più macchine, impiegando simultaneamente sia la tecnica intensimetrica che il tradizionale rilievo in pressione sonora.

Tranne l'ultimo rilievo in condizioni operative, tutti gli altri rilievi sono stati eseguiti a stabilimento fermo, con rumore di fondo trascurabile rispetto a quello emesso dalla sorgente di prova.

La tabella 1 riporta i principali dati relativi ai 4 stabilimenti studiati.

Il valore "sperimentale" del fattore di correzione ambientale  $K_{\text{sperim}}$ , riportato nella tabella, è il risultato della differenza fra il livello di potenza misurato secondo EN ISO 3746 (senza applicazione del fattore  $K$  teorico) e quello misurato secondo EN ISO 9614/2 (che è di sua natura immune dal contributo della riverberazione del locale). Si nota che lo stesso è drasticamente superiore al valore riportato nell'ultima colonna della tabella, ottenuta dalla applicazione della formulazione di Sabine classica, sulla base dell'eq. (3).

I 4 diagrammi di figura 1 mostrano il confronto fra i livelli sonori in funzione della distanza ottenuti sperimentalmente e quelli ricavati dalla relazione (2).

Si osserva come i tracciati siano sostanzialmente divergenti, e come a distanze dalla sorgente dell'ordine dei 5-15 m si verifichino differenze anche di 4-5 dB(A). Ciò significa che le formule basate sulla teoria di Sabine sottostimano in modo rilevante il contributo del campo sonoro riverberante prodotto da sorgenti sonore situate in questo range di distanze, e dunque sia il fattore di correzione ambientale, sia il contributo di sorgenti estranee a quella di oggetto di misura vengono drasticamente falsati, con il risultato che il livello di potenza sonora della macchina in esame viene sovrastimato.

## Simulazione numerica

È stata eseguita la simulazione numerica della propagazione del rumore nel caso dello stabilimento di Fredericia.

La figura 2 illustra il modello CAD dell'ambiente stesso, usato per le simulazioni acustiche.

I valori dei coefficienti di assorbimento dei materiali sono stati aggiustati manualmente, onde minimizzare lo scostamento fra i valori sperimentali e quelli calcolati dei tempi di

Nome	V (m <sup>3</sup> )	h (m)	T <sub>med</sub> (s)	K <sub>sperim</sub> (dBA)	K <sub>Sabine</sub> (dBA)
Thessaloniki	48836	8.3	2.60	2.40	0.48
Pelfort	72000	11.92	2.45	1.45	0.31
Patrasso	32000	8.0	3.50	2.75	0.94
Fredericia	27575	7.62	0.80	1.45	0.27

Tabella 1

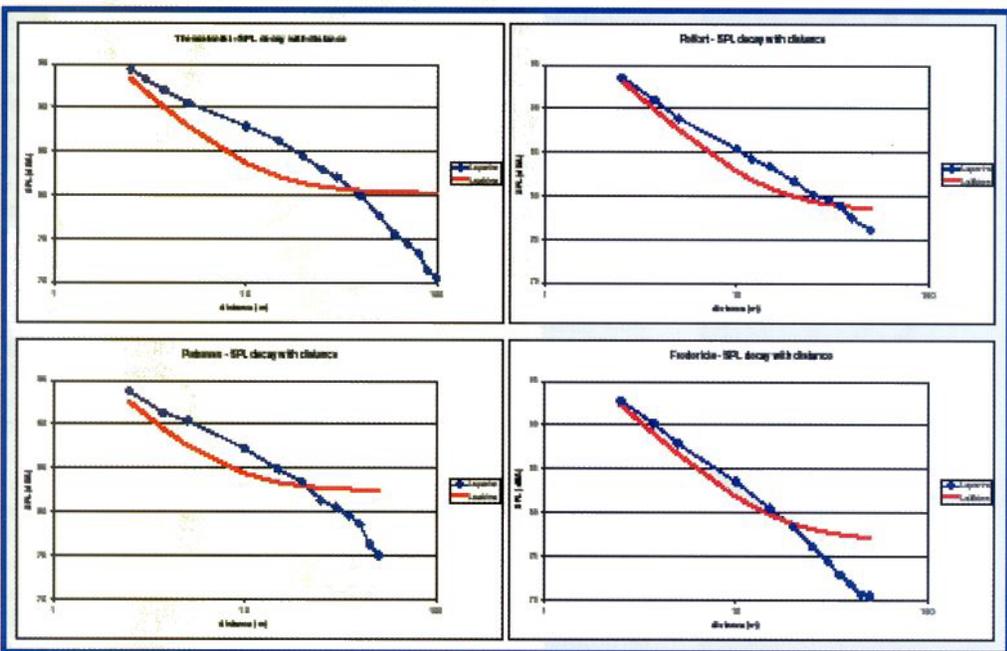


Figura 1

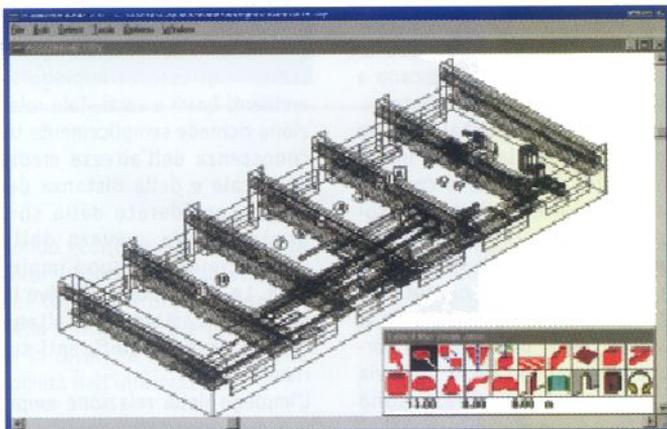


Figura 2

riverberazione  $T_{20}$  alle varie frequenze.

La figura 3 riporta il confronto fra i valori del livello sonoro rilevati sperimentalmente e calcolati dal codice di calcolo a varie distanze dalla sorgente.

Si nota che l'accordo è molto buono. E' stata altresì eseguita la simulazione del funzionamento dell'intero stabilimento, introducendo nel modello numerico un adeguato numero di sorgenti sonore, caratterizzate da livelli di potenza ottenuti da rilievi sperimentali eseguiti sulle singole macchine effettivamente installate nello stabilimento. Il confronto fra la mappatura dei livelli sonori ottenuti sperimentalmente e quelli calcolati dal programma è visibile nella figura 4.

Anche se l'accordo non è così buono come nel caso della simulazione eseguita con la sola sorgente omnidirezionale di

riferimento, comunque si è ottenuto un andamento della distribuzione del livello sonoro in discreto accordo con quella sperimentale, con un valore medio quadratico dell'errore di calcolo di 1.6 dB(A), e con errore massimo di 3.5 dB(A). Ci si attende un significativo miglioramento della precisione di calcolo dall'impiego di dati di emissione delle sorgenti sonore più raffinati, ottenuti mediante tecnica intensimetrica, comprendenti anche i "balloon" di direttività delle singole sorgenti.

E' comunque evidente da entrambe le simulazioni eseguite che l'algoritmo di pyramid tracing non ha di per sé alcun problema nell'analisi di ambienti bassi e vasti, e consente dunque di valutare le condizioni di propagazione e stimare correttamente il valore del fattore di correzione ambientale K, note

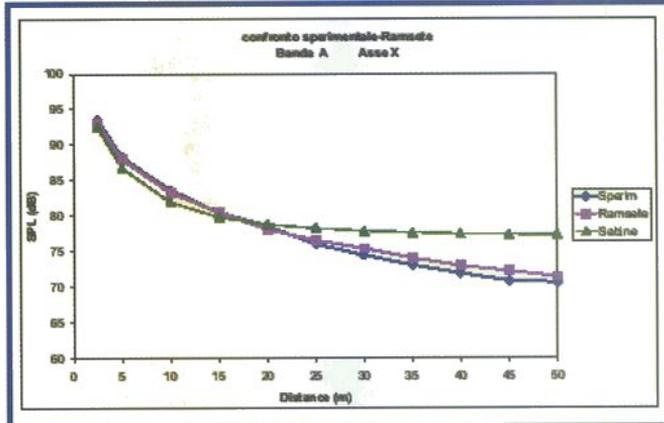


Figura 3

che siano la geometria dell'ambiente e le caratteristiche di fonoassorbimento delle superfici dello stesso.

L'attuale limite di impiego della simulazione numerica di ambienti industriali risiede soltanto nella mancanza di idonei dati in ingresso, in particolare sia per quanto riguarda le proprietà fonoassorbenti delle superfici, sia soprattutto per i livelli di potenza sonora e la direttività delle sorgenti, che per di più sono sovente variabili in funzione delle lavorazioni eseguite o della tipologia di prodotto trattato.

Entrambi questi problemi possono comunque essere risolti grazie all'impiego di avanzate tecniche di rilievo sperimentale in situ, facenti impiego dell'intensimetria acustica. E' stato infatti già mostrato come tramite questa tecnica si possa procedere al rilevamento in situ del

coefficiente di assorbimento acustico dei materiali [3] ed alla esatta quantificazione della emissione sonora di una macchina, purché il campo sonoro nell'ambiente resti stazionario nel corso dei rilievi.

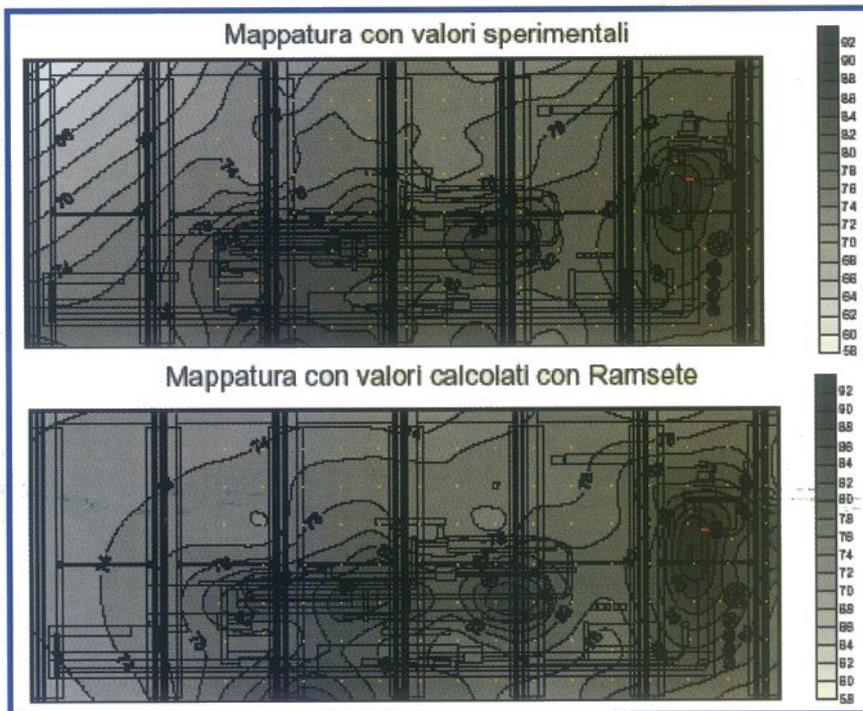
## Formulazione empirica semplificata

Nonostante la tecnica di simulazione numerica impiegata abbia fornito risultati soddisfacenti, la stessa non può attualmente essere impiegata in modo generalizzato, sia per la mancanza di dati già delineata, sia per il tempo necessario alla modellizzazione geometrica di ambienti sovente molto complessi.

Quest'ultimo fattore è solitamente la voce di costo più rilevante, in quanto la messa a punto della rappresentazione numerica tridimensionale dell'ambiente può risultare da sola più costosa dello stesso acquisto dello strumento di calcolo... E' pertanto estremamente utile disporre di una formulazione empirica molto semplice, alternativa all'impiego delle formule basate sulla teoria di Sabine già illustrate, che consenta una stima del fattore di correzione ambientale K decisamente meno errata di quella ottenibile con queste ultime.

E' inoltre opportuno che tale formulazione si integri con le prescrizioni contenute nelle norme EN ISO 3744/46 ed 11203/4; dimodochè la stessa possa venire lecitamente impiegata nell'esecuzione di rilievi aventi valore legale in ambienti bassi e vasti. A questo proposito, la formula empirica (5) qui proposta consente di mantenere valide le relazioni (1), per il calcolo del numero di unità assor-

Figura 4



$$V' = 10 \cdot h^3 + 2 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot h = 10 \cdot h^3 + S \cdot h \quad (5)$$

benti totali  $\bar{\alpha} \cdot S$  a partire dal valore sperimentale del tempo di riverberazione  $T$ , e (3), per il calcolo del fattore di correzione ambientale  $K$ . Il trucco consiste nell'introdurre nella (1), al posto del volume complessivo dell'ambiente, un volume ridotto  $V'$ , funzione dell'altezza del locale  $h$  e della distanza del punto considerato dalla sorgente  $d$ , ovvero della estensione della superficie di involuppo  $S$  considerata.

Impiegando tale relazione per il calcolo del fattore di correzione ambientale  $K$ , si ottengono dei valori teorici in buon accordo con quelli rilevati sperimentalmente nei 4 stabilimenti studiati, come mostrato dai diagrammi di figura 5.

Anche se l'accordo con i dati sperimentali non è perfetto ovunque, si osserva comunque una drastica riduzione dell'errore nella stima del fattore di correzione ambientale  $K$  rispetto all'impiego della formula di Sabine (1) con il volume complessivo dell'ambiente.

L'accordo è molto buono soprattutto per distanze dalla sorgente comprese fra 5 e 10 m, che corrispondono ai casi più frequentemente incontrati nella pratica, mentre a distanze maggiori compare qualche scostamento, sicuramente dovuto alla particolare geometria degli ambienti ed alla presenza in esso di ostacoli o superfici

schermanti/riflettenti, che ovviamente non vengono prese in considerazione dalla semplice formula empirica (5), e che invece, se correttamente introdotte in un modello di simulazione numerica, possono venire risolte come mostrato nel precedente paragrafo.

## Conclusioni

Lo studio eseguito, svolto grazie ad una collaborazione fra SIG Simonazzi SpA ed Università di Parma, ha consentito di evidenziare il peculiare comportamento acustico degli edifici industriali bassi e vasti.

Esso causa un rilevante contributo dovuto alle riflessioni sonore, che producono un innalzamento del livello sonoro complessivo ben superiore a quanto solitamente ipotizzato sulla base della teoria di Sabine. Tale effetto è particolarmente drammatico in quei comparti produttivi caratterizzati da numerose sorgenti sonore distribuite, legate a macchinari di trasporto (imballaggio, packaging), e contemporaneamente da posizioni degli operatori situate a distanze di alcuni metri dalle sorgenti sonore.

In ogni caso, la corretta valutazione dell'emissione sonora dei macchinari o dell'esposizione dei lavoratori viene alterata da tale meccanismo di propagazio-

ne, senza che i termini correttivi previsti dalle norme ISO di più comune impiego riescano a compensarlo adeguatamente.

I rilievi sperimentali hanno mostrato come la tecnica intensimetrica consenta la corretta stima del livello di potenza sonora, e come l'impiego di una sorgente sonora di riferimento (di potenza nota) consenta altresì di accedere direttamente al valore "vero" del fattore di correzione ambientale  $K$ . Tuttavia tali tecniche di rilievo sono costose e complesse, e probabilmente la maggior parte degli operatori continuerà ad usare semplici rilievi fonometrici ancora per molti anni.

E' stata anche valutata la possibilità di impiegare avanzati programmi di simulazione numerica per studiare la propagazione del rumore in ambienti industriali: i risultati sono stati incoraggianti, e mostrano come con tali strumenti si possa ottenere una ragionevole valutazione previsionale nel caso della progettazione di nuovi reparti produttivi. Il tempo richiesto è comunque risultato tuttora troppo elevato per l'utilizzo generalizzato di tali metodiche al semplice scopo di stimare il valore corretto del fattore di correzione ambientale  $K$ .

Sulla base dei dati rilevati sperimentalmente ed ottenuti dalle simulazioni numeriche, è stata pertanto derivata una semplice relazione empirica per la stima di un volume ridotto dell'am-

biente, da introdurre nella relazione di Sabine onde "aggiustarla" nel caso di impiego in ambienti bassi e vasti. Tale relazione richiede semplicemente la conoscenza dell'altezza media del locale e della distanza del punto considerato dalla sorgente sonora, ovvero della superficie di involuppo impiegata. Le dimensioni effettive in pianta dell'ambiente risultano così in pratica ininfluenti sul risultato.

L'impiego della relazione empirica qui presentata consente un significativo miglioramento della stima del fattore di correzione ambientale  $K$ , mantenendo comunque la più completa compatibilità con la formulazione prevista dalle norme tecniche vigenti.

Il proseguimento della ricerca consisterà nell'affinamento delle tecniche di simulazione numerica, ed in particolare nel rilevamento di dati di ingresso per le simulazioni (assorbimento dei materiali, potenza sonora delle macchine) e nel miglioramento dell'interfaccia CAD, onde ridurre i tempi necessari alla modellazione geometrica dell'intero stabilimento.

Si cercherà inoltre una giustificazione teorica della relazione (5), sulla linea di quanto fatto a suo tempo per la formula di Sabine stessa, che dopo essere stata ricavata sulla base di risultati sperimentali, è stata giustificata teoricamente solo dopo ulteriori, avanzati studi.

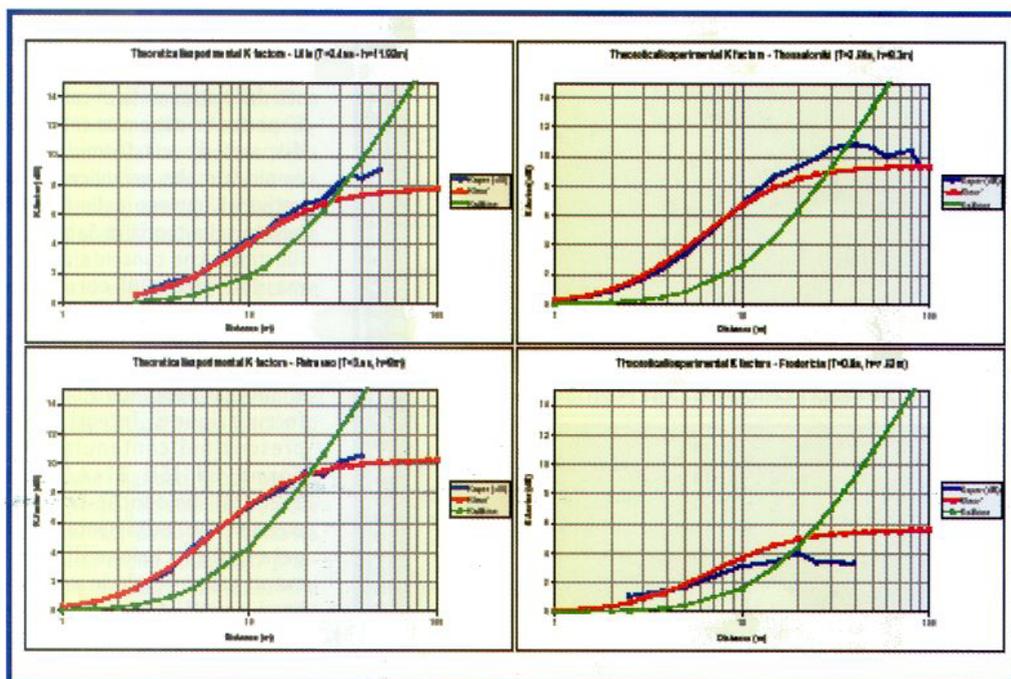


Figura 5

## BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Farina - "RAMSETE - a new Pyramid Tracer for medium and large scale acoustic problems" - Proc. of EURO-NOISE 95 Conference, Lyon 21-23 March 1995.
- [2] von H. Kuttruff - "Stationäre Schallausbreitung in Flachräumen" - Acustica, vol. 57, pp. 62-70 (1985).
- [3] A. Farina, A. Torelli - "Measurement of the sound absorption coefficient of materials with a new sound intensity technique" - Preprints of the 102<sup>nd</sup> AES Conference, Berlin, 23-26 March 1997.