

Con la simulazione numerica "RASS" (Ramses the Acoustical Software Simulator) si è cercato di determinare le peculiari condizioni di propagazione sonora negli ambienti di lavoro.

# Simulazione della propagazione sonora

L'ARTICOLO ILLUSTRA LE PECULIARI CONDIZIONI DI PROPAGAZIONE SONORA CHE SI SVILUPPANO NEGLI AMBIENTI DI LAVORO, E HA L'OBIETTIVO DI VALUTARE CON QUALI METODICHE DI CALCOLO SIA POSSIBILE GIUNGERE A PREVISIONI ACCURATE DEL FATTORE DI CORREZIONE AMBIENTALE K. LA CORRETTA DETERMINAZIONE DI K PUÒ CONSENTIRE CONSIDEREVOLI RISPARMI IN DENARO PER TUTTI I COSTRUTTORI DI MACCHINE E/O IMPIANTI.

**Angelo Farina**  
Dipartimento Ingegneria Industriale, Università di Parma,  
**Giorgio Fornari**  
Sasib Food & Beverage Machinery, Parma,  
System Engineering Department

**L**a normativa di riferimento è la ISO/TR 11690-3. Si tratta di un rapporto tecnico che illustra le diverse ipotesi di propagazione negli ambienti di lavoro e conseguentemente raccomanda le idonee metodiche di calcolo in funzione della complessità di tali condizioni e dell'accuratezza richiesta. Rientra in queste raccomandazioni l'uso di programmi di simu-

lazione acustica come quello sviluppato da Sasib Food & Beverage Machinery (RASS). In questo lavoro vengono presentate le ipotesi fisiche alla base delle diverse schematizzazioni del campo sonoro e viene mostrato come le più avanzate tecniche di simulazione computerizzata siano in grado di riprodurre correttamente i fenomeni che avvengono in ambienti anche molto lontani dalle ipotesi di campo diffuso. Viene però anche mostrato come, grazie a una semplice modifica alla formulazione tradizionale del campo sonoro semi-riverberante e mantenendo completa coerenza con le normative internazionali, sia possibile operare una corretta simulazione della propagazione sonora in questi ambienti che risultano particolarmente "difficili", senza dover necessariamente ricorrere ai suddetti programmi di calcolo.

## Propagazione

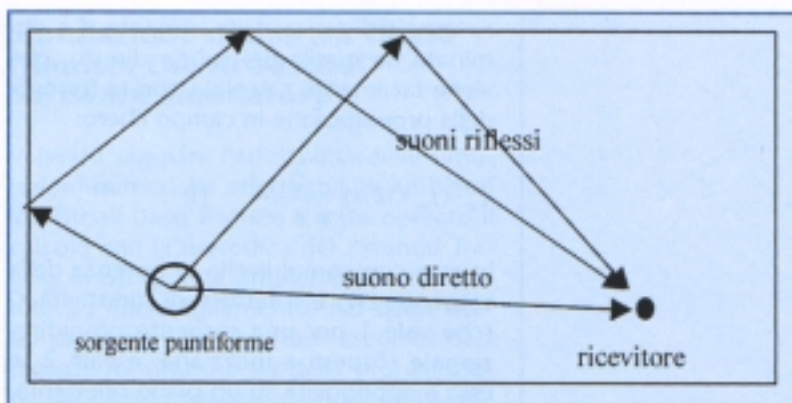
Lo schema sorgente → propagazione → ricevitore

La schematizzazione classica si basa su una sorgente sonora puntiforme e omnidirezionale, che irradia una potenza sonora indipendente dall'ambiente in cui la stessa viene collocata.

Poiché si hanno normalmente dimensioni degli ambienti, e quindi dei cammini di propagazione, più grandi della lunghezza d'onda, è lecito separare il campo sonoro prodotto in un campo diretto (energia sonora che va direttamente dalla sorgente al ricevitore, senza interagire in alcun modo con l'ambiente circostante) e in un campo riflesso (energia sonora che raggiunge il ricevitore dopo aver interagito con le superfici esistenti all'intorno, mediante fenomeni di riflessione speculare e/o diffusa, diffrazione ed eventualmente interferenza).

Ovviamente il suono diretto, seguendo il percorso più breve, arriva al ricevitore per primo, e viene poi seguito dalle riflessioni, che vanno a costituire la cosiddetta coda sonora. La figura 2, chiamata risposta all'impulso o ecogramma, rappresenta gli arrivi di energia nel tempo nell'ipotesi che la sorgente emetta un impulso sonoro di breve durata (tipo uno sparo). Si noti che la figura è di origine sperimentale: l'ecogramma può essere infatti facilmente misurato utilizzando una sorgente impulsiva (pistola, palloncino) oppure un altoparlante che emetta uno speciale segnale pseudoimpulsivo da cui la risposta all'impulso può venire poi ricostruita matematicamente.

La risposta all'impulso dunque contiene



in sé tutte le informazioni sulla propagazione sonora nell'ambiente in esame, per la particolare coppia di posizioni di sorgente e ricevitore considerata.

La risposta all'impulso può essere misurata, ma può anche venire calcolata matematicamente da opportuni programmi di simulazione.

## Il fattore di correzione ambientale K

In ambiente di lavoro è tuttavia solitamente poco importante la modificazione del suono prodotta dalla propagazione in termini qualitativi (echi, riverbero, risposta in frequenza), e si concentra gran parte dell'attenzione sul mero dato quantitativo (livello sonoro equivalente in dBA).

Per cui la risposta all'impulso risulta un oggetto di complessità esuberante rispetto alle esigenze, e l'intero effetto della propagazione viene banalizzato in un singolo valore numerico, che rappresenta il "guadagno" in dB causato dall'ambiente.

Sovente poi la variazione del livello sono-

Fig. 1 Lo schema sorgente → propagazione → ricevitore.

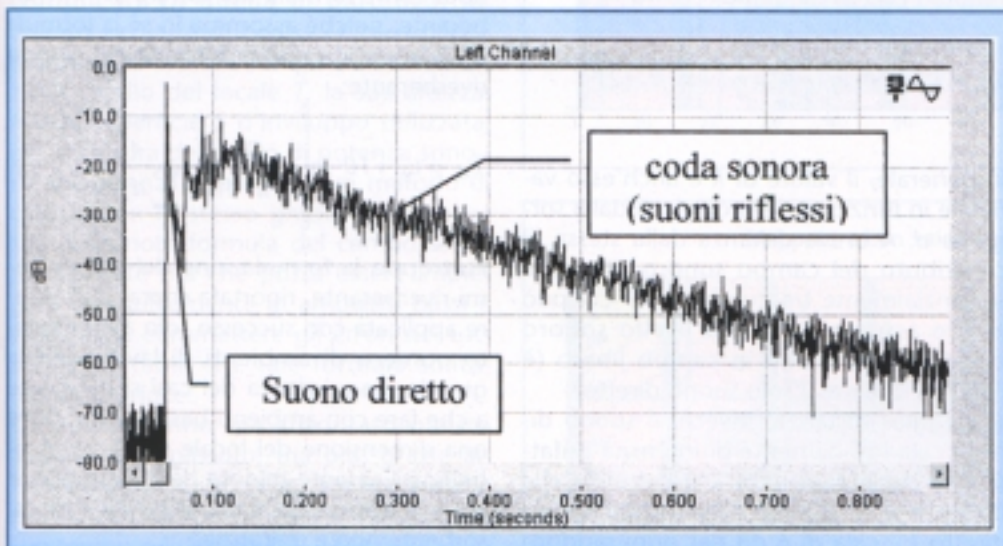


Fig. 2 Ecogramma che rappresenta gli arrivi di energia nel tempo nell'ipotesi che la sorgente emetta un impulso sonoro di breve durata (tipo uno sparo).

ro con la distanza dalla sorgente  $d$  è dominata da quella del suono diretto, che viene facilmente calcolata con la formula della propagazione in campo libero:

$$L_{dir} = L_w + 10 \cdot \lg \left[ \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \right] \quad (1)$$

In essa compare il livello di potenza della sorgente  $L_w$ , e il fattore di direttività  $Q$  (che vale 1 per una sorgente omnidirezionale sospesa a mezz'aria, e vale 2 se essa è appoggiata su un piano riflettente, come accade più sovente).

Ovviamente, in presenza di suono riflesso oltre che diretto, il livello sonoro effettivo al ricevitore sarà più elevato del solo  $L_{dir}$ . La differenza fra livello sonoro effettivo

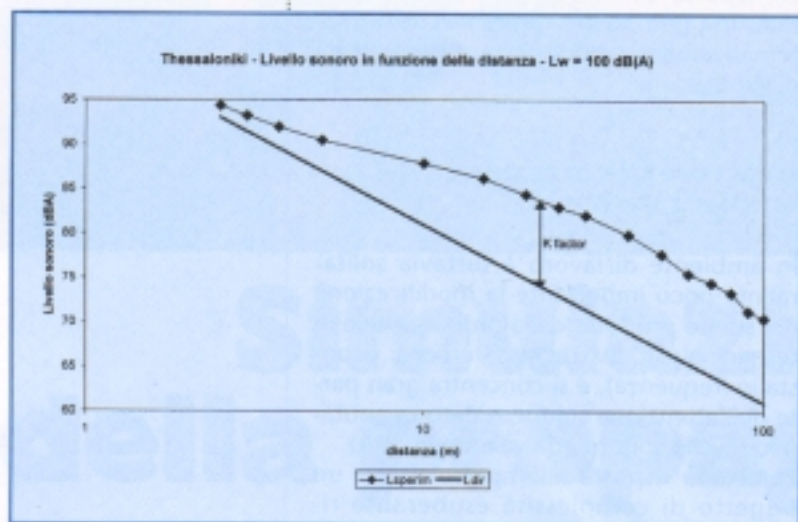


Fig. 3 Un caso pratico.

$L_{tot}$  e il valore di  $L_{dir}$  di cui alla precedente relazione viene chiamato fattore di correzione ambientale, e indicato perlopiù con il simbolo  $K$  (sulla citata norma ISO 11690-3 esso viene invece indicato con il simbolo  $D_{1,0}$ ). Si ha quindi:

$$L_{tot} = L_w + 10 \cdot \lg \left[ \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \right] + K \quad (2)$$

In generale, il valore di  $K$  è anch'esso variabile in funzione della distanza dalla sorgente  $d$ . A breve distanza dalla stessa, il contributo del campo sonoro riflesso è sostanzialmente trascurabile, per cui può essere assunto  $K=0$ , e il livello sonoro coincide con quello in campo libero (è come se ci fosse il solo suono diretto).

A maggior distanza, invece, il suono diretto cala rapidamente di intensità (infatti essa diminuisce con il quadrato della distanza  $d$ , e quindi il livello del suono diretto  $L_{dir}$  cala di 6 dB per ogni raddop-

pio della distanza); di conseguenza, diviene importante il contributo del suono riflesso, e il fattore  $K$  può assumere valori significativi (parecchi dB, anche più di 10). Il problema della propagazione in un ambiente di lavoro può dunque essere ricondotto alla determinazione del corretto valore del fattore di correzione ambientale  $K$ , determinazione che può avvenire sia per via sperimentale, sia mediante metodi di calcolo.

La figura 3 riporta il caso pratico di una nota birreria greca, in cui tale misurazione è stata eseguita in un certo numero di punti, a distanza crescente dalla sorgente sonora; si osserva come il livello sonoro cali in funzione della distanza secondo una curva che non segue quella del campo libero ma rimane significativamente più alta di essa a partire da pochi metri dalla sorgente.

Si può infine osservare come, in base alla definizione sopra riportata di fattore di correzione ambientale  $K$  (o  $D_{1,0}$ ), tale valore sia facilmente calcolabile a partire dalla risposta all'impulso  $h(\tau)$ :

$$K = 10 \cdot \lg \left[ \frac{\int_0^{\infty} h(\tau) \cdot d\tau}{\int_0^{\infty} h(\tau) \cdot d\tau} \right] \quad (3)$$

## Il campo semi-riverberante

Se si vuole calcolare il livello sonoro complessivo, è sufficiente sommare energeticamente il campo riflesso e quello diretto; si ottiene così la seguente relazione, nota come formula del campo semi-riverberante, poiché assomma in sé la formula del campo libero e la formula del campo riverberante:

$$L_{tot} = L_w + 10 \cdot \lg \left[ \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot d^2} + \frac{4}{\sum \alpha_i \cdot S_i} \right] \quad (4)$$

Purtroppo la formulazione del campo semi-riverberante, riportata sopra, può essere applicata con successo solo a un limitato numero di ambienti di lavoro. Nella grande maggioranza dei casi si ha invece a che fare con ambienti bassi e vasti, dove una dimensione del locale (l'altezza) è significativamente minore delle altre due, e dove la distribuzione del materiale fonoassorbente non è uniforme.

In tali frequenti condizioni, si ha quindi un significativo scostamento fra il comportamento reale della propagazione sonora e quello teorico basato sulle formule suddette.

### Il fattore di correzione ambientale K in ambienti bassi e vasti

In un ambiente basso e vasto, l'impiego della relazione di Sabine per passare dal valore del tempo di riverberazione alle unità assorbenti totali è quantomeno discutibile. In particolare, è decisamente obiettabile il fatto di prendere in considerazione in tale formula l'intero volume del locale. Pare così sensato prendere in considerazione un volume ridotto  $V_r$ , che dipende unicamente dall'altezza del locale  $H$  e non dalla sua estensione in pianta. Per la definizione di tale volume ridotto, si propone di adottare la seguente formula empirica:

$$V_r = 5.64 \cdot T^{0.7} \cdot H^3 + \frac{1.596}{T^{0.7}} \cdot H \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot d^2}{Q} \quad (5)$$

Se a questo punto si impiega la formula di Sabine per ricavare il valore complessivo delle unità assorbenti dell'ambiente e la si sostituisce nella formula che fornisce il valore del fattore di correzione ambientale  $K$  in campo semi-riverberante si ha:

$$K_{\text{cor}} = 10 \cdot \lg \left[ 1 + \frac{4 \cdot S \cdot T}{0.16 \cdot \left( 5.64 \cdot T^{0.7} \cdot H^3 + \frac{1.596}{T^{0.7}} \cdot H \cdot S \right)} \right] \quad (6)$$

Questa formula è solo leggermente più complicata di quella di partenza, in quanto richiede di conoscere semplicemente il valore del tempo di riverberazione medio del locale  $T$ , la sua altezza  $H$  e la superficie  $S$  d'involuppo utilizzata per la misura del livello di potenza sonora. In sostanza si propone un metodo di calcolo con lo stesso grado di complessità della nota formula del campo semi-riverberante ma che possa essere impiegato tranquillamente in ambienti bassi e vasti senza commettere gli errori del tutto inaccettabili che tale formula solitamente produce.

Gli autori hanno già affrontato questo approccio in passato, ma ora, grazie all'ultimo anno di ricerche, hanno rivisto e migliorato la formulazione empirica a suo tempo sviluppata [1].

### Simulazione numerica "RASS" (Ramses the Acoustical Software Simulator)

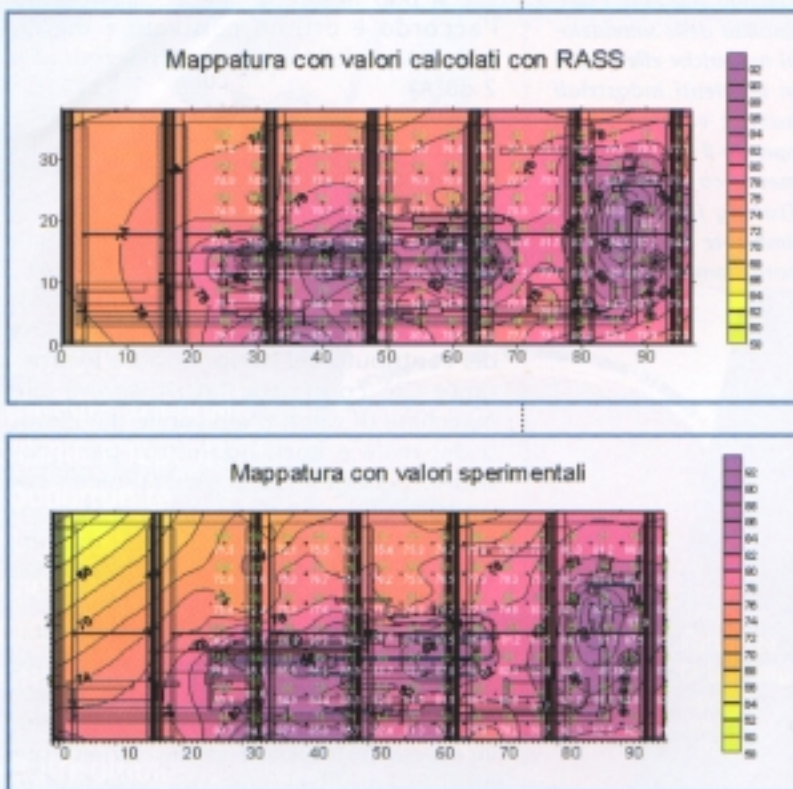
Volendo saggiare l'affidabilità delle simulazioni numeriche effettuabili in ambienti industriali bassi e vasti, è stato operato il calcolo con la metodica del Pyramid Tracing in un grande ambiente danese adibito ad imbottigliamento, nel quale erano precedentemente state eseguite dettagliate misurazioni sia della propagazione del campo sonoro, sia della emissione sonora delle macchine installate, sia infine dei livelli sonori prodotti in tutto l'ambiente dal funzionamento delle stesse.

Si tratta quindi di un caso in cui sia i dati d'ingresso, sia quelli in uscita del programma di calcolo sono verificati sperimentalmente e quindi è possibile valutare effettivamente la capacità dello stesso di riprodurre correttamente i fenomeni di propagazione che avvengono in un ambiente basso e vasto.

### Simulazione della propagazione del rumore emesso dalle macchine

Dopo aver introdotto nella geometria numerica l'adeguato numero di sorgenti sonore, i cui dati di potenza e direttività sono stati ottenuti da rilievi acustici di-

Fig. 4.



retti eseguiti sulle singole macchine con tecnica intensimetrica a scansione ISO 9614/2, è stato operato un nuovo calcolo utilizzando una griglia regolare di ricevitori esattamente corrispondente a quella impiegata per i rilevamenti fonometrici nello stabilimento.

La figura 4 pone a confronto le mappe ottenute dalla elaborazione dei dati rilevati sperimentalmente e calcolati dal programma RASS sviluppato da Sasib Food & Beverage Machinery in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Parma. Co-



*Volendo saggiare l'affidabilità delle simulazioni numeriche effettuabili in ambienti industriali bassi e vasti, è stato operato il calcolo con la metodica del Pyramid Tracing in un grande ambiente adibito a imbottigliamento.*

me si può notare anche in questo caso l'accordo è ottimo con valore medio quadratico dello scostamento inferiore a 2 dB(A)

### Conclusioni

L'applicazione pedissequa delle attuali normative tecniche (ISO 3744/46, ISO11203/4) in ambienti industriali bassi e vasti porta a una sistematica sottostima del contributo del campo sonoro riverberante. Ciò comporta l'attribuzione alle macchine di valori d'emissione più elevati del reale e costi aggiuntivi per i costruttori che si vedono generalmente costretti a utilizzare dispositivi supplementari per l'abbattimento dei livelli di pressione sonora senza che tutto questo sia realmente necessario.

Viene inoltre così sottostimata la possibilità di ridurre la rumorosità mediante trattamenti ambientali, che sono invece molto efficaci in questi stabilimenti e che viceversa potrebbero essere seriamente presi in considerazione già nella fase di

progettazione degli edifici e non dopo, quando i costi e i problemi d'installazione lieviteranno inesorabilmente. Sulla base dei risultati sperimentali è stata ricavata una semplice formula empirica, che consente il calcolo corretto del fattore di correzione ambientale pur rispettando la formulazione prevista dalle norme ISO. Ciò rappresentava il target della ricerca Sasib per fornire uno strumento di verifica "in situ" semplice ed efficace ai clienti, ai costruttori e agli organismi preposti al controllo vista l'imprecisione dei tradizionali protocolli di misura.

Si è quindi saggiata la potenzialità offerta dai moderni metodi di calcolo numerico per la valutazione della propagazione sonora in ambienti non-Sabiniani per confronto con rilievi sperimentali. La metodica messa a punto e la disponibilità dei suddetti dati tarati consentono quindi la valutazione previsionale di nuovi comparti produttivi o di modifiche al layout esistente in termini dimensionali o di numero di sorgenti sonore, con margini d'errore grandemente ridotti rispetto a quanto sinora possibile con metodiche di calcolo valide solo in campi sonori Sabiniani.

### Bibliografia

- [1] Farina A., Fornari G. - "Studio della propagazione del rumore in ambienti industriali bassi e vasti" - atti del convegno nazionale dbA 198 "Dal rumore ai rischi fisici: valutazione, prevenzione e bonifica negli ambienti di lavoro" - Modena, 17, 18 e 19 settembre 1998.
- [2] Sabine, W.C. - "Collected papers on acoustics" - Pergam. Pr., London 1929
- [3] Krokstadt A., Strom S., Sorsdal S. - "Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique" - J. Sound Vib. 8, pag. 118 (1968).
- [4] London A. - "The determination of Reverberant Sound Absorption Coefficients from Acoustic Impedance Measurements" - J.A.S.A., vol. 22, no. 2, pagg. 263-269, march 1950.
- [5] Vorlander M. - "Simulation of the transient and steady state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm" - J.A.S.A. 86 (1), pagg. 172-178, July 1989.
- [6] D. van Maercke, J. Martin - "The prediction of echograms and impulse responses within the Epidaur software" - Applied Acoustics Vol. 38 no.s 2-4, pag. 93 (1993).