

LA PROPAGAZIONE DEL RUMORE NEGLI AMBIENTI INDUSTRIALI

Nicola Prodi

Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara

1. Introduzione

Se l'emissione e l'esposizione al rumore sono basse allora tutti i possibili effetti del rumore sull'uomo sono ridotti. Questo concetto basilare, sviluppato nella norma tecnica [1], introduce la motivazione fondamentale allo studio dei campi acustici negli ambienti industriali. In questi ambienti l'obiettivo primario che ci si propone è quello di controllare e ridurre con varie strategie il rumore presente, poiché in ogni caso esso è da considerare negativo per gli occupanti. Sebbene infatti sia ammissibile in tali ambienti un certo rumore di fondo (che varia a seconda delle attività), un apporto eccessivo di rumore dai macchinari o dalle lavorazioni pregiudica il comfort acustico. Questa prospettiva è radicalmente diversa da quella che guida gli interventi su altre tipologie di ambienti, come ad esempio gli spazi di spettacolo, in cui l'acustica costituisce un importante arricchimento e non un intralcio alla funzionalità dell'ambiente.

Per la piena fruizione dell'ambiente industriale è quindi necessario il controllo del rumore sia alla sorgente che nella sua propagazione verso gli occupanti. L'intervento sull'involucro architettonico è, sebbene non l'unica, una delle strategie possibili e spesso efficaci a questo scopo. Per questo motivo è quindi importante conoscere nel modo più completo le qualità del campo sonoro nell'ambiente, ed in particolare la propagazione del suono, per poterlo controllare più efficacemente.

Il primo problema che si incontra nell'affrontare lo studio della propagazione del rumore negli ambienti industriali è la estrema varietà di tipologie architettoniche che possono ricadere in questa categoria. Infatti, sebbene esistano modelli di ambienti consolidati secondo la funzione (industrie dello stesso tipo tendono ad essere simili), gli ambienti industriali possono presentare caratteristiche acustiche molto diverse anche per le medesime lavorazioni, a seconda di come sia realizzato l'ambiente stesso e organizzata l'attività. Non bisogna poi dimenticare che esistono oggettive e ovvie differenze tra le diverse industrie e non ci si potrà aspettare in genere una similitudine acustica ad esempio tra una piccola-media industria ed una grande industria, poiché le loro attività implicano di solito ambienti con caratteristiche assai diverse.

Detto questo la propagazione acustica è in ogni caso governata dai medesimi fattori, che possono essere riassunti in:

- Forma dell'ambiente e volume: fondamentale è in questo caso il rapporto tra le dimensioni (lunghezza - L, larghezza - W, altezza - H);
- Proprietà acustiche delle superfici di contorno: in particolare la presenza di trattamenti acustici per il fonoassorbimento, la loro estensione e collocazione;
- Presenza di equipaggiamenti: e quindi sia di linee e dispositivi di produzione che di zone di stoccaggio e movimentazione nonché di schermi e simili.

Come si vedrà è proprio l'interazione dei fattori precedenti che genera il campo acustico e, quando si decida di intervenire sulla propagazione del rumore, bisognerà conoscere e controllare ciascuno di essi nella maniera più conveniente.

2. Riferimenti normativi

La normativa tecnica circa gli ambienti industriali si è arricchita in anni recenti di importanti strumenti operativi. In particolare la norma *UNI EN ISO 11690 - Raccomandazioni pratiche per la progettazione di ambienti di lavoro a basso livello di rumore contenenti macchinario* copre tutto l'iter che va dalla definizione delle strategie per il controllo del rumore (*Parte 1: 1998*) ai provvedimenti per il controllo del rumore (*Parte 2: 1999*) fino alla descrizione esemplificata di come studiare la propagazione e la previsione del rumore negli ambienti industriali (*Parte 3: 2000*). La norma è di estrema chiarezza ed è una guida sicura sia per impostare il problema dal punto di vista tecnico che organizzativo - gestionale. Un indispensabile complemento tecnico della norma precedente è un'altra norma, la *UNI EN ISO 14257 - Misurazione e descrizione parametrica delle curve di decadimento del suono nello spazio degli ambienti di lavoro per la valutazione delle loro prestazioni acustiche* (2004). Questo secondo riferimento è più specifico riguardo alla metodologia di qualificazione delle caratteristiche acustiche degli ambienti industriali in vista della loro bonifica.

Nel loro insieme le norme precedenti hanno per prima cosa introdotto i concetti fondamentali dello studio acustico degli ambienti industriali ed i parametri da ritenere idonei a qualificare sinteticamente le prestazioni acustiche. Su tali parametri è incentrato il controllo del rumore su di essi è quindi opportuno fermare l'attenzione.

3. La curva di distribuzione spaziale ed i parametri DL2 e DLf

Per capire come il rumore si diffonde nell'ambiente viene introdotto il concetto di curva di distribuzione spaziale. Questa curva mostra come il livello di pressione emesso da una sorgente di riferimento diminuisca con l'aumentare della distanza da essa. La curva è tracciata su assi di distanza e dB, entrambi in scala logaritmica, ed è posta a confronto con l'andamento conosciuto del suono in un campo libero. Infatti quest'ultimo, espresso negli assi precedenti, è semplicemente rappresentato da una retta con pendenza di -6dB per raddoppio di distanza e costituisce la condizione più favorevole di attenuazione del rumore mantenendo la linea visuale libera tra sorgente e ricevitore.

Ogni curva di distribuzione è suddivisibile, seppure con qualche differenza da caso a caso, in tre regioni fondamentali a seconda della distanza tra la sorgente ed il ricevitore. Nel primo intervallo, che si può tipicamente individuare da 1m a 5 – 10 m dalla sorgente, la curva di propagazione è dominata dal suono diretto ed è determinante in questa zona la posizione della sorgente, specie se in prossimità di superfici riflettenti che ne limitino l'angolo solido di emissione. L'intervallo seguente, tipicamente da 5 – 10m a 16 – 20 m di distanza, è di particolare interesse per gli aspetti di controllo del rumore e riduzione del disturbo. Per distanze maggiori sono assai rilevanti gli eventuali schermi acustici e la presenza di macchinari che diffondono il suono che incide su di essi.

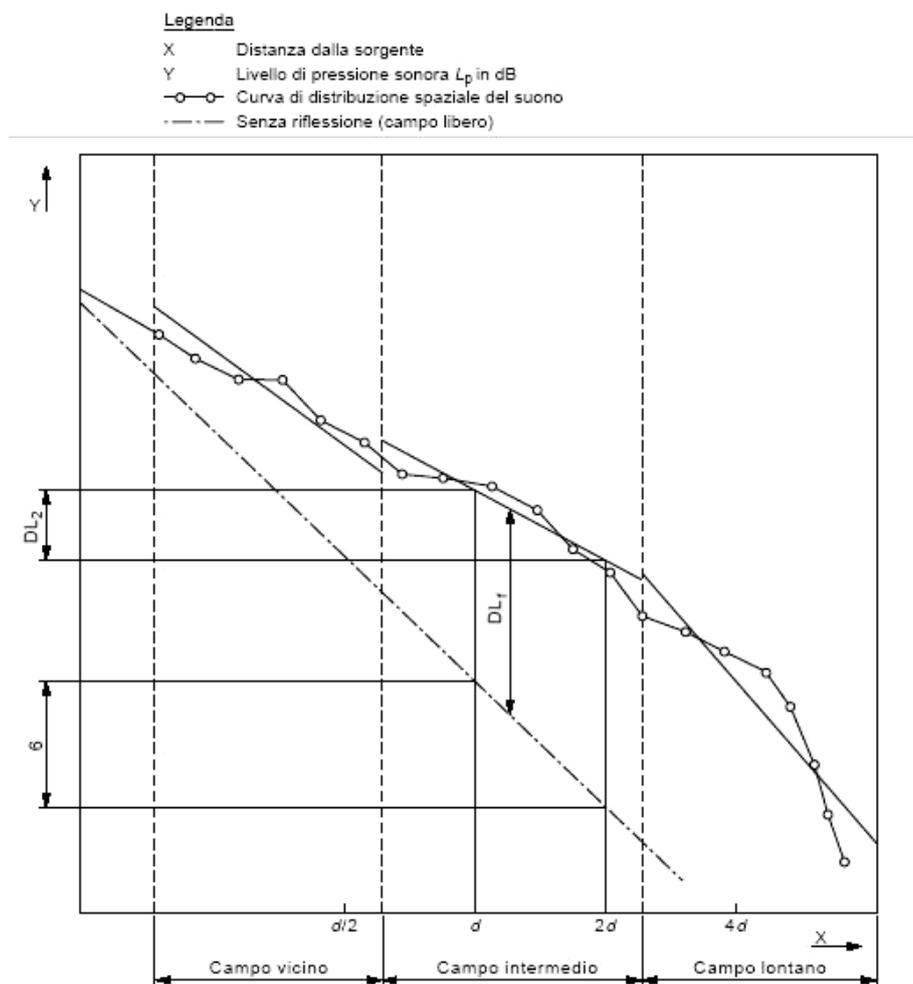


Figura 1 – La curva di distribuzione spaziale del suono ed i parametri DL_2 e DL_f (da [1]).

Tabella 1 – Valori indicativi di DL_2 e DL_f nel range di distanze intermedio (da [2]).

Descrizione dei locali	α	DL_f dB	DL_2 dB
Volume piccolo e medio ($V < 10\,000\text{ m}^3$ e $h < 5\text{ m}$) senza soffitto assorbente, vuoto	$< 0,2$	da 8 a 13	da 1 a 3
Volume grande ($V \geq 10\,000\text{ m}^3$ e $h \geq 5\text{ m}$) senza soffitto assorbente, con arredi	$< 0,2$	da 6 a 9	da 2,5 a 4
Locali con soffitto assorbente, con arredi	$> 0,3$	da 5 a 8	da 3,5 a 5

Per meglio studiare la curva di distribuzione spaziale alle diverse distanze sono stati introdotti due parametri descrittivi:

DL2 – è la pendenza, espressa in dB per raddoppio di distanza, della curva di propagazione per un assegnato intervallo di distanze;

Dlf – è la differenza media, in dB, in un certo intervallo di distanze, tra la curva di propagazione nell'ambiente e quella del campo libero.

I DL2 e Dlf sono mostrati per un caso tipico nella figura 1 dove è anche riportata la suddivisione tra le diverse regioni della curva e l'andamento del campo libero.

I due parametri così introdotti hanno una variabilità tra i diversi ambienti che non è facilmente prevedibile e, anche all'interno della singola curva di distribuzione spaziale, variano tra le zone vicine e quelle più lontane dalla sorgente. E' quindi difficoltoso indicare in ciascun caso dei valori attesi. Limitandosi alla zona intermedia, la norma [2] riporta i valori in tabella 1 per diverse tipologie di ambienti.

La curva di distribuzione spaziale è infatti influenzata in maniera decisiva dai fattori indicati in precedenza come costitutivi del campo acustico ed in particolare la geometria, i materiali e gli equipaggiamenti. Da questo si comprende come diverse combinazioni di fattori portino ad alterare in maniera crescente la curva medesima. Al livello più semplice nell'ambiente sono valide le ipotesi del campo acustico diffuso, che, come noto si realizzano quando si trovano:

- rapporti dimensionali non sbilanciati e volumi non eccessivi;
- assorbimento delle superfici equamente distribuito non troppo dissimile fra superficie e superficie.

In questo caso esiste una sola curva di distribuzione spaziale del suono che descrive tutto l'ambiente e che coincide con la curva ricavabile teoricamente con la formulazione classica di Sabine.

Quando vengono a mancare i presupposti precedenti si entra in una casistica molto ampia, che non è descrivibile in maniera semplice. In particolare, nel caso in cui una o due dimensioni dell'ambiente siano fortemente sbilanciate ma si abbia che

- gli equipaggiamenti presenti sono distribuiti in maniera pressoché omogenea;
- l'assorbimento sonoro è distribuito in maniera simile in tutto l'ambiente (es. pavimento riflettente e copertura assorbente);

allora esiste comunque una unica curva di distribuzione del livello sonoro, valida per tutto l'ambiente. Viceversa se equipaggiamenti sono distribuiti in maniera non omogenea e/o l'assorbimento sonoro è distribuito in maniera non uniforme nell'ambiente allora è molto probabile che non esista una unica curva di distribuzione spaziale ma che a seconda della direzione considerata si abbiano curve anche sensibilmente diverse.

4. La misura e la valutazione della curva di distribuzione spaziale

Un volta definita la curva di distribuzione spaziale ed anche i parametri utili alla sua descrizione si deve chiarire il metodo, in termini di procedure e strumentazione, con cui misurare ciascuno dei punti della curva. Inoltre è necessario anche stabilire in maniera univoca un procedimento matematico per estrarre i parametri DL2 e Dlf dalla curva misurata ed infine avere un criterio di valutazione per discutere i risultati.

Questi scopi più specificamente metrologici sono dettagliati nella norma [4]. In essa si specifica come la quantità da misurare sia il valore della distribuzione (o propagazione) del suono indicata con D e definita come:

$$D_j(r) = L_{P_j}(r) - L_{W_j} \quad [\text{dB}]$$

dove r è distanza sorgente-ricevitore mentre L_P e L_W sono rispettivamente il livello di pressione sonora misurata e il livello di potenza della sorgente. L'indice j riguarda l'ottava in cui si effettua la misura. E' infatti sconsigliato di effettuare misure in terzi d'ottava poiché le variabilità in frequenza che potrebbero risultarne sono in genere di difficile interpretazione e richiedono soprattutto molta esperienza.

I punti principali circa la catena di misura sono la necessità di conoscere sia la potenza sonora della sorgente, che deve essere quindi preventivamente misurata secondo idonea normativa ([5], [7]), sia la sua direttività che può anche essere studiata secondo l'Annesso A della medesima norma [4]. Sebbene la conoscenza della potenza sonora non sia strettamente necessaria quando lo scopo è un raffronto tra le due situazioni *ante operam* e *post operam* di un intervento di trattamento acustico, è viceversa utile per poter confrontare diversi ambienti.

La catena di acquisizione è di classe 1 e sono definiti dei cammini di raccolta punti che, ponendo il microfono preferibilmente a 1.2m o a 1.55m dal suolo, si muovano su rette con visuale libera sulla sorgente sonora. Quest'ultima è posta di preferenza al suolo o a più di 0.5m da esso. La norma fornisce indicazioni molto utili per la soluzione di alcune importanti necessità pratiche ed in special modo per:

- esprimere i risultati per una sorgente sonora di diversa potenza e spettro;
- esprimere i risultati con una normalizzazione in frequenza (ponderazione A);
- correggere la curva di distribuzione spaziale per effetto della riflessione del suolo e della direttività.

L'insieme delle procedure di misura e di correzione serve quindi a produrre curve di distribuzione spaziale in ottava da 125Hz a 4kHz. A queste si applicano successivamente due semplici algoritmi di calcolo per l'estrazione, in ciascun range di distanze (vicino, medio e lontano), dei descrittori DL2 e DLf. E' anche possibile specificare tali parametri a distanze fissate e questo evidentemente per dare una valutazione dei miglioramenti apportati in posizioni specifiche da interventi di trattamento acustico negli ambienti.

Infine la procedura ai sensi della norma [4] prevede uno schema dettagliato di rapporto di misura e presentazione dei risultati che è ben esposto dell'Annesso C della normativa stessa.

La qualificazione acustica dell'ambiente industriale è funzionale a stabilire se le condizioni al suo interno siano più o meno idonee. Per fare questa valutazione è necessario avere a disposizione da un lato i valori di riferimento legislativo che esprimono il massimo disturbo ammissibile e dall'altro i valori raccomandati dalla normativa tecnica, espressi in termini di caratteristiche acustiche dell'ambiente. Questi ultimi servono per creare condizioni acusticamente favorevoli al controllo dei primi, anche se da soli non ne garantiscono il rispetto. Sfortunatamente poi i dati a disposizione sugli ambienti industriali non sono molti e non sono esaurienti. In particolare si può fare riferimento alla seguente tabella 2 che si trova nella norma [1].

Come è facile notare dalla tabella 2 si hanno indicazioni abbastanza dettagliate per gli ambienti piccoli riguardo al tempo di riverbero, poiché sovente in queste condizioni il campo acustico è più vicino alla teoria classica, mentre per ambienti più grandi vi è una sola indicazione di massima per il DL2. Rimane sottinteso che il valore preferibile per il DLf e quello più prossimo a 6dB, che costituisce il massimo raggiungibile senza schermature. A questo riguardo è bene precisare che gli schermi possono portare ad alterazioni notevoli dei parametri fino a $DLf < 0$ e $DL2 > 6dB$.

Volume dell'ambiente V [m^3]	Tempo di riverbero RT [s]	Decremento per raddoppio di distanza $DL2$ [dB]
$V < 200$	$0.5 < RT < 0.8$	-
$200 < V < 1000$	$0.8 < RT < 1.3$	
$V > 1000$	-	$DL2 > 3 \sim 4$

Tabella 2 – Valori raccomandati per gli ambienti industriali (da [1]).

5. La previsione della curva di distribuzione

A completamento delle informazioni precedenti la norma [3] tratta le tematiche della previsione della curva di distribuzione spaziale negli ambienti industriali evidentemente in funzione del trattamento acustico, sviluppato o in fase progettuale o a posteriori. Sono esaminati diversi tipi di metodiche previsionali con vari gradi di dettaglio geometrico e di descrizione degli equipaggiamenti. Lo scopo è quello di associare a ciascuna metodica previsionale (sia essa di tipo analitico, semi-empirica o direttamente numerica) i dati di ingresso corretti e con il giusto livello di dettaglio.

Una delle difficoltà maggiori che si incontra infatti è quella di impiegare gli strumenti adatti a ciascun caso sia per la scelta del metodo di calcolo che per la sua applicazione specifica. Infatti, sebbene sia possibile e spesso discretamente affidabile l'impiego di complessi modelli tridimensionali al calcolatore in cui si possano rappresentare correttamente geometrie, materiali ed equipaggiamenti, questa procedura si presenta poco economica nella maggior parte dei casi. E' spesso preferibile cercare di impostare in maniera più semplice il problema (almeno nella fase iniziale) studiando il campo acustico per individuarne la tipologia e quindi selezionare gli strumenti di calcolo più idonei alla formulazione delle previsioni. A questo riguardo una interessante rassegna di alcuni dei modelli semplici si trova in [8].

Per individuare la natura del campo acustico ci si basa essenzialmente sulla geometria, semplificandola ad un parallelepipedo. I rapporti dimensionali configurano il tipo di campo acustico, e le caratteristiche delle superfici (riflettenti, assorbenti, diffondenti e schermanti) definiscono l'effettiva energia in gioco in ogni posizione. Come si vedrà, non in tutti i casi le riflessioni provengono egualmente da ogni direzione ma spesso la forma geometrica sbilanciata privilegia solo alcune superfici rendendo quindi "mute" una o più dimensioni. Più tecnicamente la struttura dei campi acustici è descritta dalle sorgenti immagine per le diverse superfici. Ciascuna sorgente immagine rappresenta o una riflessione singola, che cioè coinvolge una sola superficie, o multipla, che viceversa è il risultato di riflessioni multiple su diverse superfici impattate dal suono in successione. Da questo schema si può comprendere come la configurazione complessiva di tutte le sorgenti immagine spieghi la provenienza delle riflessioni nel punto di ricezione.

5.1 Gli ambienti bassi e vasti

Questa tipologia molto diffusa di ambienti è tipica dei grandi capannoni industriali le cui dimensioni in pianta sono molto maggiori dell'altezza, cioè L e $W \gg H$. In questo caso le riflessioni sulle pareti laterali non giocano un ruolo significativo poiché sono solo soffitto e pavimento che forniscono riflessioni importanti. L'andamento della curva di distribuzione spaziale in un ambiente di questo tipo può essere studiato con una certa affidabilità e produce delle curve del tipo di quelle mostrate in figura 2 (da [9]).

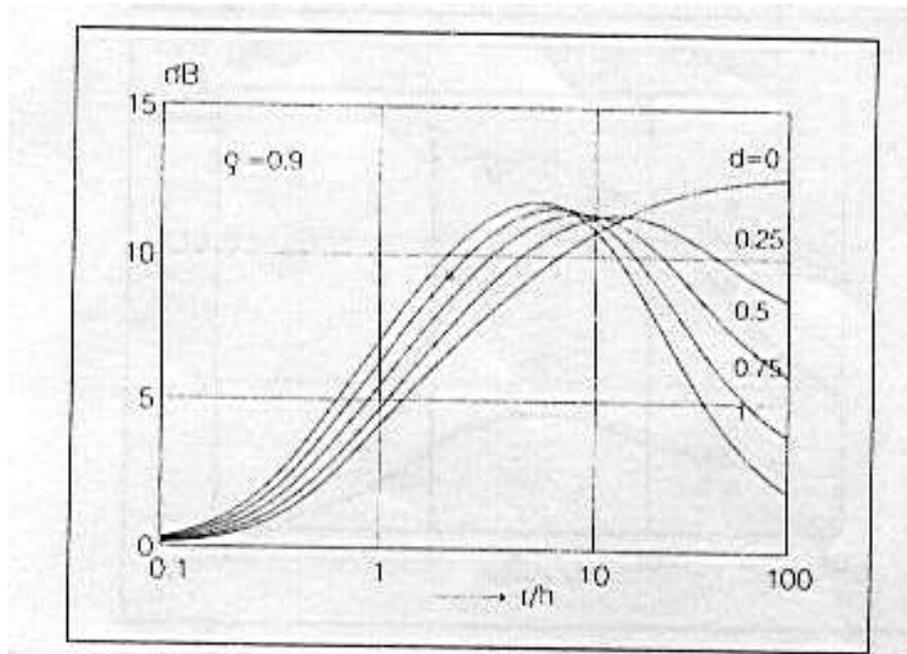


Figura 2 – Andamento del DLf in un ambiente basso e vasto. Ascisse: distanza normalizzata all'altezza (r/h); ordinate: dB. Il coefficiente di riflessione ρ di pavimento e soffitto è 0.9 mentre la diffusione d varia da 0 a 1 (da [9]).

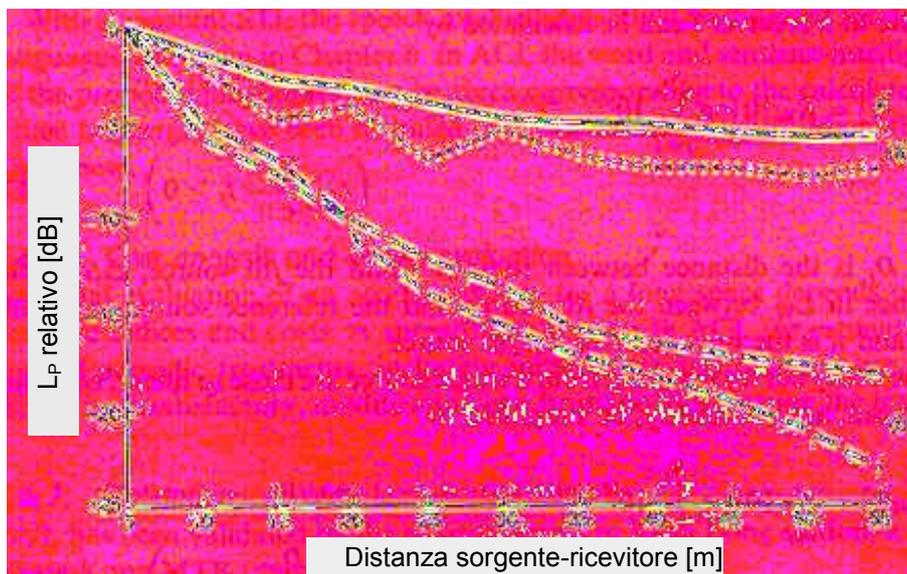


Figura 3 – Andamento del livello sonoro in un ambiente lungo senza e con diversi trattamenti diffondenti (a) e assorbenti (b) (da [10]).

In questi ambienti è impossibile applicare con successo la teoria classica ed anzi nella zona mediana di distanze si ha un valore maggiore di quello previsto dalla teoria sabiniiana del campo diffuso. Per contro il livello sonoro diminuisce progressivamente con l'incremento della distanza come è chiaramente deducibile dalla figura 2.

Inoltre la diffusione a soffitto e a pavimento (garantite da superfici usualmente di dimensioni non trascurabili) ha un ruolo fondamentale sia nell'innalzare il livello nelle zone vicine che nell'abbassarlo in quelle lontane. Il ruolo dell'assorbimento è invece quello di abbassare complessivamente le curve mantenendole entro valori sempre più contenuti a parità di distanza.

5.2 Gli ambienti lunghi

Al contrario dei precedenti ambienti bassi, negli ambienti lunghi quali tunnel e corridoi è la lunghezza che è in genere almeno sei volte maggiore delle altre due dimensioni che sono tra loro confrontabili. Anche in questo caso le riflessioni sono generate dalle superfici di pavimento e soffitto assieme alle pareti laterali più estese mentre le rimanenti due pareti laterali danno un contributo trascurabile. Anche per questi ambienti è possibile un approccio semplificato che tenga in considerazione le caratteristiche delle superfici come in precedenza [10].

Nella figura 3 è mostrato l'andamento del livello sonoro con la distanza in un ambiente di questo tipo ed è mostrata anche l'efficacia di trattamenti diffondenti o assorbenti. E' interessante notare che può essere poco efficace in questi casi intervenire solo su una coppia di pareti affacciate poiché si rischia di lasciare inalterato il contributo delle altre due pareti lunghe affacciate. Per quanto visto in precedenza le riflessioni residue possono essere tutt'altro che trascurabili. A questo motivo è più efficace e quindi preferibile intervenire su coppie di pareti perpendicolari.

5.3 Gli ambienti grandi o molto assorbenti

In questa categoria rientrano quegli ambienti che, seppure con dimensioni in proporzione tra loro come numeri interi e piccoli, non soddisfano la teoria classica a motivo del grande volume o del notevole assorbimento presente. Infatti in entrambe i casi la curva di distribuzione del suono mantiene un decremento sensibile con l'aumento della distanza in contrasto con la formulazione classica. Questo risultato è bene prevedibile dal punto di vista teorico ed è stato già da molto tempo individuato anche per le sale da concerto [11]. Lo studio di questi ambienti industriali può quindi beneficiare di una formula di tipo classico ma che è stata rivista nelle premesse [12], [13].

Nella figura 4 sono mostrati due tipici andamenti per campi acustici che rientrano in questa categoria rispettivamente per un ambiente di tipo industriale con forma di parallelepipedo ma di grande volume e poco allestito (quadrati pieni) e per una sala marcatamente assorbente di forma anch'essa regolare (triangoli vuoti). Il ruolo della riverberazione non è trascurabile in nessuno dei due casi, ma la previsione secondo le leggi classiche è affetta da un errore considerevole specie nelle posizioni più lontane.

Infatti per meglio valutare gli andamenti in figura 4 è bene ricordare che curve analoghe per ambienti che soddisfino la teoria classica dovrebbero presentare un andamento progressivamente crescente fino a divergere per distanze grandi. Questo perché la differenza tra i valori costanti del campo riverberato e il valore decrescente del contributo diretto si incrementa progressivamente. Per contro si vede come in entrambe i casi i valori si assestano o tendono ad assestarsi su un valore costante, che dipende evidentemente dalle caratteristiche di ciascun ambiente.

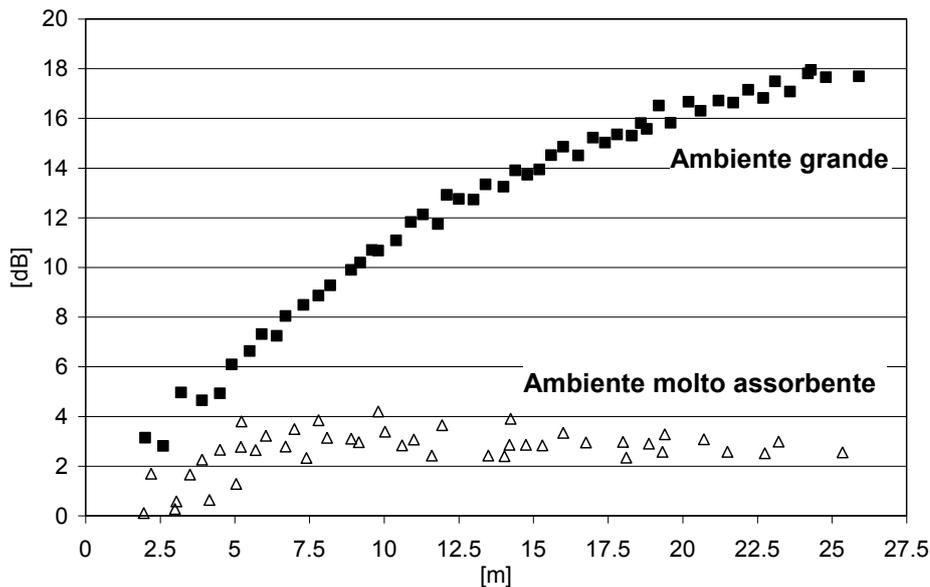


Figura 4 – Curve di distribuzione sonora in termini di DLF per un ambiente grande e per uno molto assorbente.

6. Considerazioni conclusive

Lo studio della propagazione del suono negli ambienti industriali può essere condotto con successo secondo le prescrizioni normative. L'impostazione tecnica delle norme, riassunta in precedenza, è però necessariamente generale e non può prendere in considerazione la natura specifica del campo acustico che in ciascun ambiente si viene ad instaurare. Questa informazione, specie nei casi in cui non sia applicabile la teoria classica, è di un certo rilievo perché funge da guida nella soluzione dei problemi di controllo del rumore. D'altronde, sebbene siano spesso riconducibili a campi acustici conosciuti, i casi pratici non sempre rientrano nella schematica presentazione sviluppata sopra o ne sono una combinazione difficilmente riproducibile (es. ambienti accoppiati, compartimenti, etc..). In questi ultimi casi risulta indispensabile ricorrere a modelli numerici cui sottoporre la reale geometria tridimensionale dell'ambiente. Questi algoritmi, basati su ray tracing, image source, radiosity etc., forniscono in uscita tutti i parametri derivabili dalla risposta all'impulso.

La maggiore attenzione della normativa è rivolta poi allo studio della curva di distribuzione del suono e quindi al livello sonoro cui è associabile un disturbo. Non trova altrettanto rilievo lo studio della riverberazione. Questa caratteristica percettiva acustica, che viceversa è di primario interesse in altri casi, risulta comunque importante anche negli ambienti industriali. In particolare la conoscenza del tempo di riverbero è indispensabile per l'applicazione della importante norma [6] per la misura della potenza sonora. In questo caso infatti si deriva dal tempo di riverbero misurato un parametro correttivo, chiamato k_2 , che permette di correggere l'apporto della riverberazione ambientale sulle misure di pressione. La formula da cui tale parametro k_2 è ricavato è basata sulla teoria classica ed è quindi verificata solo negli ambienti in cui tale teoria è valida. Per questo motivo si comprende come nella maggior parte dei casi sarebbe utile uno

strumento previsionale affidabile per il tempo di riverbero, da cui poter ricavare il parametro k_2 anche nei casi in cui la teoria classica non sia valida. Da questo punto di vista i modelli numerici al calcolatore, se opportunamente tarati, sono in grado di fornire anche il tempo di riverbero corretto mentre non è altrettanto agevole ottenere il medesimo risultato per altra via.

7. Bibliografia

- [1] UNI EN ISO 11690 - Raccomandazioni pratiche per la progettazione di ambienti di lavoro a basso livello di rumore contenenti macchinario. Parte 1 (1998) – Strategie per il controllo del rumore
- [2] UNI EN ISO 11690 - Raccomandazioni pratiche per la progettazione di ambienti di lavoro a basso livello di rumore contenenti macchinario. Parte 2 (1999) – Provvedimenti per il controllo del rumore
- [3] UNI EN ISO 11690 - Raccomandazioni pratiche per la progettazione di ambienti di lavoro a basso livello di rumore contenenti macchinario. Parte 3 (2000) – propagazione del suono e previsione del rumore in ambienti di lavoro.
- [4] UNI EN ISO 14257 - Misurazione e descrizione parametrica delle curve di decadimento del suono nello spazio degli ambienti di lavoro per la valutazione delle loro prestazioni acustiche (2004).
- [5] UNI EN ISO 3741 – Determinazione della potenza sonora delle sorgenti di rumore mediante misurazione della pressione sonora. Metodi di laboratorio in camere riverberanti (2001).
- [6] UNI EN ISO 3744 – Determinazione della potenza sonora delle sorgenti di rumore mediante misurazione della pressione sonora. Metodo tecnico progettuale in un campo essenzialmente libero su piano riflettente (1997).
- [7] UNI EN ISO 3745 - Determinazione dei livelli di potenza sonora di sorgenti di rumore mediante pressione sonora. Metodi di laboratorio in camere anecoica e semi- anecoica (2004).
- [8] M. R. Hodgson, *Experimental evaluation of simplified methods for predicting sound propagation in industrial workrooms*, J. Acoust. Soc. Am. **103**(4) 1933-1939 (1998).
- [9] H. Kuttruff, *Stationary propagation of sound energy in flat enclosures with partially diffuse surface reflection*, Acustica **86** (2000) 1028-1033.
- [10] J. Kang, *Acoustics in long spaces: theory and design guide*. Thomas Telford Publishing, London, (2002).
- [11] M. Barron, *Growth and decay of sound intensity in rooms according to some formulae of geometric acoustic theory*, J. Sound Vibration **27** (2) (1973) 183 – 196.
- [12] M. Barron, *Loudness in concert halls*, Acustica **82** (1996) s21 – s29.
- [13] N. Prodi, *On the use of the force density within room acoustics*, Proc.of Forum Acusticum 2002, Siviglia, 16 – 20 Settembre in Revista de Acustica, Vol. XXXIII, 2002.