
UN METODO DI PROGETTAZIONE PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO DA RUMORE

Raffaele PISANI

Studio di Ingegneria Acustica, Rivoli (TO)

1. SOMMARIO

Il tema trattato riguarda l'impostazione di un progetto per la riduzione dell'esposizione al rumore dei lavoratori e lo sviluppo dello stesso nei diversi settori produttivi.

Se la valutazione del rischio è affrontata in modo più ampio dagli articoli del Decreto Legislativo 277, le modalità per l'intervento di riduzione sono lasciate a completa discrezione del tecnico competente, con il rischio di interventi "casuali", rivolti esclusivamente alla riduzione delle emissioni sonore e non dell'esposizione al rumore.

La *riduzione del rischio* causato dall'esposizione al rumore è un obbligo che compete al datore di lavoro (*art.41, comma 1 del D.L.277*), il quale deve provvedere a ridurre l'esposizione con interventi di ordine tecnico, organizzativo e procedurale *concretamente attuabili*. Il problema che si pone al progettista è quindi almeno duplice: da un lato si tratta di ridurre il rischio, ovvero l'esposizione, e non semplicemente il rumore; dall'altro si tratta di esplicitare il significato di "concretamente attuabile", che, al di là delle implicazioni legate al progresso tecnico, può essere tradotto come tutte quelle misure la cui realizzazione porti davvero ad una riduzione dell'esposizione e non soltanto del rumore.

Con questi presupposti diventa quindi necessario un approccio metodologico che consenta di quantificare l'incidenza percentuale (in termini di energia assorbita) di ciascuna delle postazioni di lavoro che fanno parte di una certa mansione in rapporto al livello di esposizione complessivo. In questo modo vengono individuati i punti in cui un'azione di mitigazione risulta più efficace, con il massimo rapporto beneficio/costo, possono essere stabilite le priorità di intervento nell'ambito di una pianificazione aziendale, possono essere esclusi interventi che ad una valutazione superficiale potevano sembrare di importanza primaria (postazioni caratterizzate da una elevata rumorosità) ma che, ai fini dell'esposizione, risultano trascurabili.

Nell'ambito dell'argomento trattato si affrontano due problematiche distinte, la definizione di un metodo generale di progettazione e l'applicazione del metodo nel settore produttivo dei contenitori metallici.

2. PREMESSA

L'articolo 41, comma 1, del D.L. 277 prescrive la riduzione al minimo del rischio derivante dall'esposizione al rumore mediante misure tecniche, organizzative e procedurali **concretamente attuabili**. Il problema che si pone al progettista è quello di individuare gli interventi più efficaci con un'azione mirata alle sorgenti più influenti. Non si tratta semplicemente di progettare gli interventi di riduzione del rumore nei punti dello stabilimento dove esso è più alto, ma occorre analizzare e rimuovere le cause che determinano un potenziale **rischio** derivante dall'esposizione al rumore. Occorre quindi determinare le aree critiche dello stabilimento nelle quali devono essere adottati i criteri di riduzione del rischio da rumore e progettate le opere di riduzione del rischio mediante misure tecniche, organizzative e procedurali privilegiando gli interventi alla fonte come previsti nel D.Lvo 277 Art. 41 comma 1. Le variabili che incidono sull'esposizione sono due, il **livello sonoro** nel punto operatore, il **tempo di esposizione** di un soggetto a quel rumore. Possono realizzarsi situazioni, in uno stabilimento, per cui livelli sonori relativamente contenuti incidono notevolmente sull'esposizione complessiva perché abbinati a lunghi tempi di permanenza, e all'opposto, livelli sonori molto alti possono avere un'influenza scarsa o nulla sull'esposizione perché subiti per tempi brevi.

Il progetto di riduzione del rischio da rumore consiste dunque, prima di tutto, nell'analizzare ciascuna **mansione** in modo da definire le **operazioni** che un lavoratore compie nell'ambito della mansione stessa; per ciascuna operazione si individuano poi i punti di lavoro occupati dall'operatore e si misurano, in essi, i livelli sonori equivalenti; si quantifica, poi, l'esposizione per ciascuna operazione assoluta nell'ambito di una determinata mansione e quindi si calcola l'incidenza, in termini percentuali, della esposizione a ciascuna operazione sul livello di esposizione complessivo. Evidenziate le operazioni che si associano alle percentuali più elevate della esposizione si esegue una indagine mirata volta alla individuazione delle cause che determinano le esposizioni più elevate: occorrerà analizzare il rumore prodotto da ciascuna macchina al fine di individuare gli organi i cui rumori determinano maggiormente il livello equivalente prodotto dalla macchina e, quindi, procedere alla progettazione dell'intervento più adatto. Il progetto si conclude con la previsione del nuovo livello di esposizione a seguito degli interventi proposti.

Tutto il procedimento deve essere *documentato* e l'iter progettuale *facilmente ripercorribile* dall'organo di controllo in modo che possa esservi una verifica di quanto fatto. In questo modo, inoltre, si può dimostrare che ogni ulteriore intervento si rivelerebbe inutile, o quanto meno con un'efficacia talmente ridotta in rapporto ai costi o ai problemi di realizzazione (ad esempio cali di produzione o aumento di rischi per la sicurezza), da non poter essere preso in considerazione. Nei settori produttivi che si affrontano viene applicato estesamente il metodo di progettazione descritto. Per la estensione delle lavorazioni in ciascun stabilimento che verrà trattato non è possibile analizzare ciascuna mansione lavorativa per cui verranno estratte le mansioni più significative ai fini della applicazione del metodo toccando quelle per le quali sono stati ottenuti i migliori risultati e quelle per le quali i risultati sono stati molto scarsi.

3. IMPOSTAZIONE METODOLOGICA

Per l'individuazione delle aree critiche ai fini dell'esposizione al rumore si prosegue seguendo dettagliatamente il D.L.vo 277/91 nelle parti tecniche di calcolo dell'esposizione e di riduzione della stessa. Si ricorda che tale decreto è attuativo della Direttiva CEE n.86/188 del 12 maggio 1986 e che le espressioni matematiche da utilizzarsi per il calcolo traggono origine da precedenti norme ancora in vigore emanate dall'organismo internazionale ISO con il n.1999. Recependo l'indicazione che vuole prioritariamente la riduzione del rumore alla fonte, si elabora un metodo progettuale che deriva direttamente dalle indicazioni tecniche delle normative ricordate. Il metodo utilizzato si sviluppa con i seguenti passi logici:

1. definizione delle mansioni interessate dal progetto;
2. individuazione dei posti operatore nell'ambito di ciascuna mansione e misura del livello sonoro continuo equivalente per ciascun punto operatore;
3. definizione dei tempi di permanenza del lavoratore in ciascun punto di lavoro e calcolo del livello quotidiano di esposizione per mansione e per singolo dipendente;
4. modellizzazione di ciascuna mansione per il calcolo numerico dell'Esposizione Sonora pesata "A" $E_{A,T}$ espressa in % dell'esposizione totale nell'ambito della mansione considerata. L'esposizione sonora $E_{A,T}$ è implicita nella espressione di cui all'Art. 39 comma 1 lettera a) del D.L.vo 277/91 ed esplicita nella ISO 1999;
5. individuazione dei posti operatore, nell'ambito di ciascuna mansione, dove la percentuale $E_{A,T}$ è maggiore;
6. indagine acustica dettagliata nei posti operatore individuati nel precedente punto 5 per rilevare la causa di un livello di rumore tale che, commisurato con il tempo di permanenza, provoca una eccessiva esposizione;
7. definizione di un progetto di riduzione del rumore alla fonte e calcolo del livello di esposizione atteso mediante il modello di cui al punto 4.

Il metodo sopra descritto, a parere di chi scrive, è quello più sicuro per la riduzione dell'esposizione in quanto consente di individuare con certezza le cause di una esposizione elevata e di concentrare gli sforzi progettuali ed economici solo sulle reali e provate fonti di rumore. Sovente si assiste ad una progettazione acustica che si indirizza esclusivamente alla riduzione del rumore nei posti operatore ove esso è più elevato, senza tenere conto della reale incidenza di quella postazione sull'esposizione. In sede di misura dei livelli sonori e di calcolo dei livelli quotidiani di esposizione al rumore dei lavoratori, si riscontra che, dopo aver eseguito le riduzioni di rumore in maniera non organica, tale quantità è scesa di poco o non è scesa affatto o, comunque, sarebbe potuta scendere ulteriormente ottemperando appieno al disposto di cui all'Art. 41 comma 1 del D.L.vo 277/91.

Dallo schema di intervento sopra riportato si può osservare che i punti da 1 a 3 presentano i passaggi tipici per la valutazione del rischio come richiesto dall'Art. 40 comma 1. Il progettista, quindi, deve chiedere al datore di lavoro la valutazione del rischio e se questa non è stata redatta in modo dettagliato ove le singole operazioni sono state ben individuate ed indagate, occorre ripeterla con maggiore ricchezza di dettagli per descrivere con sufficienza il livello di rumore equivalente per ciascuna operazione.

L'obiettivo di questo tipo di analisi è quello di individuare le postazioni e/o fasi di lavoro che incidono maggiormente sul livello di esposizione al rumore degli addetti. In alcuni casi, però, a causa della complessità e della molteplicità delle mansioni (che coinvolgono spesso le stesse macchine con tempi diversi), è più opportuno analizzare le percentuali di incidenza in rapporto all'energia complessiva non in funzione del livello di esposizione personale quotidiana $L_{EP,d}$ ma in funzione del livello di rumore per macchina $Leq_{macchina}$. Viene quindi impostato un prospetto di calcolo che consente di individuare le postazioni e le fasi di lavoro che hanno la massima incidenza sul valore complessivo di rumorosità della singola macchina o linea. La necessità di valutare l'incidenza $E_{A,T}$ sul rumore della macchina anziché sul livello di esposizione si manifesta ad esempio, nei casi in cui particolari macchine sono coinvolte in un elevato numero di mansioni.

In entrambi i casi la massima incidenza è calcolata come energia parziale della postazione (ottenuta considerando sia il livello di rumore nella postazione sia il tempo di permanenza) riferita all'energia totale prodotta dalla macchina e assorbita dall'addetto. Essa è rappresentata dal valore $E_{A,T}$ espresso in percentuale.

In pratica si ottiene un prospetto analogo a quello sotto riportato:

macchina	tempo [%]	Leq [dB(A)]	$E_{A,t}$ %
fase di lavoro 1	a	xx.x	m
fase di lavoro 2	b	yy.y	n
.....
fase di lavoro n	c	zz.z	p
TOTALE	100 %	xy.z	100 %

La colonna "tempo [%]" indica per quanto tempo viene eseguita l'operazione in percentuale rispetto al tempo globale di lavoro.

La colonna "Leq [dB(A)]" indica il livello di rumore rilevato durante l'operazione.

La colonna " $E_{A,T}$ [%]" rappresenta l'incidenza percentuale della singola operazione sul livello di rumore o sul livello di esposizione complessivo e si calcola sulla base del tempo impiegato per l'operazione e del livello di rumore corrispondente.

Il valore $E_{A,T}$ % più elevato indica la fase/postazione di lavoro che incide maggiormente sul livello di esposizione complessivo e indica dove un intervento di riduzione può risultare più efficace. Il massimo valore di $E_{A,T}$ non coincide necessariamente con la postazione caratterizzata dal più alto livello di rumore. Può infatti verificarsi, come detto, che una permanenza prolungata in una postazione con un livello di rumore inferiore ad altri sia il fattore determinante in termini di esposizione al rumore.

In generale il progetto parte dall'analisi delle postazioni che incidono maggiormente sul livello di esposizione degli addetti seguendo la metodologia che verrà descritta e che consente di evidenziare le postazioni e/o le operazioni che concorrono in modo più significativo a determinare il livello di esposizione.

Per valutare, infine, i risultati ottenibili con la realizzazione dei diversi interventi proposti, deve essere implementato un modello di comportamento dei reparti nel quale si imposta l'attenuazione del rumore per un determinato tipo di intervento per ciascuna delle macchine. Il modello restituisce il valore del livello di esposizione personale quotidiana al rumore per ogni mansione. In questo modo è possibile valutare gli interventi, oltre che da un punto di vista tecnico, anche sotto il profilo dell'efficacia in relazione alla riduzione del rischio, e le scelte progettuali potranno seguire un criterio coerente che rispetti anche le priorità di intervento legate alla maggiore efficacia delle stesse.

Si comprende subito come possa essere difficile stabilire una attenuazione del rumore in funzione del tipo di intervento. L'attenuazione non può essere determinata con il calcolo in quanto, in pratica, la realizzazione dell'intervento stesso è possibile solo praticando una approssimazione nella realizzazione dell'intervento stesso. Si pensi, ad esempio, ad una cabina da realizzarsi su una macchina. Se essa è tutta chiusa si possono conseguire abbattimenti del rumore anche molto elevati dell'ordine di 15 - 20 dB(A). In pratica perché una macchina operatrice, anche automatica, possa operare è necessario alimentarla con la materia prima (lato di carico della macchina) ed estrarre da essa il prodotto finito (lato di scarico). Devono essere previste particolari aperture nella cabina per cui l'isolamento acustico si riduce drasticamente a pochi dB. Le aperture di cui si accenna devono essere necessariamente praticate sulla cabina per esigenze produttive e sono il frutto di numerosi compromessi che vede coinvolti anche gli addetti alla manutenzione della macchina.

4. IL METODO DI PROGETTAZIONE

Il punto di partenza del progetto, come è stato precedentemente detto, è la definizione per ogni postazione di lavoro, o per ogni operazione svolta nell'ambito di una mansione, dell'esposizione al rumore $E_{A,T}$ (esposizione sonora pesata "A") espressa come percentuale dell'energia totale assorbita nell'arco di 8 ore lavorative. La definizione di $E_{A,T}$ riportata nella Norma ISO 1999 è:

$$E_{A,T} = \int_{t_1}^{t_2} p_A^2(t) dt \quad [\text{Pa}^2 \cdot \text{s}]$$

dove $p_A(t)$ è il valore istantaneo della pressione sonora pesata "A" in [Pa] e $T_e = t_2 - t_1$ sono gli istanti di inizio e fine del periodo temporale T_e per il quale l'esposizione viene conteggiata.

La proprietà additiva di $E_{A,T}$ consente di definire l'esposizione totale al rumore per un periodo determinato (ad esempio otto ore lavorative giornaliere) quando un individuo è soggetto a variazioni discrete del livello equivalente. Se ad esempio n è il numero dei diversi livelli sonori equivalenti rilevati nelle n postazioni di lavoro occupate o nelle diverse fasi operative di una singola macchina e L_{Aeq,T_i} è il livello sonoro continuo equivalente, pesato "A", rilevato nella postazione i -esima o i -esima fase della macchina, la cui durata è T_i secondi, l'esposizione totale percepita sarà data dalla relazione seguente, per una durata T di permanenza (ad esempio una giornata lavorativa):

$$E_{A,T}^i = \sum_{i=1}^n p_0^2 \left[T_i \cdot 10^{0.1 L_{Aeq,T_i}} \right] \quad [\text{Pa}^2 \cdot \text{s}]$$

dove $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ [Pa]

In questo modo si determinano le diverse esposizioni E_{A,T_i}^i che concorrono alla definizione del livello quotidiano (o settimanale) personale di esposizione al rumore di un lavoratore dato dalla seguente relazione:

$$L_{EP,d} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T_0} \frac{1}{p_0^2} E_{A,T} \right] = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T_0} \frac{1}{p_0^2} \int_{t_1}^{t_2} p_A^2(t) dt \right] \quad \text{dB(A)}$$

dove T_0 è il periodo di riferimento di 8 ore giornaliere $T_0 = 8 \text{ h} = 28800 \text{ s}$

$T_e = t_2 - t_1$ è la durata quotidiana dell'esposizione personale di un lavoratore al rumore, ivi compresa la quota giornaliera di lavoro straordinario.

La relazione sopra esposta è la definizione data dall'Art. 39 comma 1 del D. Lvo 277 con semplici passaggi analitici.

Si consideri ora l'esempio di **Fig. 1** dove ad un lavoratore è assegnata la **mansione 1** che lo vede per 200 minuti nel punto P1 della linea al controllo della taglierina, per 15 minuti nel punto P2 al controllo del motore e per 265 minuti nel punto P3 al pulpito di controllo della linea ipotetica rappresentata dalle macchine S1 ed S2. Si suppone anche, per semplicità, che non esegue pause per cui la somma dei tempi indicati è pari al tempo di riferimento di otto ore lavorative giornaliere.

La macchina W1 appartiene ad un'altra linea e non è interessata dal lavoratore in esempio ma contribuisce al rumore anche nel punto P3.

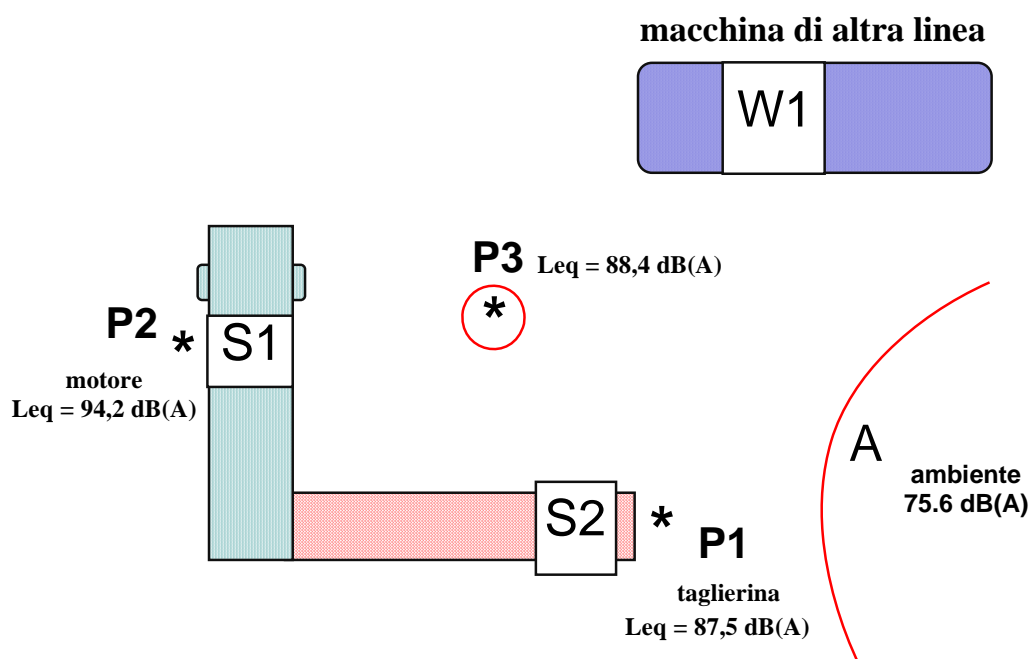


Fig. 1 - Posti operatore per la Mansione 1 e livelli equivalenti

Per la **mansione 1** applicando la teoria esposta si ottiene una tabella di calcolo che porta ad un livello quotidiano di esposizione al rumore pari a $L_{EP,d} = 88,4 \text{ dB(A)}$:

MANSIONE 1

Punti occupati	t [min]	Leq [dB(A)]	E ⁱ _{A,Ti} %
P1	200	87.5	33 %
P2	15	94.2	12 %
P3	265	88.4	55 %
TOTALE	480	88.4	100 %

E' evidente che l'esposizione più elevata il lavoratore la subisce nel punto P3 (55% dell'esposizione totale) e che intervenendo in tale punto si ottengono i maggiori benefici. Supponendo, per esempio, di poter ridurre di 3 dB(A) autonomamente il livello in P1, oppure in P2 oppure in P3 e senza che la riduzione del livello in un punto comporti anche la riduzione del livello stesso in un altro punto si ricavano le seguenti variazioni del livello quotidiano di esposizione personale del lavoratore.

Livello di esposizione personale originario	$L_{EP,d} = 88,4 \text{ dB(A)}$
Riduzione di 3 dB(A) del livello Leq = 87,5 dB(A) solo in P1	$L_{EP,d} = 87,6 \text{ dB(A)}$
Riduzione di 3 dB(A) del livello Leq = 94,2 dB(A) solo in P2	$L_{EP,d} = 88,2 \text{ dB(A)}$
Riduzione di 3 dB(A) del livello Leq = 88,4 dB(A) solo in P3	$L_{EP,d} = 87,1 \text{ dB(A)}$

La riduzione del livello in P3 risulta essere la più efficace; è evidente che il discorso fin qui effettuato è valido solo da un punto di vista didattico in quanto si suppone che la riduzione della emissione sonora di una macchina influenzi solo la postazione più vicina e non le altre: in pratica questo potrebbe accadere se si decidesse di costruire delle cabine per l'operatore o in P1, o in P2 ovvero in P3.

Con le ipotesi sopra formulate risulterebbe più efficace ridurre i livelli in P1 e P3 che non in P2. Infatti supponendo ora di ridurre di 3 dB i livelli in P1 e P3 oppure di ridurre di 12 dB il livello in P2 si ottiene

Livello di esposizione personale originario	$L_{EP,d} = 88,4 \text{ dB(A)}$
Riduzione di 3 dB(A) del livello in P1 ed in P3	$L_{EP,d} = 85,9 \text{ dB(A)}$
Riduzione di 12 dB(A) del livello Leq = 94,2 dB(A) solo in P2	$L_{EP,d} = 87,9 \text{ dB(A)}$

E' evidente che una drastica riduzione del livello più elevato (in P2) porta meno benefici che una riduzione, seppure moderata, del livello negli altri due punti.

Identificata ora la postazione P3 quella più critica con la maggiore percentuale di incidenza sulla esposizione, lo studio si concentra principalmente sulle sorgenti singole maggiormente responsabili del livello sonoro in quel punto. Questa quantificazione dei contributi in pratica è molto complessa: nei casi più semplici ove è possibile interrompere il funzionamento delle singole macchine è immediata la misura dei livelli immessi in P3 da ciascuna delle sorgenti individuate nella **Fig. 2**. Nei casi più complessi quando non è possibile interrompere il funzionamento delle singole macchine senza incidere significativamente sul funzionamento della intera linea, si ricorre a stime dei contributi per calcolo indiretto dalla misura del rumore emesso da un macchinario rilevato in prossimità ove il contributo delle altre fonti di rumore può essere ritenuto trascurabile.

Nel caso in esempio è stato possibile separare in P3 i diversi contributi che concorrono al valore finale del livello sonoro equivalente. Si giunge a definire uno schema del tipo:

P3 Leq globale = 88.4 dB(A)	Leq = 85.2 dB(A)	<i>S1 = motore</i>
	Leq = 81.1 dB(A)	<i>S2 = taglierina</i>
	Leq = 83.0 dB(A)	<i>W1 = sorgente lontana</i>
	Leq = 75.6 dB(A)	<i>A = ambiente</i>

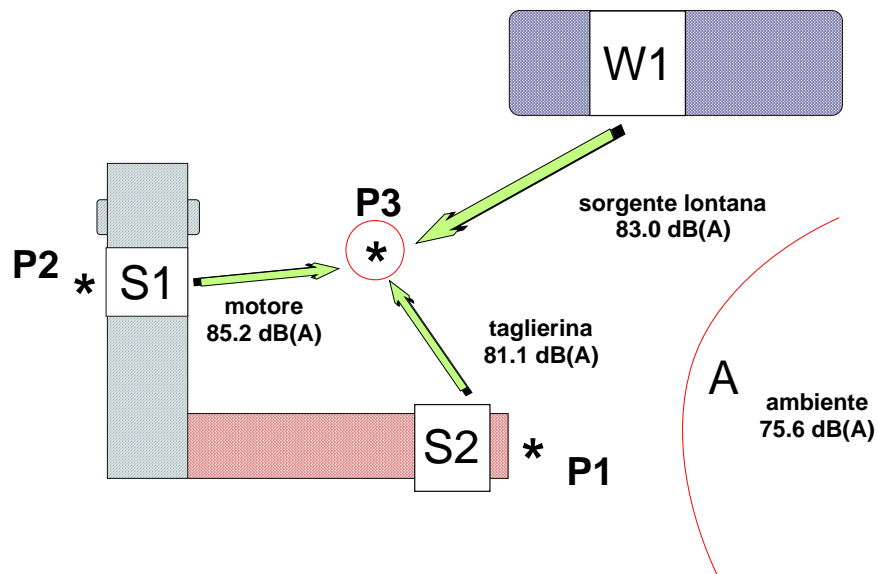


Fig.2 - Livelli sonori generati dalle singole sorgenti sonore in P3

A questo punto possono essere progettati gli interventi più idonei in seguito ai quali il nuovo livello sonoro nel punto in esame può essere previsto con una certa precisione.

Per la linea in esame una analisi acustica della rumorosità delle macchine porta ad individuare come preponderate il rumore prodotto dal motore della macchina S1 ed una inefficace chiusura della protezione posta sulla taglierina di S2. Anche il rumore della macchina W1 è determinante in P3 per cui si decide di intervenire nel seguente modo:

- incapsulaggio del motore della macchina S1 con una cabina fonoisolante
- revisione della chiusura della cabina posta sulla taglierina S2 a protezione dei lavoratori
- schermatura della macchina W1 appartenente ad un'altra linea
- nessun intervento sull'ambiente A.

Il punto più critico del progetto è senz'altro quello di attribuire una attenuazione del rumore a ciascuno degli interventi prospettati. E' impensabile calare nella realtà di un reparto produttivo tutta la scienza di acustica per stabilire quanto possa attenuare una cabina fonoisolante in pratica con la presenza delle numerose aperture che si devono praticare partendo dalla potenza sonora irradiata dalla macchina, dal potere fonoisolante del pannello, dall'irraggiamento sonoro delle aperture etc. Normalmente si ricorre a stime basate sulla esperienza di chi ha eseguito cabine simili ovvero procedendo in pratica per tentativi successivi di messa a punto di un modello di cabina originario.

La tabella di calcolo del livello sonoro equivalente in P3 è:

PUNTO P3

	Leq dB(A)	E ⁱ _{A,Ti} % prima	intervento	attenuazione	Leq dB(A)	E ⁱ _{A,Ti} % dopo
S1	85.2	48 %	<i>incapsulaggio del motore in cabina fonoisolante</i>	15 dB	70.2	8 %
S2	81.1	18 %	<i>chiusura delle fessure della esistente cabina sulla taglierina con opportune guarnizioni</i>	5 dB	76.1	30 %
W1	83.0	29 %	<i>posa di una parete fonoisolante tra le due macchine</i>	6 dB	77.0	36 %
A	75.6	5 %	<i>nessun intervento</i>	-	75.6	26 %
	88.4		Livello equivalente in P3		81.4	

Il nuovo livello equivalente in P3 che deriva da questo processo viene quindi utilizzato per il calcolo finale del livello di esposizione Lep,d. Ovviamente occorre stimare la riduzione del livello sonoro negli altri punti P1 e P2 a seguito degli interventi prospettati nella tabella precedente e ripetere il calcolo del livello quotidiano (o settimanale) personale di esposizione al rumore di un lavoratore il quale, nell'ambito della sua **mansione 1**, opera anche negli altri punti.

Prima di affrontare il calcolo del livello quotidiano personale di esposizione al rumore per la **mansione 1** si vuole approfondire il discorso progettuale per la riduzione del livello in P3 analizzando altre scelte e valutandone i risultati prevedibili.

Si può calcolare il livello equivalente in P3 o su base temporale pari alla durata di permanenza in tale punto o su base giornaliera supponendo che l'operatore trascorra tutto l'orario di lavoro nel punto P3 e che tale orario sia di 8 ore. Si possono prefigurare alcuni scenari di intervento e calcolare i relativi risultati in termini di livello equivalente nel posto operatore. I risultati sono riportati nel grafico di **Fig.3**:

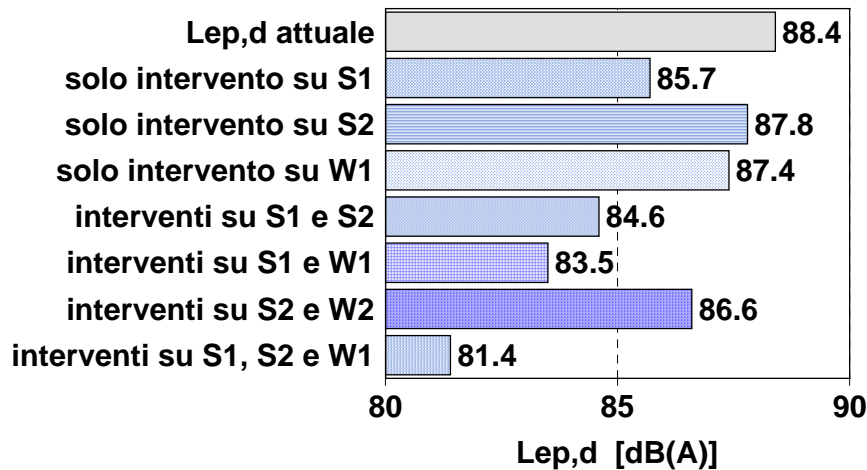


Fig.3 - Grafico per la valutazione dell'efficacia degli interventi in P3

I diversi tipi di interventi non possono essere scelti arbitrariamente dal professionista ma devono essere analizzati e concordati con i responsabili di stabilimento ed i responsabili della manutenzione. L'aiuto del progettista di acustica è quello di fornire una valutazione immediata del rapporto benefici/costi durante la fase di attuazione pratica del progetto di bonifica.

Per il caso della mansione 1 si calcola il livello quotidiano di esposizione al rumore ipotizzando gli interventi precedentemente elencati e valutando gli effetti di riduzione in ciascuno dei tre punti individuati. Un procedimento più corretto è quello di valutare i contributi in termini di riduzione del rumore nei tre punti operatore come è stato effettuato per P3. Occorre ripetere, se possibile, tutte le misure del livello equivalente in P1 e P2 arrestando tutte le macchine fonti di rumore e procedendo al rilievo con ciascuna in moto singolarmente. Se questa operazione non è possibile occorre calcolare il livello di pressione nel punto indagato partendo dai valori dei livelli sonori misurati in prossimità delle diverse macchine e tenendo conto della presenza di ostacoli e delle unità assorbenti presenti nel reparto. Questo parametro si deduce o attraverso la misura del tempo di riverberazione oppure mediante una sorgente campione di potenza nota. In pratica si possono utilizzare le sorgenti sonore presenti nel reparto e misurare il decadimento del livello sonoro con la distanza quando viene attivata una sola sorgente. Nel caso portato ad esempio il rumore emesso dal motore in S1 può essere facilmente utilizzato come generato da una sorgente puntiforme e misurato a diverse distanze ed in diverse direzioni rispetto al punto di emissione .

Ripercorrendo i passi sopra descritti per P3 si ricalcolano i livelli equivalenti nei due punti P2 e P1 ipotizzando attenuazioni in funzione della distanza dalle rispettive sorgenti. Per semplicità si ripropongono, poi, gli stessi valori di attenuazione dei diversi interventi. Per questi ultimi è da considerare il fatto che se nella maggior parte dei casi pratici senza intervento ciascuna sorgente può essere considerata omnidirezionale, con gli interventi proposti e specialmente quelli che utilizzano le cabine fonoisolanti i diagrammi di radiazione possono risultare fortemente distorti ad esempio per la presenza di apertura nella cabina che, in generale sono praticate per alimentare e scaricare la macchina. Anche in questo caso l'acustica può essere di aiuto per valutare un nuovo diagramma di radiazione. Si misura la potenza sonora della sorgente, le unità assorbenti all'interno della cabina e la distanza della sorgente dall'apertura. Ovviamente nel progetto della cabina stessa si prevedono delle superfici di apertura e dei tunnel per ridurre le emissioni. In pratica molti progettisti ricorrono ad una stima del diagramma di radiazione valutando le aperture sulla cabina in relazione alla posizione all'interno della sorgente.

Il punto di lavoro P2 è fortemente influenzato dal rumore prodotto dal motore. Una cabina fonoisolante sul motore produce senz'altro un elevato beneficio in P2 che si ripropone negli altri punti. Nella tabella che segue si stimano i risultati degli interventi ipotizzati nei diversi punti.

PUNTO P2 Stima del livello equivalente con gli interventi

	Leq dB(A)	E ⁱ _{A,Ti} % prima	intervento	attenuazione	Leq dB(A)	E ⁱ _{A,Ti} % dopo
S1	93.6	87.5 %	<i>incapsulaggio del motore in cabina fonoisolante</i>	15 dB	78.6	28.3 %
S2	80.5	4.3 %	<i>chiusura delle fessure della esistente cabina sulla taglierina con opportune guarnizioni</i>	5 dB	75.5	13.8 %
W1	82.5.0	6.8 %	<i>posa di una parete fonoisolante tra le due macchine</i>	2 dB	80.5.0	43.8 %
A	75.6	1.4 %	<i>nessun intervento</i>	-	75.6	14.2 %
	94.2		Livello equivalente in P2		84.1	

Anche per P1 si ricalcolano i livelli immessi in questa postazione da tutte le sorgenti di rumore, tenendo presente che la fonte più vicina è S2 che corrisponde alla taglierina già protetta da una schermo isolante per proteggere i lavoratori da incidenti possibili con una lama rotante.

PUNTO P1 Stima del livello equivalente con gli interventi

	Leq dB(A)	E ⁱ _{A,Ti} % prima	intervento	attenuazione	Leq dB(A)	E ⁱ _{A,Ti} % dopo
S1	82.1	28.7 %	<i>incapsulaggio del motore in cabina fonoisolante</i>	15 dB	67.1	3.1 %
S2	83.8	42.5 %	<i>chiusura delle fessure della esistente cabina sulla taglierina con opportune guarnizioni</i>	5 dB	78.8	45.3 %
W1	81.0	22.3 %	<i>posa di una parete fonoisolante tra le due macchine</i>	4 dB	77.0	29.9 %
A	75.6	6.4 %	<i>nessun intervento</i>	-	75.6	21.7 %
	87.5		Livello equivalente in P1		82.2	

Utilizzando i livelli equivalenti calcolati per i diversi punti operatore, si ricalcola nuovamente il livello quotidiano di esposizione per la mansione 1

MANSIONE 1 previsioni con intervento

Punti occupati	t [min]	Leq [dB(A)]	E ⁱ _{A,Ti} %
P1	200	82.2	33 %
P2	15	84.1	4 %
P3	265	83.7	63 %
TOTALE	480	83.2	100 %

Ovviamente, attuato il progetto e ripetuto nuovamente il procedimento, emergeranno nuove percentuali di incidenza delle sorgenti residue. Infatti nella mansione risulta ancora critico il punto P3. Questo però è una conseguenza della logica di calcolo della percentuale di esposizione in ciascun punto che necessariamente deve fornire un valore complessivo del 100%. Se però consideriamo il fatto che si è passati da un livello di esposizione $L_{ep,d} = 88.4$ dB(A) ad un livello di $L_{ep,d} = 83.2$ dB(A) con gli interventi, si può decidere se è il caso di approfondire ulteriormente lo studio della riduzione del livello in P3 ovvero ritenere il progetto esaustivo almeno per quanto riguarda le potenze sonore attuali irradiate dalle macchine che costituiscono la linea di produzione.

Una interessante applicazione di questo procedimento di calcolo riguarda anche la valutazione dell'efficacia di un **trattamento ambientale** accoppiato (o in sostituzione) agli interventi diretti sulla linea in esame.

E' noto che aumentando le unità fonoassorbenti presenti nel reparto, ad esempio appendendo al soffitto dei pannelli fonoassorbenti, la rumorosità in un punto operatore immessa da tutte le sorgenti che sono definite lontane (cioè quelle sorgenti per le quali la distanza dal punto considerato è superiore al raggio critico) si riduce per il trattamento fonoassorbente. L'entità dell'attenuazione si calcola agendo sul contributo del campo riverberato mantenendo inalterato il contributo del campo diretto. Supponendo per esigenze didattiche che i tre punti operatore P1, P2 e P3 si trovino nell'azione del campo diretto delle tre sorgenti considerate S1, S2 e W1 il trattamento fonoassorbente dell'ambiente agirà solo ed esclusivamente sulla riduzione del livello ambientale generato dalle linee lontane. Si definisce quindi una tabella del tipo:

MANSIONE 1

Punti occupati	$E_{A.Ti}^i$ % sorgente singola	$E_{A.Ti}^i$ % ambiente
P1	42 %	18 %
P2	13 %	8 %
P3	45 %	74 %
TOTALE	100 %	100 %

dove per sorgente singola si intende la macchina più prossima al relativo punto operatore e per ambiente si intende il rumore determinato in ciascun punto da tutte le altre sorgenti del reparto quando la macchina più vicina all'operatore viene spenta (energia del campo riverberato).

Separando il contributo della rumorosità dell'ambiente al livello sonoro nel punto considerato (sorgenti "lontane") dalla rumorosità della sorgente diretta (sorgenti "vicine"), si calcola in ciascun punto la percentuale di incidenza come sopra definita.

Diventa immediatamente chiara l'efficacia degli interventi in un senso o nell'altro, o se, come più spesso accade, un miglioramento decisivo si può ottenere agendo contemporaneamente in entrambe le direzioni.

4.1 ANALISI DEL RUMORE DI UNA SINGOLA MACCHINA

Molte volte si rende necessario analizzare il rumore prodotto da una singola macchina per individuare l'intervento più efficace per ridurre il rumore alla sorgente.

Il tipo di analisi da effettuare è essenzialmente sui livelli, specialmente quando la macchina produce rumori variabili durante il suo funzionamento. Prendendo ad esempio il rumore prodotto dal gruppo di taglio S2 della Fig. 1, si rileva in P1 il rumore prodotto dalla taglierina durante le sue fasi di taglio e di attesa che giunga il pezzo da tagliare. La taglierina è costituita da una lama rotante che viene abbassata sul listello da tagliare a tronconi. Nella **Fig. 4** che segue si riporta l'andamento del livello sonoro rilevato in P1 durante l'attività di taglio (segmento a) e la pausa di attesa (segmento b) durante la quale è in funzione il solo motore. Occorre decidere se è conveniente effettuare una schermatura con cuffia fonoisolante per il solo gruppo di taglio ovvero inglobare in una cabina tutta la macchina.

Utilizzando una tecnica di editing del segnale si può calcolare il livello equivalente prodotto durante la fase di taglio (segmento a), ovvero nel tratto b e nel tratto complessivo a+b. Nella tabella che segue si riportano i risultati delle misurazioni di dettaglio.

	in P1 tutto in funzione e reparto in attività	Leq = 87.5 dB(A)
a)	rumore durante il taglio Leq calcolato su 35 s.	Leq = 89.2 dB(A)
b)	taglierina ferma - solo motore calcolato su 65 s.	Leq = 86.1 dB(A)

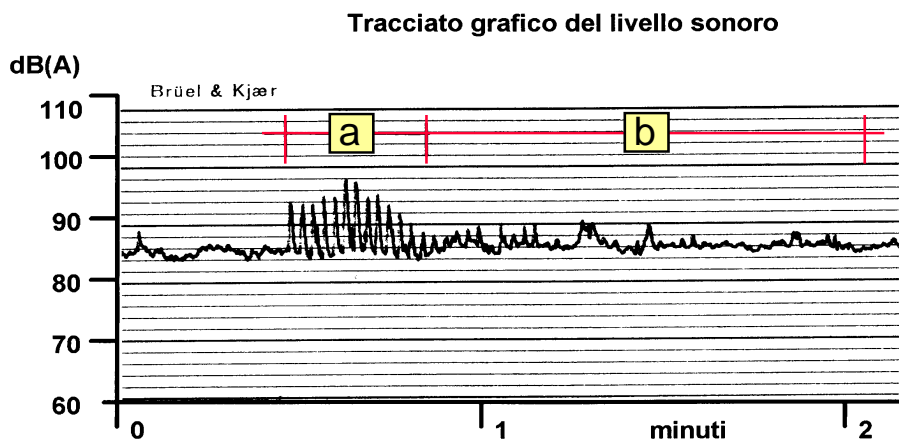


Fig. 4 - Andamento del livello sonoro nel punto operatore P1; a) rumore del taglio, b) rumore del motore della taglierina

Si calcola il livello equivalente in P1 ipotizzando una riduzione del rumore relativo al solo tratto a) (rumore durante il taglio) per effetto della cuffia

fonoisolante sulla gruppo di taglio. Con il calcolo si evince che il livello equivalente di 87.5 dB(A) può essere ricondotto ad un livello pari di 86.1 dB(A) operando una riduzione di 3 dB(A) del rumore emesso nella fase a). Non è possibile scendere al di sotto di 86.2 dB(A) perché lo stesso rumore del motore prevale sul rumore della taglierina.

Questo esempio chiarisce il modo di operare qualora si decidesse di eseguire interventi mirati sulla macchina per evitare doverla racchiudere in una grossa cabina.

L'indagine della emissione sonora degli organi e componenti di una macchina è una operazione complessa che richiede tecniche anche sofisticate di indagine quali l'intensimetria acustica praticata su superfici che racchiudono esclusivamente una determinata fonte di rumore nell'ambito dell'intera macchina.

In pratica, approfondendo il modo di funzionare di una macchina, è possibile parzializzare il funzionamento della stessa in modo da quantificare l'emissione di alcuni componenti. Si porta ad esempio il caso delle presse per lo stampaggio a caldo dei pezzi di acciaio. Lo stampo sovente viene raffreddato con un getto d'aria mentre il distaccante viene spruzzato da un secondo getto. E' possibile chiudere il rubinetto dell'aria e continuare le misurazioni per rilevare l'incidenza dell'energia sonora del colpo prodotto dai due stampi che deformano il pezzo e separare questo contributo da quello generato dagli ugelli che soffiano aria sullo stampo.

In molti casi possono essere migliorativi del livello sonoro equivalente generato da una macchina di questo tipo gli interventi volti a parzializzare il getto d'aria, se rilevante, nei soli istanti in cui gli stampi sono aperti ed ad arrestare tale getto durante la fase di stampaggio.

Rivoli, 4 giugno 1999