

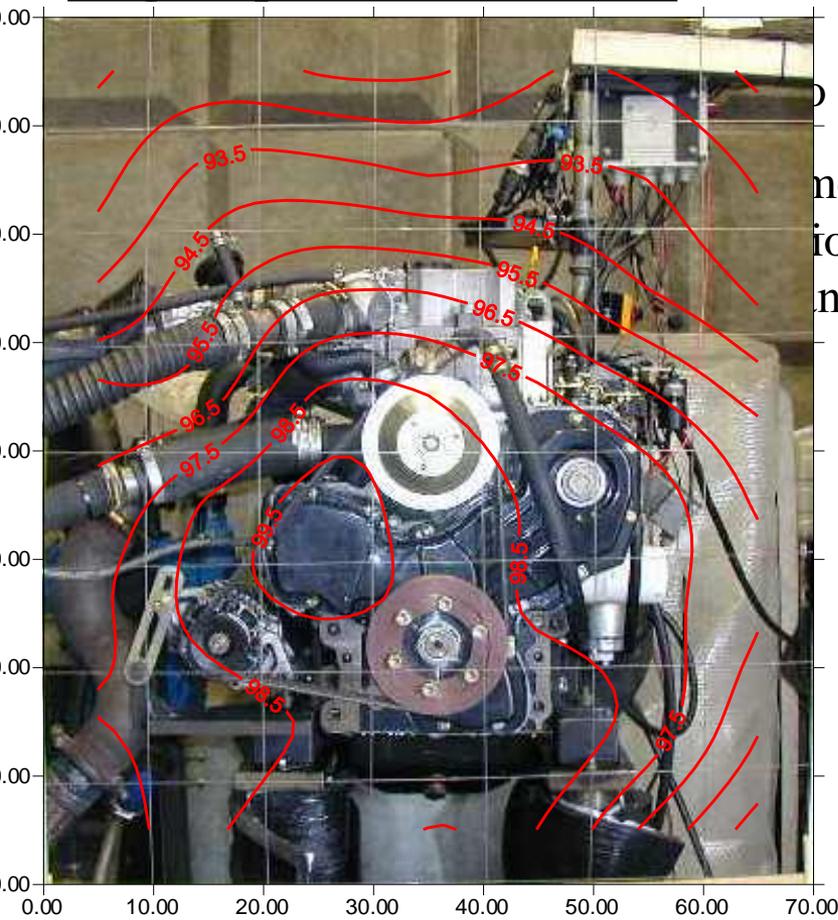
# GENERAZIONE DEL RUMORE NELLE SORGENTI SONORE



CRITERI DI PRIORITA'



**Sorgenti primarie del rumore:** elementi meccanici o fluidi che, in relazione a specifici



(o liquidi aventi un flusso irregolare)

Elementi meccanici che in sé non costituiscono sorgenti di generazione di onde sonore o vibratorie provenienti attraverso la meccanica, possono irradiare energia acustica

## **MOTORE ENDOTERMICO**

**Sorgenti primarie del rumore:** combustione, manovellismi, ingranaggi, pompe

**Sorgenti secondarie del rumore:** carter ingranaggi, coppa olio, basamento

**Trasmissione:** via strutturale, tramite vibrazioni

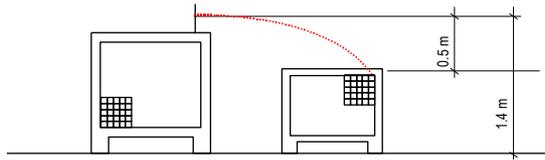
# **TIPOLOGIE DI GENERAZIONE DEL RUMORE**

- meccaniche (impatti, ingranamento, rotolamento, inerzia, attrito, campi magnetici, vibrazioni)
- aerodinamiche
- fluidodinamiche

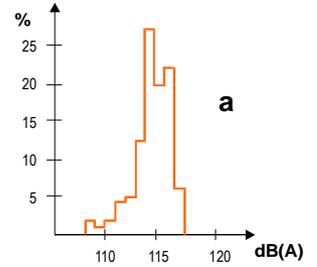
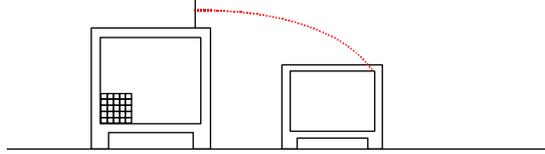
# GENERAZIONE DI RUMORE MECCANICO-1

## Impatto

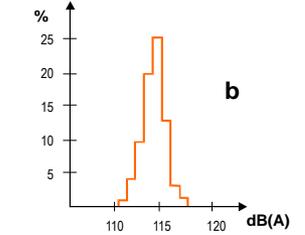
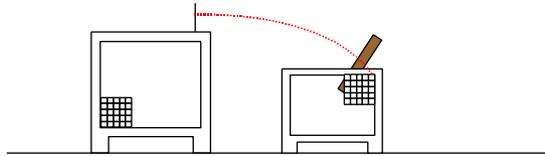
- Caratteristiche:
  - rumore a banda larga con dominanza di alte frequenze;
  - il rumore è spesso di tipo periodico.
  
- Parametri importanti:
  - massa dei corpi che impattano;
  - velocità dei corpi che impattano;
  - periodo di impatto.
  
- Regole progettuali:
  - incrementare il periodo dell'impatto;
  - diminuire la velocità dell'impatto;
  - diminuire la massa del corpo che colpisce;
  - aumentare la massa del corpo che riceve i colpi;
  - evitare i componenti con carichi alternativi.

**a**

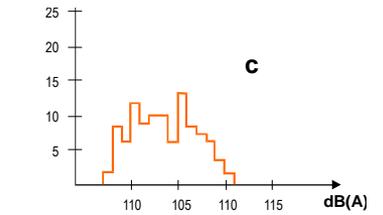
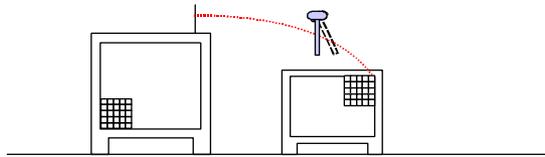
Caduta nel cestello di rete metallica  
con fondo in legno

**b**

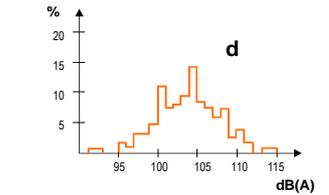
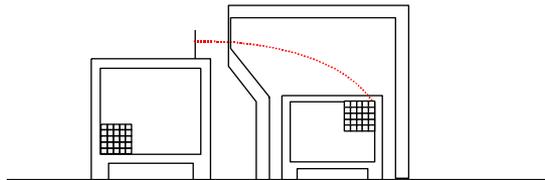
Caduta nel cestello di lamiera sp. 2 mm  
con fondo in legno

**c**

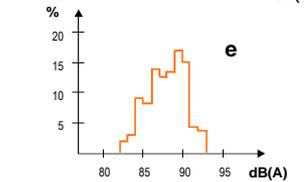
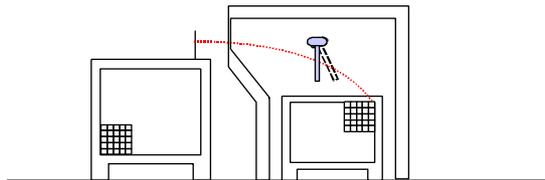
Caduta nel cestello di rete dopo intercettazione  
mediante lastra di legno rivestita di PVC sp. 10  
mm

**d**

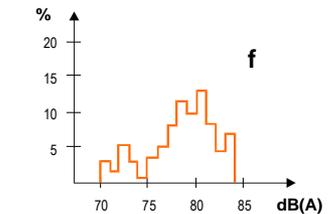
Caduta nel cestello di rete dopo aver usato un  
grembiule oscillante di PVC sp. 5 mm

**e**

Caduta nel cestello di rete con rivestimento  
fonoassorbente

**f**

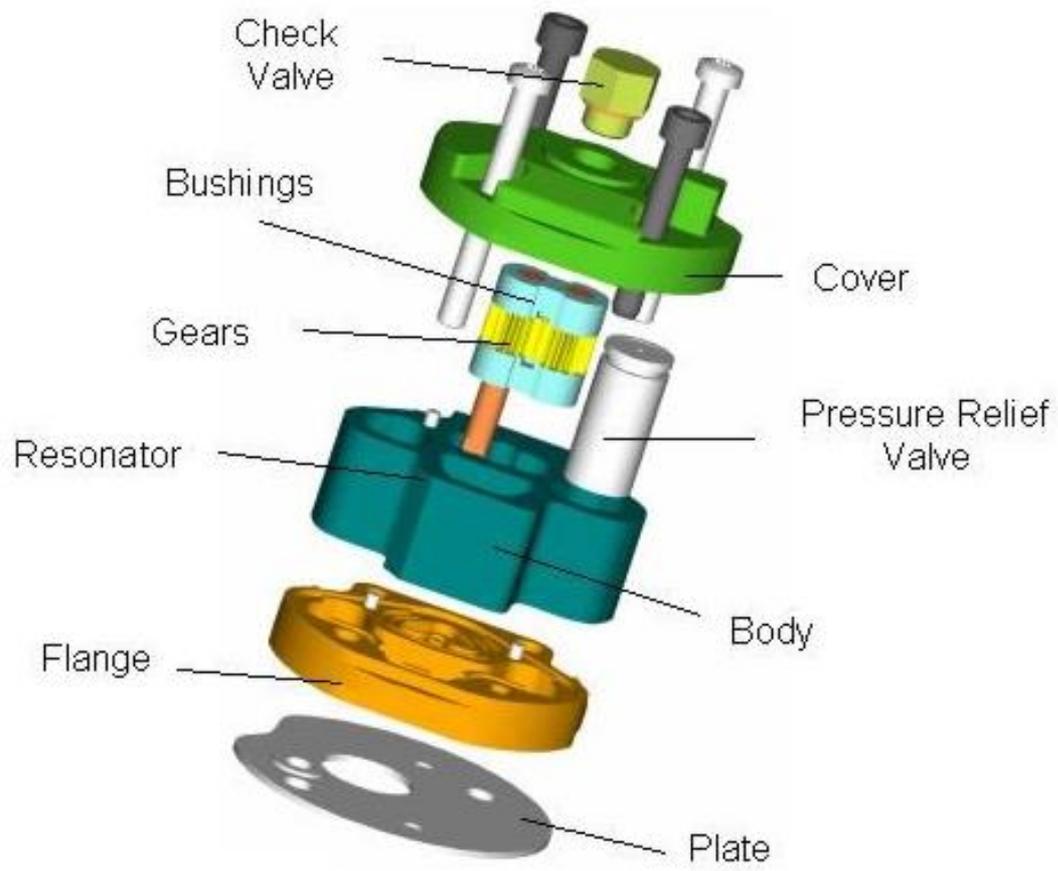
Caduta nel cestello di rete con rivestimento  
fonoassorbente, dopo aver urtato  
nel grembiule di PVC



# GENERAZIONE DI RUMORE MECCANICO-2

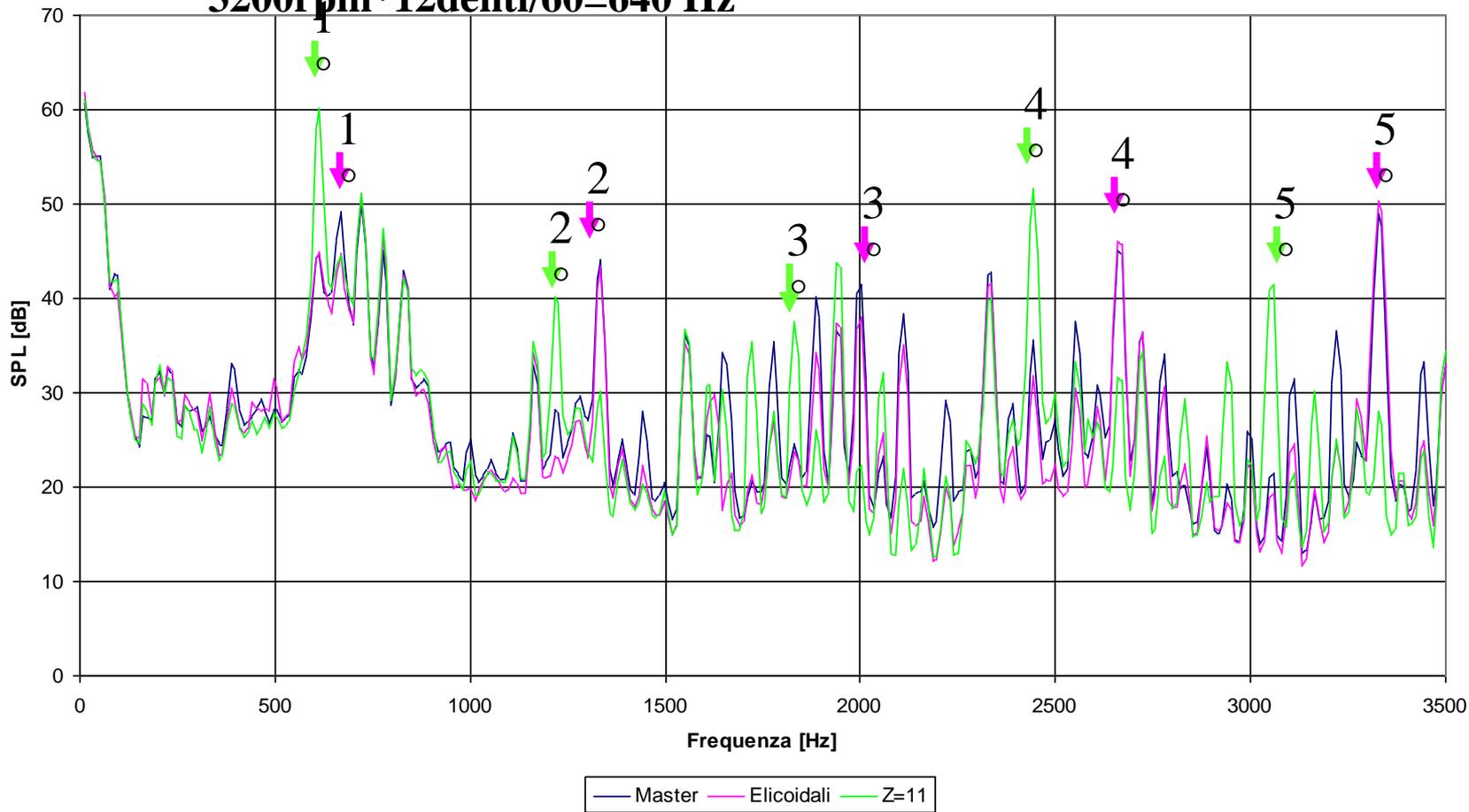
## Ingranamento

- Origine e caratteristiche:
  - contatto dei denti durante il movimento degli ingranaggi;
  - particolare rumore di impatto;
  - presenza dei toni puri (frequenza di ingranamento  $Z*N/60$  e armoniche superiori)
- Parametri importanti:
  - periodo di contatto tra i corpi in movimento;
  - variazione del rapporto forza-tempo durante il contatto;
  - rigidità degli elementi in contatto (denti);
- Regole progettuali:
  - ottimizzare il numero di denti (usare dei numeri primi);
  - aumentare il periodo di contatto;
  - utilizzare degli ingranaggi elicoidali;
  - aumentare il numero di denti;
  - migliorare la qualità degli ingranaggi (allineamento, precisione dei denti);
  - utilizzare materiali in plastica per piccoli carichi;
  - ottimizzare i profili della dentatura delle ruote.



Confronto Master-Elicoidali-Z=11 20 bar giunto in acciaio

**3200rpm\*12denti/60=640 Hz**



## CAUSE DI RUMORE:

L'ingranamento imperfetto delle ruote dentate provoca delle azioni dinamiche sui denti, che si traducono in una eccitazione dei corpi ruota e degli alberi con conseguente generazione di rumore aereo.

L'errore di trasmissione è il fattore singolo più importante di generazione di rumore degli ingranaggi; è definito come la “differenza tra la posizione effettiva della ruota condotta e la posizione che essa occuperebbe nel caso le ruote dentate fossero perfettamente coniugate”; può essere espresso in radianti:

$$TE = \vartheta_2 - \frac{Z_1}{Z_2} \vartheta_1 \quad [\text{rad}]$$

Esistono due tipi di errore di trasmissione:

1. MTE (Manufactured Transmission Error) errore di trasmissione di costruzione.
2. LTE (Loaded Transmission Error) errore di trasmissione sotto carico.

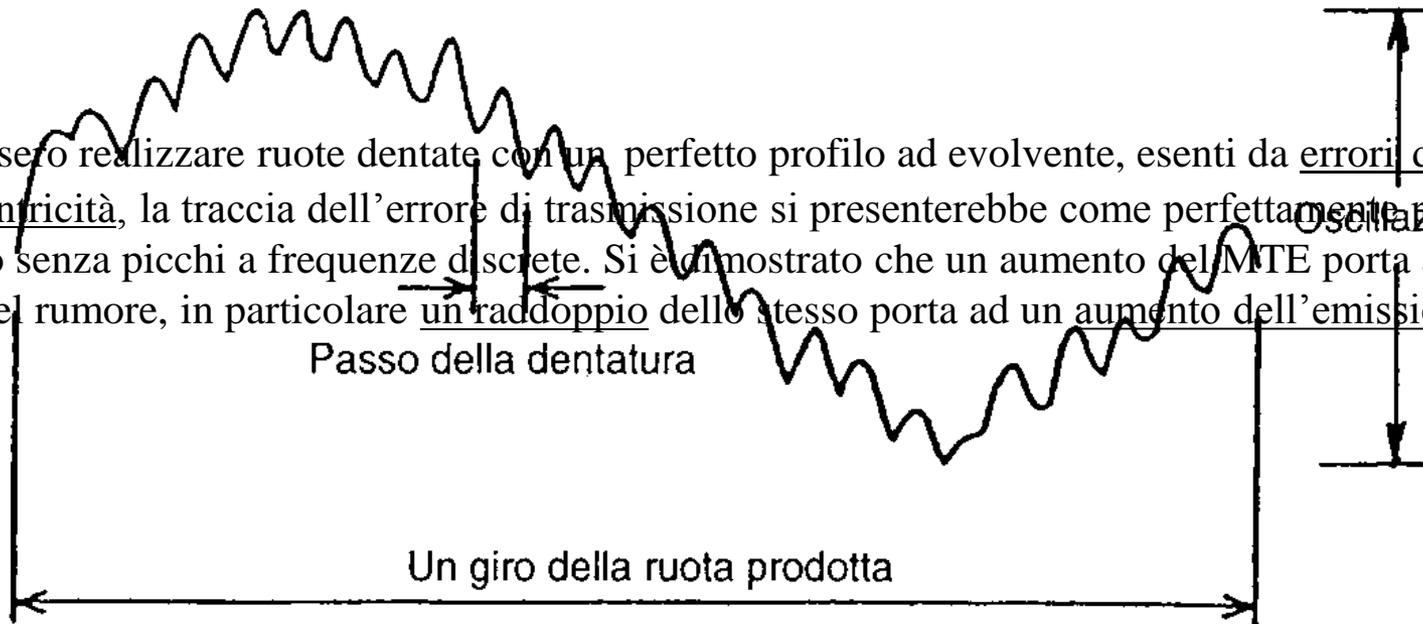
## MTE (Manufactured Transmission Error)

Questo tipo di errore si verifica quando la velocità di rotazione è elevata ed il carico è basso; è influenzato principalmente da:

- imprecisioni del profilo
- errori di passo
- eccentricità dei denti.

Lo spettro in frequenza di una tipica misura di errore di trasmissione mostra la frequenza di ingranamento, le sue armoniche ed una componente alla frequenza dell'albero dovuta alla eccentricità della ruota. In figura è riportato un andamento tipico del MTE.

Se si potessero realizzare ruote dentate con un perfetto profilo ad evolvente, esenti da errori di passo e senza eccentricità, la traccia dell'errore di trasmissione si presenterebbe come perfettamente piatta, con uno spettro senza picchi a frequenze discrete. Si è dimostrato che un aumento del MTE porta ad un aumento del rumore, in particolare un raddoppio dello stesso porta ad un aumento dell'emissione sonora di 6-8 dB.



## LTE (Loaded Transmission Error)

Ingranaggi a bassa velocità e sotto carico:

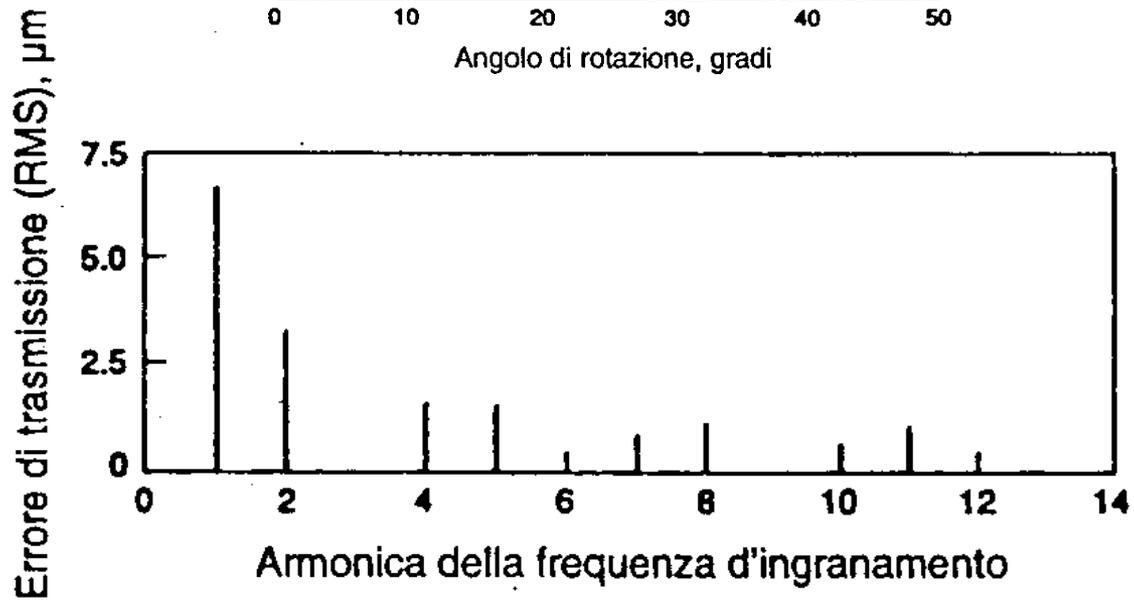
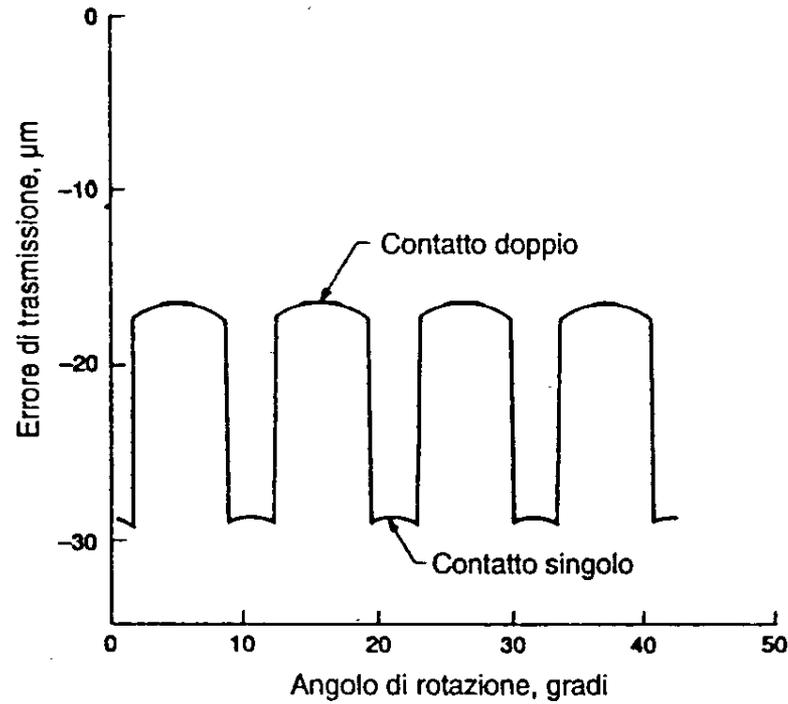
la geometria del dente e la variazione della rigidità di ingranamento influenzano fortemente il rumore emesso alla frequenza di ingranamento.

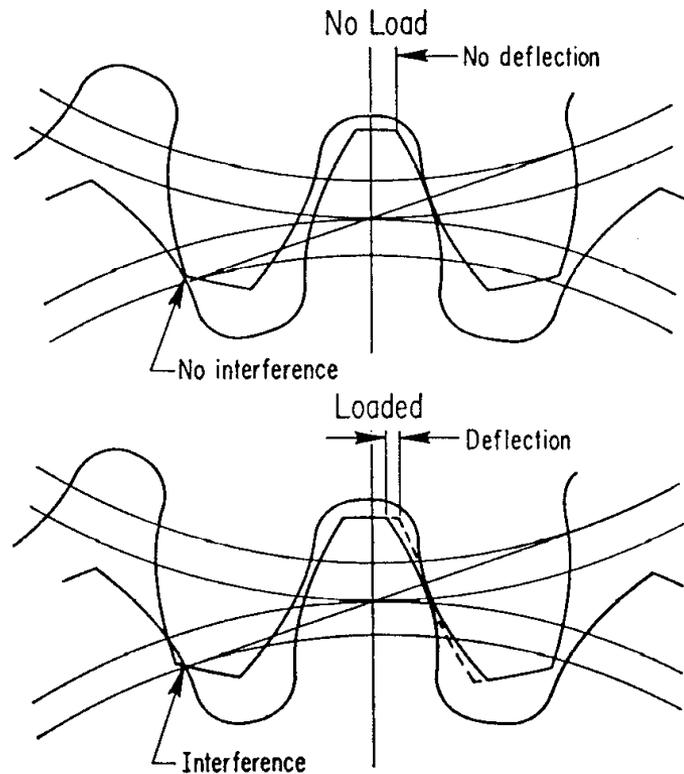
La ***rigidità di ingranamento*** è il rapporto tra la forza tangenziale lungo la retta di azione e la deflessione del dente lungo la stessa retta, quindi varia con il variare della posizione angolare dei denti nel ciclo di ingranamento. Negli ingranaggi cilindrici a denti dritti con rapporto di condotta compreso tra 1 e 2 il contatto si alterna tra una e due coppie di denti, ciascun dente può essere pensato come una molla. La rigidità di ingranamento in virtù di questa schematizzazione si alterna tra quella di una coppia di molle e quella di due coppie di molle in parallelo. La rigidità di ingranamento è quindi proporzionale al numero di coppie di denti in contatto che cambia con la posizione angolare facendo cambiare anche il valore del LTE.

Esempio:

se la coppia di ingranaggi a denti dritti ha rapporto di condotta pari a 1,60, due coppie di denti saranno in contatto per il 60% del ciclo di ingranamento, ed una coppia lo sarà per il restante 40%. La freccia dell'ingranamento, calcolata come il rapporto tra il carico applicato e la rigidità d'ingranamento, è uguale all'errore di trasmissione nelle condizioni in cui sia in contatto una sola coppia di denti, mentre varrà circa il doppio rispetto alla condizione in cui si registri il contatto di due coppie di denti. Questo alternarsi genera un andamento temporale dell'errore di trasmissione ed uno spettro dello stesso come quello delle figure successive.

# LTE





### **Ingranaggi elicoidali :**

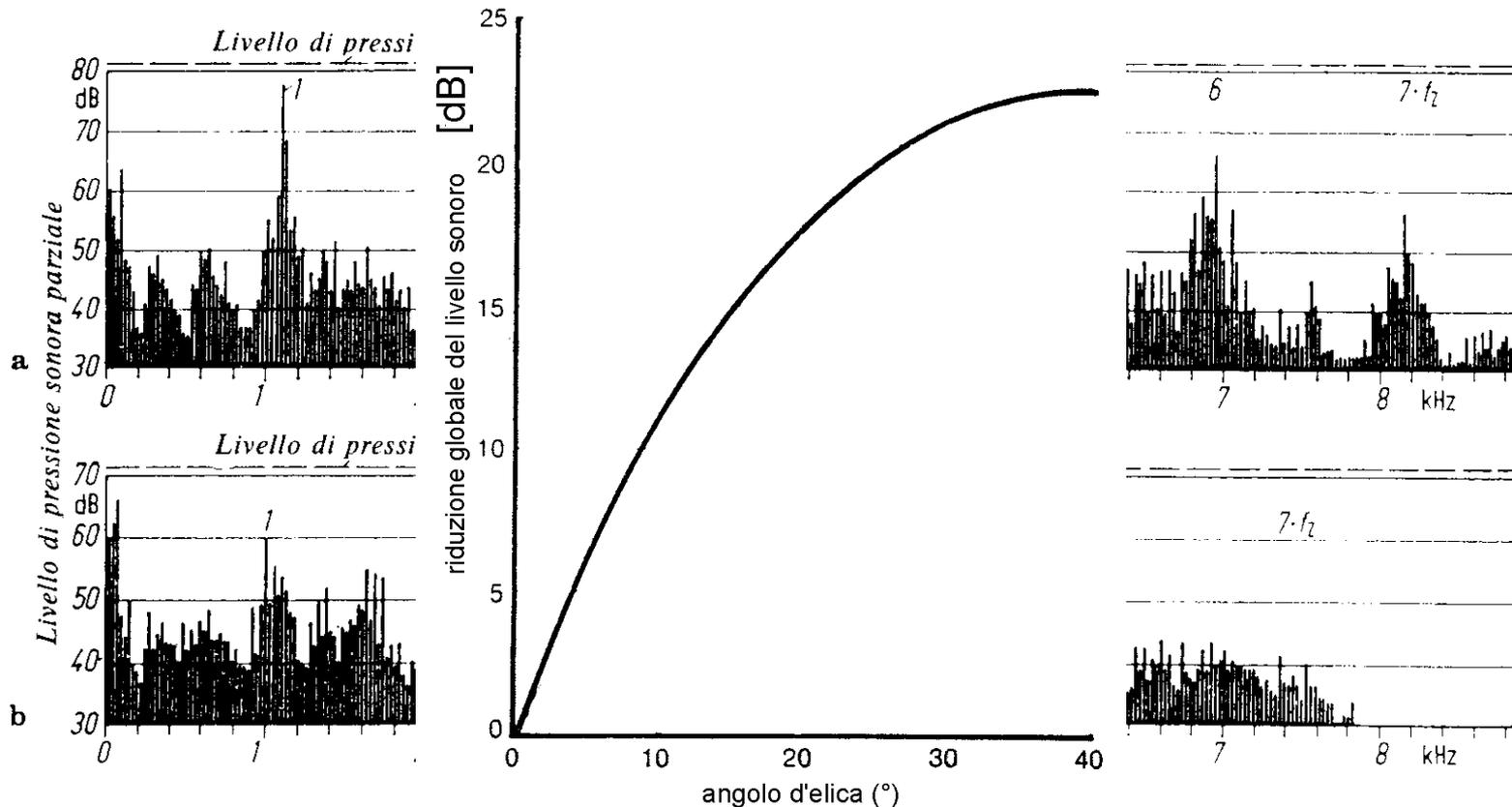
la rigidezza di ingranamento è circa proporzionale alla somma delle lunghezze delle linee diagonali di contatto di tutte le coppie di denti in presa, questo è stato evidenziato con misure dinamiche. Se la somma delle lunghezze delle linee di contatto è mantenuta costante, l'errore di trasmissione sarà quasi costante per tutti i valori di carico. Questo è in diretta contrapposizione con gli ingranaggi a denti dritti per i quali l'errore può essere minimizzato solo per un valore di carico;

per tale motivo gli ingranaggi a denti elicoidali sono usualmente più silenziosi di quelli a denti dritti di pari precisione.

# Riduzione della rumorosità degli ingranaggi

## INGRANAGGI ELICOIDALI

Il primo passo effettuato per cercare di ridurre la rumorosità degli ingranaggi è di passare agli ingranaggi elicoidali. Tali ingranaggi possono portare a **riduzioni fino a 12 dB** del livello sonoro se usati al posto di quelli a denti dritti

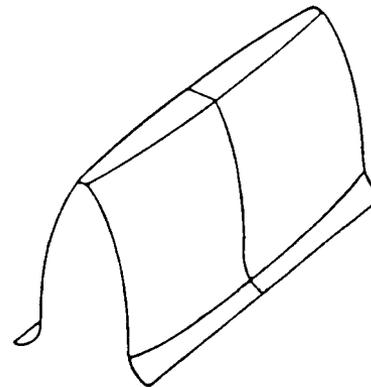
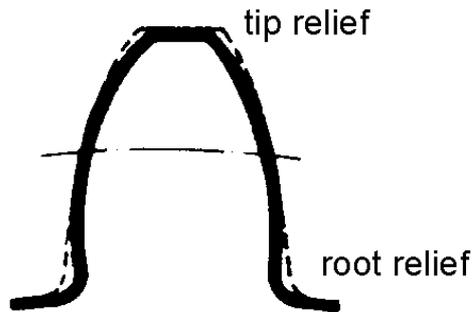


# Riduzione della rumorosità degli ingranaggi

## MODIFICHE ALLA GEOMETRIA DEL DENTE

Le modifiche alla geometria del dente prevedono varie metodologie, le più comuni sono:

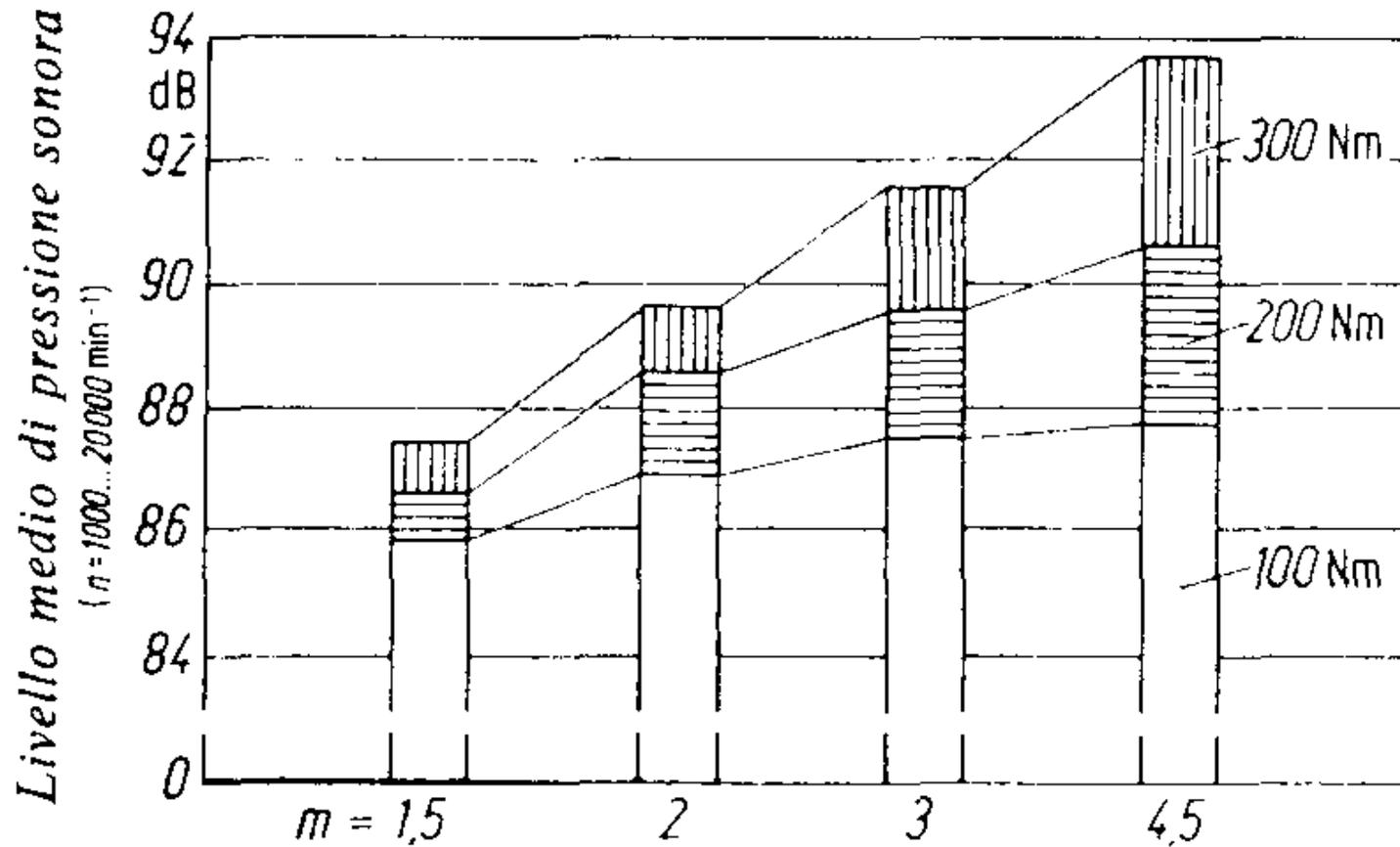
1. Smusso di testa.
2. Bombatura trasversale.
3. Bombatura longitudinale.
4. Aumento della Wildhaber (riduzione dei giochi).
5. Variazione dell'angolo di spinta.
6. Profili particolari.



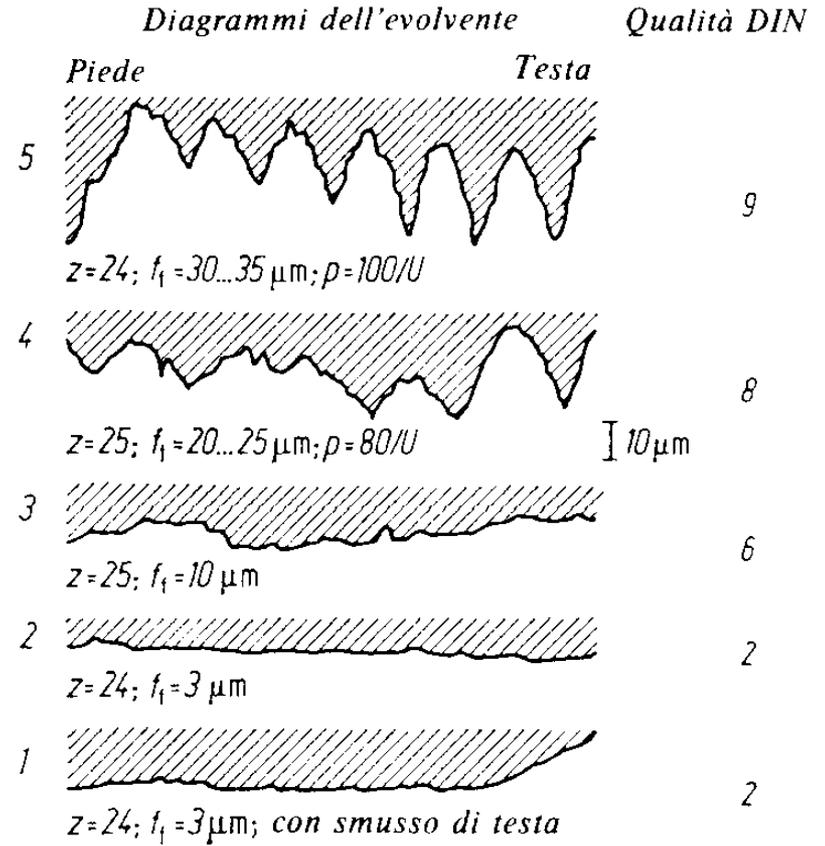
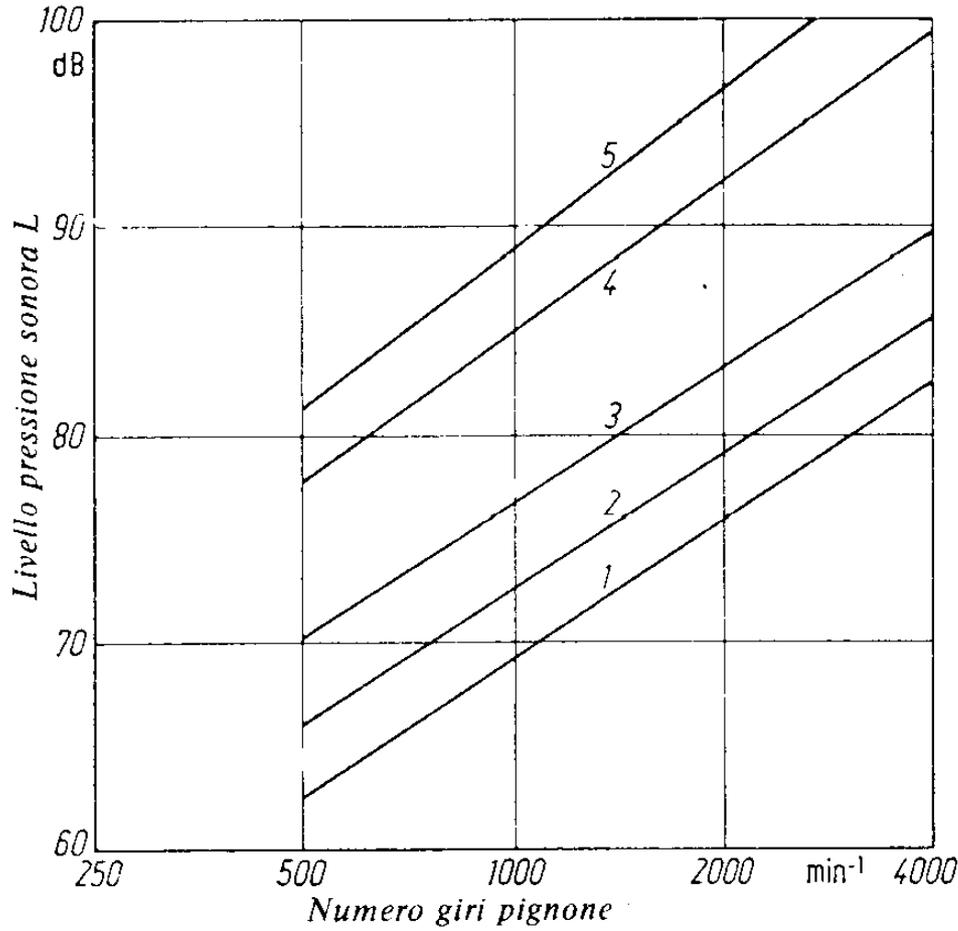
Il **modulo**  $m$  viene definito come il rapporto tra il diametro primitivo  $2R$ , e il numero di denti  $z$ :

$$m = \frac{2R}{z}$$

**MODULO E NUMERO DI DENTI**



# QUALITA' E FINITURA SUPERFICIALE



## **UTILIZZO DI MATERIALI POLIMERICI**

Può condurre a riduzioni del livello sonoro emesso di circa 10 dB, si sfruttano a tal scopo le grandi capacità di smorzamento possedute da questi materiali. Fra i materiali più usati abbiamo il nylon. I problemi relativi a questa scelta sono però tali da relegare questa metodologia a poche applicazioni, tali problemi sono:

- ⑩ Riduzione considerevole della capacità di carico.
- ⑩ Condizioni di lavoro non compatibili con il materiale per alte temperature, alte velocità, incompatibilità con il lubrificante.
- ⑩ Difficoltà nella produzione d'ingranaggi con elevate tolleranze dimensionali.

# GENERAZIONE DI RUMORE MECCANICO-3

## Rotolamento

- Origine e caratteristiche:
  - asprezza e irregolarità delle superfici degli elementi rotanti (camme, cuscinetti a sfera);
  - rumore a banda larga;
  - presenza di componenti tonali quando le eccitazioni sono periodiche (cuscinetti a sfera).
- Regole progettuali:
  - mantenere le superfici lisce e usare adeguate lubrificazioni;
  - utilizzare dei cuscinetti di precisione;
  - minimizzare le tolleranze;
  - utilizzare dei cuscinetti ad attrito;
  - aumentare la flessibilità delle aeree di contatto.

# GENERAZIONE DI RUMORE MECCANICO-4

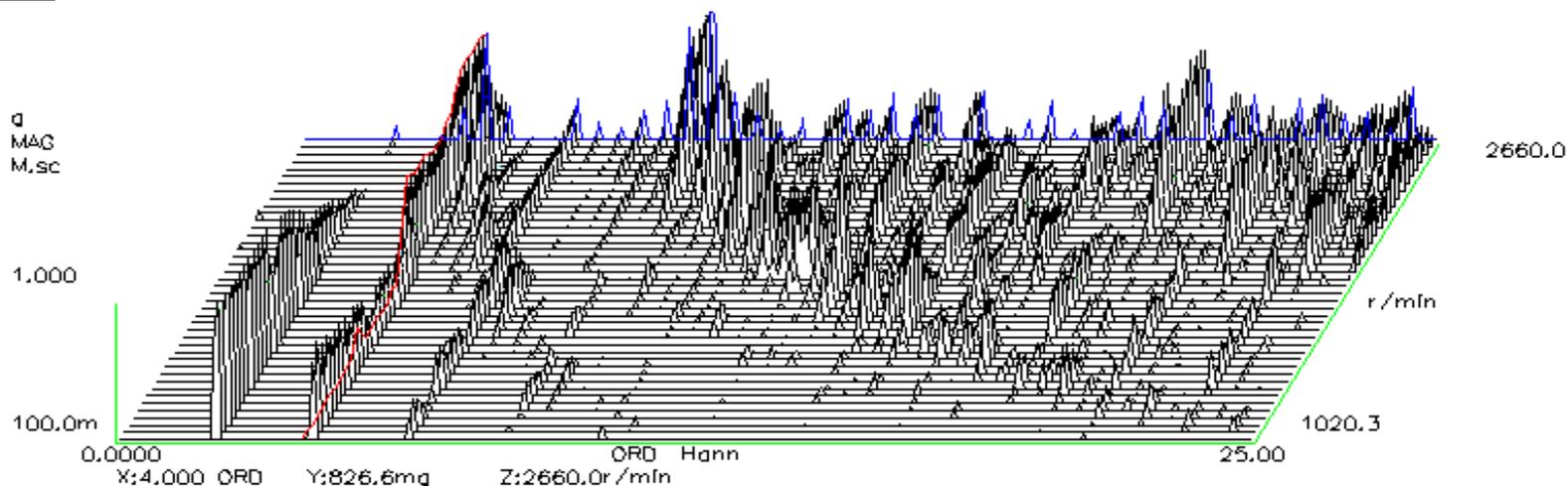
## Attrito

- Origine e caratteristiche:
  - fenomeni di avanzamento a scatti (es. cerniere, ...);
  - rumore a banda larga (scorrimento) con la presenza di componenti tonali (risonanza).
- Regole progettuali:
  - controllare l'attrito scegliendo i materiali adeguati
  - controllare l'attrito usando i lubrificanti

# GENERAZIONE DI RUMORE MECCANICO-5

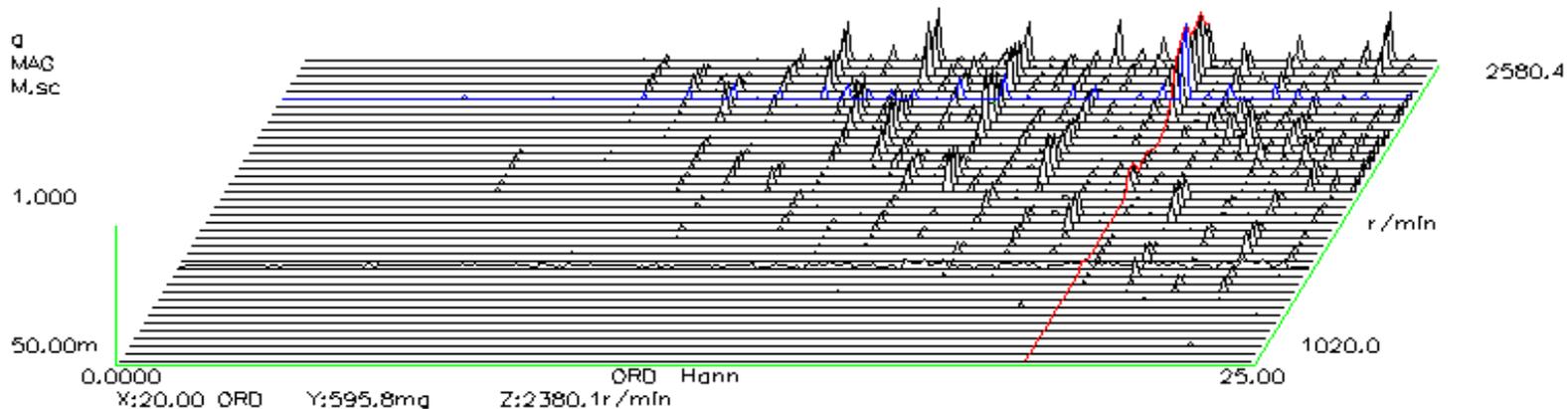
## Motore diesel senza masse controrotanti

Inerzia



enza

- Regole progettuali: **Motore diesel con masse controrotanti**



# GENERAZIONE DI RUMORE MECCANICO-6

## Campi magnetici

### ●Origine e caratteristiche:

- variazione non uniforme delle forze motrici applicate sugli elementi statici e di trasmissione dei motori elettrici;
- rumore per via solida generata dal nucleo dei trasformatori (trasmesso tramite l'olio refrigerante e gli appoggi, emesso dalle superfici della carcassa);
- rumore dipendente dal carico;
- per motori AC, componente tonale a 50 Hz.
- per trasformatori, presenza delle frequenze multiple di 50 Hz.

### ●Regole progettuali:

- fissare con cura gli avvolgimenti dei trasformatori;
- scegliere un numero di cave in modo da evitare l'eccitazione di risonanza del rotore e dello statore;
- evitare le cave parallele ai poli;
- minimizzare le tolleranze nella forma e nella posizione del nucleo magnetico in modo da ottenere una buona simmetria del campo magnetico;
- ottimizzare la forma dei poli;
- scegliere un adeguato materiale per il nucleo del trasformatore.

# GENERAZIONE DI RUMORE MECCANICO-7

## Rumore da vibrazioni

In molte macchine moderne le strutture sono sottoposte a sollecitazioni elevate, che variano rapidamente nel tempo e possono mettere in vibrazione parti della macchina che si comportano allora come generatori di rumore. Lo spettro del rumore può presentare dei toni quasi puri, la frequenza dei quali è legata alla velocità di rotazione degli organi della macchina.

I possibili rimedi a questa situazione sono, in generale, molto specifici e necessitano quindi di un'analisi dettagliata di ciascuna macchina.

### METODI FONDAMENTALI:

- ***Riduzione dell'eccitazione***: cambiamenti dell'ampiezza e della frequenza delle forze agenti e degli spostamenti in gioco o con varianti dei movimenti in gioco o con interventi sulla trasmissione dei medesimi;
- ***Modificazioni delle risonanze***: cambiamenti della massa e della rigidità al fine di alterare la frequenza propria, le frequenze modali e la risposta di vibrazione;
- ***Smorzamento***: applicazione di supporti, strati sottili, rivestimenti e strutture per dissipare l'energia vibrazionale sotto forma di calore.

# GENERAZIONE DI RUMORE AERODINAMICO-1

## Turbolenza

### •Origine e caratteristiche :

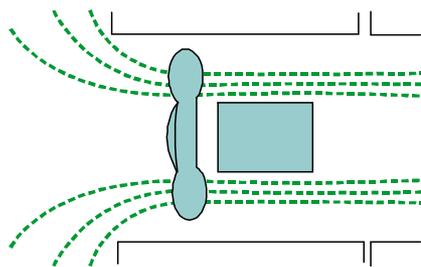
- formazione di vortici per moto turbolento dovuto a elevata velocità o ostacoli al flusso
- lungo un condotto per discontinuità di superfici, singolarità (angoli bruschi, cambiamento di sezione, valvole...);
- interazione di aria in movimento con aria ferma (es. sbocco di un condotto).
- a volte presenza toni puri, spettro a banda larga con basse frequenze

### •*Regole progettuali:*

- diminuire la velocità del flusso;
- diminuire le cadute di pressione;
- ridurre, per quanto possibile, la velocità di rotazione delle ventole;
- eliminare, per quanto possibile, gli ostacoli;
- evitare i cambiamenti bruschi (angoli, riduzione di sezione, ...).

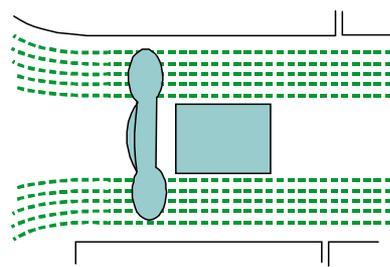
# GENERAZIONE DI RUMORE AERODINAMICO

**SBAGLIATO**

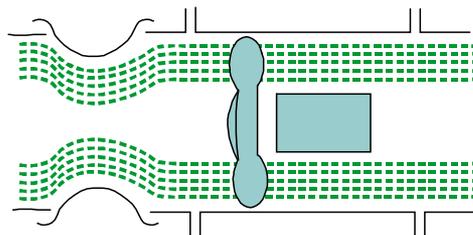


Ingresso non raccordato

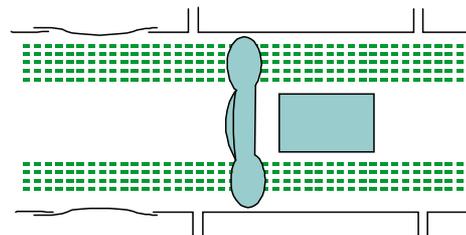
**CORRETTO**



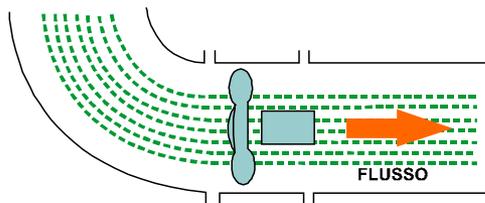
Ingresso conico o smussato



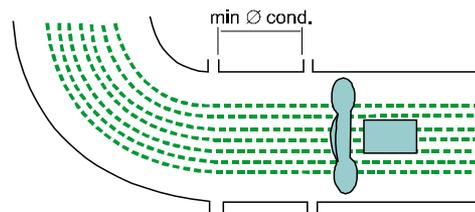
Raccordo flessibile allentato



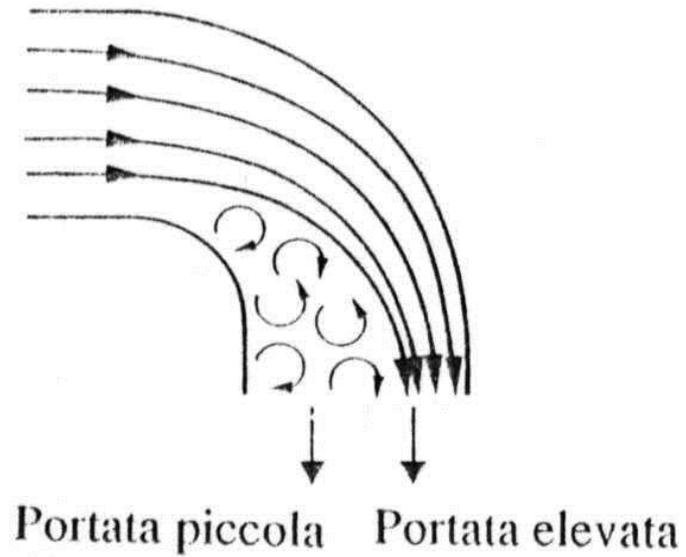
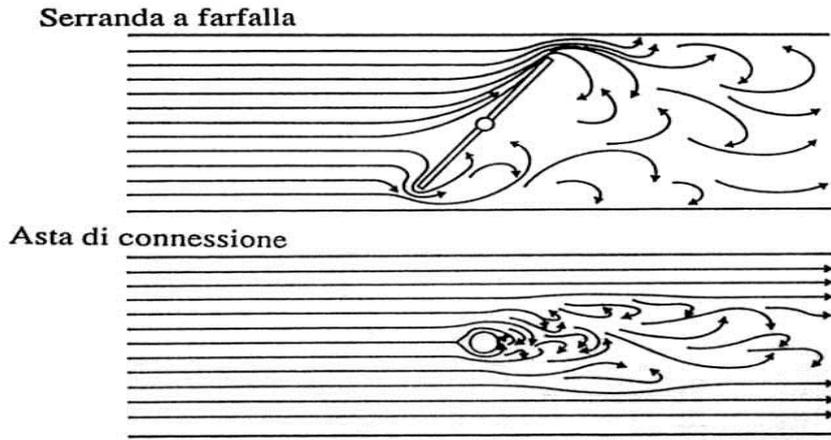
Raccordo flessibile teso



Ventola immediatamente dopo la curva



Ventola disposta ad una distanza minima dalla curva pari al diametro del condotto



## ***RUMORE AUTOGENERATO DAL FLUSSO D'ARIA***

Esistono alcune metodiche di calcolo per valutare l'entità del rumore autogenerato in qualche configurazione. Più semplicemente si riporta la seguente formula utile a valutare il livello di potenza sonora emesso dovuto al fruscio dell'aria:

$$L_w = 10 \log S + 55 \log V - 45 + K \quad [\text{dB}]$$

dove:

$L_w$  è il livello di potenza sonora non ponderato fra 250 Hz e 8 kHz [dB];

$V$  è la velocità di efflusso dell'aria [m/s];

$S$  è la sezione di passaggio dell'aria [m<sup>2</sup>];

$K$  è un valore ricavabile dalla tabella seguente.

<b>Tipologia</b>	<b>K</b>
Condotto rettilineo	38
Restringimento 3 : 1 (fino a 0.3 m x 0.3 m)	47
Curva a 90° raccordata	48
Curva a 90° squadrata con deflettori	56
Curva a 90° squadrata senza deflettori	57
Smorzatore aperto	44
Smorzatore chiuso a 15°	53
Smorzatore chiuso a 45°	65

## ***RUMORE AUTOGENERATO DAL FLUSSO D'ARIA***

Per ottenere lo spettro in banda d'ottava il valore  $L_w$  ottenuto con la formula precedente deve essere corretto mediante i seguenti fattori:

	<b>Frequenza centrale della banda d'ottava (Hz)</b>					
	<b>250.00</b>	<b>500.00</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000.00</b>
<b>Correzione</b>	-7.00	-7.00	-8.00	-10.00	-17.00	-29.00

**Elementi terminali** di un condotto (griglie e diffusori):

$$L_w = 10 + 10 \log S + 30 \log \zeta + 60 \log V$$

dipendente da un coefficiente di perdita di carico normalizzata dall'elemento

$$\zeta = \frac{\Delta p}{2\rho v^2}$$

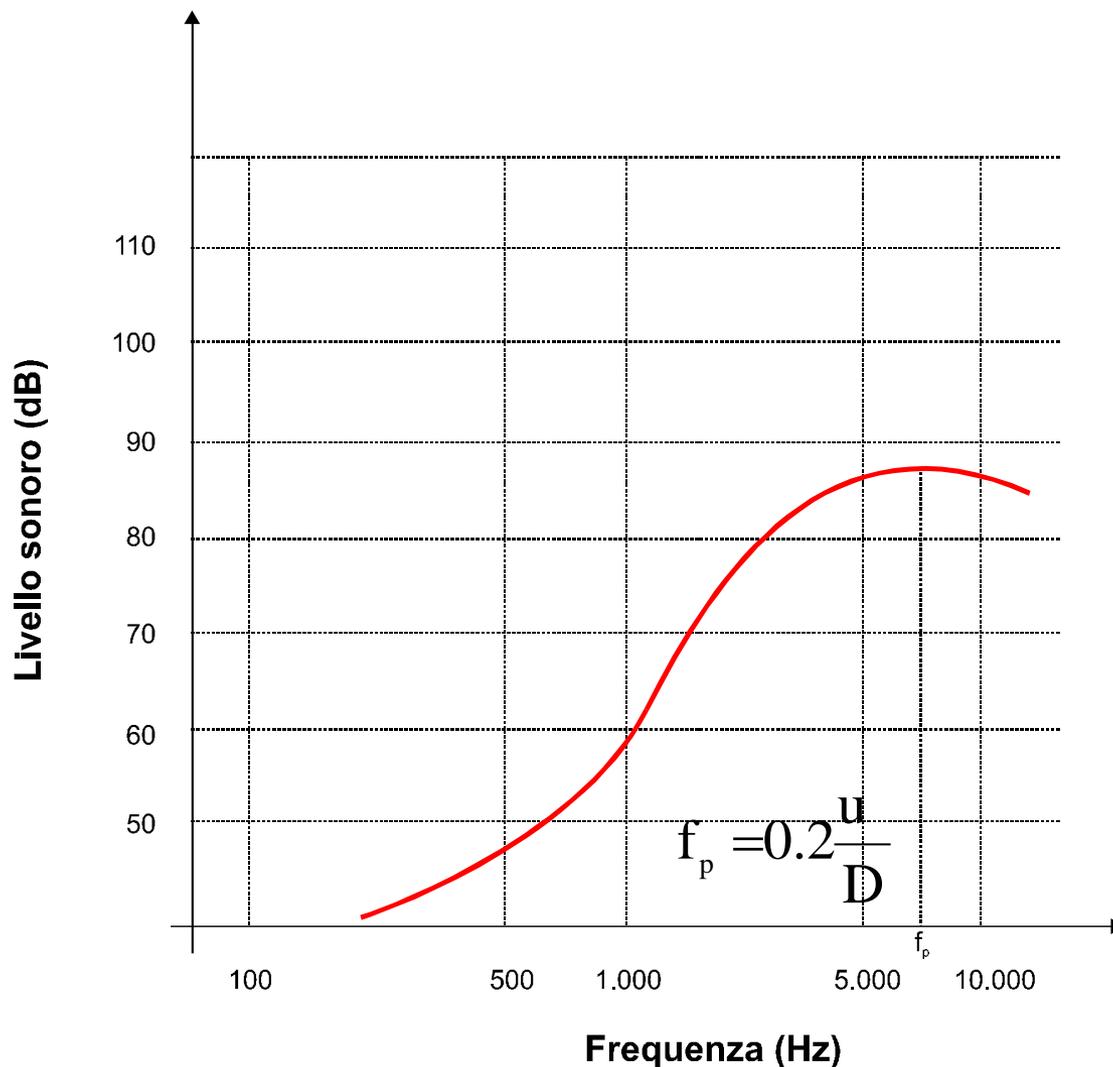
# GENERAZIONE DI RUMORE AERODINAMICO-2

Getti aria, sfiati

CAUSE:

alte frequenze: vortici di piccole dimensioni prodotti dal getto in prossimità della sezione di uscita,

frequenze medio-basse: generate più avanti rispetto al corso del flusso, dove la turbolenza è inferiore e caratterizzata da vortici più larghi.

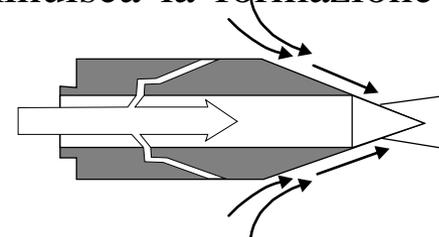
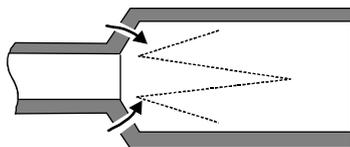


# GENERAZIONE DI RUMORE AERODINAMICO

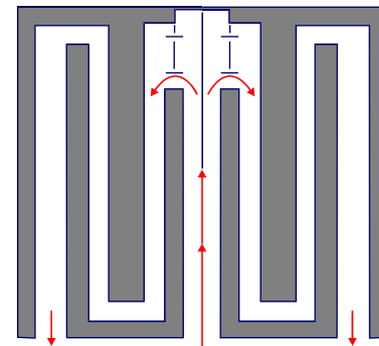
## Getti aria

### Interventi:

- suddividere la portata d'aria in più ugelli di piccolo diametro, costituiti ad esempio da una piastra forata, o da un collare a più fori;
- inserire nella parte terminale dell'ugello una rete o una maglia che riduca la velocità del getto (il che comporta però una riduzione della spinta) e diminuisca la formazione di turbolenza;
- utilizzare particolari tipi di ugello.



- espansione graduale dell'area di scarico (attraverso l'aumento della sezione di passaggio) al fine di limitarne la velocità d'uscita;
- progressiva attenuazione dell'emissione acustica, ottenuta con il passaggio dell'aria in canali rivestiti con materiale fonoassorbente.



# GENERAZIONE DI RUMORE AERODINAMICO-3

## Urti e pulsazioni

- Origine e caratteristiche:
  - rilascio brusco di un fluido compresso in una zona a bassa pressione (apertura delle valvole di motori e pompe pneumatiche ad alta pressione);
  - il rumore dovuto a valvole è a banda larga;
  - il rumore dovuto a motori e pompe ad alta pressione è periodico (frequenza di rotazione e le sue armoniche).
- Regole progettuali:
  - ridurre la velocità di variazione della pressione;
  - evitare gli ostacoli vicini al rotore;
  - ridurre la velocità del flusso.

# GENERAZIONE DI RUMORE FLUIDODINAMICO

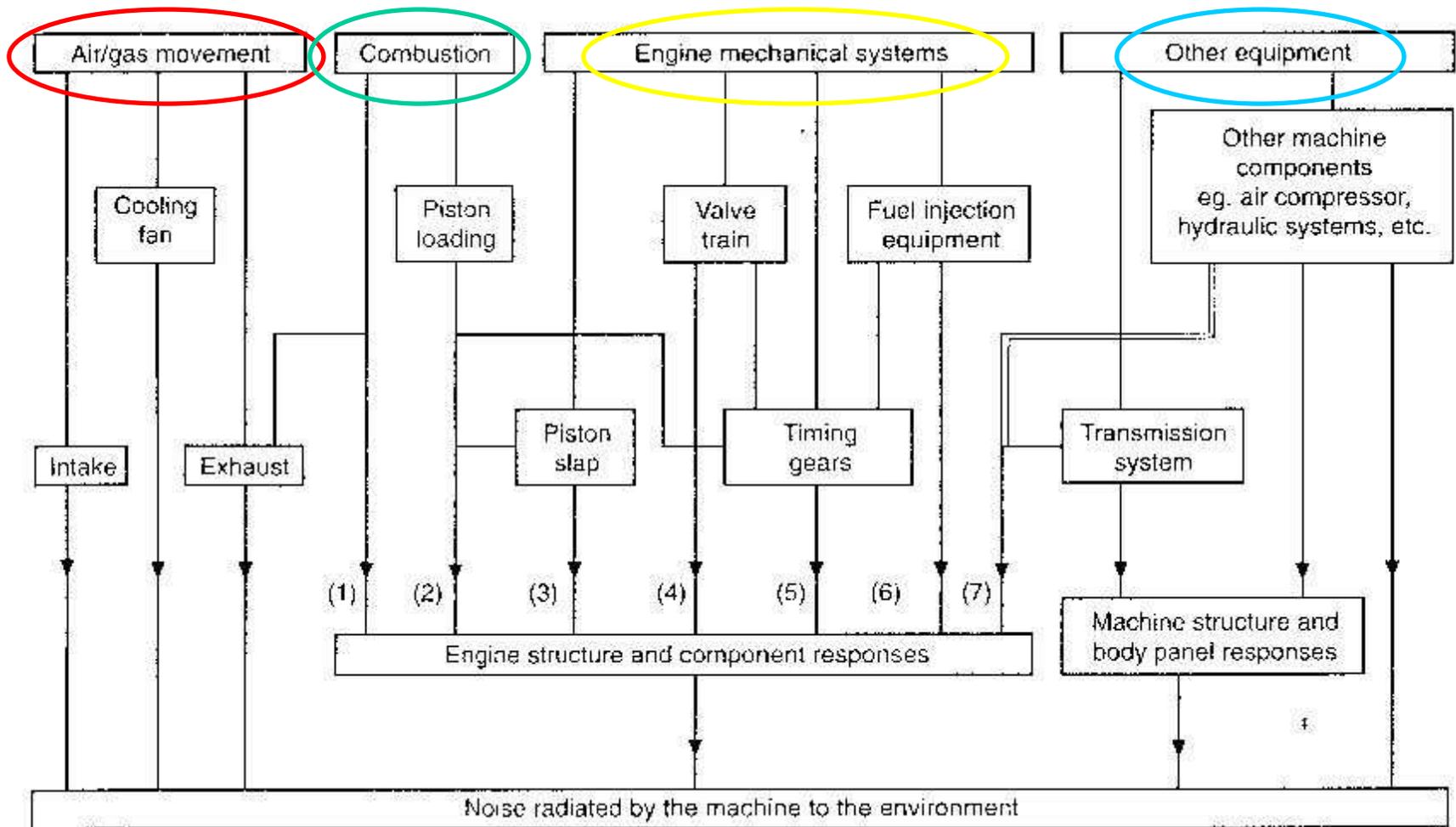
## Turbolenza, urti e pulsazioni

(vedi rumore aerodinamico)

## Cavitazione

- Origine e caratteristiche:
  - caduta della pressione statica al di sotto della tensione di vapore (valvole e pompe);
  - rumore a banda larga (estesa).
- Regole progettuali:
  - diminuire la caduta della pressione;
  - diminuire la velocità del flusso;
  - incrementare la pressione statica;
  - prevedere un circuito di forma adeguata;
  - disporre il serbatoio ad una quota più alta della bocca di aspirazione pompa;
  - utilizzare componenti di piccola resistenza.

# ESEMPIO DI SORGENTE DI RUMORE COMPLESSA: MOTORE ENDOTERMICO



# **TIPOLOGIE DI RUMORE DI UN MOTORE ENDOTERMICO:**

1. **Rumore di aspirazione e scarico** (il rumore di tipo aerodinamico prodotto dall'apertura e dalla chiusura della valvola di aspirazione dall'improvviso rilascio di gas dovuto all'apertura della valvola di scarico)

2. **Rumore indotto dalla combustione** (è causato da forze unidirezionali, generate dalla combustione e dirette ortogonalmente alla superficie superiore del pistone, che inducono rumore quando il pistone è in prossimità del PMS. Queste forze sono dovute al rapido incremento di pressione risultante dall'aumento di temperatura che si manifesta all'inizio del processo di combustione. Tale impulso di pressione provoca anche delle oscillazioni di pressione nel gas contenuto nella camera di combustione che vanno a sollecitare le strutture del motore)

3. **Rumore dovuto ad impatti meccanici** (il rumore prodotto da una serie discreta di sorgenti con caratteristiche proprie (impatti tra pistoni e incamiciatura, impatti tra gli ingranaggi del treno di distribuzione, impatti tra i perni di banco ed i supporti,...)).

## **Principali sorgenti di rumore meccanico**

PISTON SLAP: la forza reversibile per effetto del movimento del meccanismo biella-manovella e dell'inerzia delle masse che costituiscono il meccanismo stesso cambia direzione durante il moto del pistone. Tali forze spingono il pistone ad attraversare il gioco sino all'impatto con l'incamiciatura che genera vibrazioni nella struttura del motore.

RUMORE DELLA DISTRIBUZIONE: effetto degli impatti che avvengono tra i denti degli ingranaggi del treno di distribuzione quando il gioco viene ripreso in una o nell'altra direzione. L'inversione di direzione è causata dalle vibrazioni torsionali dell'albero motore e dalle fluttuazioni della coppia richiesta dall'albero a camme e dalla pompa di iniezione. Si manifestano principalmente nei grossi motori diesel da autotrazione che debbono necessariamente utilizzare degli ingranaggi per trasmettere la potenza. I motori più piccoli utilizzano invece catene o cinghie che risultano più silenziose.

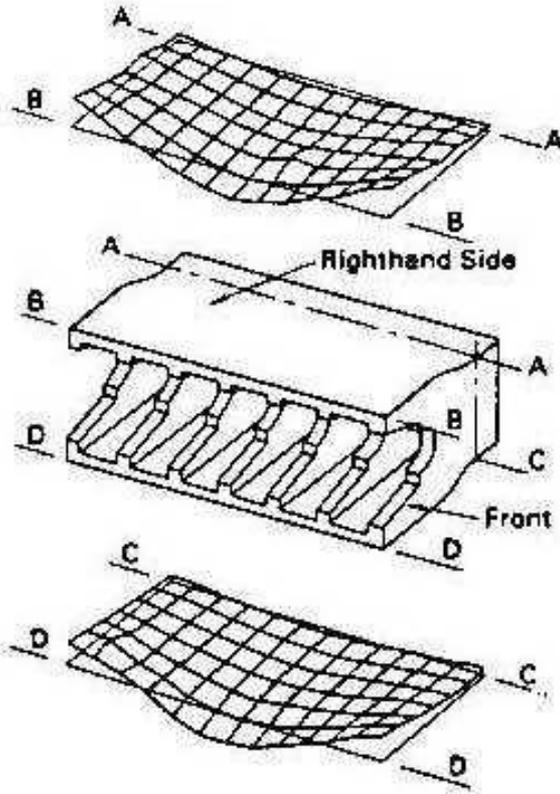
RUMORE DEI SUPPORTI: i giochi tra i perni di banco ed i supporti vengono periodicamente ripresi quando le forze, durante il ciclo di funzionamento, si invertono provocando così impatti e vibrazioni.

ALTRE CAUSE: includono gli impatti che si manifestano all'apertura ed alla chiusura delle valvole, non solo tra le teste delle valvole stesse e la loro sede, ma anche nel meccanismo che le muove (camme, aste, bilancieri); gli impatti provocati dalla chiusura degli spilli degli iniettori; i rumori generati da tutti gli altri ausiliari montati (internamente o esternamente) sul motore: pompa acqua, pompa olio, alternatore... Tutte queste sorgenti possono produrre vibrazioni addizionali che però, generalmente, sono di ordine inferiore rispetto a quelle menzionate in precedenza.

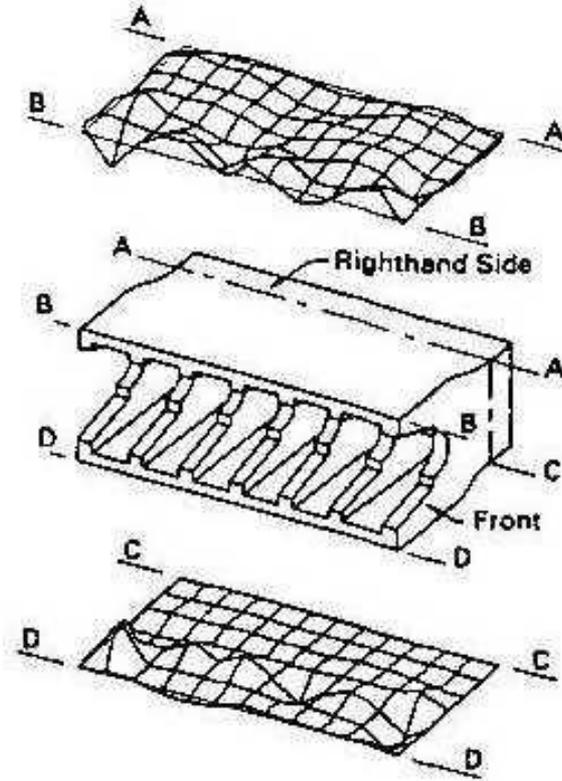
# Rumore irradiato dalle superfici del motore e dei componenti

Tutto il ru  
genera, vi  
componer  
vibrante s

- BASAM  
Questo co  
condizion  
materiale)  
dei modi s  
dell'estens
- 1. modi fl  
muovono
- 2. modi ti  
(normalm



Fundamental bending mode.



Typical panel mode.

che lo  
ei  
ficie

te dalle  
geometria,  
e proprie  
ione

otore si

### •COPPA DELL'OLIO

La coppa è generalmente realizzata in lamiera e viene fissata alla parte inferiore del basamento dove l'ampiezza delle vibrazioni è elevata. Normalmente presenta una **vasta superficie radiante** che tende ad avere **la prima frequenza naturale intorno a 1 kHz** che cade proprio nella zona più sensibile dello spettro di frequenza pesato A.

### •COPERCHIO INGRANAGGI ANTERIORI

Così come la coppa dell'olio anche questo componente è attaccato al monoblocco in una zona dove il livello di vibrazione è generalmente elevato, quindi può divenire un **efficace irradiatore di rumore nella regione compresa tra 1 e 5 kHz**, specie quando è realizzato in lamiera sottile.

### •POMPA INIEZIONE

Questo componente è sottoposto ad elevati carichi meccanici risultanti dall'iniezione di carburante ad alta pressione e **può produrre un considerevole rumore ad alte frequenze**. Il rumore è generato dagli improvvisi cambiamenti della pressione idraulica all'interno della pompa e dagli impatti tra i componenti in movimento che inducono coppie di reazione sui supporti e sull'ingranaggio conduttore. I supporti della pompa possono anche trasmettere le vibrazioni del motore al corpo pompa il quale può irradiarle sotto forma di rumore.

### •PULEGGIA ALBERO MOTORE E SMORZATORE

L'albero motore è sottoposto a vibrazioni torsionali che vengono trasmesse all'aria attraverso la puleggia e lo smorzatore il quale agisce in modo simile alla membrana di un altoparlante. Questa sorgente influenza principalmente il rumore misurato sul fronte del motore.

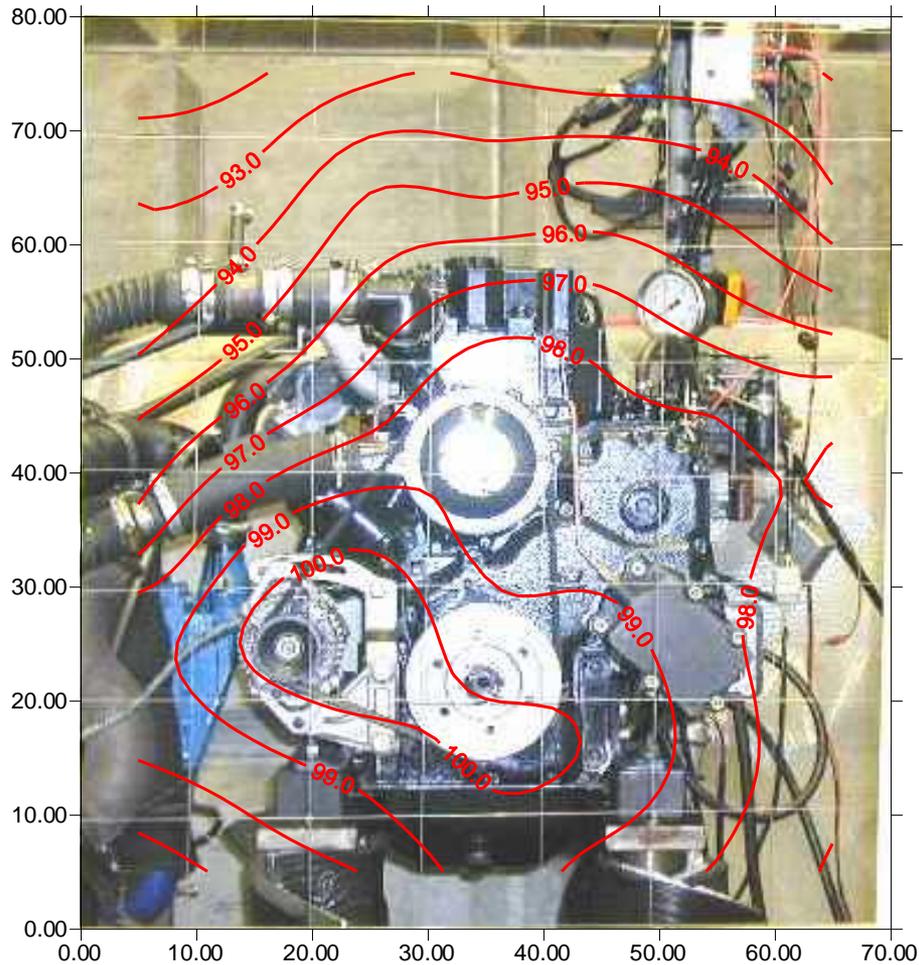
### •SCATOLA DEL CAMBIO

Poiché normalmente la scatola del cambio è collegata direttamente al motore essa può irradiare il rumore prodotto dal motore stesso oltre a fornire il proprio contributo. Il rumore proveniente dal cambio è causato dall'eccitazione alle frequenze d'ingranamento e, nel funzionamento al minimo, dagli impatti dovuti al recupero delle tolleranze nell'ingranamento.

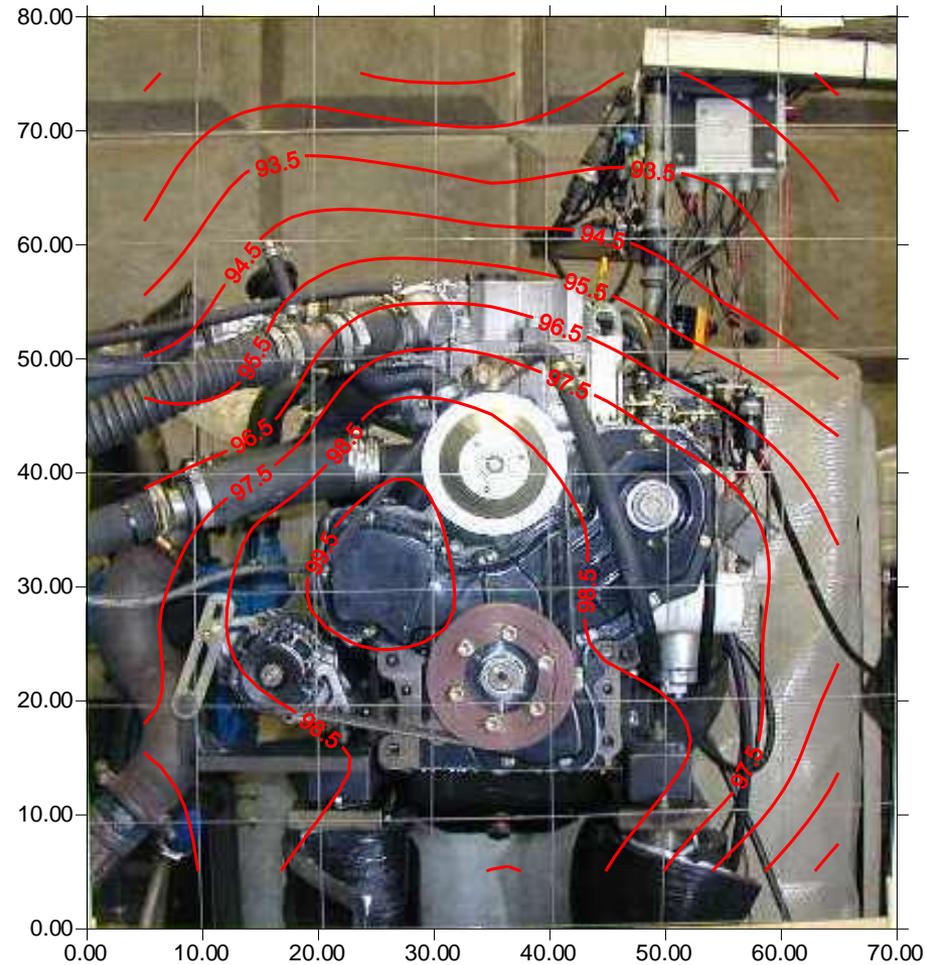
### •COLLETTORI DI ASPIRAZIONE E DI SCARICO

Questi componenti, usualmente, sono imbullonati direttamente sulla testata e sono eccitati dalle vibrazioni trasmesse dalla testata stessa e dal monoblocco.

# Mappe intensimetriche anteriori

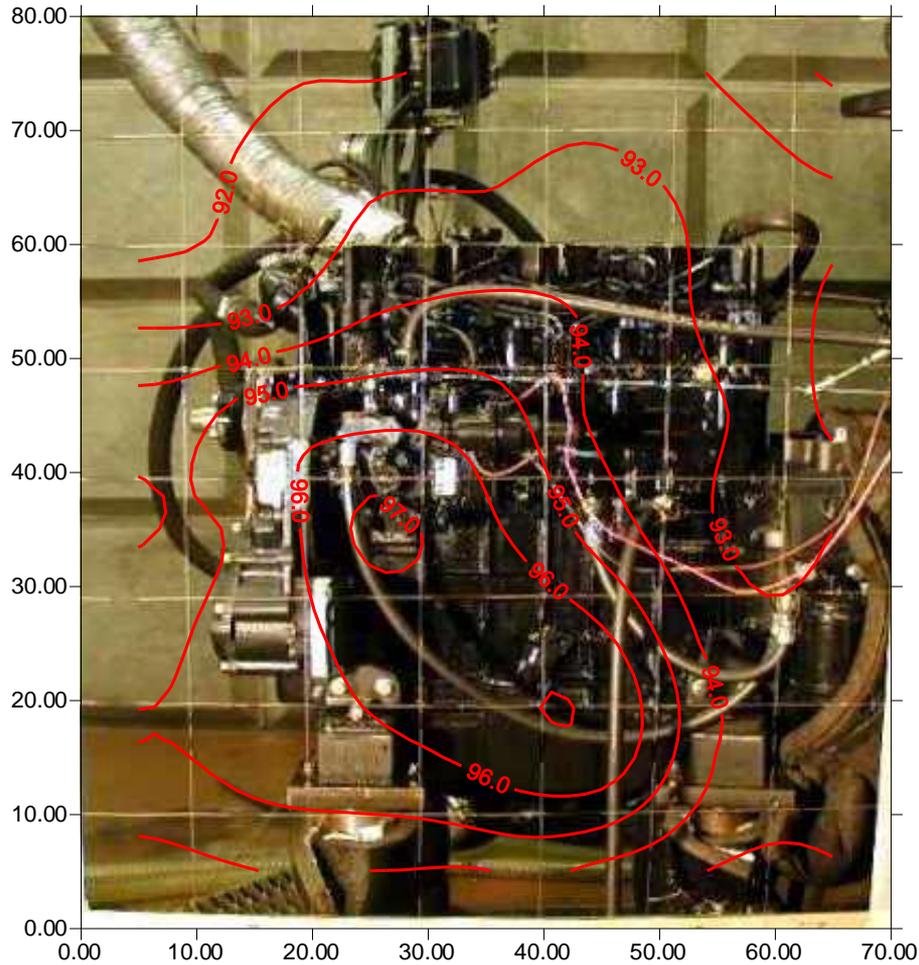


**Motore D754E1**

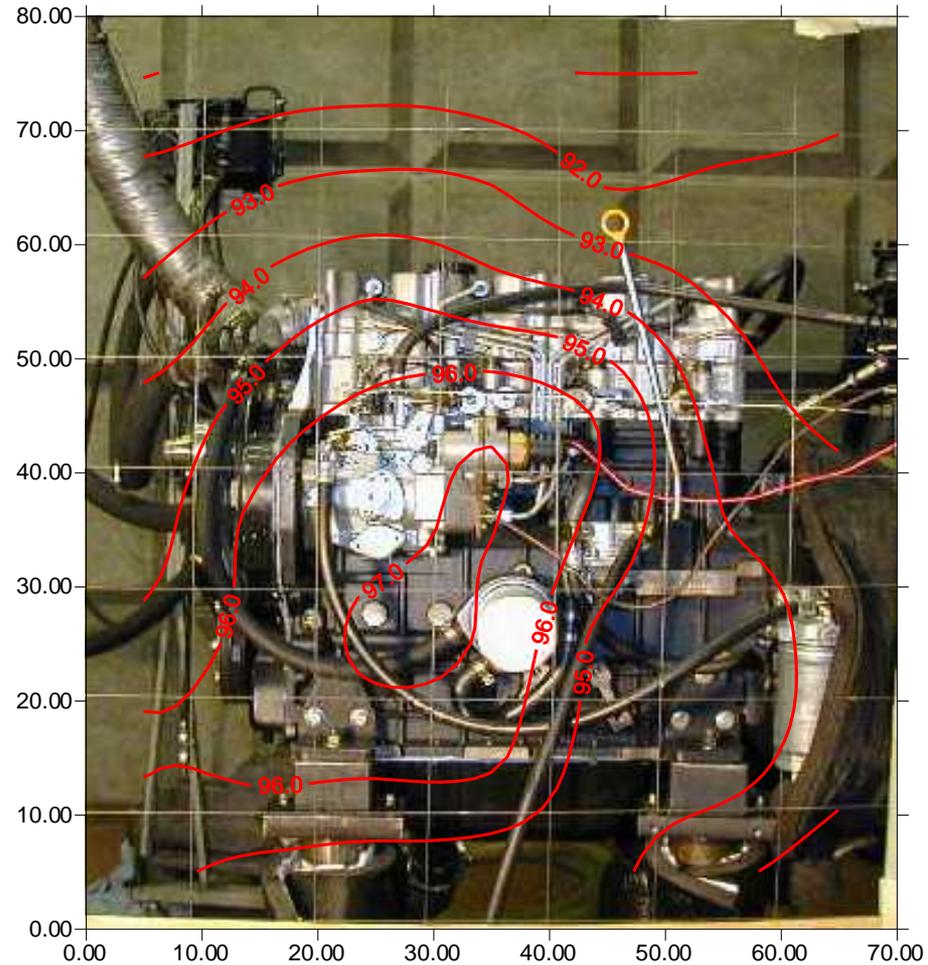


**Motore D754E2P**

# Mappe intensimetriche lato pompa

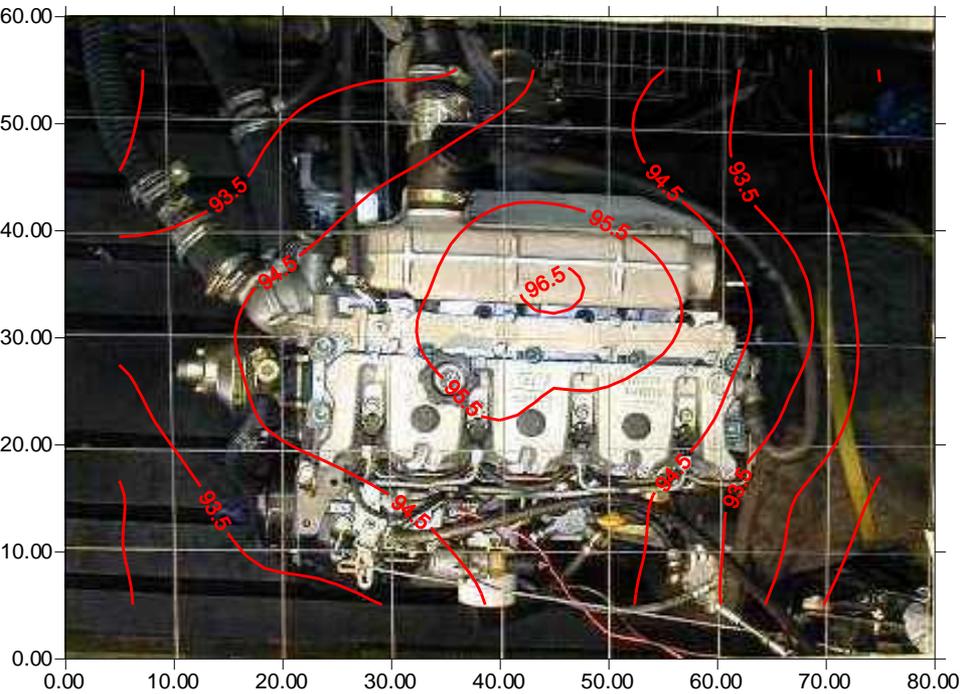


**Motore D754E1**

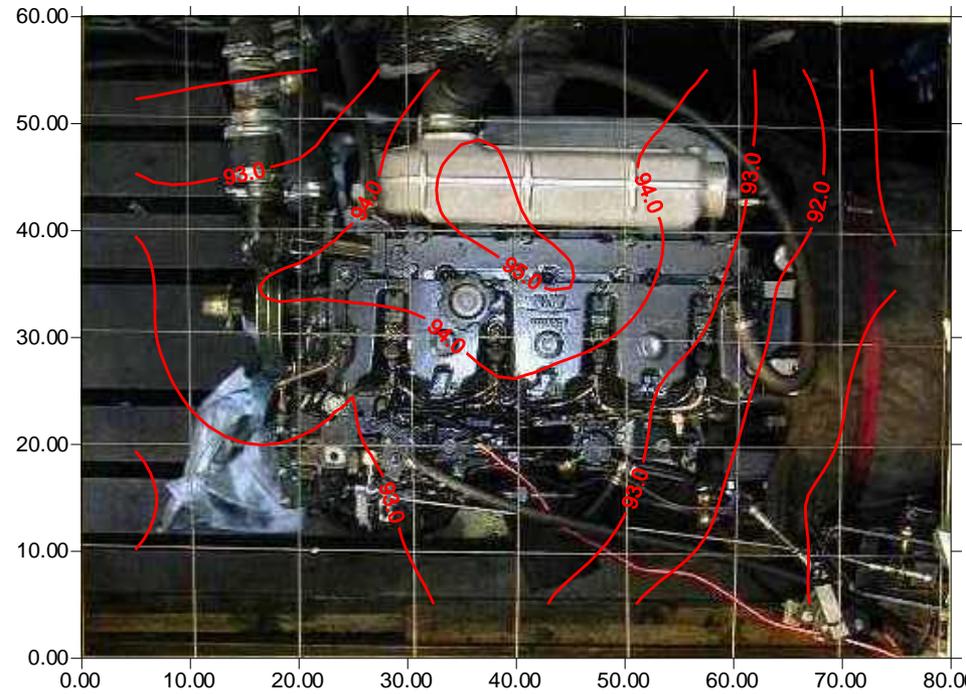


**Motore D754E2P**

# Mappe intensimetriche lato superiore

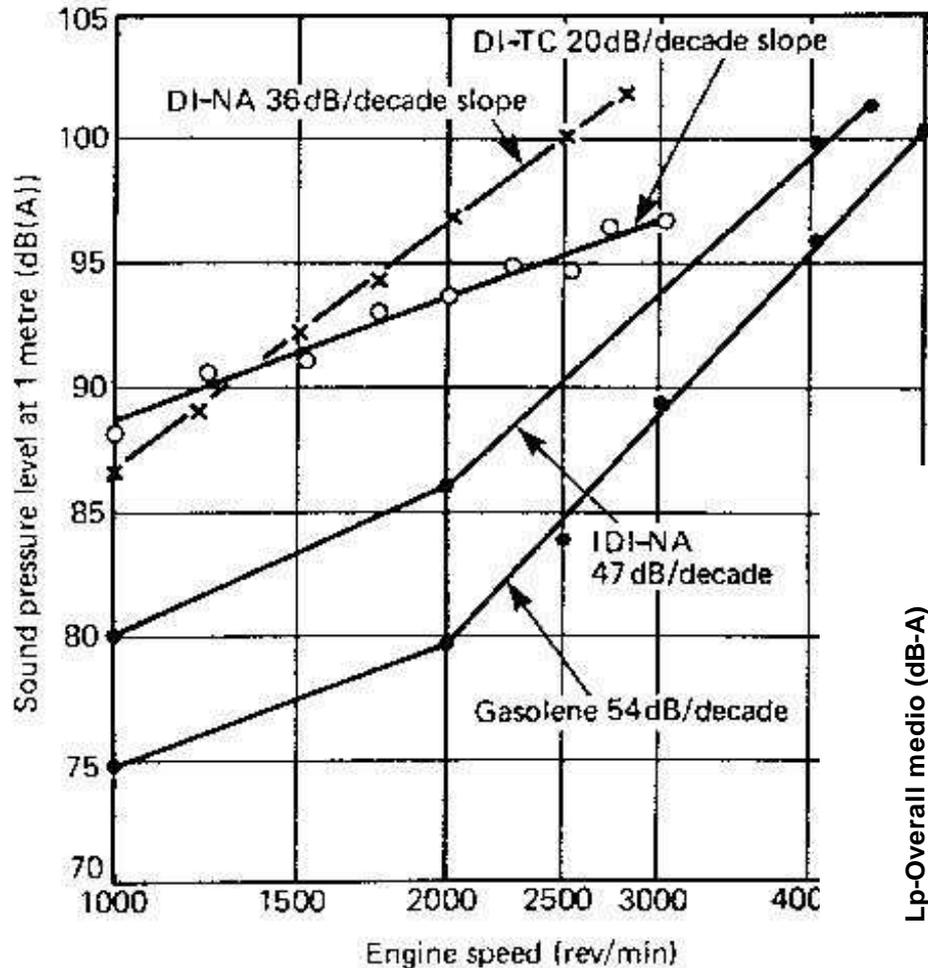


**Motore D754E1**



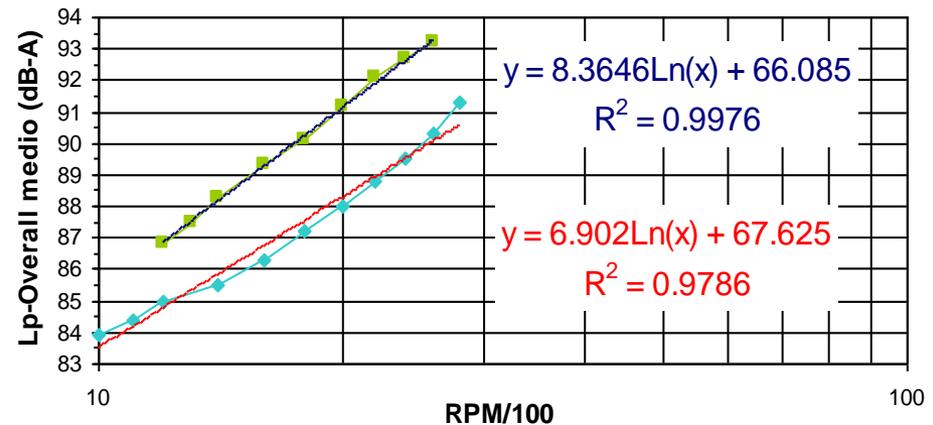
**Motore D754E2P**

# Rumore in gruppi di motori di diverso tipo e potenza



Per i due motori nei quali la combustione è "più silenziosa", cioè i motori diesel ad iniezione indiretta (IDI-NA) e i motori benzina (Gasoline), la pendenza della curva cambia intorno ai 2000 rpm, mentre per i motori diesel ad iniezione diretta (DI-NA) la pendenza è sostanzialmente costante (e più bassa nel caso di motori sovralimentati DI-TC).

Motore D754E1



◆ a vuoto

■ 100% del carico

— Tendenza log. (a vuoto)

— Tendenza log. (100% del carico)

# BONIFICA DELLE SORGENTI DI RUMORE



# **METODOLOGIA**

1. Individuare **SORGENTI** e le modalità di propagazione del rumore al ricevitore
2. Individuare gli **OBIETTIVI** che ci si pone con la bonifica del rumore
3. Progettare gli interventi di bonifica
4. Eseguire gli interventi di bonifica
5. Collaudare acusticamente gli interventi di bonifica e verificare il raggiungimento degli **OBIETTIVI**

## D.Lgs. 81/2008 : Sicurezza da rischio rumore negli ambienti di lavoro

LEP: livello di esposizione personale (riferita a 8h di lavoro)

$LEP < 80 \text{ dB[A]}$  ; nessun intervento richiesto

$80 < LEP < 85 \text{ dB[A]}$  ; dotazione di DPI, corsi di formazione e addestramento sull'utilizzo dei DPI, controlli sanitari periodici in azienda

$LEP > 85 \text{ dB[A]}$  ; obbligo di utilizzo dei DPI e di bonifica delle aree con  $Leq > 85 \text{ dBA}$ , segnalazione delle stesse con opportuna segnaletica

NB: in ogni caso a DPI indossati il LEP non può superare 87 dB(A)

## Legge 447: Disturbo da rumore in ambiente esterno

Leq diurno (6-22) e notturno (22-6) misurato in facciata degli edifici

Fissa dei limiti assoluti di immissione (tutte le sorgenti) ed emissione (singola sorgente) dipendenti dalla classificazione acustica del territorio e del periodo di riferimento

	<i>DIURNO (6:00-22:00)</i>		<i>NOTTURNO (22:00-6:00)</i>	
	Limite assoluto di immissione (dBA)	Limite assoluto di emissione (dBA)	Limite assoluto di immissione (dBA)	Limite assoluto di emissione (dBA)
Classe I	50	45	40	35
Classe II	55	50	45	40
Classe III	60	55	50	45
Classe IV	65	60	55	50
Classe V	70	65	60	55
Classe VI	70	65	70	65

Fissa dei limiti differenziali da misurare all'interno delle abitazioni a finestre aperte e finestre chiuse con e senza sorgente disturbante attivata

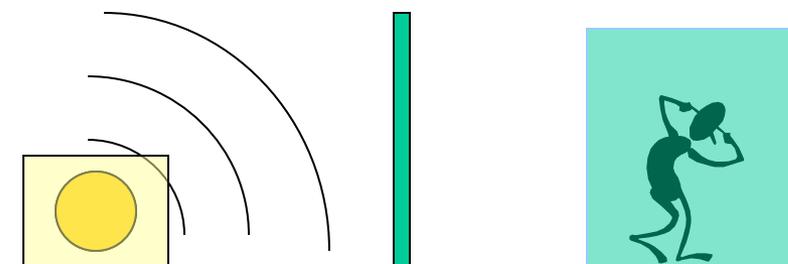
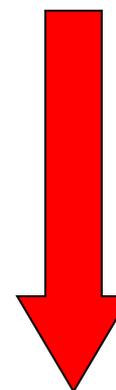
# PROGETTAZIONE DEGLI INTERVENTI DI BONIFICA

Interventi sulla generazione (sorgente)

Interventi sulla propagazione del rumore (ambiente)

Interventi sul ricevitore

**ORDINE DI PRIORITA'**



**Sulla macchina  
Incapsulaggio**

**Schermi, trattamento  
ambientale fonoassorbente**

**Cabina silente  
Schermi  
(DPI)**

# INCAPSULAGGIO DELLA SORGENTE

Modalità:

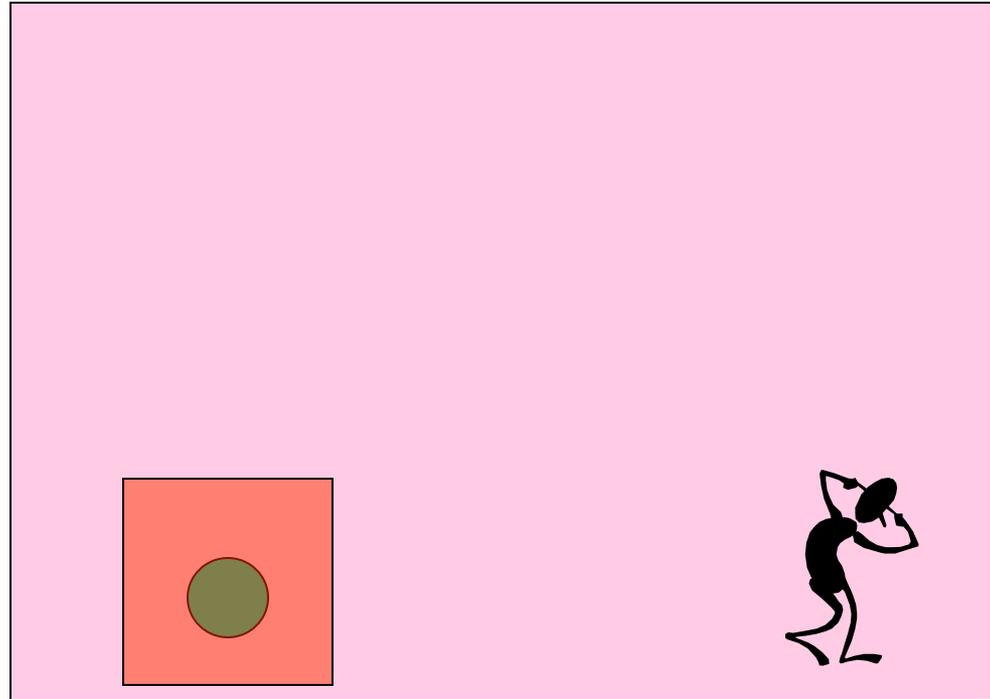
*come incapsulare la  
macchina ?*

Materiali:

*quali materiali usare ?*

Dimensionamento:

*come raggiungere gli  
OBIETTIVI di bonifica ?*

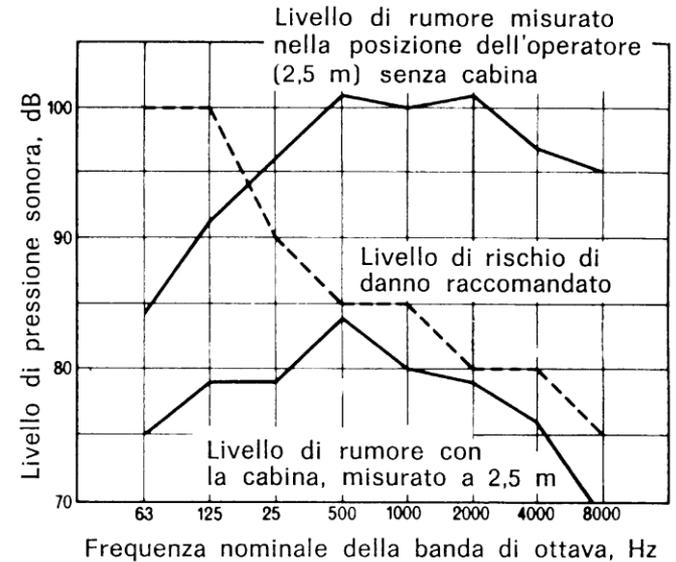
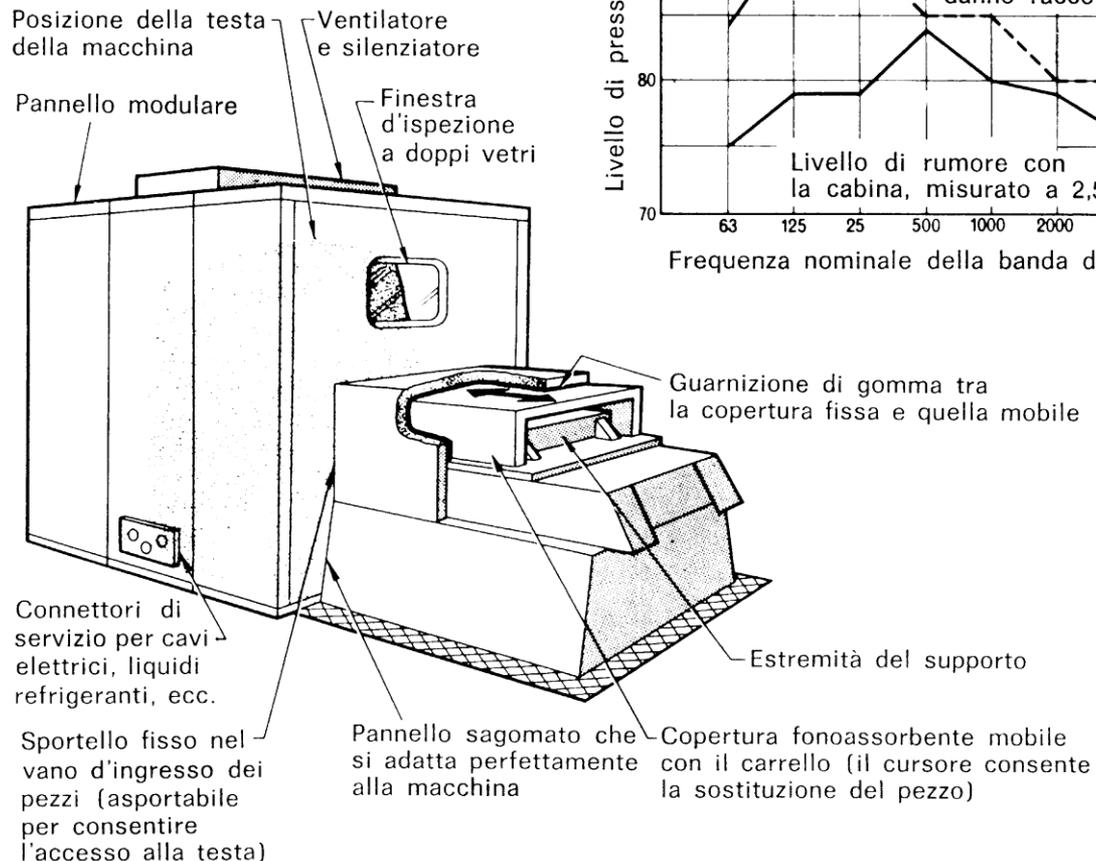


# INCAPSULAGGIO DELLA SORGENTE- MODALITA'

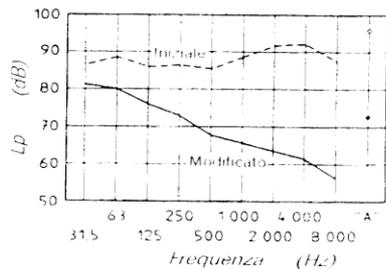
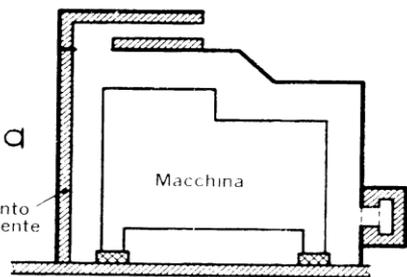
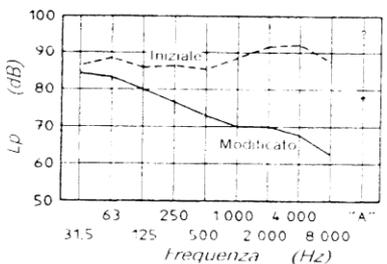
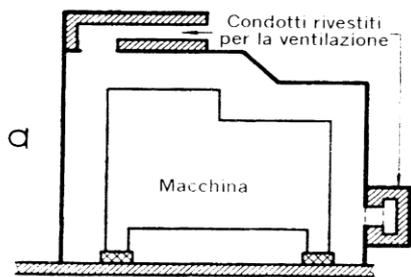
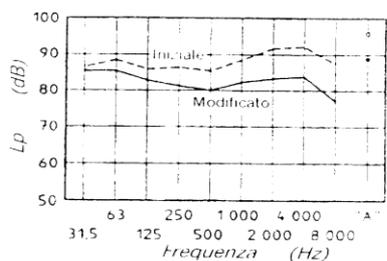
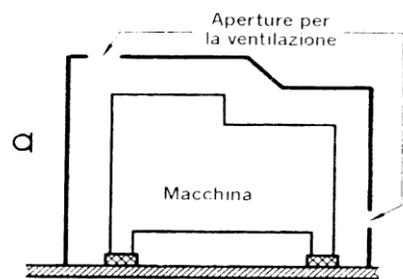
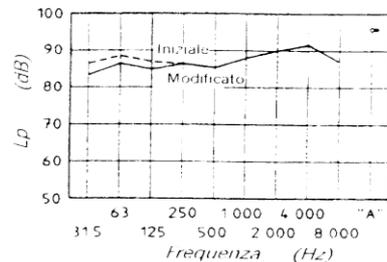
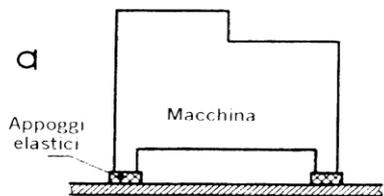
E' necessario chiudere il più possibile la sorgente senza pregiudicarne il funzionamento

Spesso è necessario prevedere aperture per areazione, passaggio di materiali o pezzi finiti, accesso da parte di addetti, zone ispezionabili, schermi mobili, zone trasparenti per controllo visivo, ecc.

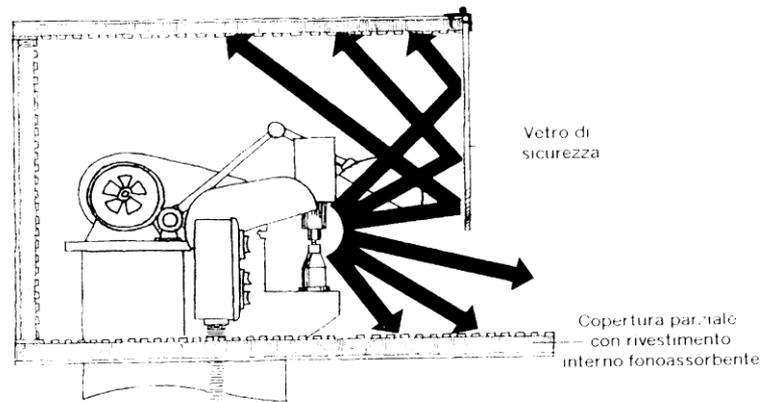
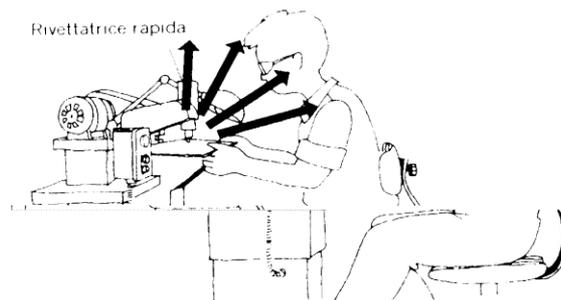
Tutti questi componenti portano ad una diminuzione delle proprietà fonoisolanti dell'incapsulaggio e vanno eseguite con particolare cura.



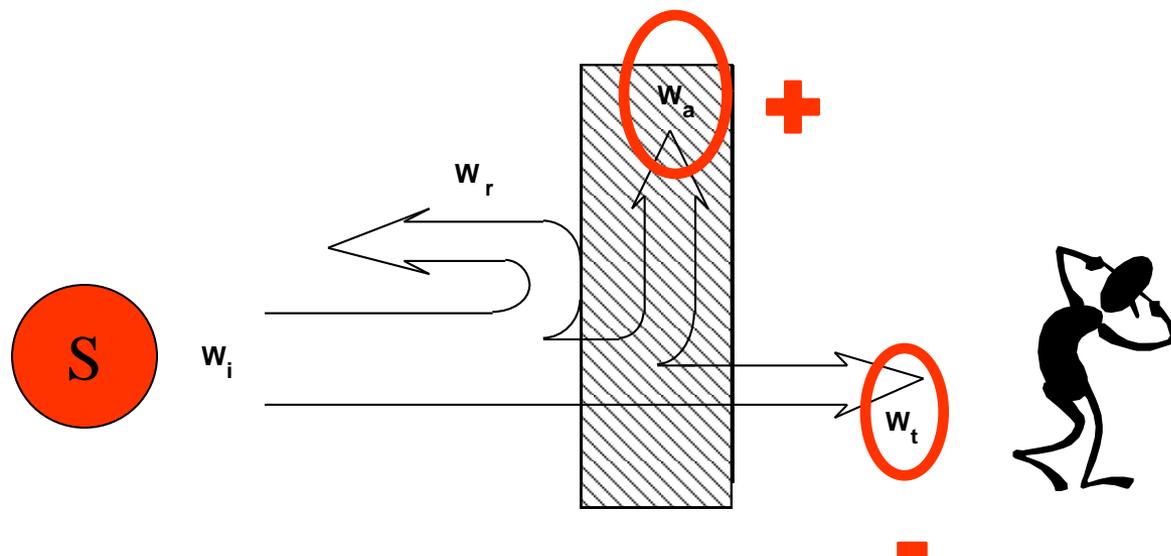
# INCAPSULAGGIO DELLA SORGENTE- MODALITA'



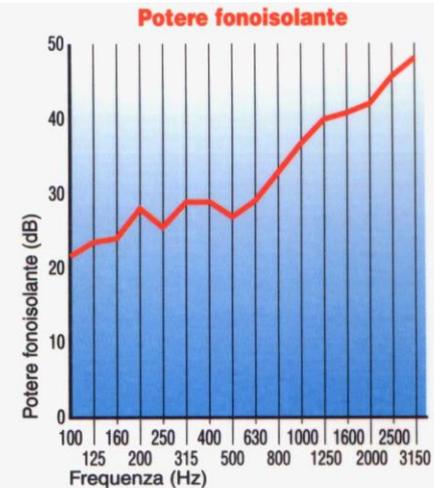
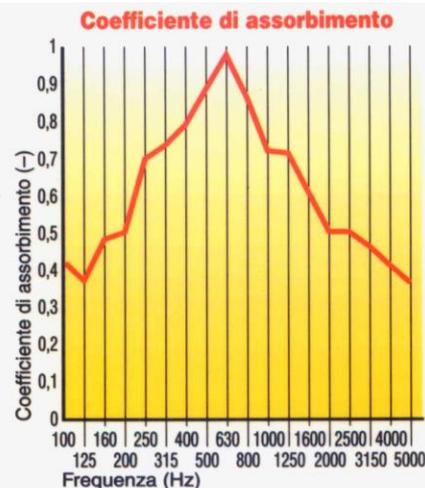
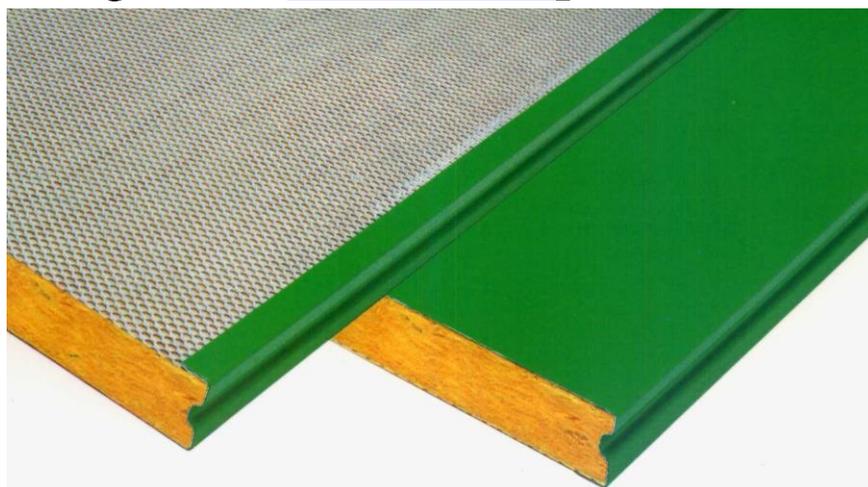
Rivettatrice rapida



# INCAPSULAGGIO DELLA SORGENTE-MATERIALI



I materiali per incapsulaggio devono preferibilmente essere fonoassorbenti (lato sorgente) e fonoisolanti.



# INCAPSULAGGIO DELLA SORGENTE-DIMENSIONAMENTO

$$IL = L_1 - L_2 = TL + 10 \log(\alpha_i)$$

$\alpha_i$  è il coefficiente di assorbimento medio delle pareti interne dell'incapsulaggio

## Esempio:

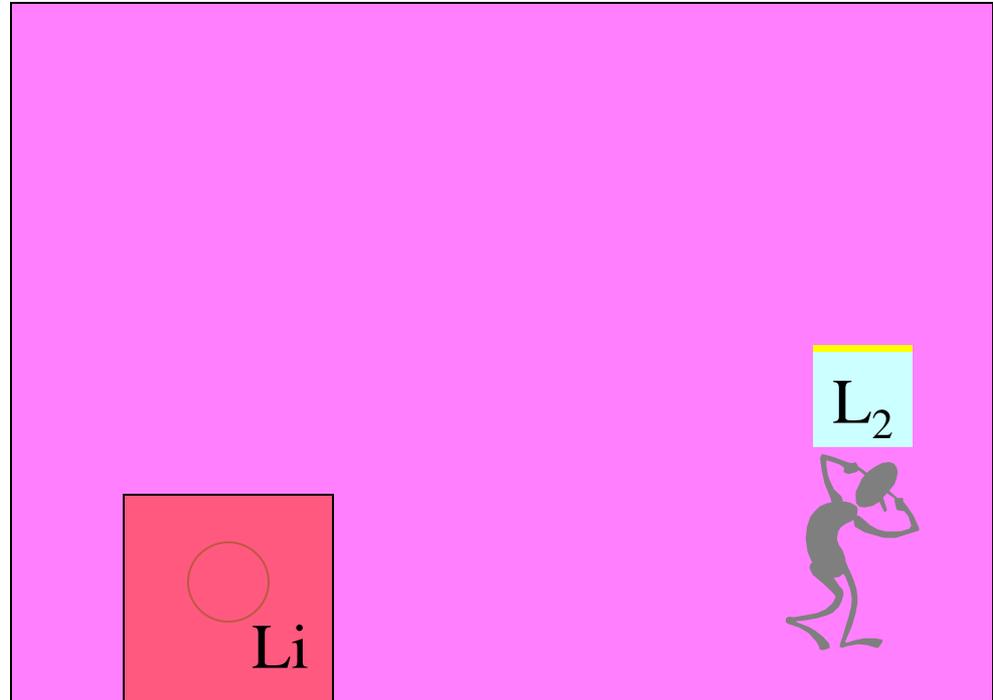
Se le pareti hanno coefficiente  $\alpha_i = 0.03$  (scarso assorbimento acustico) risulta:

$$IL = TL + 10 \log 0,03 \sim TL - 15 \quad [\text{dB}]$$

Aumentando il coefficiente a 0.2 (discreto assorbimento acustico), si ottiene:

$$IL = TL + 10 \log 0,2 = TL - 7 \quad [\text{dB}]$$

Pertanto un rivestimento fonoassorbente delle superfici interne di un incapsulaggio è necessario per conseguire un elevato valore di  $IL$  cioè di effettivo isolamento acustico.

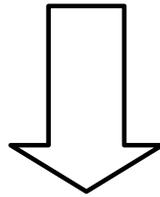


$$IL = L_1 - L_2$$

$$L_1 = Lw_1 + 10 \log \left( \frac{4}{A} \right)$$

$$L_i = Lw_1 + 10 \log \left( \frac{4}{S_i \alpha_i} \right)$$

$$L_2 = L_i - TL + 10 \log \left( \frac{S_i}{A} \right) = Lw_1 + 10 \log \left( \frac{4}{S_i \alpha_i} \right) - TL + 10 \log \left( \frac{S_i}{A} \right)$$



$$IL = TL + 10 \log (\alpha_i)$$

# SILENZIAMENTO DEI CONDOTTI

## **Propagazione del suono nei condotti**

Riveste una grande importanza pratica in diversi casi:

- gli impianti di condizionamento;
- gli impianti di aspirazione fumi;
- gli impianti a tiraggio forzato;
- i condotti di scarico aria o gas;
- i gasdotti;
- gli impianti dell'aria compressa

## *Principali cause di rumore:*

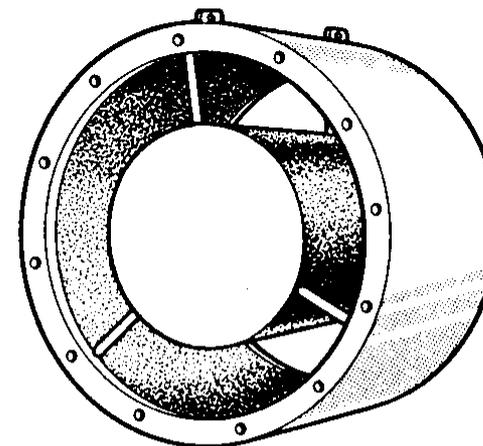
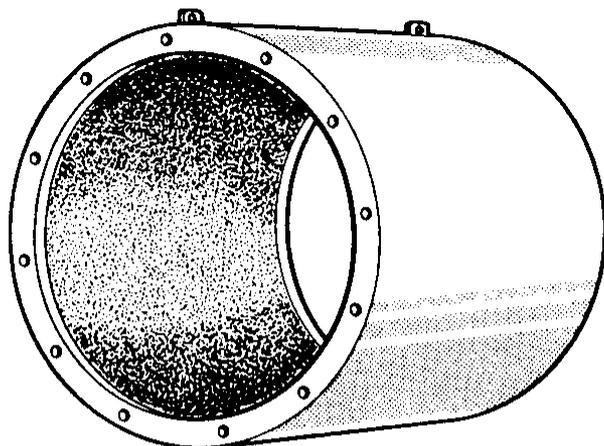
- rumore generato da una o più sorgenti a monte dei condotti e che si propaga fino alle terminazioni degli stessi;
- rumore autogenerato dal gas in movimento per fruscio, urto, variazione rapida di regime;
- rumore emesso dai condotti all'esterno sia per effetto di vibrazioni meccaniche che per la presenza di un campo acustico al loro interno.

## *Sistemi di attenuazione:*

I sistemi adottati per ridurre l'energia sonora lungo un condotto sono schematizzabili in quattro gruppi:

- **silenziatori dissipativi e plenum** (*ottimo funzionamento alle alte frequenze*)
- **silenziatori reattivi** (*funzionamento selettivo alle medio-basse frequenze*)
- **silenziatori attivi** (*funzionamento selettivo alle basse frequenze*)

# SILENZIATORI DISSIPATIVI



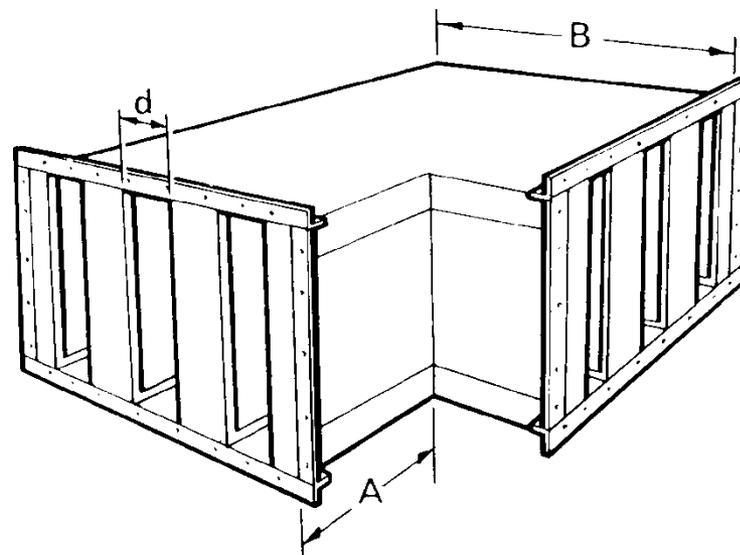
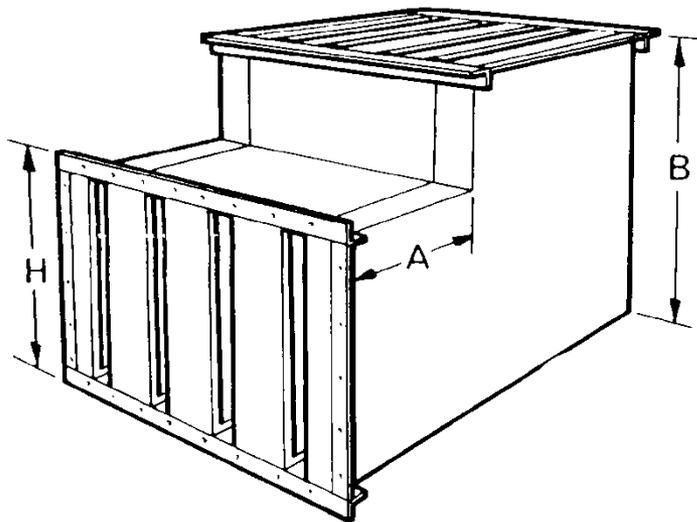
Diametro mm	Attenuazione in dB, per banda d'ottava (Hz)							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
315	1	2	4	9	11	10	9	7
400	2	3	5	10	13	11	9	8
500	2	3	6	13	14	10	10	5
630	2	5	7	15	13	8	9	8
710	3	5	7	15	13	9	9	8
800	3	5	8	16	12	9	9	8
900	3	5	10	17	13	11	10	8
1000	4	5	11	16	11	10	8	9
1120	4	5	11	17	11	9	8	8
1250	4	6	12	17	10	9	8	7
1400	4	6	12	16	10	8	7	6
1600	4	7	12	16	10	8	7	6

Diametro mm	Attenuazione in dB, per banda d'ottava (Hz)							
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
315	2	5	5	9	18	20	18	15
400	2	6	6	10	19	24	20	17
500	2	3	8	16	21	22	21	17
630	3	5	8	15	19	16	14	12
710	3	5	8	15	19	15	14	12
800	4	5	8	16	19	15	14	13
900	4	5	9	17	19	15	14	13
1000	5	5	11	18	19	15	14	13
1120	5	7	11	19	18	14	13	12
1250	5	8	12	19	17	14	12	10
1400	5	8	12	18	16	13	11	9
1600	5	8	13	17	16	13	11	8

# Silenziatori a setti:

## Gomito orizzontale

Prestazione corrispondente a quella di una lunghezza  $A + B$ , più l'attenuazione di un raccordo a gomito rivestito (ved. fig. 6.15)



## Gomito verticale

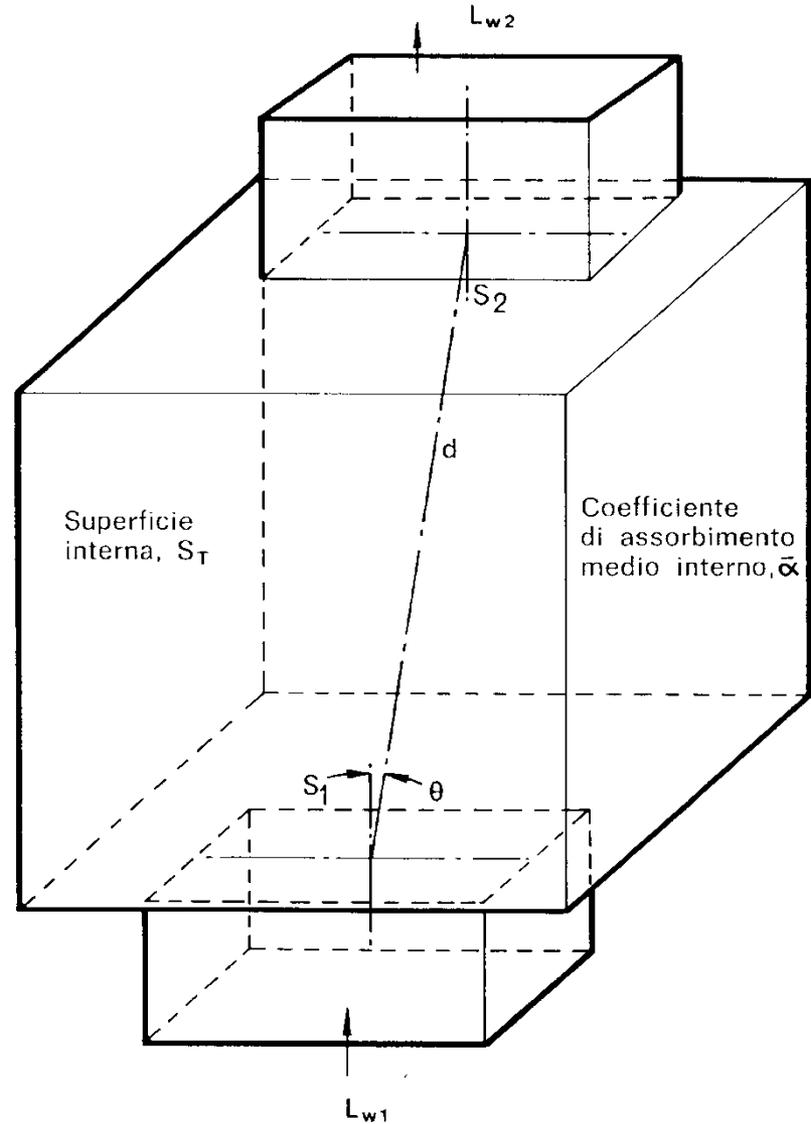
Prestazione corrispondente a quella di una lunghezza  $A + B$ , più l'attenuazione di un raccordo a gomito non rivestito (ved. fig. 5.5)

Fig. 7.31 - Esempi di silenziatori a setti del tipo ad angolo

# Plenum:

$$L_{w1} - L_{w2} = \dots$$

in cui:  $S_2$  è l'area della bocca  
 $d$  è la distanza fra  
 $\theta$  è l'angolo format  
 $R_c$  è la « costante d'  
 $S_r$  è la superficie tot  
le bocche d'ingres  
 $\bar{\alpha}$  è il coefficiente d  
terne del plenum  
Nel calcolo di  $\bar{\alpha}$  s  
so e d'uscita abbi

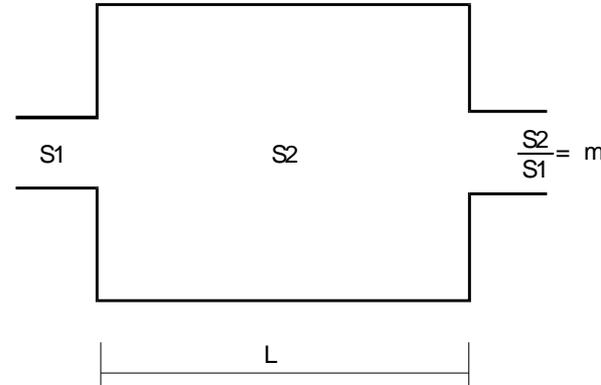
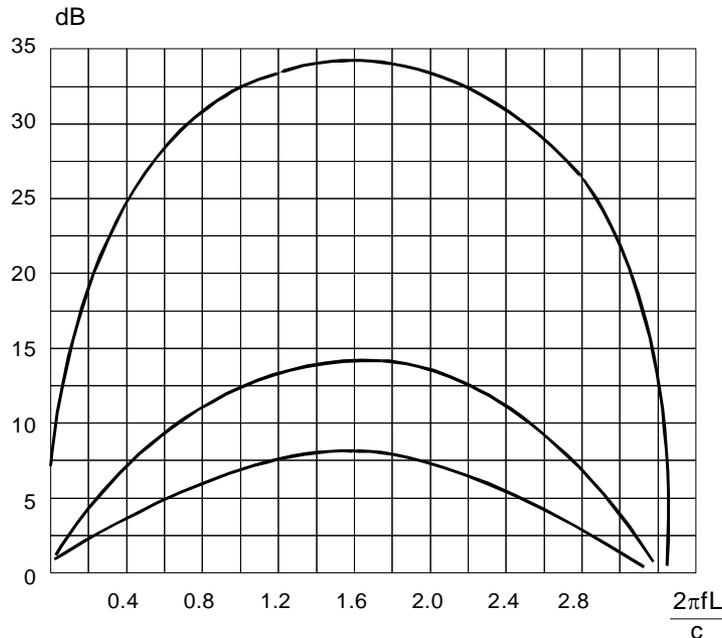


# Silenziatori reattivi:

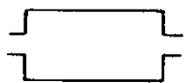
Se un condotto ha una variazione di sezione (allargamento o restringimento) questa discontinuità non consente a tutta l'energia sonora di trasmettersi.

La più classica realizzazione pratica di questo principio si ha quando si pone in serie ad un condotto una camera di espansione. Chiamando  $m$  il rapporto tra la sezione del condotto e quella della camera (di lunghezza  $L$ ), si ottiene un'attenuazione pari a:

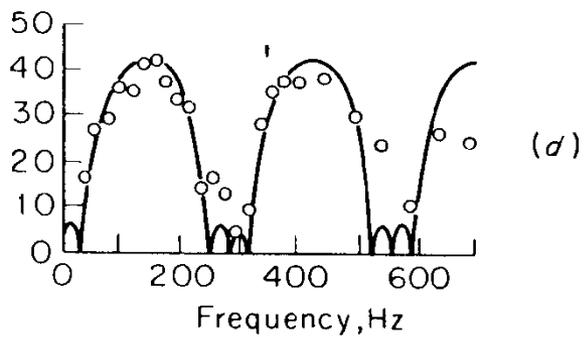
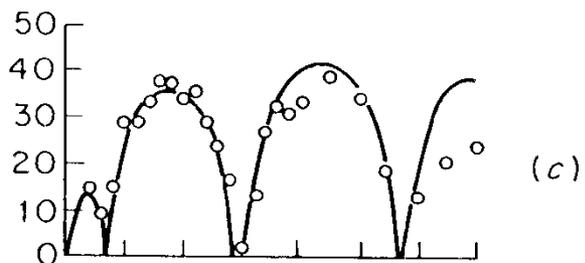
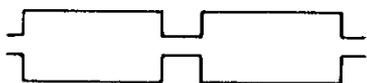
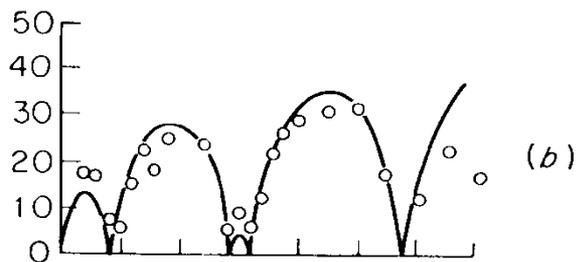
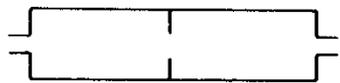
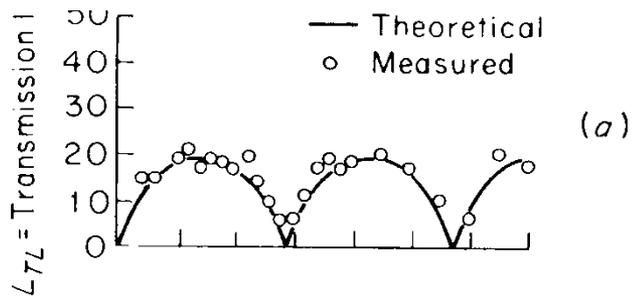
$$L_{TL} = 10 \log \frac{W_i}{W_t} = 10 \log \left[ 1 + \frac{1}{4} \left( m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 \left( \frac{2\pi L}{\lambda} \right) \right]$$



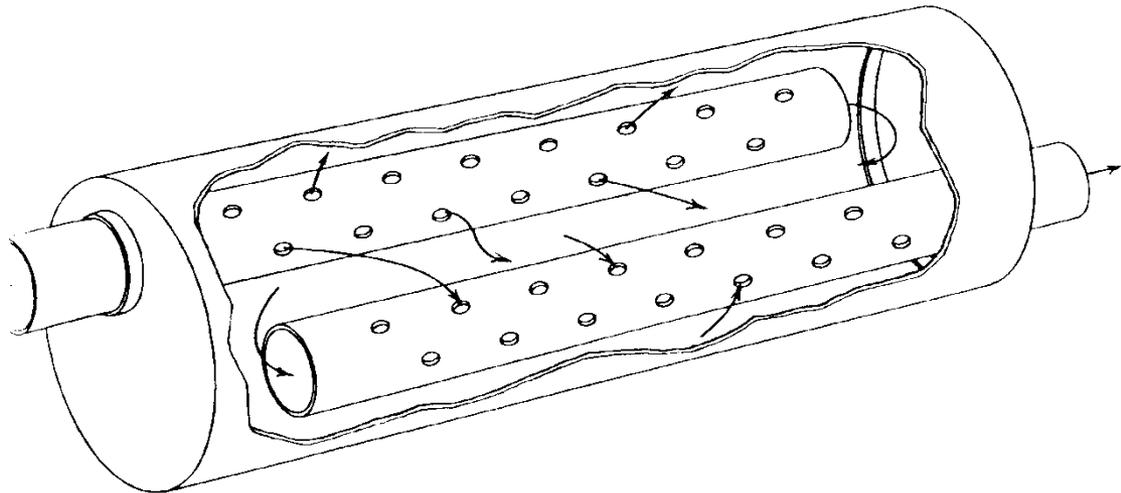
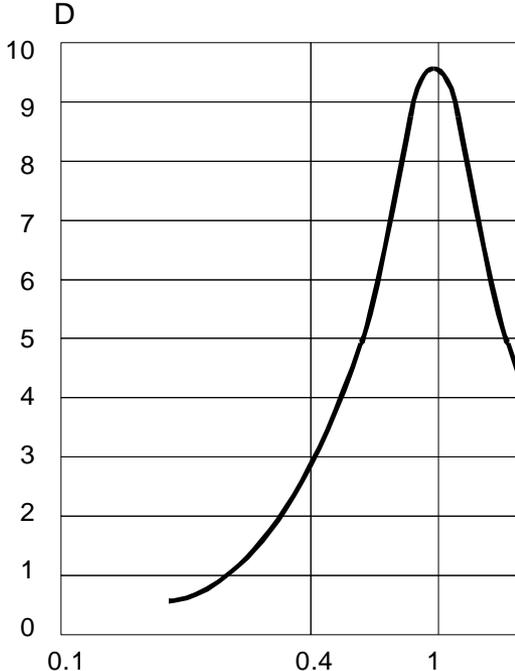
Funzione con periodo  $2\pi L/\lambda$



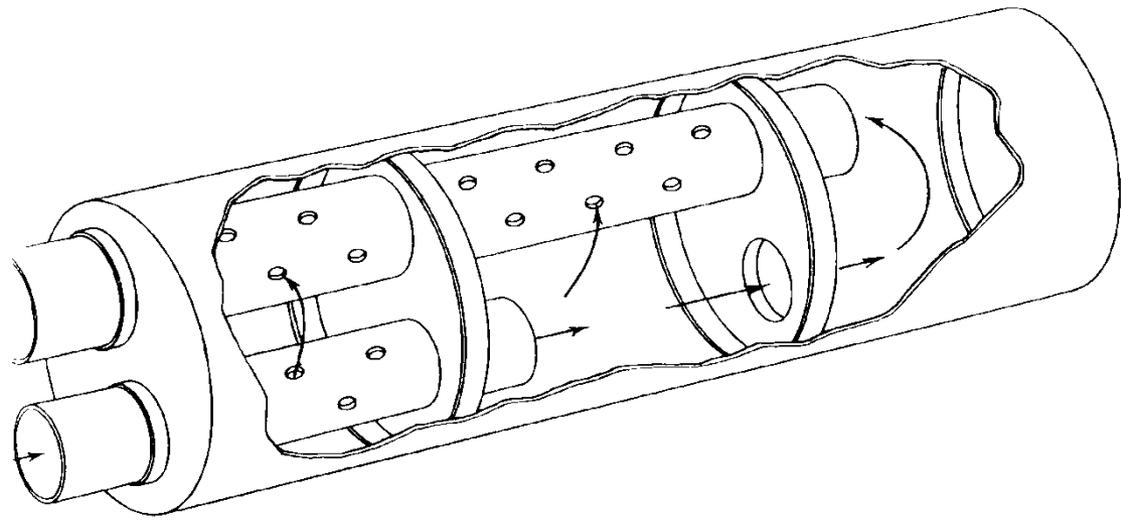
0 20 40 60  
Scale, cm



# Silenziatori reattivi a risonanza:

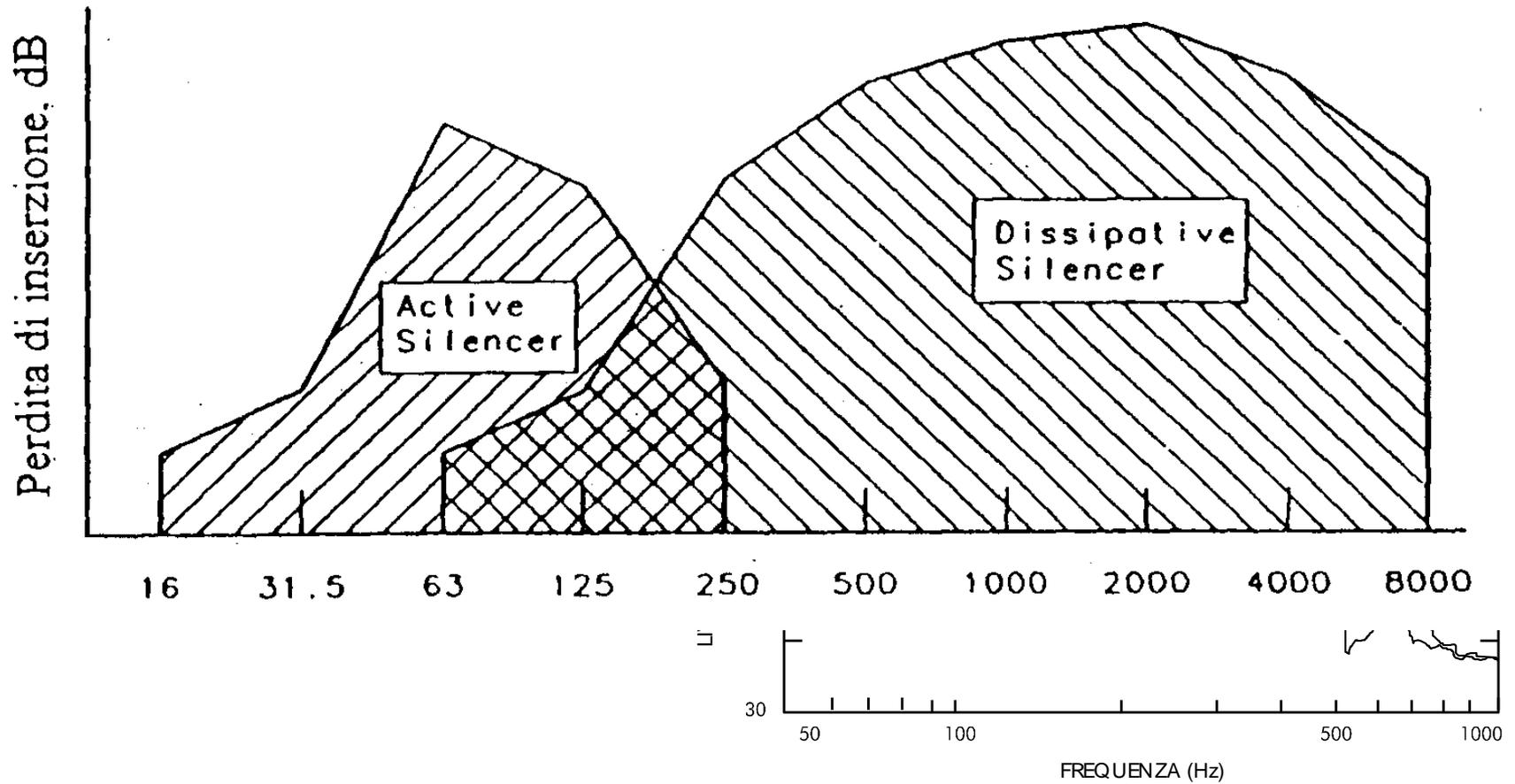


(a)



# Silenziatori attivi:

Utilizzati per basse frequenze, rumore stazionario e tonale



ECS - EFFETTO DI CANCELLAZIONE DEL SUONO

# CRITERI DI BONIFICA NELLA PROPAGAZIONE

←

AMBIENTE APERTO



Schermi

Modalità

→

AMBIENTI CHIUSI



Schermi

Trattamenti fonoassorbenti

Materiali

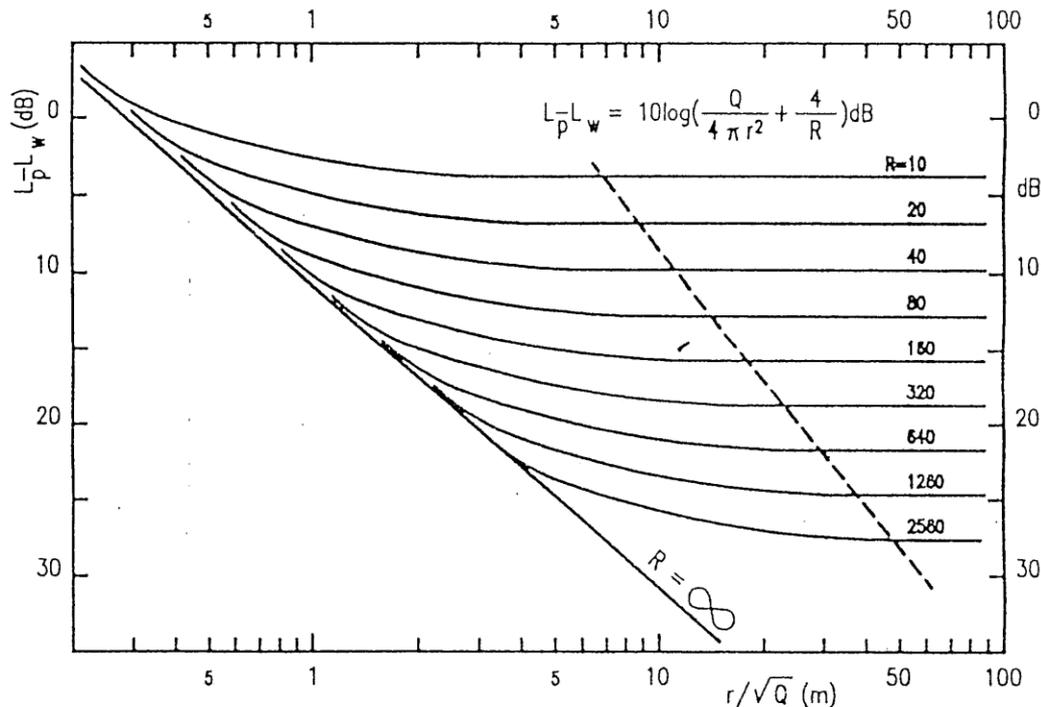
Dimensionamento

# CRITERI DI BONIFICA NELLA PROPAGAZIONE

## AMBIENTI CHIUSI

*Teoria:* Campo semi-riverberante

$$L_p \cong L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$



Costante dell'ambiente:

$$R_\beta = \frac{\bar{\alpha}_\beta S_t}{1 - \alpha_\beta}$$

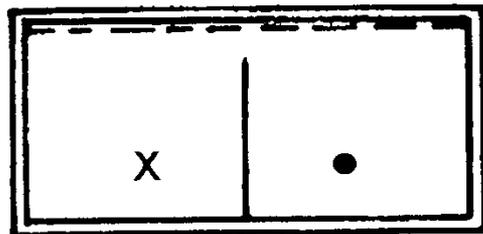
Attenuazione:

$$L_1 - L_2 = 10 \log \frac{\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_1}}{\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_2}}$$

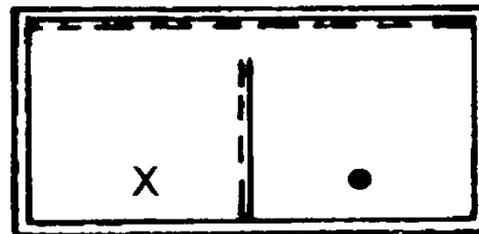
Nel caso di campo riverberante:

$$L_1 - L_2 = 10 \log \frac{A_2}{A_1}$$

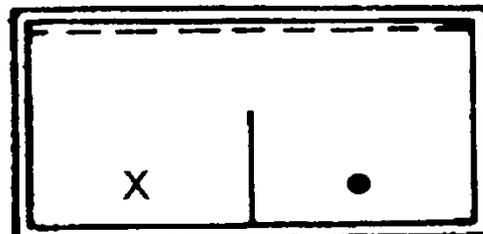
# CRITERI DI BONIFICA NELLA PROPAGAZIONE



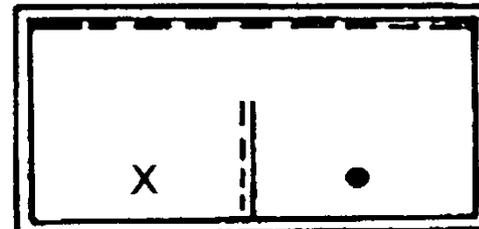
~ 16 dB (A)



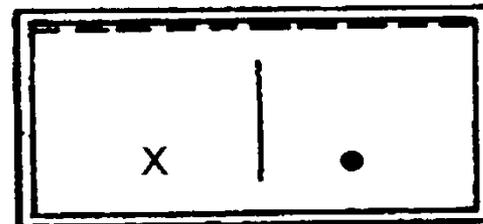
~ 19 dB (A)



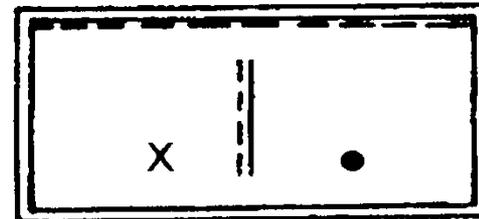
~ 14 dB (A)



~ 16 dB (A)



~ 8 dB (A)

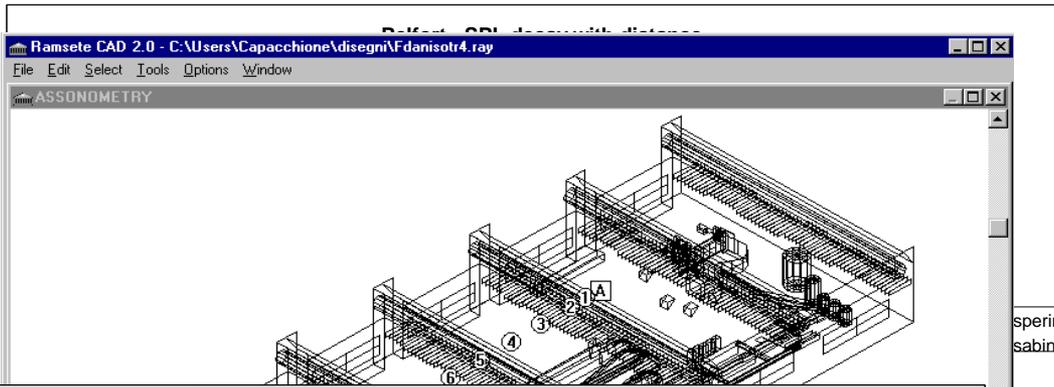


~ 11 dB (A)

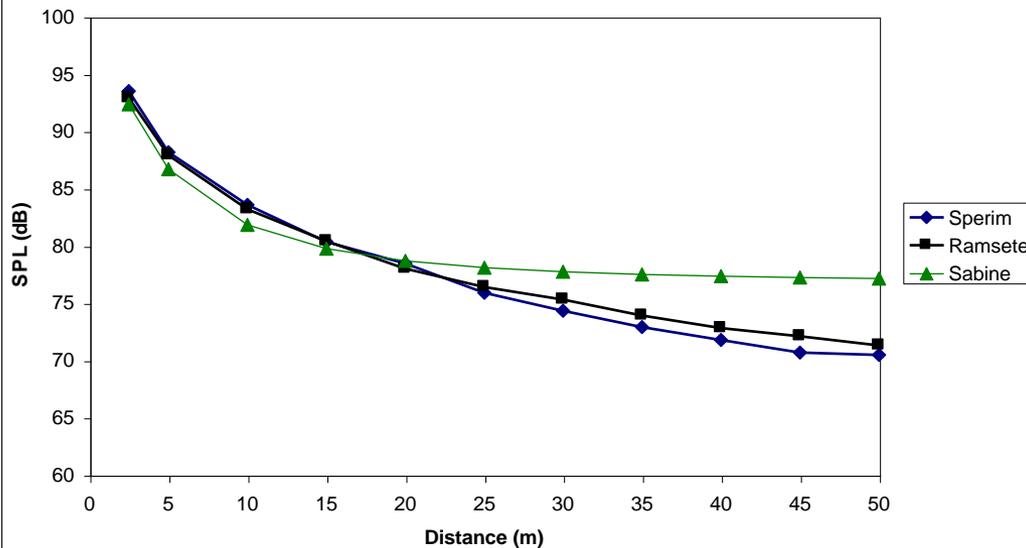
# CRITERI DI BONIFICA NELLA PROPAGAZIONE

## AMBIENTI CHIUSI INDUSTRIALI

*Pratica: ambienti bassi e vasti*

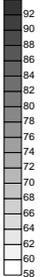
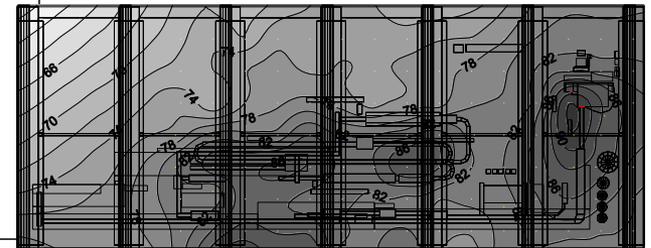


confronto sperimentale-Ramsete  
Banda A Asse X



sperim  
sabine

Mappatura con valori sperimentali



# ESEMPI DI TRATTAMENTI AMBIENTALI

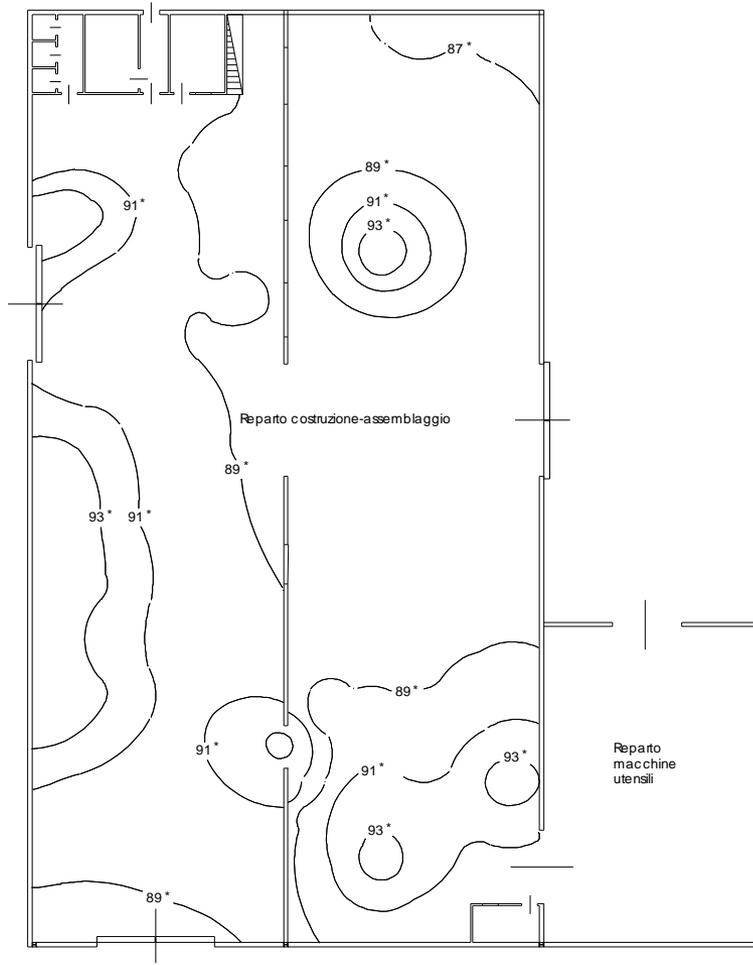


Controsoffitti fonoassorbenti

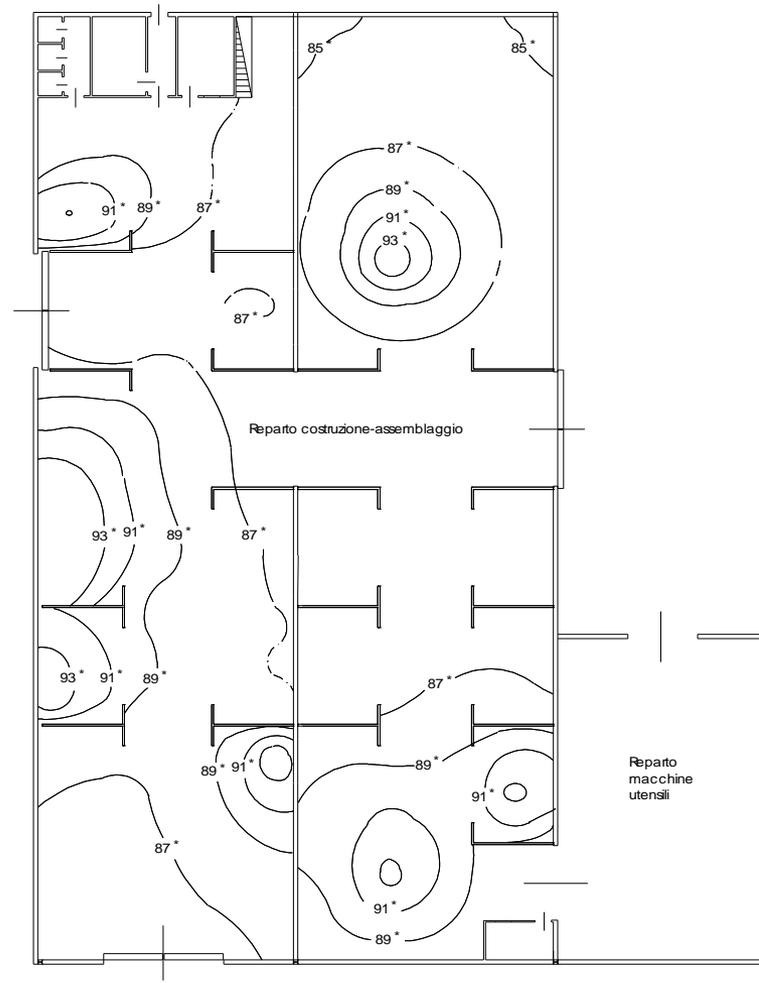
Baffles



# ESEMPI DI TRATTAMENTI AMBIENTALI: studio del lay-out



\* il livello di pressione sonora delle isofoiniche e' espresso in dB(A)



\* il livello di pressione sonora delle isofoiniche e' espresso in dB(A)

# CRITERI DI BONIFICA AL RICEVITORE

## Operatore

Cabina per la postazione di lavoro  
Schermi acustici presso postazione  
di lavoro  
(Dispositivi di protezione)



## Abitazione

Schermi acustici presso abitazione  
Incremento isolamento acustico della facciata(ad es. sostituzione infissi della facciata)

# BIBLIOGRAFIA

G.Elia, *Criteri di Bonifica delle sorgenti sonore*, Dispense della Scuola di Acustica di Ferrara.

R.Spagnolo, *Manuale di Acustica*, Libreria UTET.

A.Farina, G.Fornari, *Studio della propagazione del rumore in ambienti industriali bassi e vasti*, Dispense della Scuola di Acustica di Ferrara.

I.Sharland, *L'attenuazione del rumore*, Ed.Woods Italiana.