



**Università degli Studi di Parma**  
**Dipartimento di Ingegneria Industriale**

# “Controllo del rumore delle linee di packaging mediante interventi sull’acustica ambientale”

Angelo Farina – Università degli Studi di Parma

[HTTP://www.angelifarina.it](http://www.angelifarina.it)

E-mail: [farina@unipr.it](mailto:farina@unipr.it)

**MEC** FOR **PACK**

**Controllo delle vibrazioni e del rumore  
nelle macchine automatiche**

Bologna, 12 novembre 2009

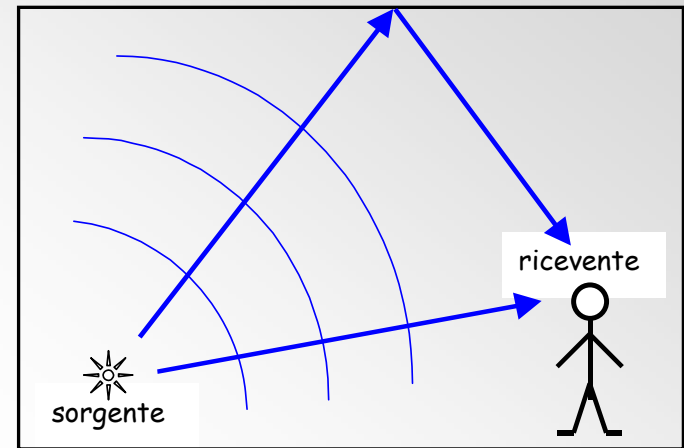
# Argomenti

- Propagazione del suono in ambienti confinati
- La teoria di Sabine – campo semiriverberante
- Il Fattore di Correzione Ambientale  $K_2$
- Risultati di misure sperimentali
- Una nuova formulazione per stimare l'effetto dell'ambiente e la sua possibile riduzione

# **Propagazione del suono negli ambienti confinati**

# Ambiente chiuso: generalità

Un suono generato all'interno di un ambiente chiuso produce un campo acustico che è il risultato della sovrapposizione dell' **onda diretta** e delle **onde riflesse**.

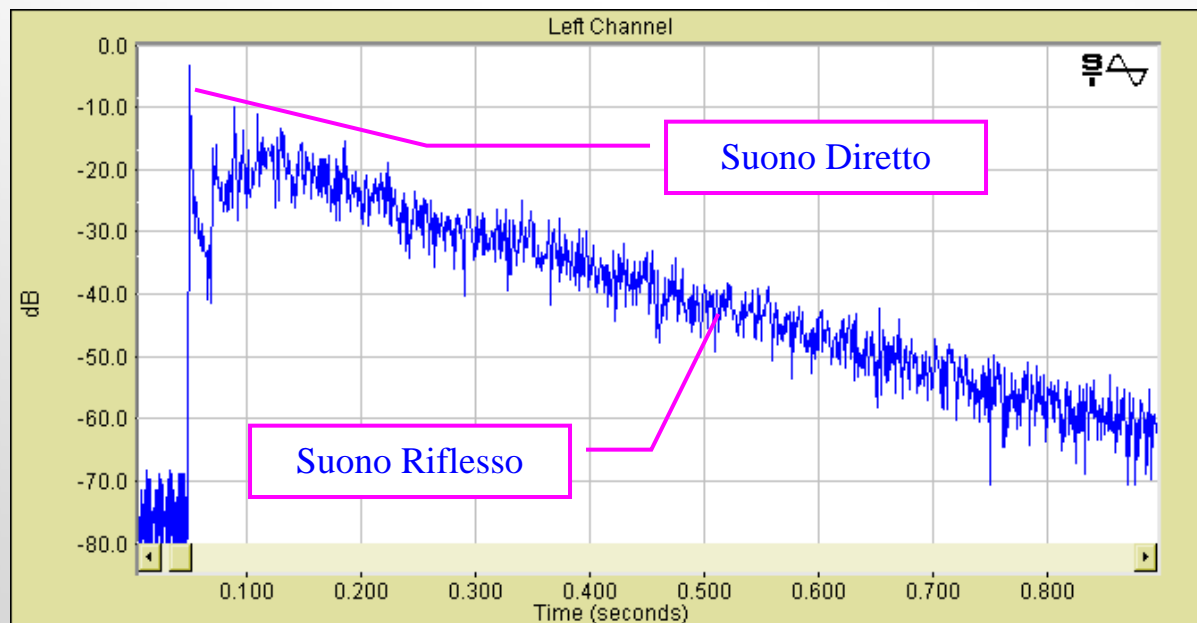
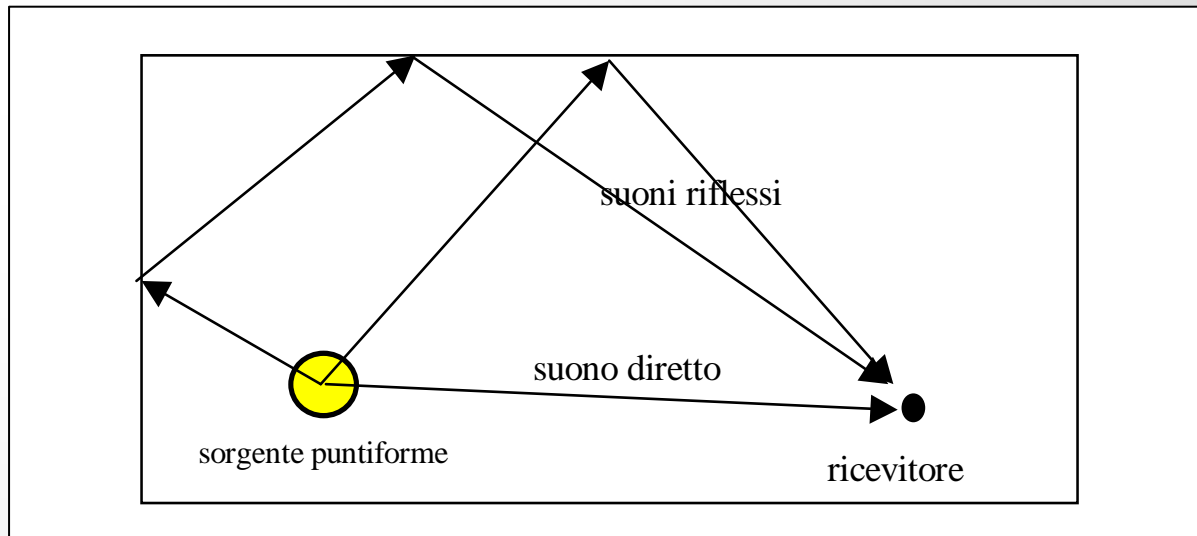


La **onda diretta** proviene dalla sorgente e raggiunge direttamente l'ascoltatore, come se fosse in campo libero;

le **onde riflesse** sono invece prodotte da tutte le riflessioni sulle pareti che delimitano l'ambiente.

La porzione di energia riflessa dalle superfici di confine dipende dal loro comportamento acustico, in generale descritto dal coefficiente di assorbimento  $\alpha$ .

# Meccanismi di propagazione del suono nelle sale



# Campo riverberante & semiriverberante:

All'interno di un ambiente chiuso il campo acustico può essere di tre differenti tipi :

- **campo libero**
- **campo riverberante**
- **campo semiriverberante**

# Campo libero:

Un campo si dice *libero* quando ci troviamo in prossimità della sorgente, dove prevale il contributo dell'energia diretta, rispetto alla quale il contributo di tutte le riflessioni risulta trascurabile.

In queste ipotesi, il campo è lo stesso che si avrebbe all'aperto, e dipende solo dalla distanza dalla sorgente e dalla sua direttività  $Q$ .

Il livello di pressione sonora vale:

$$L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi d^2} \right)$$

In cui  $L_w$  è il livello di potenza sonora della sorgente,  $Q$  la sua direttività, e  $d$  la distanza fra sorgente e ricevitore. In campo libero, il livello sonoro decresce di 6 dB per ogni raddoppio della distanza  $d$ .

# Campo riverberante:

Un campo si dice *riverberante* se il numero delle riflessioni prodotte dalle pareti laterali è tanto elevato da formare un campo acustico uniforme in tutto l'ambiente (anche in prossimità della sorgente).

Si definisce l'**area equivalente di assorbimento acustico**  $A$  ( $m^2$ ) come:

- $$A = \alpha S = \sum_i \alpha_i \cdot S_i \quad (m^2)$$

dove  $\alpha$  è il coeff. di assorbimento medio e  $S$  è la superficie totale interna (pavimento, pareti, soffitto, etc.).

Il **livello di pressione sonora** vale:

$$L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{4}{A} \right)$$

Il campo riverberante è ottenibile nelle cosiddette *camere riverberanti*, dove vengono misurati anche i coefficienti di assorb. dei vari materiali.



# Campo semiriverberante (1):

Un campo si dice *semiriverberante* quando al suo interno esistano contemporaneamente zone di campo libero (in prossimità della sorgente, dove prevale il contributo dell'energia diretta) e zone di campo riverberante (in prossimità delle pareti, dove prevale il campo riflesso). In ambienti di normali dimensioni, si può ipotizzare che il campo acustico sia *semiriverberante*.

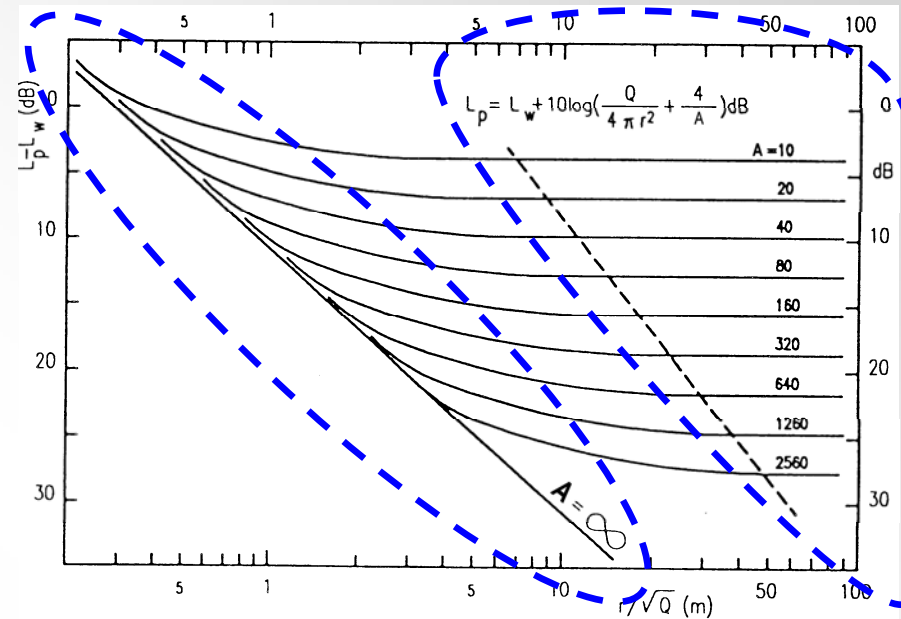
**Il livello di pressione sonora** vale:

$$L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi d^2} + \frac{4}{A} \right)$$

In presenza di campo acustico semiriverberante, la densità di energia sonora in un punto dell'ambiente è pertanto data dalla somma del campo acustico diretto e di quello riflesso.

# Campo semiriverberante (2):

- la retta ( $A = \infty$ ) rappresenta il caso limite di campo libero (6 dB per raddoppio della distanza  $d$ )
- la linea tratteggiata ed ombreggiata delimita una zona alla destra della quale il campo acustico è praticamente riverberante.



Riduzione del livello sonoro nell'ambiente attraverso un trattamento acustico delle pareti:

- *vicino alla sorgente*, l'attenuazione sarà molto piccola anche aumentando notevolmente il valore di  $R$ ;
- *lontano dalla sorgente*, (campo acustico prevalentemente riverberante) la riduzione di livello sonoro potrà essere significativa.

# Distanza Critica

Livello sonoro in funzione della distanza dalla sorgente



Distanza critica, alla quale il suono diretto e riflesso sono uguali

# Distanza Critica

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

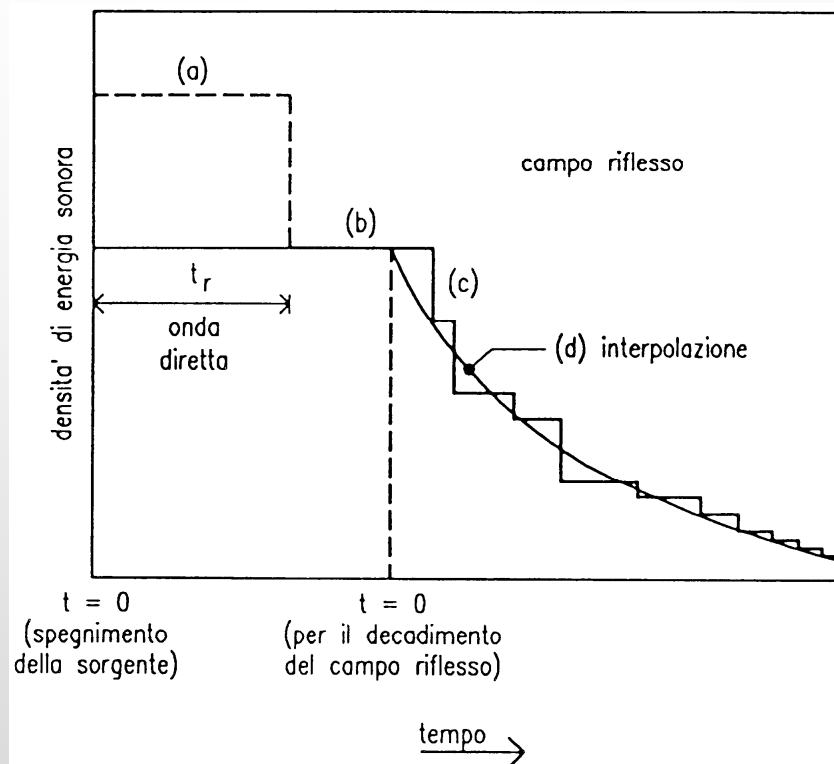
Suono diretto

Suono riflesso

$$\frac{Q}{4\pi d^2} = \frac{4}{\alpha \cdot S} \quad d_{cr} = \sqrt{\frac{Q \cdot \alpha \cdot S}{16 \cdot \pi}}$$

# Tempo di riverbero (1):

Si consideri un ambiente contenente una sorgente sonora attiva, si interrompa improvvisamente l'emissione di energia sonora. Si definisce **tempo di riverberazione**  $TR$  (s) di un ambiente, il tempo necessario affinché la densità di energia sonora diminuisca di un milionesimo (60 dB) rispetto al valore che aveva prima dello spegnimento della sorgente.



## Tempo di riverbero (2):

Se l'ambiente è perfettamente riverberante allora il valore del tempo di riverberazione è lo stesso in tutti i punti e vale:

$$\bullet \quad TR = 0.16 \cdot \frac{V}{\sum_i (\alpha_i \cdot S_i)} \quad (\text{s})$$

dove  $V$  è il volume dell'ambiente. Tale relazione è nota come “**formula di Sabine**”.

Attraverso la misura del tempo di riverberazione, risulta possibile determinare:

$$\bullet \quad A = \alpha S \quad \text{area equivalente di assorbimento acustico}$$

# La formula di Sabine

$$T_{60} = \frac{0.16 \cdot V}{\sum \alpha_i \cdot S_i}$$

- Sostituendo nella formula della distanza critica:

$$d_{cr} = \sqrt{\frac{Q}{16 \cdot \pi} \cdot \frac{0.16 \cdot V}{T_{60}}} = \sqrt{\frac{Q}{100 \pi} \cdot \frac{V}{T_{60}}}$$

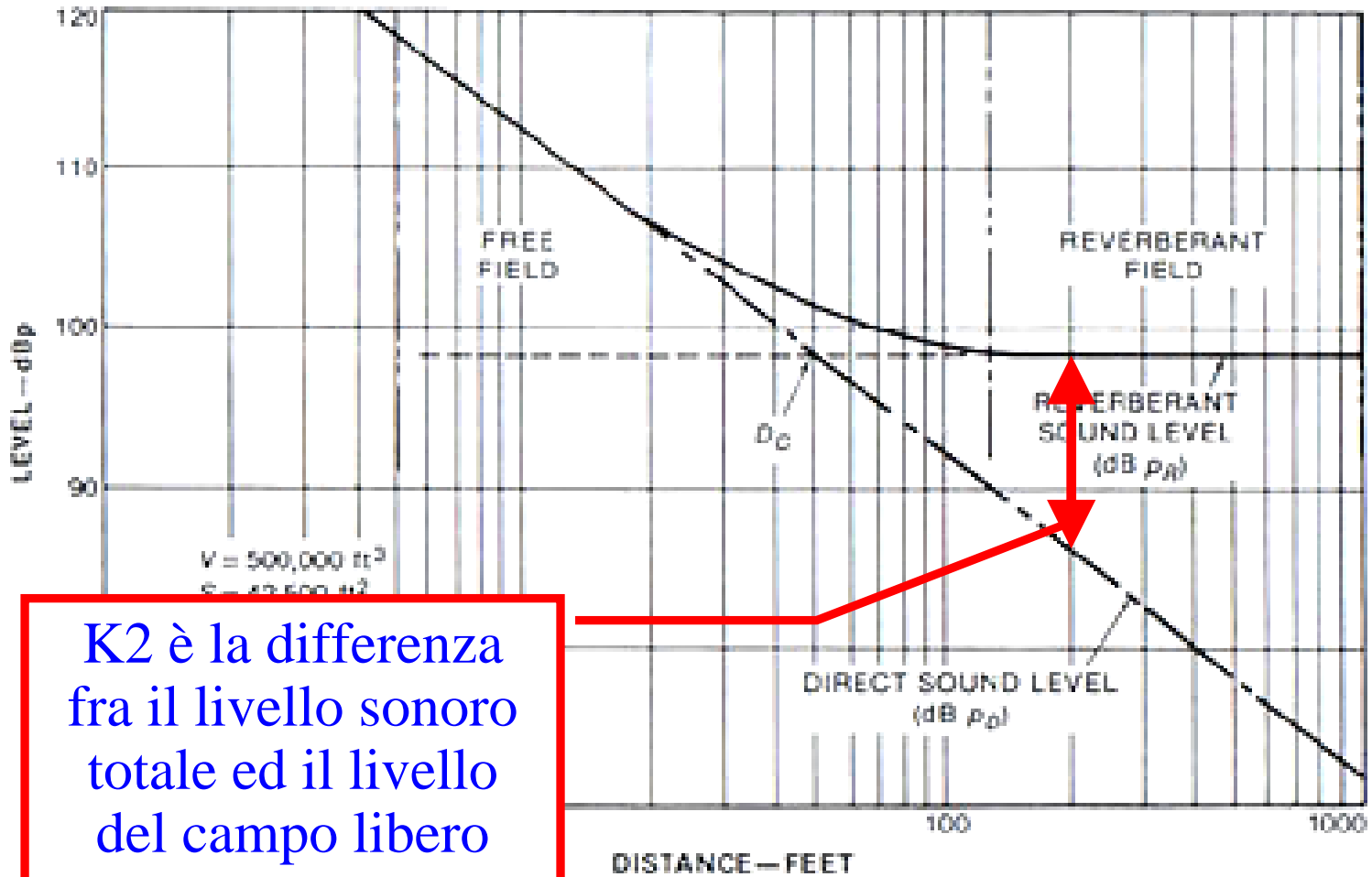
# **Il Fattore di Correzione Ambientale**

## **$K_2$**



# Fattore Correzione Ambientale $K_2$

Livello sonoro in funzione della distanza dalla sorgente



$K_2$  è la differenza fra il livello sonoro totale ed il livello del campo libero

# Fattore Correzione Ambientale $K_2$

Calcolando la differenza fra i livelli sonori forniti dalle formule del campo semiriverberante e del campo libero otteniamo:

$$K_2 = 10 \cdot \lg \left[ \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot d^2} + \frac{4}{A} \right] - 10 \cdot \lg \left[ \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \right]$$

Area della superficie di involuppo  
attorno alla sorgente =  $2\pi d^2$

$$K_2 = 10 \cdot \lg \left[ 1 + \frac{4 \cdot 4 \cdot \pi \cdot d^2}{Q \cdot A} \right] = 10 \cdot \lg \left[ 1 + \frac{4 \cdot S'}{A} \right] = 10 \cdot \lg \left[ 1 + \frac{4 \cdot T_{60} \cdot S'}{0.16 \cdot V} \right]$$

$Q=2$  (sorg. su piano riflettente)

Questa formula fornisce il cosiddetto “ $K_2$  teorico Sabiniano”

# **Risultati di misure sperimentali**

# Tipici ambienti da industria del packaging

Si tratta di capannoni molto vasti e relativamente bassi



# Tipici ambienti da industria del packaging

Si tratta di capannoni molto vasti e relativamente bassi



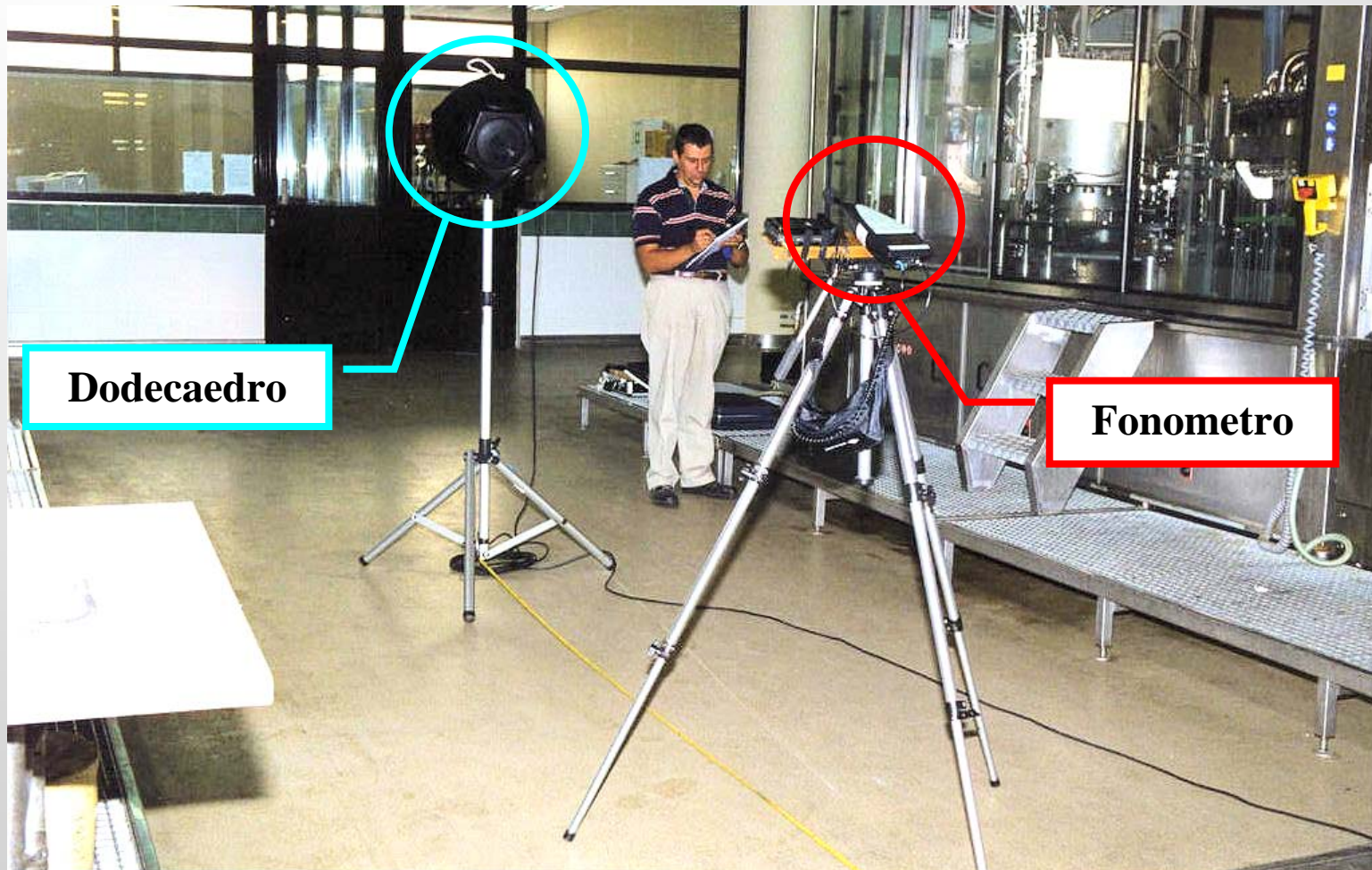
# Tipici ambienti da industria del packaging

Si tratta di capannoni molto vasti e relativamente bassi



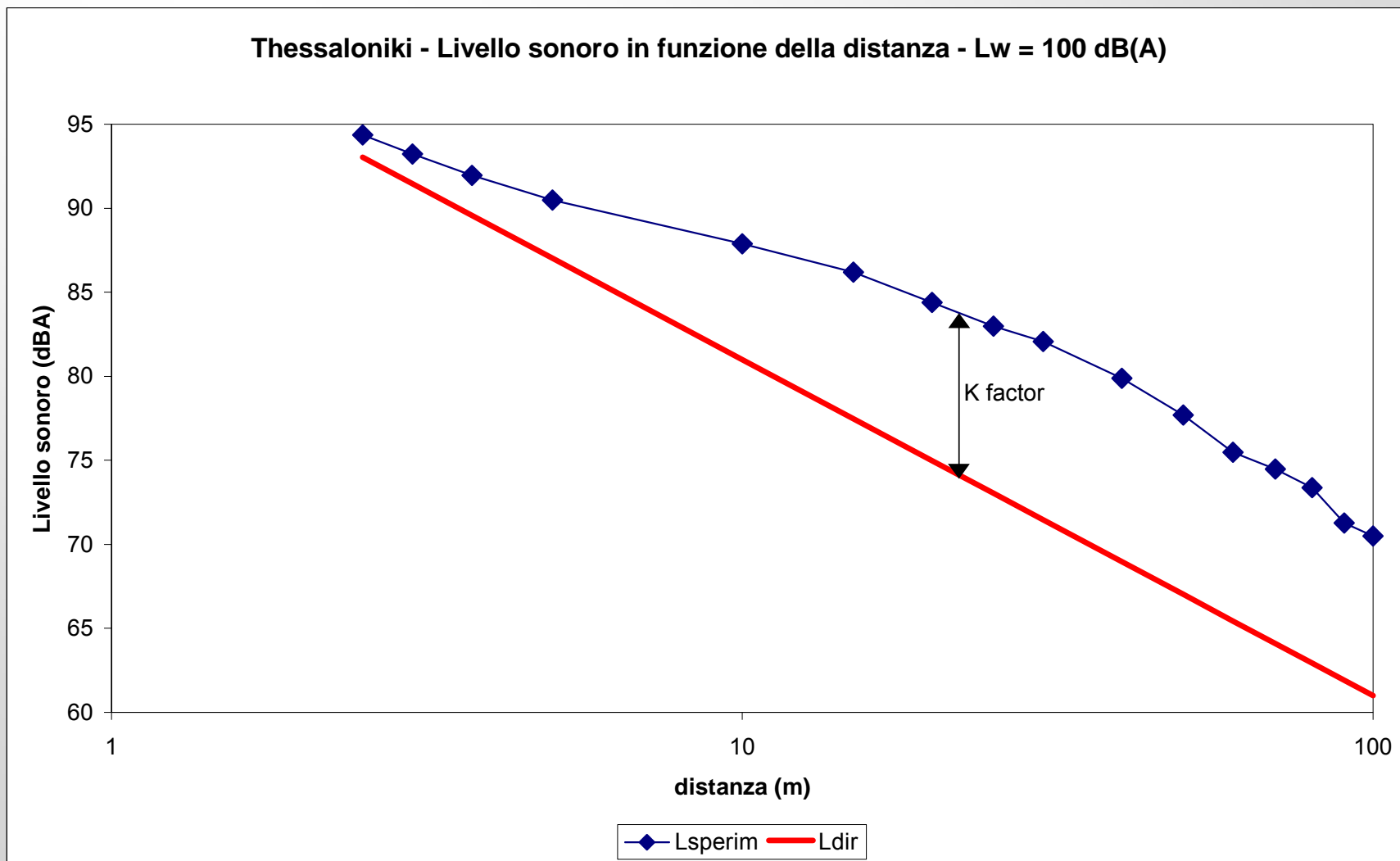
# Misura del livello sonoro a varie distanze

Viene impiegata una sorgente artificiale omnidirezionale ( $Q=1$ , dodecaedro) per misurare il livello sonoro al crescere della distanza  $d$



# Misura del livello sonoro a varie distanze

Il diagramma sperimentale che si ottiene è di questo tipo

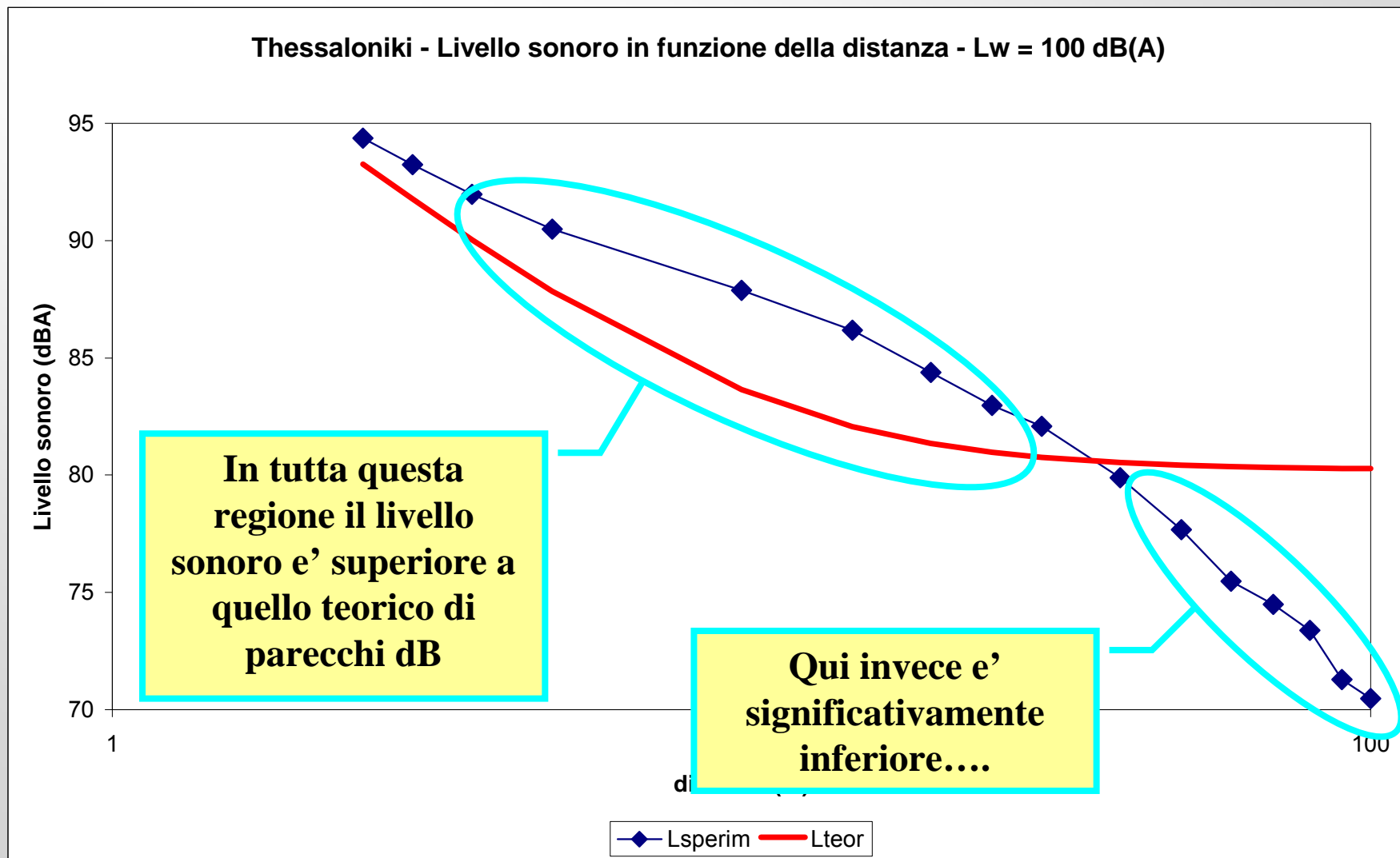




# Misura del livello sonoro a varie distanze

Il confronto con quello teorico mostra che:

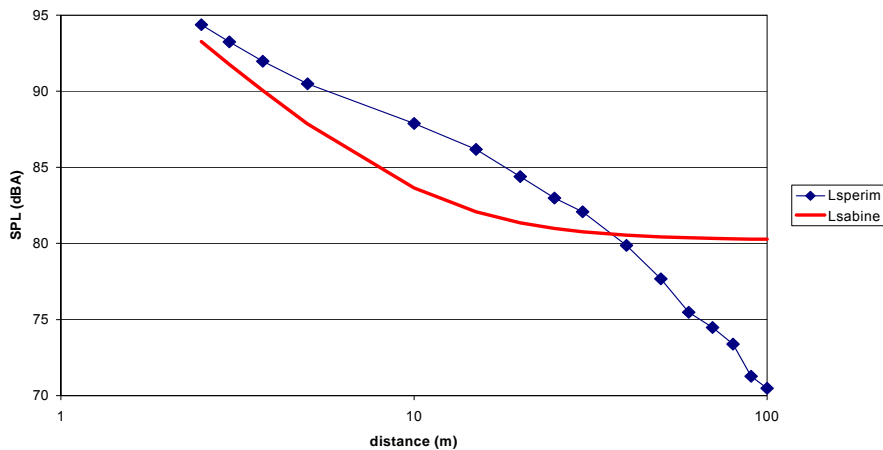
Thessaloniki - Livello sonoro in funzione della distanza -  $L_w = 100$  dB(A)



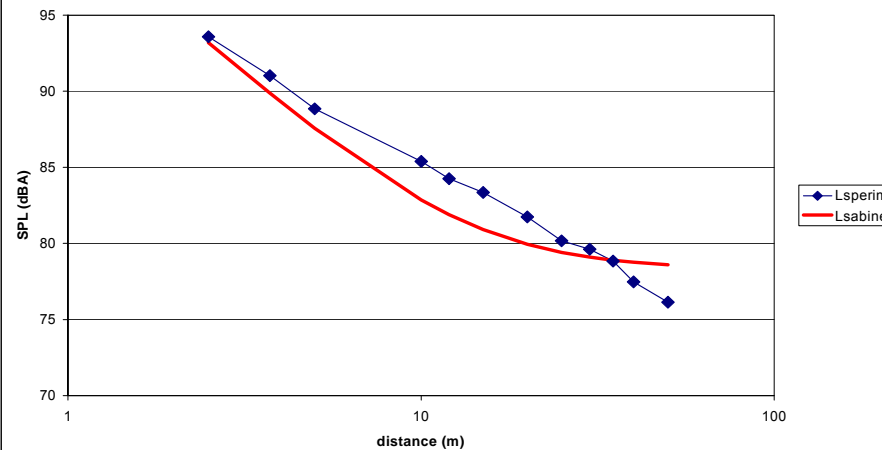
# Misura del livello sonoro a varie distanze

## Misure in altri capannoni

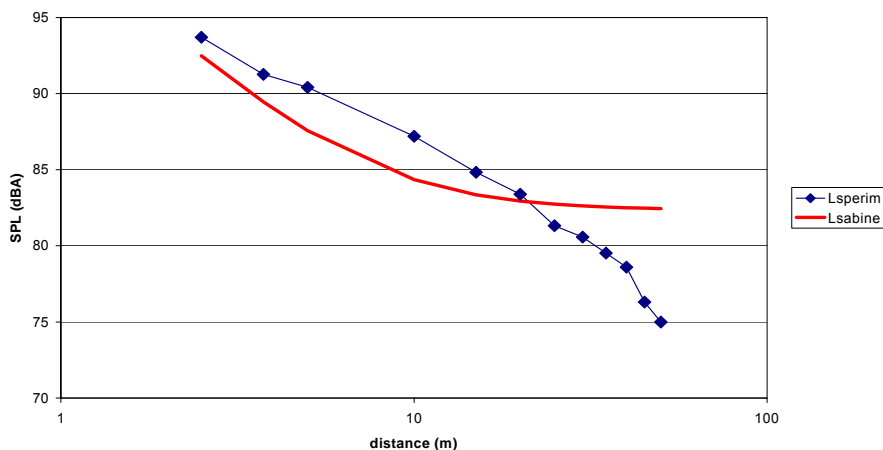
Thessaloniki - SPL decay with distance



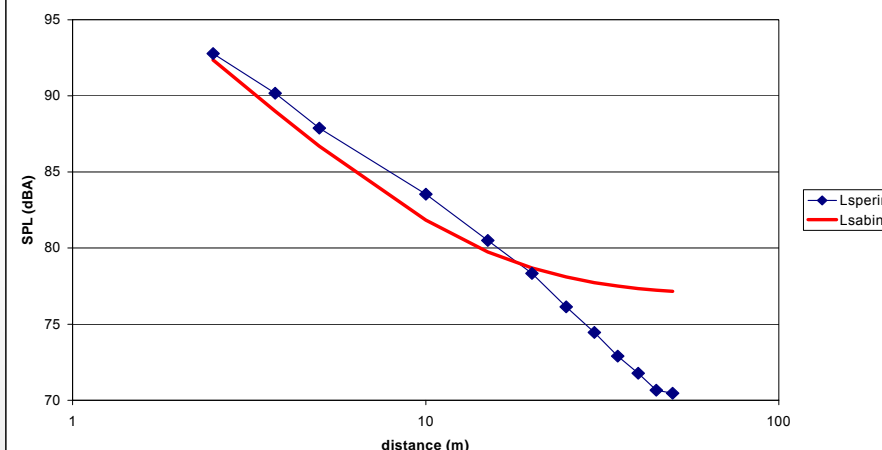
Pelfort - SPL decay with distance



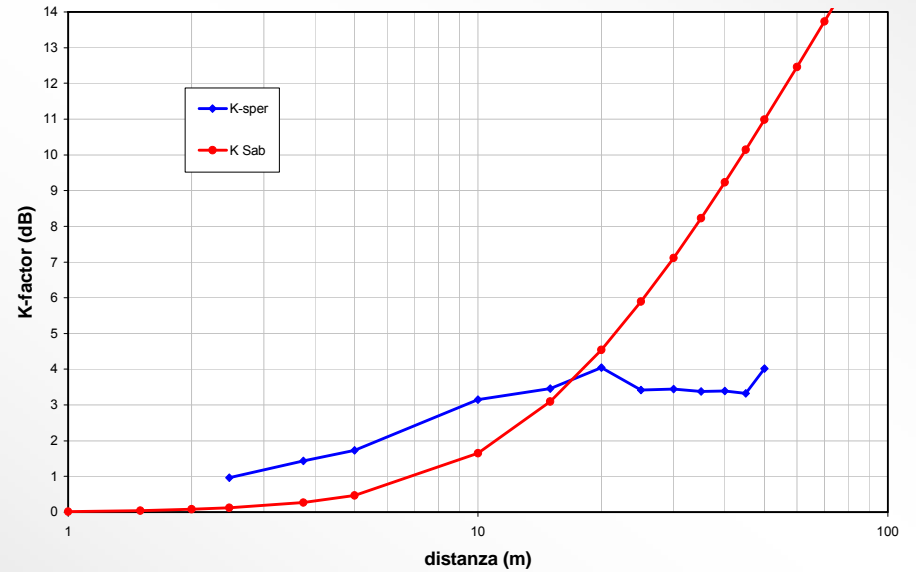
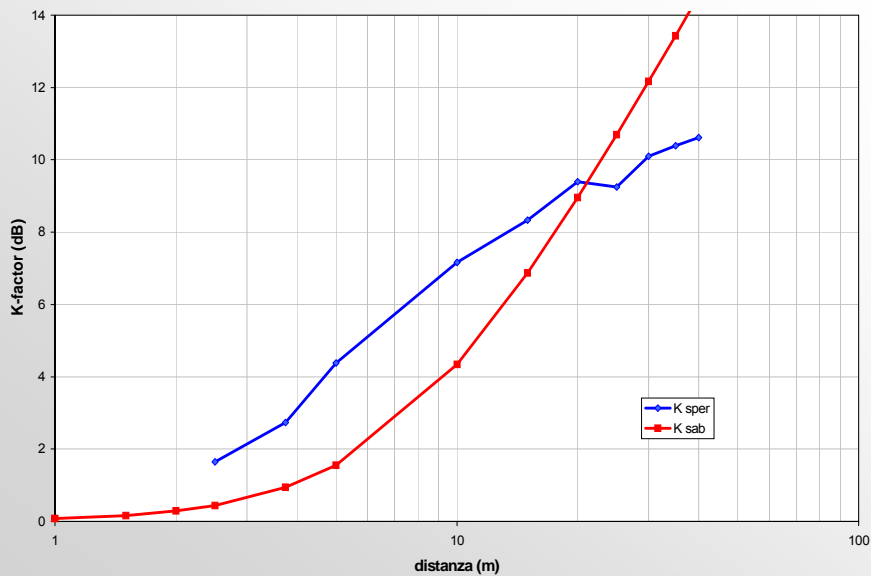
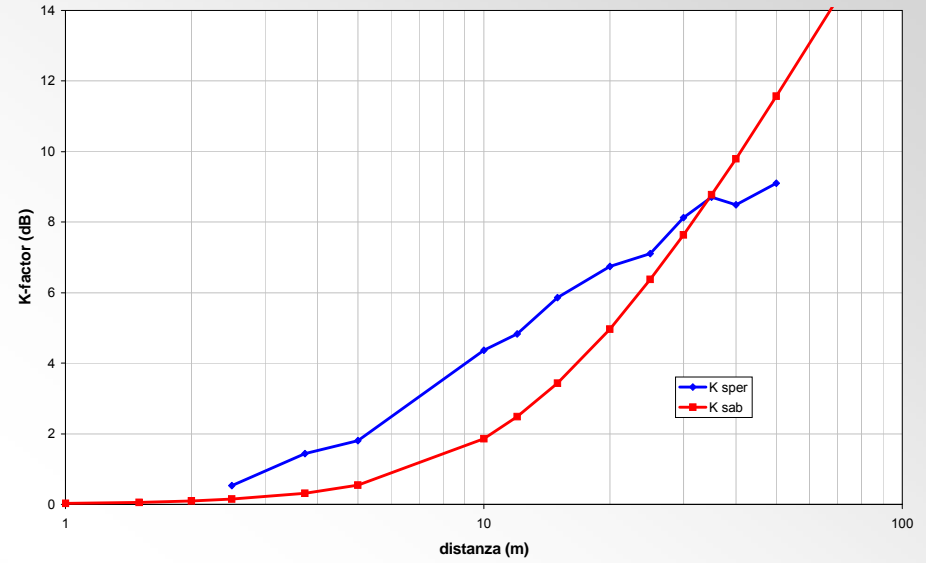
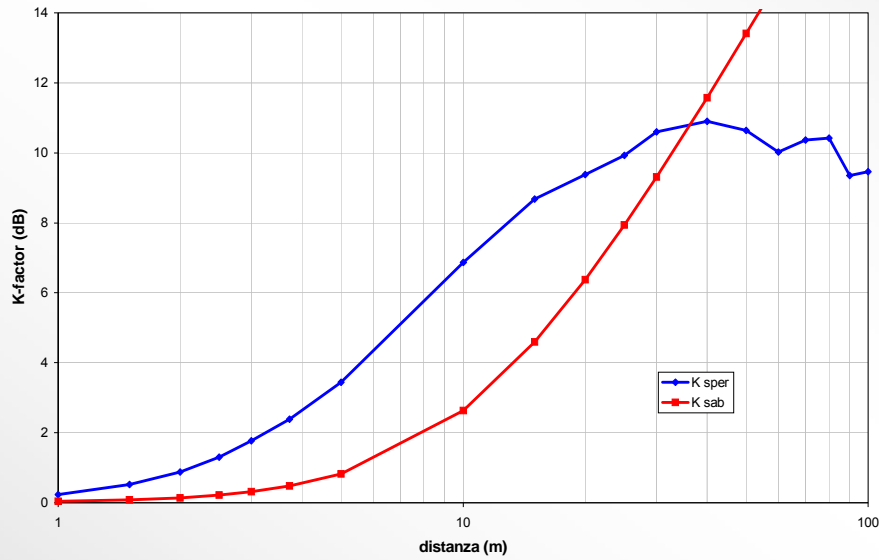
Patrasso - SPL decay with distance



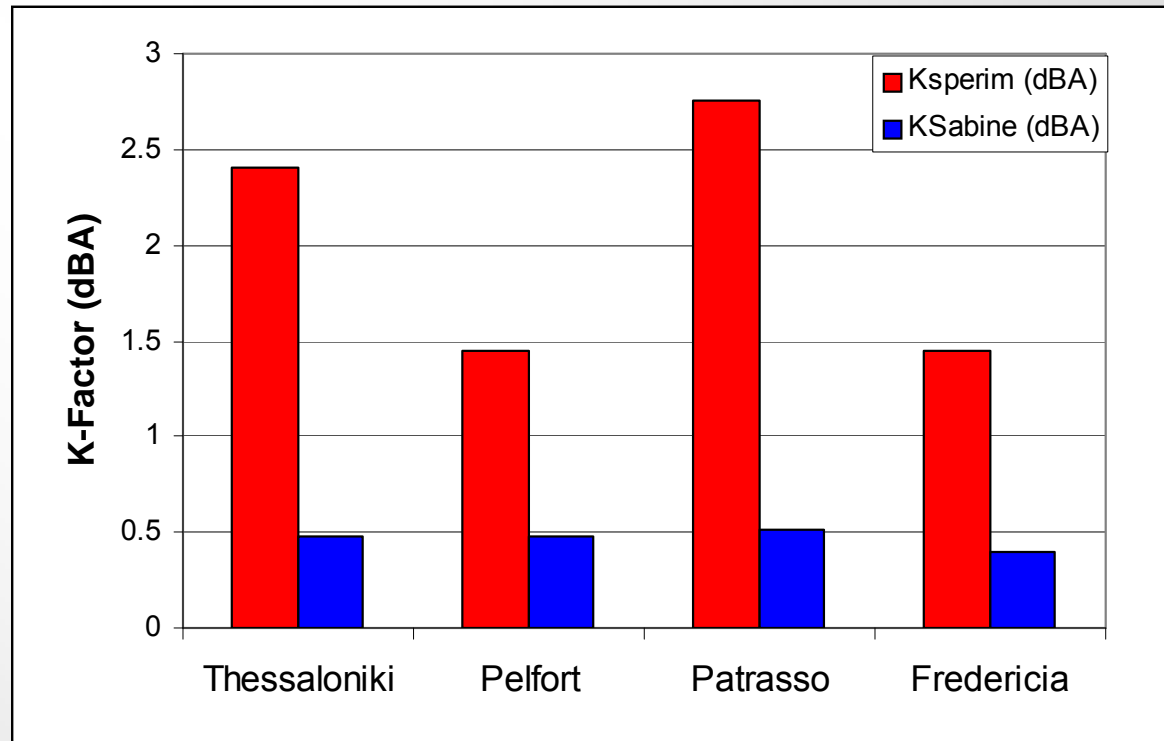
Fredericia - SPL decay with distance



# $K_2$ in funzione della distanza



# $K_2$ al posto operatore (superf. S')



Nome	V (m <sup>3</sup> )	h (m)	T <sub>med</sub> (s)	K <sub>sperim</sub> (dBA)	K <sub>Sabine</sub> (dBA)
<b>Thessaloniki</b>	48836	8.3	2.60	2.40	0.48
<b>Pelfort</b>	72000	11.92	2.45	1.45	0.48
<b>Patrasso</b>	32000	8.0	3.10	2.75	0.51
<b>Fredericia</b>	27575	7.62	0.81	1.45	0.40

# Fatti Accertati

- I capannoni per il packaging hanno un “effetto ambientale” molto maggiore di quello previsto dalle formule teoriche, anche a brevissima distanza dalle sorgenti sonore
- Questo spesso non viene riconosciuto dal committente, che contesta le macchine in quanto apparentemente troppo rumorose (ed invece e' colpa del SUO ambiente)
- Solo una misura diretta del fattore di correzione ambientale consente di quantificare questo effetto
- In presenza di valori elevati di  $K_2$ , ci si può attendere una riduzione cospicua di livello sonoro grazie ad un trattamento ambientale di tipo fonoassorbente

**Misura sperimentale diretta di  $K_2$**

# Tecniche di misura

- Il metodo di elezione consiste nel misurare due volte la potenza sonora di una macchina per il packaging, impiegando anzitutto il metodo “classico” (pressione sonora, mediante ISO 3744 o 3746) e senza applicare alcun  $K_2$
- La misura viene poi ripetuta con il metodo intensimetrico (ISO 9614/3), che elimina automaticamente  $K_2$  dal risultato
- Solo una misura diretta del fattore di correzione ambientale consente di quantificare questo effetto
- La differenza fra i due livelli di potenza così misurati fornisce il  $K_2$  sulla superficie di misura  $S'$  (solitamente ad 1m dalla macchina, quindi coincidente con la misura al posto operatore).

# Tecniche di misura

- In alternativa, si può operare la misura con una sorgente sonora artificiale, di cui sia già nota la potenza sonora (da misure intensimetriche o da test in laboratorio), su cui viene applicata una misurazione in pressione secondo ISO 3744/3746, utilizzando una superficie di involuppo  $S'$  corrispondente a quella della macchina da packaging reale
- La tecnica della sorgente artificiale ha il vantaggio di poter essere impiegata anche prima dell'installazione della macchina in linea.
- Non è invece possibile stimare il valore di  $K_2$  utilizzando le formule contenute nelle norme ISO 3744 – ISO 3746, in quanto le stesse sono basate sulla formula di Sabine, che in questi ambienti non funziona.



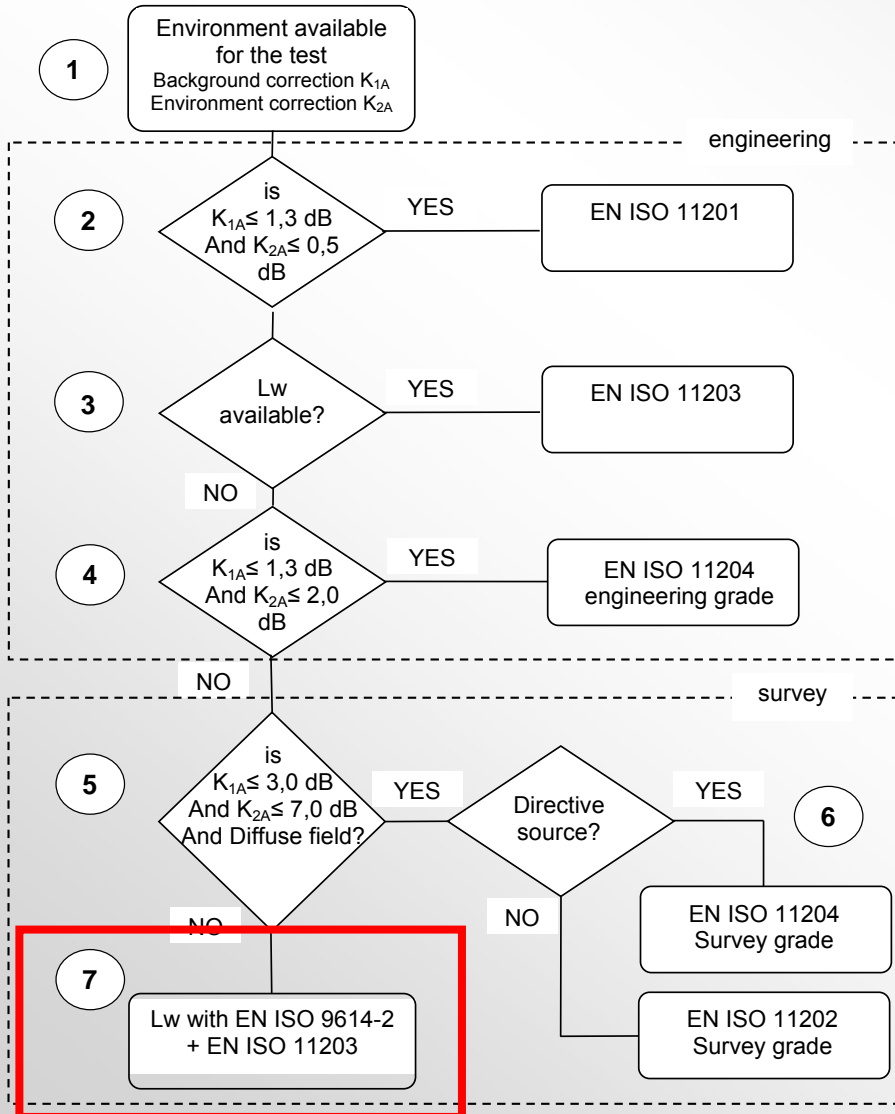
# La norma EN 415-9:2009

## Safety of packaging machines. Noise measurement methods for packaging machines, packaging lines and associated equipment, grade of accuracy 2 and 3

- Questa norma riconosce per la prima volta le peculiarità acustiche degli ambienti per le macchine da “packaging”
- Essa consente il tradizionale calcolo di  $K_2$  con le relazioni di Sabine nel caso di ambienti compatti
- Prevede viceversa la misura sperimentale di  $K_2$  con il metodo della sorgente artificiale in caso di locali “bassi e vasti”
- Ed in ogni caso la distanza sorgente-ricevitore viene definita come:

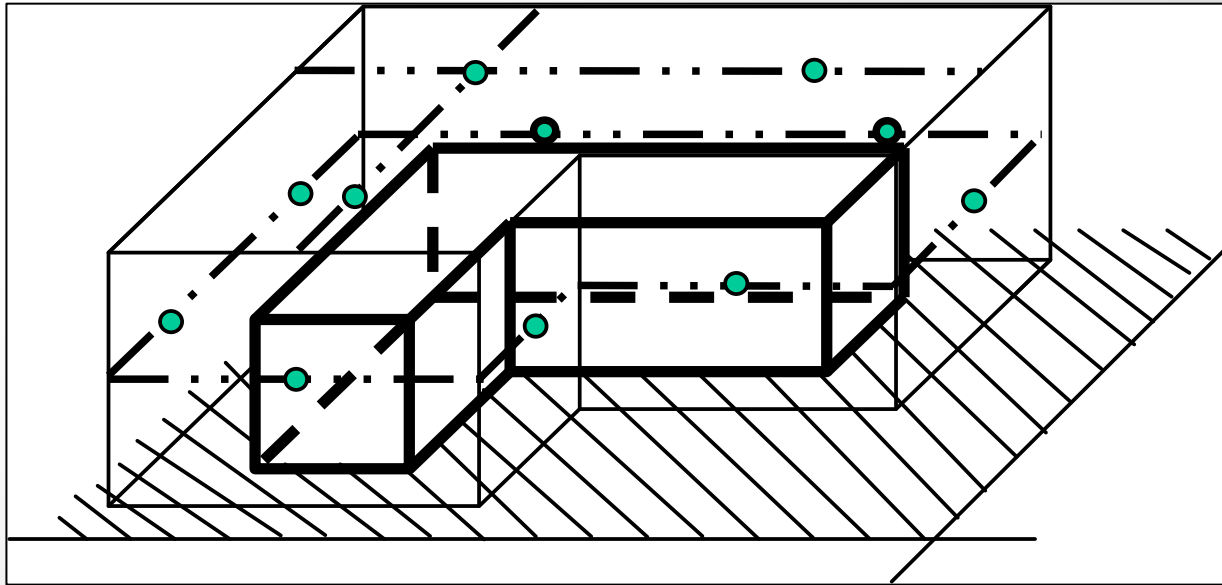
$$d = \sqrt{\frac{S'}{2\pi}} \quad \text{e porta dunque a valori di } K_2 \text{ molto + grandi}$$

# La norma EN 415-9:2009



- In ambienti industriali bassi e vasti, (quindi campo NON diffuso) con valore di  $K_2$  elevato, la metodica da utilizzare è la misura intensimetrica di  $L_w$ , seguita dalla EN ISO 11203 per la stima del  $L_p$  al posto operatore

# La norma EN 415-9:2009



- In ogni caso, la superficie di misura  $S'$  è un involucro “stretto” della sagoma della macchina, ad 1m di distanza dalla stessa. Questo differisce sia dalla norme della serie 11200, sia da quelle per la misura del  $L_w$  (serie ISO 3740)
- E la distanza effettiva sorgente-posto operatore è definita sulla base di tale sup. di involucro:

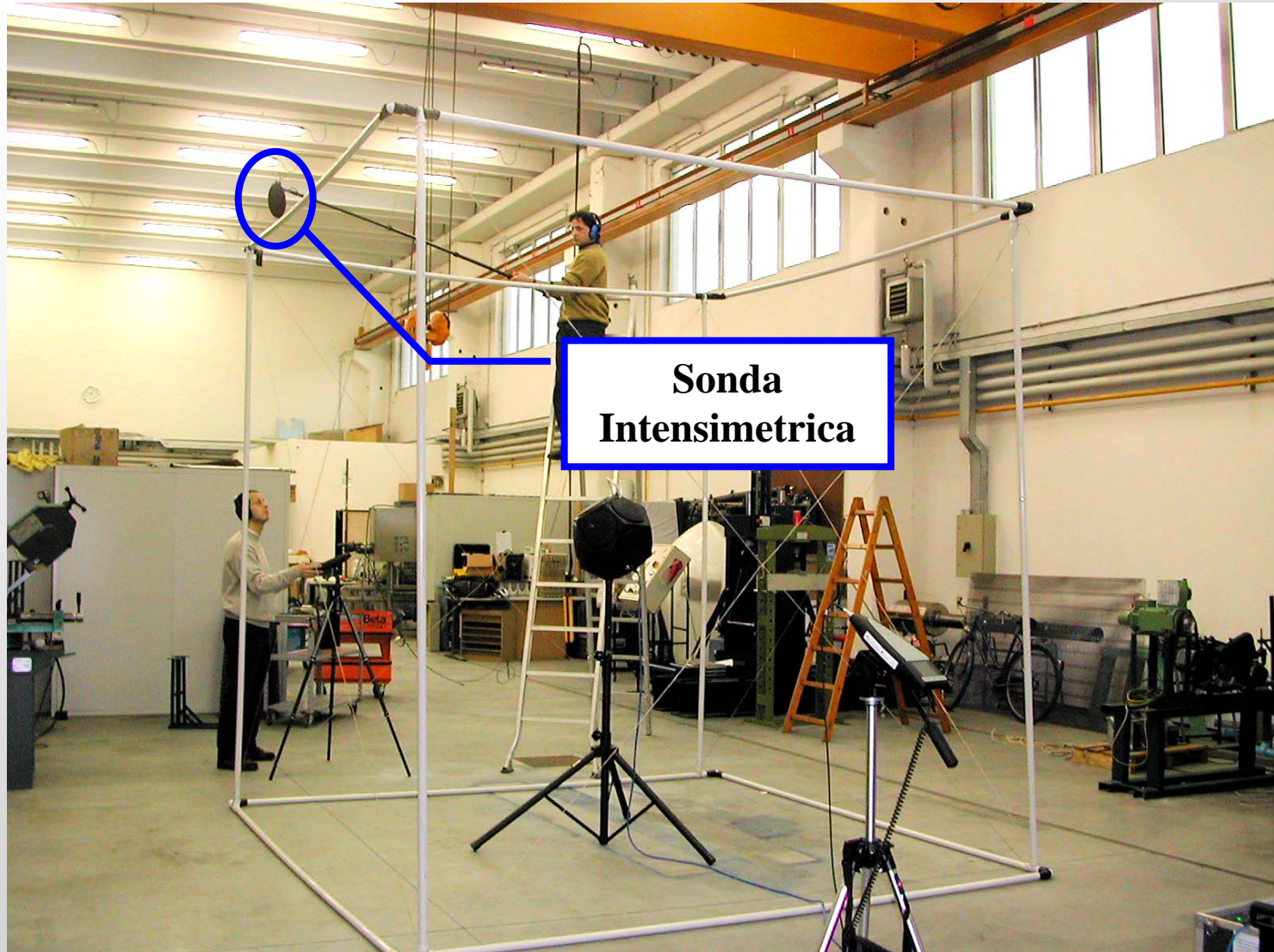
$$d = \sqrt{\frac{S'}{2\pi}}$$

# Esempio 1 – misura intensimetrica su una macchina



**Sonda  
Intensimetrica**

# Esempio 2 – misura con superficie di involuppo attorno a sorg. artificiale



**Sonda  
Intensimetrica**

# **Stima di $K_2$ con una nuova formula semiempirica**

# La formula di Farina/Fornari

- Dall'analisi di decine di misurazioni sperimentali di  $K_2$  effettuate in linee di packaging è emersa la possibilità di “fittare” i dati con la seguente formula:

$$K_{\text{teor}} = 10 \cdot \lg \left[ 1 + \frac{4 \cdot T \cdot 2 \cdot \pi \cdot d^2}{0.16 \cdot \left( 5.64 \cdot T^{0.7} \cdot H^3 + \frac{1.596}{T^{0.7}} \cdot H \cdot 2 \cdot \pi \cdot d^2 \right)} \right]$$

In cui T e' il tempo di riverberazione, H l'altezza del locale

# La formula di Farina/Fornari

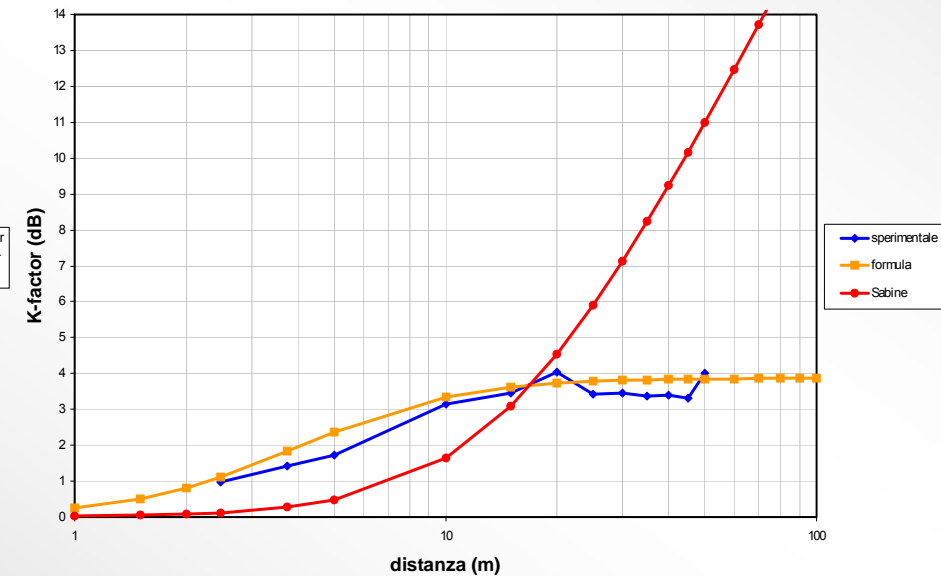
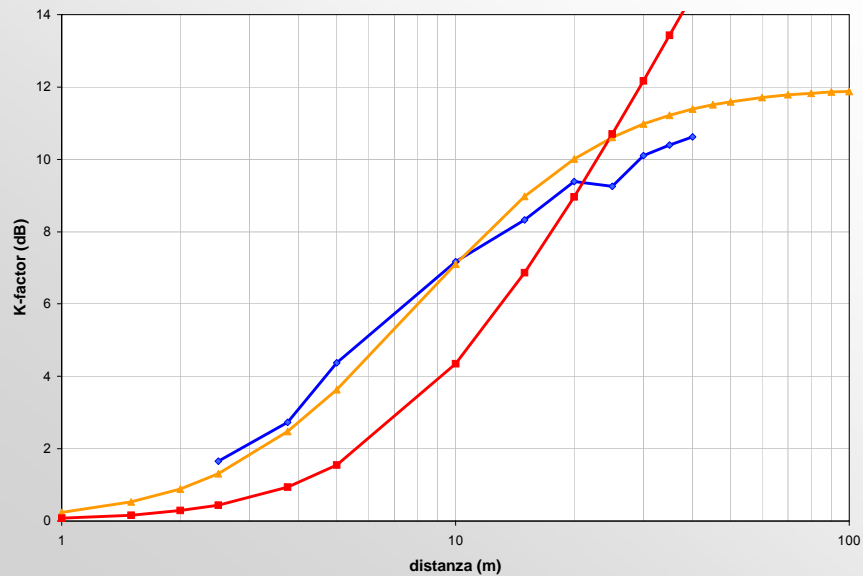
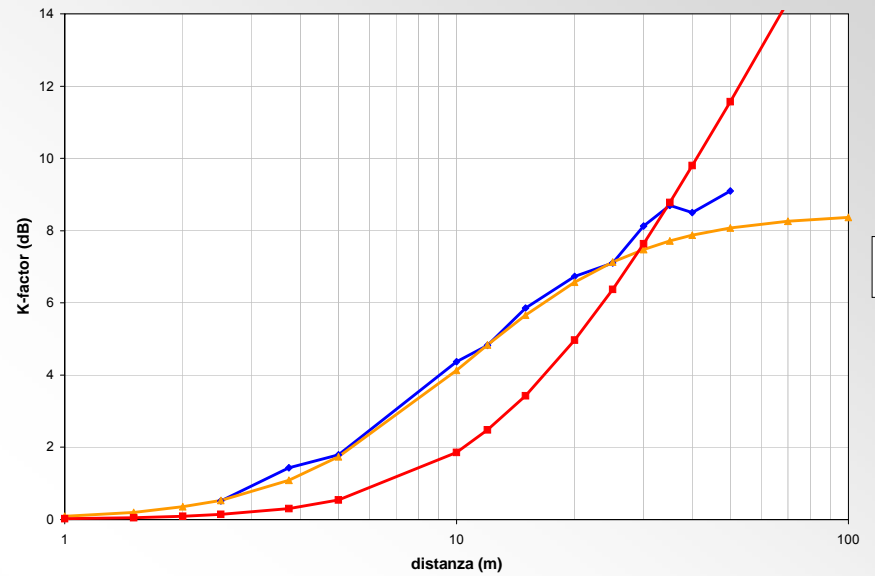
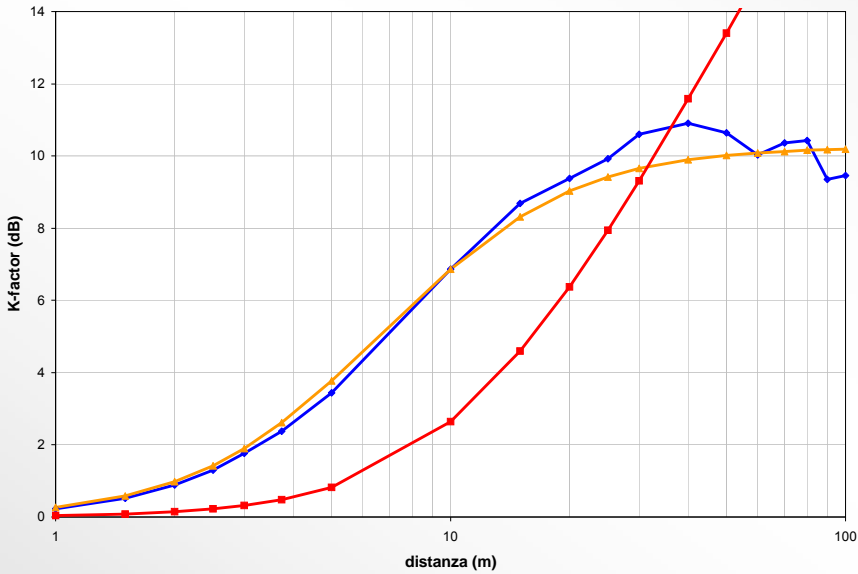
- Dall'analisi di decine di misurazioni sperimentali di  $K_2$  effettuate in linee di packaging è emersa la possibilità di “fittare” i dati con la seguente formula:

$$K_{\text{teor}} = 10 \cdot \lg \left[ 1 + \frac{4 \cdot T \cdot S'}{0.16 \cdot \left( 5.64 \cdot T^{0.7} \cdot H^3 + \frac{1.596}{T^{0.7}} \cdot H \cdot S' \right)} \right]$$

In cui  $T$  è il tempo di riverberazione,  $H$  l'altezza del locale, ed il termine fra parentesi al denominatore rappresenta di fatto un **“volume apparente”** dell'ambiente basso e vasto



# Verifica di $K_2$ in funzione della distanza



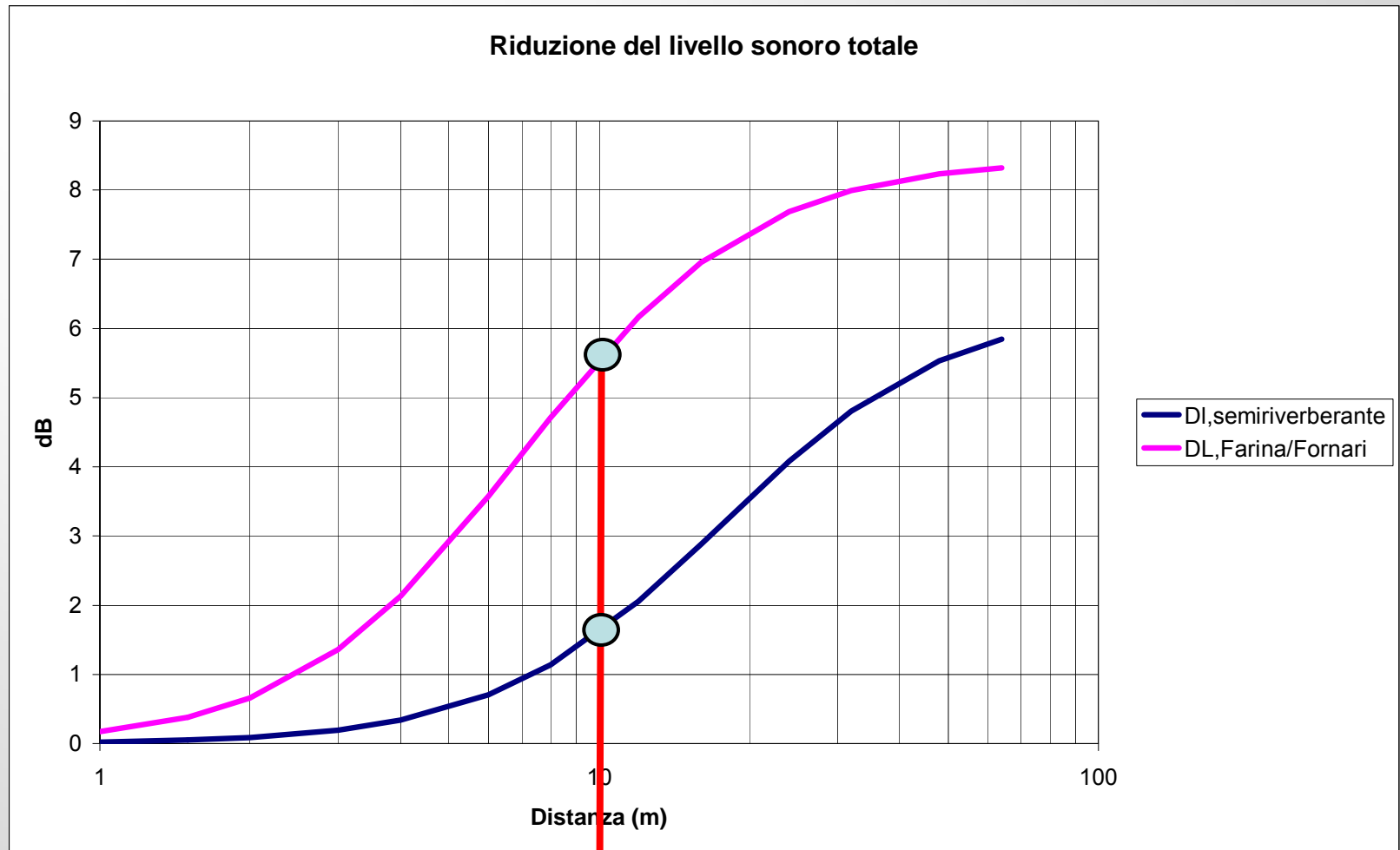
# Stima dell'efficacia di un trattamento ambientale

- La formula di Farina/Fornari consente una facile stima del beneficio ottenibile da un trattamento ambientale
- Si ipotizza un ambiente con queste caratteristiche:

Parametro	Valore	u. di misura
Volume Totale V	70.000	m <sup>3</sup>
Altezza media h	7	m
Tempo di riverbero iniziale	3	s
Tempo di riverbero trattato	0.7	s

- Si calcola ora la differenza fra i valori di  $K_2$  dell'ambiente originale, e dello stesso dopo il trattamento ambientale fonoassorbente
- Il calcolo viene effettuato due volte, con la formula di Sabine e con la formula di Farina/Fornari

# Stima dell'efficacia di un trattamento ambientale



- La formula di Farina/Fornari mostra una efficacia molto maggiore del trattamento fonoassorbente: a 10m sono 5.7 dB(A) di riduzione anziché 1.7 dB(A) previsti dalla formulazione semiriverberante secondo Sabine

# Conclusioni

- L'uso della formulazione di Sabine ha portato in passato a gravi problemi all'industria del packaging
- Oggi però la nuova norma EN 415-9:2009 consente di affrontare correttamente il problema dell'effetto-ambiente
- Sono disponibili ed ormai ampiamente collaudate tecniche di misura diretta del fattore di correzione ambientale
- Oppure si può usare la formula di Farina/Fornari per una stima ragionevolmente accurata di  $K_2$ .
- Emerge così che per la riduzione del rumore nelle linee di packaging si possono ottenere risultati insperati mediante trattamenti ambientali fonoassorbenti

# Ringraziamenti

- La ricerca sulle caratteristiche ambientali degli ambienti per il packaging è stata supportata economicamente e tecnicamente da Simonazzi SpA (oggi SIDEL), grazie al determinante apporto di Giorgio Fornari
- L'attività normativa culminata nell'approvazione della norma EN 415-9:2009 ha avuto successo solo grazie al fattivo apporto del working group italiano costituito presso l'UCIMA, e coordinato dall'infaticabile Mirco Finotto della GD di Bologna