

STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DEL RUMORE IN AMBIENTI INDUSTRIALI BASSI E VASTI

GIORGIO FORNARI

Sesib Food & Beverage Machinery - Via La Spezia 241/a - 43100 Parma - Italia

ANGELO FARINA

Dip. Ing. Industriale - Università di Parma - Via delle Scienze - 43100 Parma - Italia

STUDY ON THE NOISE PROPAGATION IN LOW AND WIDE INDUSTRIAL ENVIRONMENTS

SCOPI DELLO STUDIO

Fase Sperimentale

1) Comprendere il comportamento della parte riverberante dell'energia sonora in ambienti ampi e bassi in relazione alla distanza dalla sorgente di rumore;

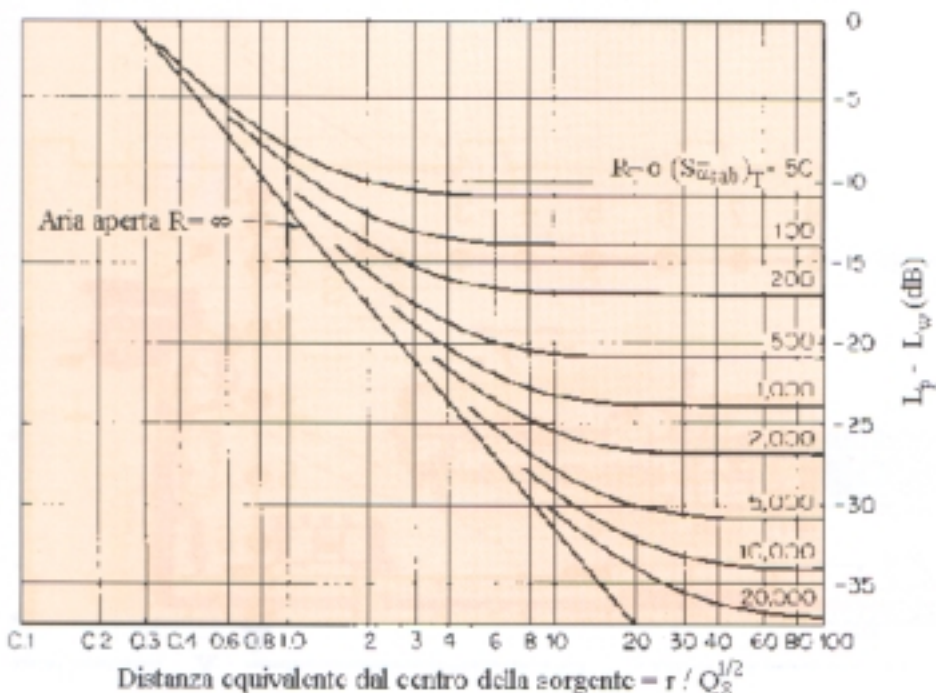
2) Quantificare l'errore che si commette nella stima del fattore di correzione ambientale con l'uso della rela-

zione di Sabine su cui è basata la normativa in vigore (ISO 3744/6).

Fase Teorica

1) Verificare se è possibile eseguire con ragionevole accuratezza la simulazione del campo sonoro entro uno stabilimento basso e largo mediante avanzate tecniche computerizzate.

2) Ricavare una relazione matematica per il calcolo del fattore di correzione ambientale migliore di quella di Sabine.



METODOLOGIA

1) Rilievi strumentali in 4 stabilimenti caratterizzati da valori molto diversi del tempo di riverberazione e da diversi rapporti altezza/larghezza

2) Analisi numerica dei risultati sperimentali mediante le procedure standard previste dalle norme ISO (3382, 3744/6, 9614/2)

3) Verifica del grado di riproducibilità di tali risultati mediante il programma "pyramid tracing" Rass

4) Verifica del grado di riproducibilità di tali risultati mediante una semplice formula empirica per il calcolo del fattore di correzione ambientale K.

TEORIA CLASSICA (SABINE)

Tempo di Riverberazione:

$$T = 0,16 \cdot \frac{V}{\bar{\alpha} \cdot A} \quad (1)$$

Livello sonoro nel campo semi-riverberante:

$$L_p(d) = L_w + 10 \cdot \lg \left[\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot d^2} + \frac{4}{\bar{\alpha} \cdot A} \right] \quad (2)$$

Fattore di correzione ambientale K:

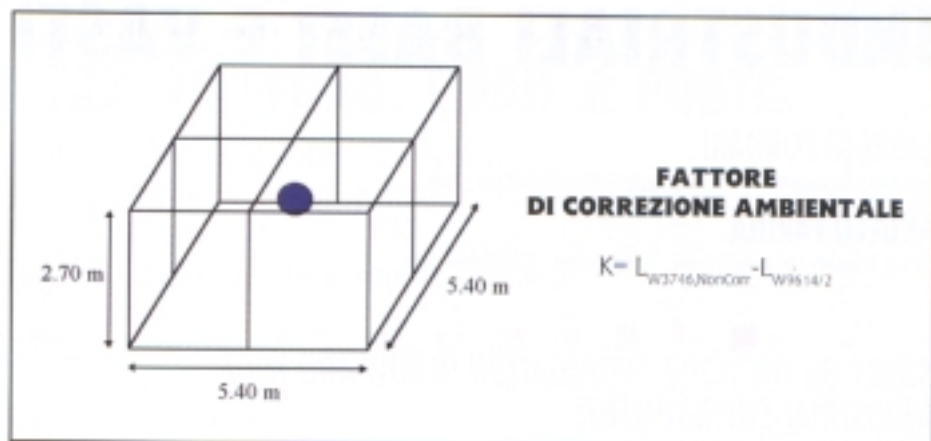
$$K = 10 \cdot \lg \left[1 + \frac{4 \cdot S}{\bar{\alpha} \cdot A} \right] \quad (3)$$

In cui T è il tempo di riverberazione, V il volume dell'ambiente, A la superficie totale delle pareti dello stesso, $\bar{\alpha}$ il coeff. di assorbimento acustico medio, d la distanza del punto di ascolto dal centro acustico della sorgente, ed S la superficie di involuppo utilizzata per la misura del livello di potenza sonora.

Ad ogni distanza, il valore di K rappresenta la differenza fra il livello del campo semi-riverberante e quello del campo libero.

STRUMENTAZIONE USATA NEI RILIEVI

- 1) Analizzatore di Spettro bicanale in tempo reale B&K tipo 2133.
- 2) Analizzatore di spettro portatile in tempo reale B&K tipo 2260.
- 3) Sonda Intensimetrica B&K tipo 3548.
- 4) Alimentatore/preamplificatore microfonico bicanale B&K tipo 5935.
- 5) Cavi di prolunga schermati B&K tipo A00027.
- 6) Sorgente di riferimento omnidirezionale (dodecaedro) Look Line mod. D1.
- 7) Amplificatore di potenza autoalimentato con equalizzatore Look Line mod. A1.
- 8) Supporto estensibile per la sorgente sonora marca Bespeco mod. XT.
- 9) Computer portatile AST Premium P-133 con scheda acquisizione dati SoundBlaster Vibra-16 e software AURORA.
- 10) Calibratore di livello sonoro Larson Davis mod. CA-250.

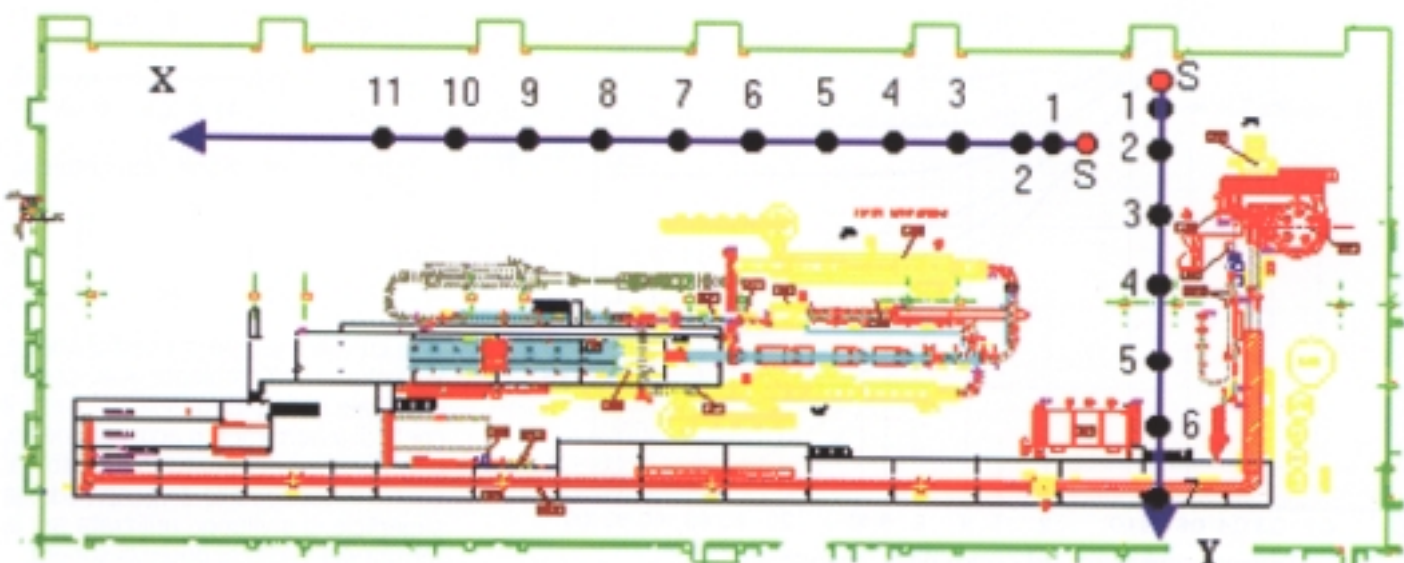
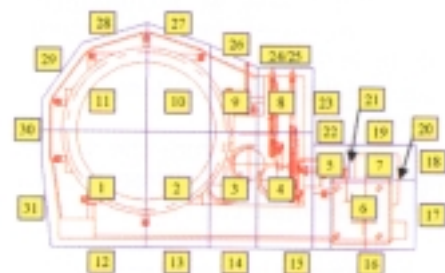


- 11) Calibratore di livello sonoro B&K tipo 4231.

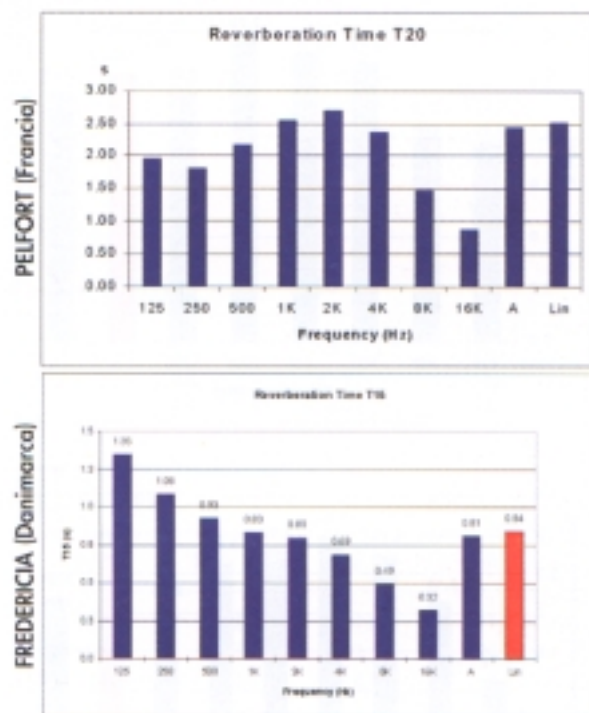
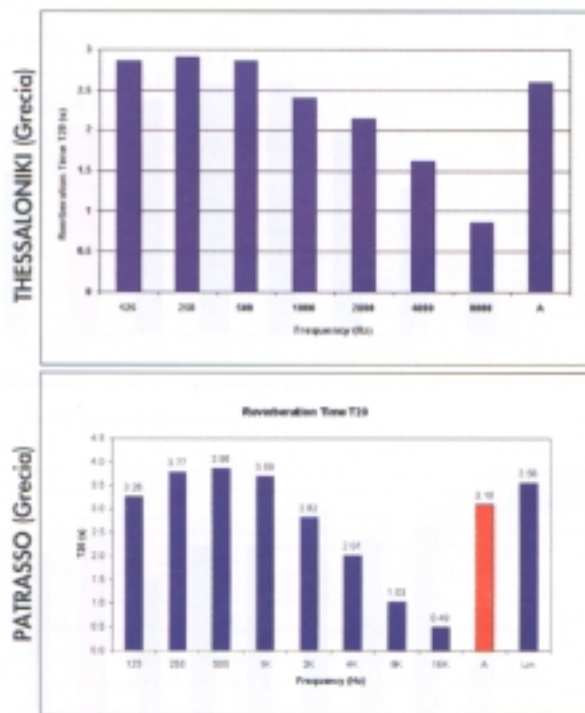
operative del livello di potenza sonora di alcuni macchinari facenti parte dell'impianto di imbottigliamento secondo ISO 3746 e ISO 9614/2.

RILIEVI ESEGUITI

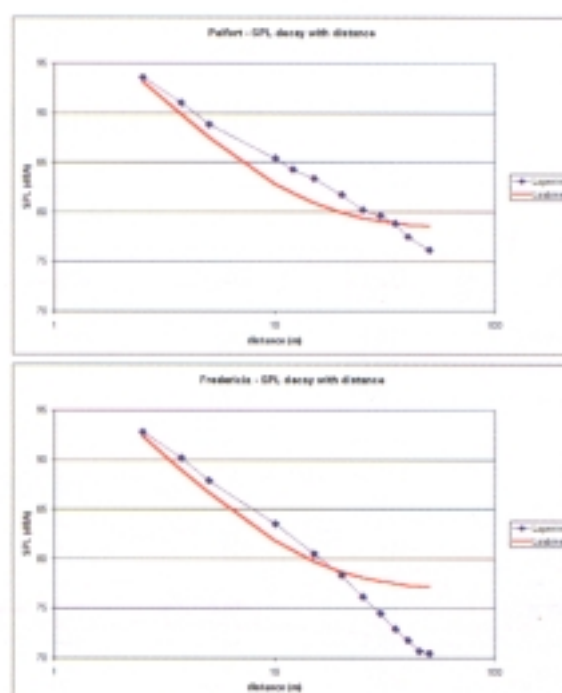
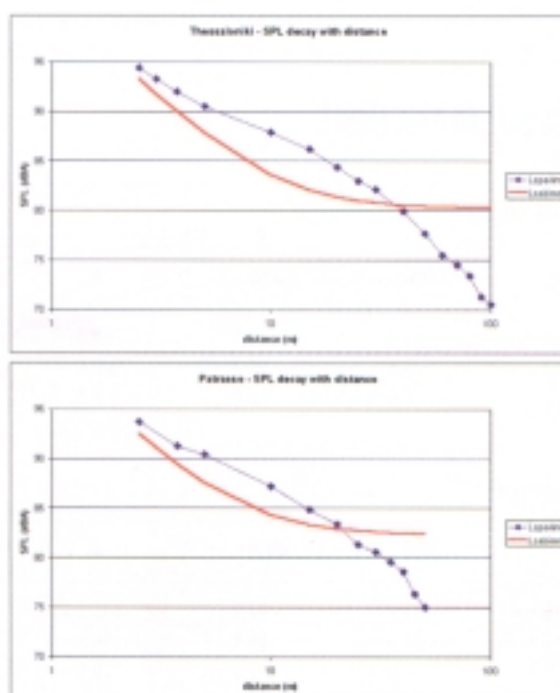
- 1) Rilevazione del tempo di riverbero secondo ISO3382.
- 2) Rilevazione del decadimento con la distanza secondo il progetto di norma UNI U20.00.054.0.
- 3) Rilievo comparativo della potenza sonora di una sorgente di riferimento secondo le norme ISO 3746 ed ISO 9614/2.
- 4) Rilievo simultaneo in condizioni



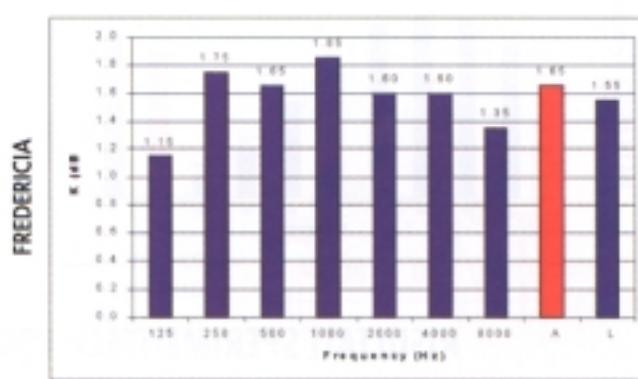
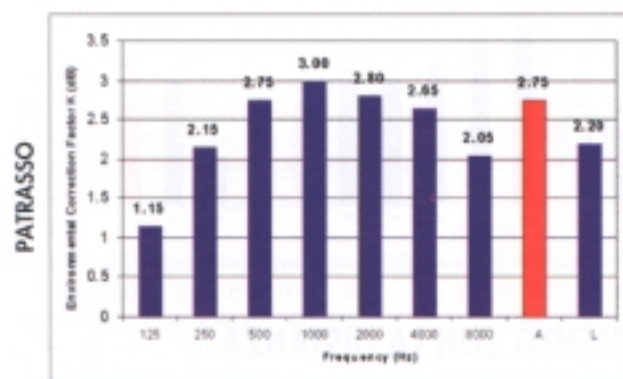
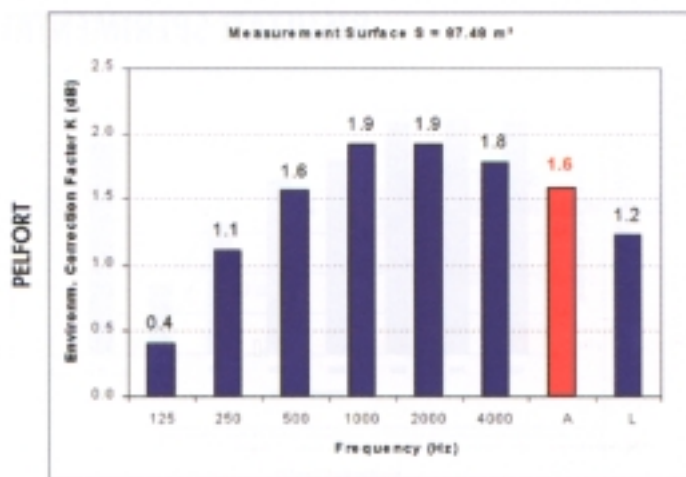
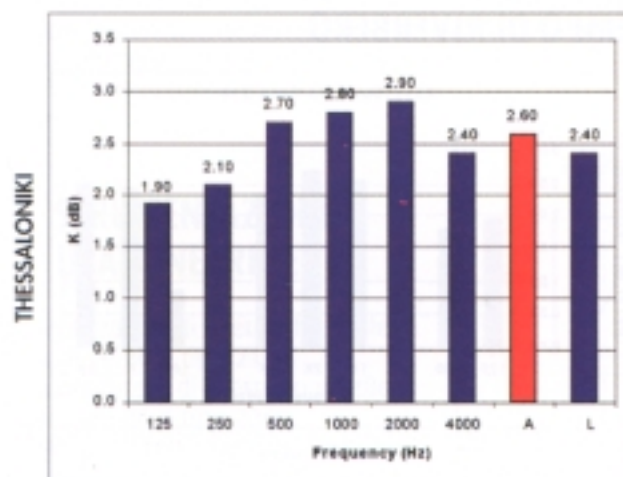
RISULTATI SPERIMENTALI: TEMPO DI RIVERBERO



RISULTATI SPERIMENTALI: DECADIMENTO CON LA DISTANZA



IMBOTTIGLIAMENTO



RILIEVI ESEGUITI: LW DELLE MACCHINE

Imbottigliatrice Eurostar (Thessaloniki)								
Frequency (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	A	L
Lw - ISO 3746 N.C.	98,3	100,7	101,8	102,4	103,6	101,0	108,3	109,5
Lw - ISO 9614/2	93,4	93,6	95,1	94,3	94,6	94,2	100,6	104,0
Diff. Lwp-Lwi (K ₁₀₀₁)	4,9	7,1	6,7	8,2	9,0	6,8	7,7	5,4

Ispettore Kronos (Thessaloniki)								
Frequency (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	A	L
Lw - ISO 3746 N.C.	95,3	98,0	98,2	99,8	100,5	97,3	105,3	106,5
Lw - ISO 9614/2	90,2	90,9	89,9	90,9	91,4	89,4	96,8	100,3
Diff. Lwp-Lwi (K ₁₀₀₁)	5,1	7,0	8,4	8,9	9,0	7,9	8,5	6,2

Bancale Senza Pressione Simonazzi (Thessaloniki)

Frequency (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	A	L
Lw - ISO 3746 N.C.	86,3	88,6	90,6	92,5	95,1	95,3	100,3	100,4
Lw - ISO 9614/2	78,8	78,8	80,8	82,4	89,1	92,9	95,8	95,9
Diff. $L_w - L_w (K_{tot})$	7,5	9,8	9,7	10,1	6,1	2,4	4,5	4,5

Riempitrice Eurostar 2000 (Pelfort)

Frequency (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	A	L
Lw - ISO 3746 N.C.	101,6	102,8	105,2	107,8	108,4	106,3	112,8	113,5
Lw - ISO 9614/2	98,4	98,1	100,6	102,9	103,2	101,9	108,6	109,4
Diff. $L_w - L_w (K_{tot})$	3,2	4,7	4,6	4,9	5,2	4,4	4,2	4,1

Riempitrice Eurostar RAA514 (Patrasso) - S = 82.03 m²

Frequency (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A	L
Lw - ISO 3746 N.C.	99,7	102,7	103,3	105,0	106,5	104,8	101,6	111,2	111,7
Lw - ISO 9614/2	92,3	94,1	95,4	96,8	98,5	98,8	97,1	104,1	104,3
Diff. $L_w - L_w (K_{tot})$	7,37	8,59	7,98	8,23	7,90	6,00	4,58	7,1	7,36

Ispezzore Krones Toptronic (Patrasso) - S = 41.88 m²

Frequency (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A	L
Lw - ISO 3746 N.C.	97,2	99,9	100,1	102,2	102,9	101,4	95,7	108,0	108,6
Lw - ISO 9614/2	90,2	91,3	91,7	94,4	94,7	93,7	88,1	100,2	100,8
Diff. $L_w - L_w (K_{tot})$	6,97	8,65	8,35	7,73	8,19	7,73	7,68	7,8	7,82

Etichettatrice Krones Topmatic (Patrasso) - S = 62.11 m²

Frequency (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A	L
Lw - ISO 3746 N.C.	99,5	102,3	102,2	103,0	106,6	101,5	96,4	110,1	110,7
Lw - ISO 9614/2	94,4	94,7	94,6	92,5	94,2	88,9	89,3	99,1	101,4
Diff. $L_w - L_w (K_{tot})$	5,14	7,65	7,61	10,46	12,36	12,60	7,11	11,0	9,29

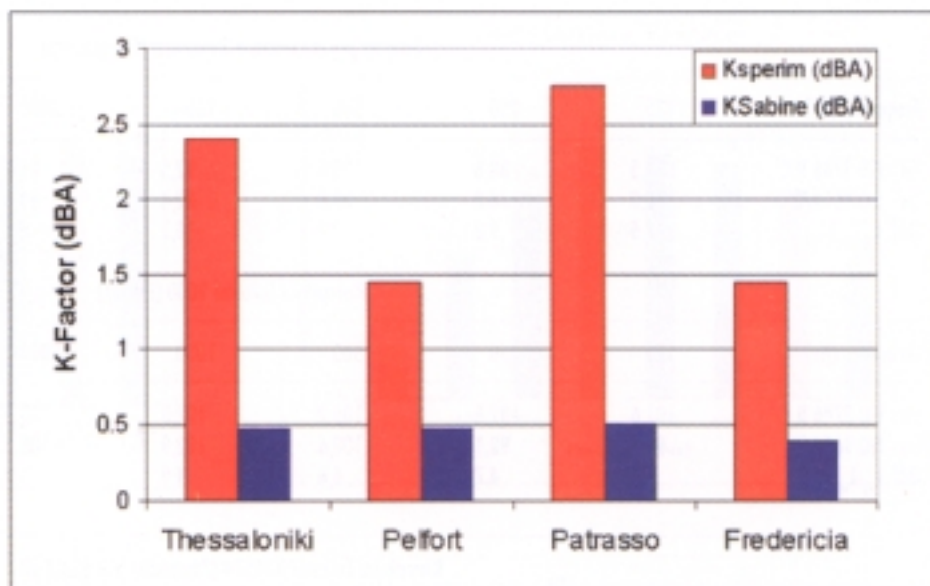
Riempitrice Starcons (Fredericia) - S = 101.19 m²

Frequency (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	A	L
Lw ISO 3746 N.C.	101,1	103,3	106,5	105,2	104,1	100,4	110,2	111,7
Lw ISO 9614/2	98,1	99,2	102,3	100,7	99,7	96,6	106,0	107,6
Diff. $L_w - L_w (K_{tot})$	3,0	4,1	4,2	4,6	4,4	3,8	4,2	4,1

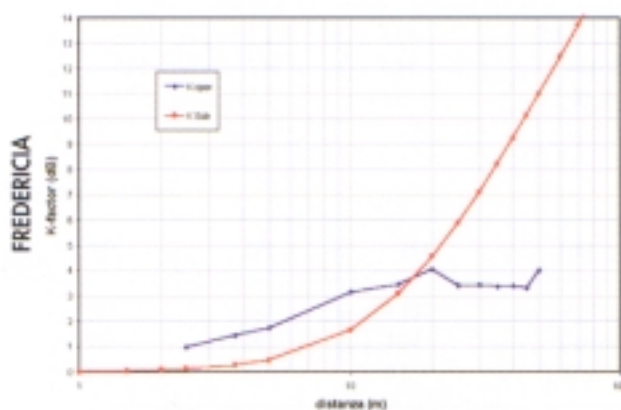
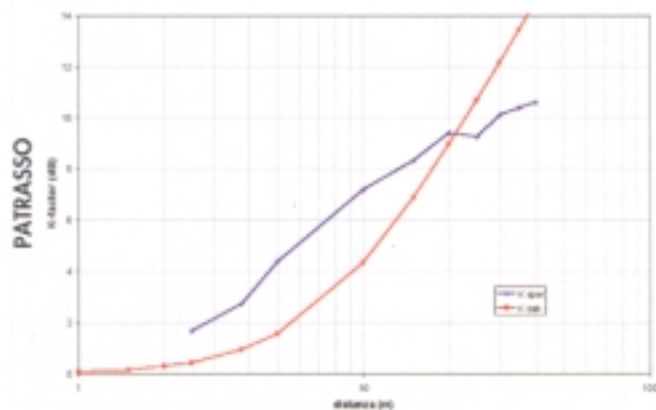
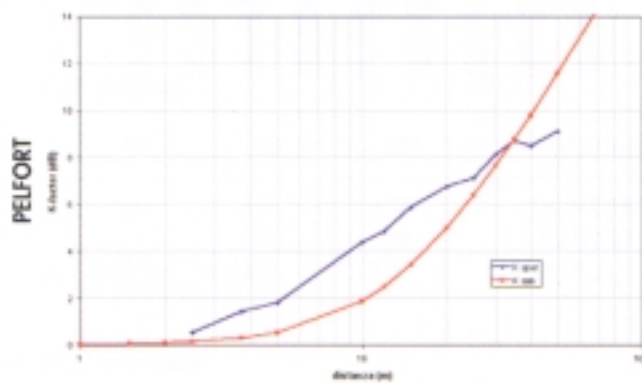
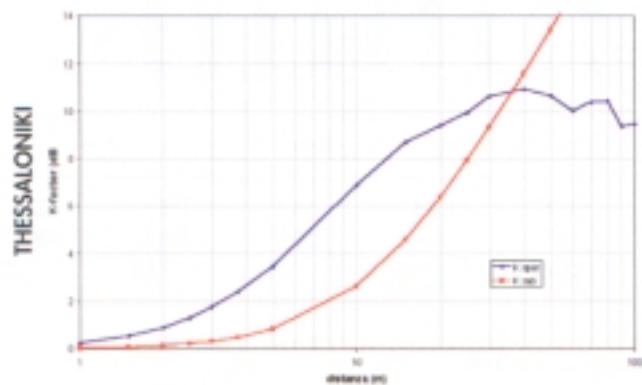
**RILIEVI ESEGUITI:
RIEPILOGO**

Nome	V (m ³)	h (m)	T _{ref} (s)
Thessaloniki	48836	8,3	2,60
Pelfort	72000	11,92	2,45
Patrasso	32000	8,0	3,10
Fredericia	27575	7,62	0,81

Nome	K _{sperim} (dBA)	K _{Sabine} (dBA)
Thessaloniki	2,40	0,48
Pelfort	1,45	0,48
Patrasso	2,75	0,51
Fredericia	1,45	0,40



FATTORI DI CORREZIONE AMBIENTALE



FORMULAZIONE EMPIRICA

Si scompone la densità di energia sonora complessiva del campo semi-riverberante nella componente diretta ed in quella puramente riverberante:

$$D_{dir} = \frac{Q_0 \cdot W}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (\text{J/m}^3)$$

$$D_{riv, Sabine} = \frac{4 \cdot W \cdot T}{0,16 \cdot C \cdot V} \quad (\text{J/m}^3)$$

L'andamento della densità riverberante è costante con la distanza dalla sorgente, mentre sperimentalmente si verifica una progressiva riduzione della stessa.

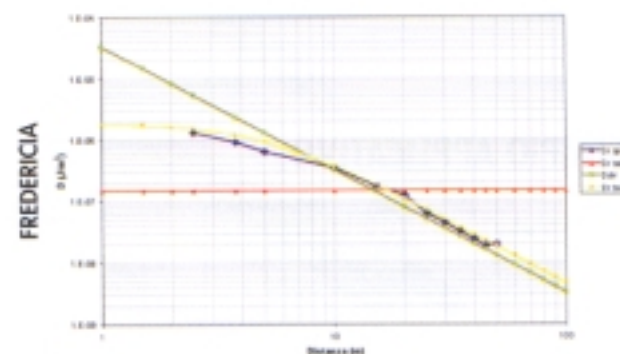
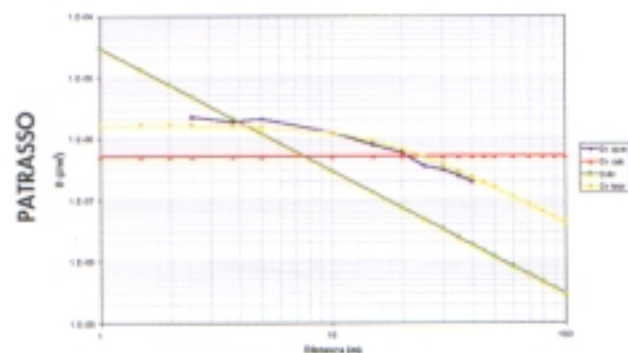
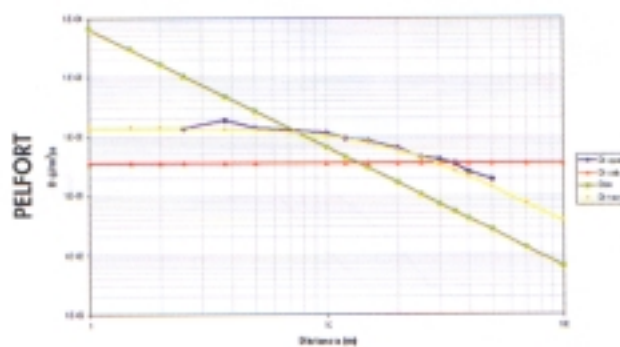
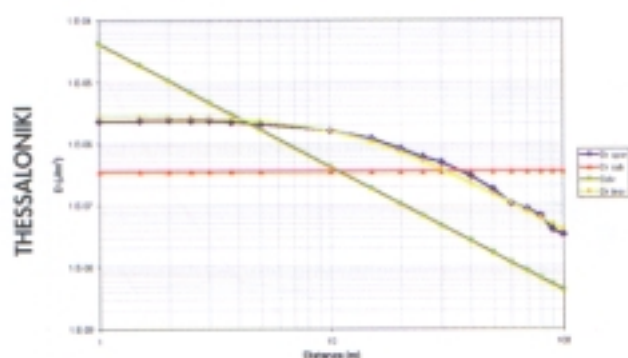
Ma se al posto di V si introduce un opportuno V':

$$V' = 5,64 \cdot T^{0,7} \cdot H^3 + \frac{1,596}{T^{0,7}} \cdot H \cdot 2 \cdot \pi \cdot d^2 =$$

$$= 5,64 \cdot T^{0,7} \cdot H^3 + \frac{1,596}{T^{0,7}} \cdot H \cdot S$$

si ottiene un andamento di $D_{riv, teor}$ in ottimo accordo con i risultati sperimentali.

DENSITÀ ENERGETICHE DEL CAMPO RIVERBERANTE



Sostituendo l'espressione di V' in quella che fornisce il fattore di correzione ambientale K si ottiene:

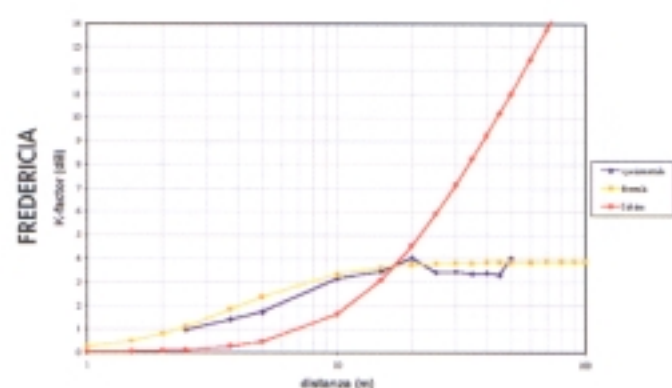
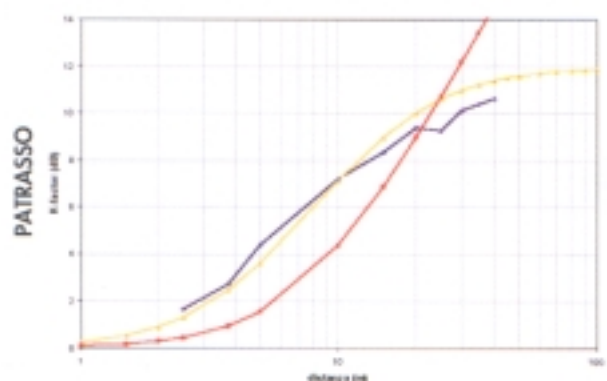
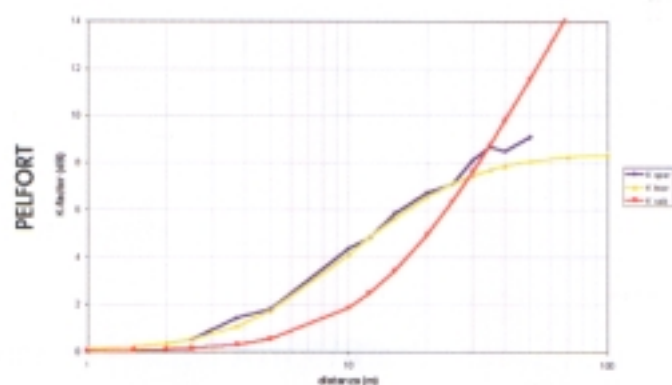
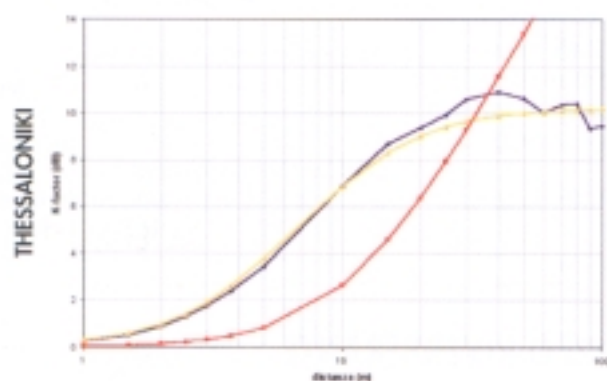
$$K_{teor} = 10 \cdot \lg \left[1 + \frac{4 \cdot S \cdot T}{0,16 \cdot \left(5,64 \cdot T^{0,7} \cdot H^3 + \frac{1,596}{T^{0,7}} \cdot H \cdot 2 \cdot \pi \cdot d^2 \right)} \right]$$

oppure, se si fa apparire la superficie di involuppo, $S = 2 \cdot \pi \cdot d^2$:

$$K_{teor} = 10 \cdot \lg \left[1 + \frac{4 \cdot S \cdot T}{0,16 \cdot \left(5,64 \cdot T^{0,7} \cdot H^3 + \frac{1,596}{T^{0,7}} \cdot H \cdot S \right)} \right]$$

In tal modo si ottiene un buon accordo con i valori sperimentali in tutti gli stabilimenti studiati, pur mantenendo il formale rispetto della ISO 3744/46:

FATTORI DI CORREZIONE AMBIENTALE K

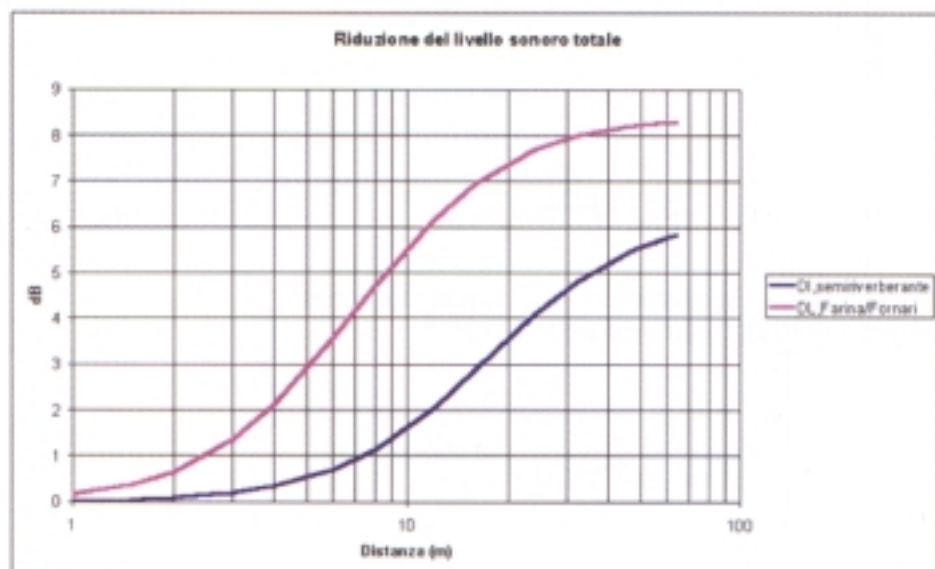


ESEMPIO APPLICATIVO

Si vuole valutare l'effetto di un trattamento ambientale in uno stabilimento basso e vasto. I dati di calcolo sono i seguenti:

Parametro	Valore	u. di misura
Volume Totale V	70.000	m ³
Altezza media h	7	m
Tempo di riverbero iniziale	3	s
Tempo di riverbero trattato	0,7	s

La riduzione di livello sonoro complessivo (diretto + riverberante) varia con la distanza dalla sorgente, come qui mostrato:



A distanze medie dalla sorgente (3-10 m) si hanno grandi differenze fra le due teorie, ed in pratica la nuova formula empirica rende conto delle rilevanti riduzioni di rumorosità che vengono effettivamente ottenute in ambienti bassi e vasti con trattamenti fonoassorbenti ambientali, mentre la teoria tradizionale indica riduzioni sostanzialmente risibili.

pimento dello stabilimento sui calcoli numerici;

4) realizzare un database di materiali di uso industriale coi relativi coefficienti di assorbimento da utilizzare in successive simulazioni;

5) realizzare un database di sorgenti sonore industriali con i relativi livelli di

potenza per ogni banda e i diagrammi direzionali;

6) confrontare i risultati della simulazione con quelli sperimentali mediante vari parametri quali il decadimento con la distanza e i tempi di riverbero al fine di valutare il grado di precisione e di affidabilità da attendersi dal simulatore.

SIMULAZIONE NUMERICA DELLO STABILIMENTO DI FREDERICIA

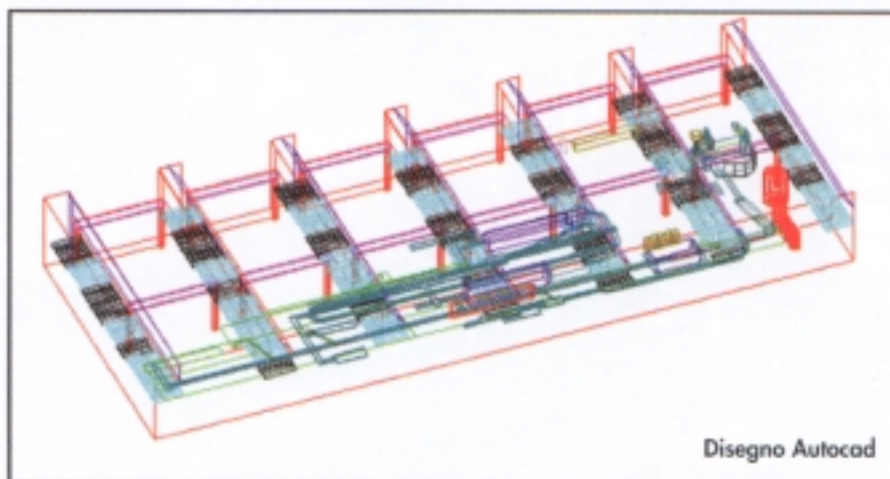
Scopi

1) studiare il comportamento del programma in ambienti industriali bassi e ampi aventi comportamento non sabiniano;

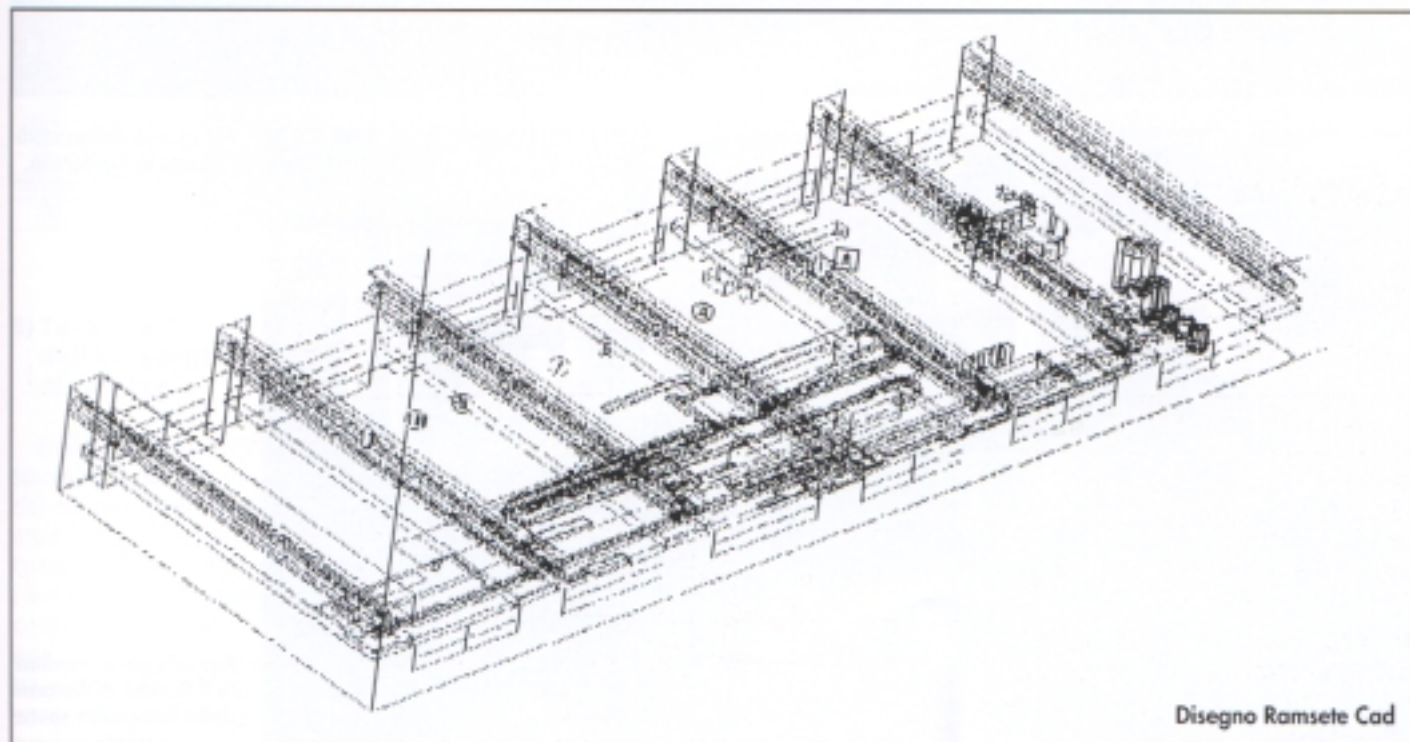
2) stabilire il grado di dettaglio col quale bisogna realizzare il disegno dell'ambiente da simulare;

3) valutare l'effetto del grado di riem-

RAPPRESENTAZIONE GEOMETRICA DELLO STABILIMENTO



Disegno Autocad

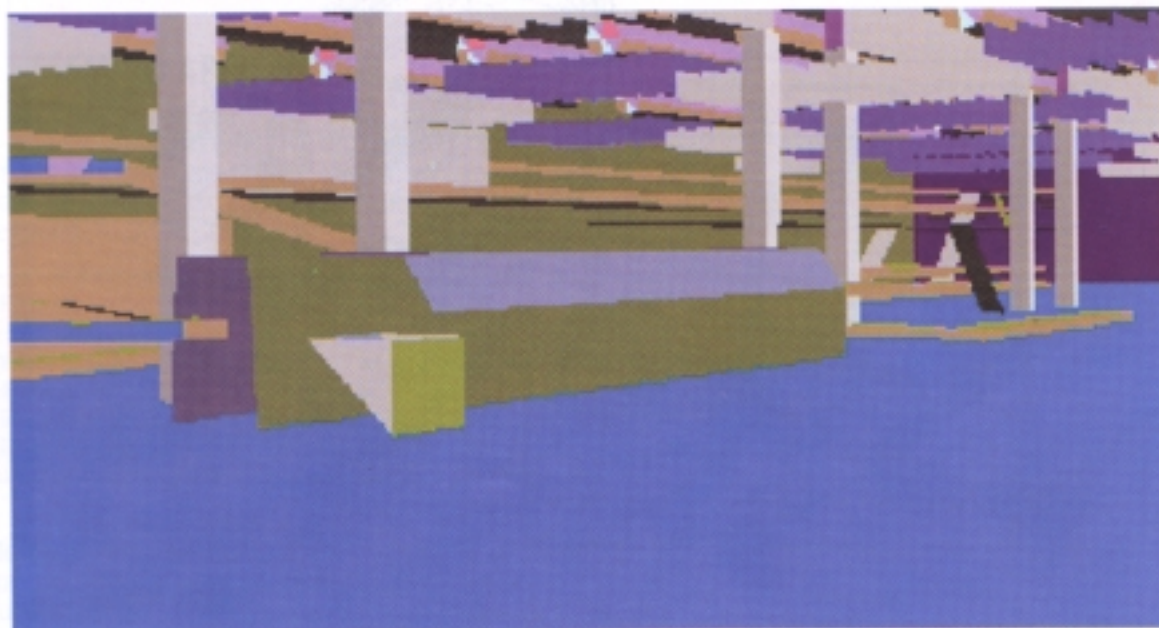


Disegno Ramsete Cad

IMBOTTIGLIAMENTO



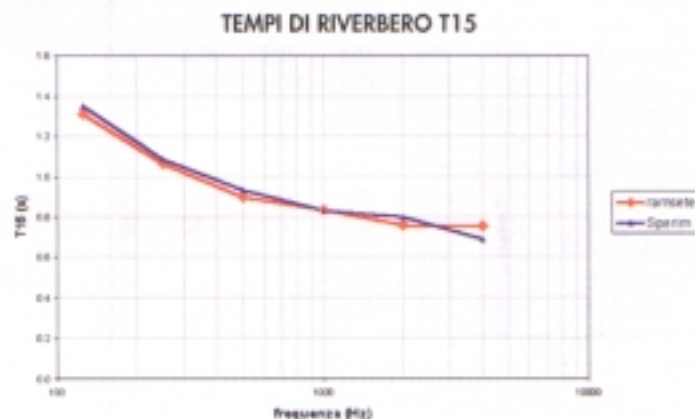
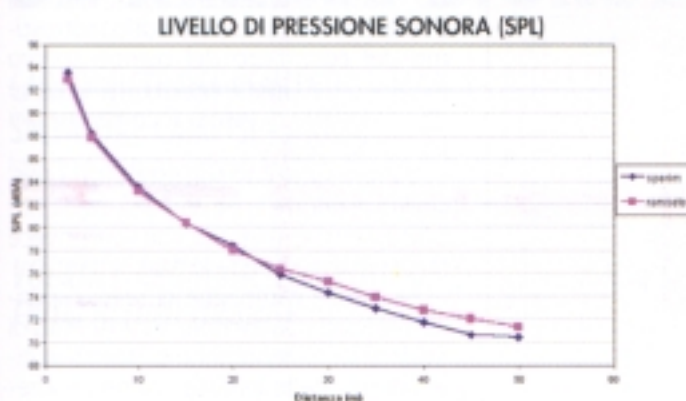
Fotografia dello stabilimento di Fredericia.



Riproduzione mediante il Render di Autocad della fotografia sovrastante.

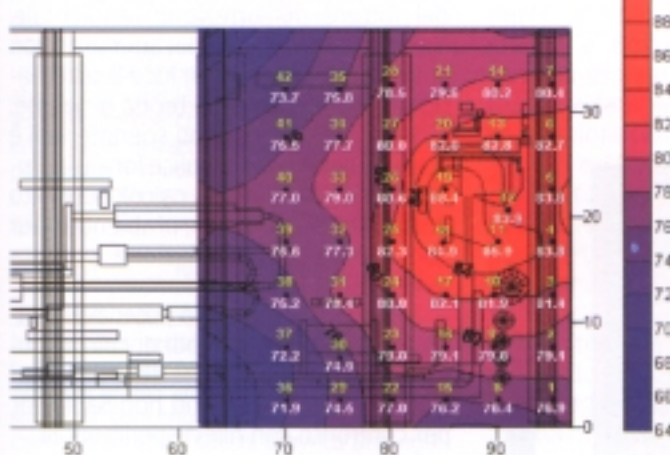
CONFRONTO RISULTATI NUMERICI/SPERIMENTALI

1) Decadimento con la distanza e tempo di riverberazione

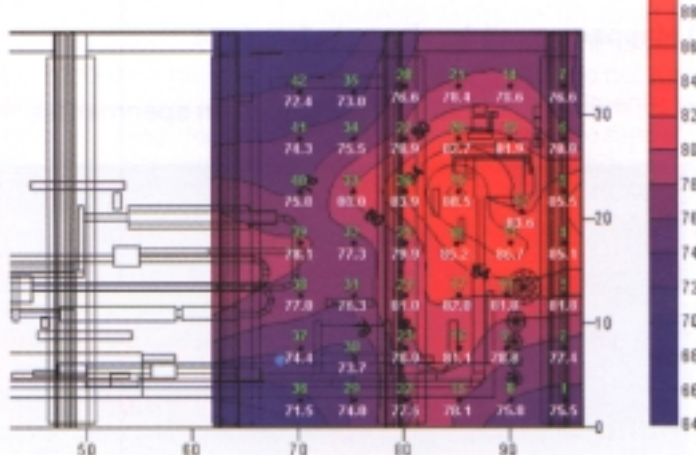


2) Mappatura con singola sorgente omnidirezionale (dodecaedro)

Mappatura con rilievi sperimentali

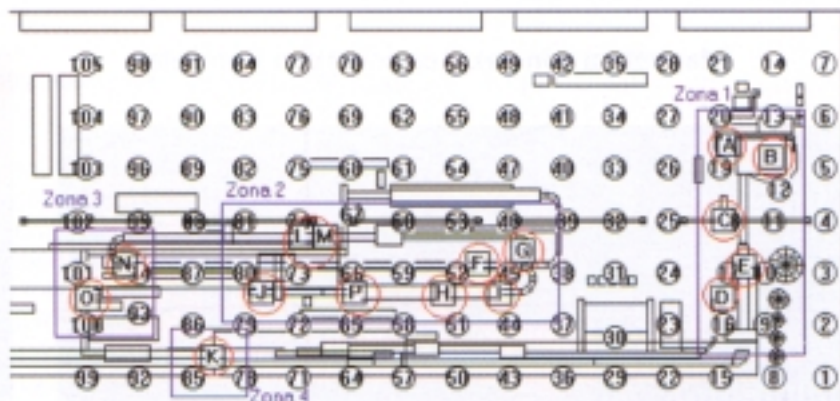


Mappatura con valori calcolati con Ramsete



3) Taratura delle sorgenti di rumore

Della riempitrice Starcans erano disponibili i dati di emissione ottenuti dal rilievo intensimetrico, ma per le altre numerose sorgenti sonore è stato necessario stimare empiricamente i livelli di potenza, mediante un processo automatizzato basato sull'utilizzo del Solver di MS Excel. L'ottimizzazione è stata eseguita per gruppi di sorgenti, considerate di emissione omogenea:



Gruppi di ottimizzazione dei livelli di pressione sonora.

Livelli di potenza sonora delle sorgenti Lw (dB)

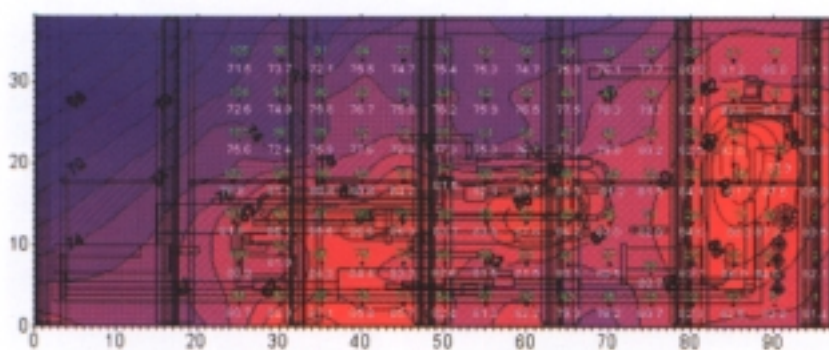
sorgenti	Frequenze in banda d'ottava (Hz)									
	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	A	LIN
tappatrice (A)	80.0	80.0	80.0	80.0	97.0	97.8	87.6	101.9	104.3	104.4
riempitrice (B)	96.6	92.7	100.1	102.6	104.0	104.3	94.6	99.8	108.1	110.0
sciacquatrice (E)	89.8	83.3	81.2	89.3	95.0	93.8	83.8	90.3	98.4	99.6
nastro1 (C,D)	84.0	85.6	85.1	89.4	94.3	96.2	84.8	92.6	99.5	100.3
nastro2 (G,L,M)	80.0	80.3	83.7	83.0	86.8	88.7	79.6	87.2	92.6	93.9
nastro3 (J)	80.0	85.9	90.0	96.4	97.9	97.1	86.7	96.2	102.0	103.4
kisters (H,I,P)	84.6	84.0	88.1	90.7	92.2	92.3	83.0	88.0	96.2	98.2
scivolo (F)	80.0	80.0	84.9	95.5	99.1	99.1	89.0	96.2	103.3	104.0
nastro4 (N,O)	80.0	84.8	86.7	89.4	91.6	91.3	82.6	89.7	95.9	97.5
soffiatrice (K)	80.0	80.0	85.2	91.1	93.1	94.0	86.6	99.4	101.4	101.9

Andando a minimizzare la somma degli scarti al quadrato fra i livelli sonori sperimentali e quelli ottenuti dalla si-

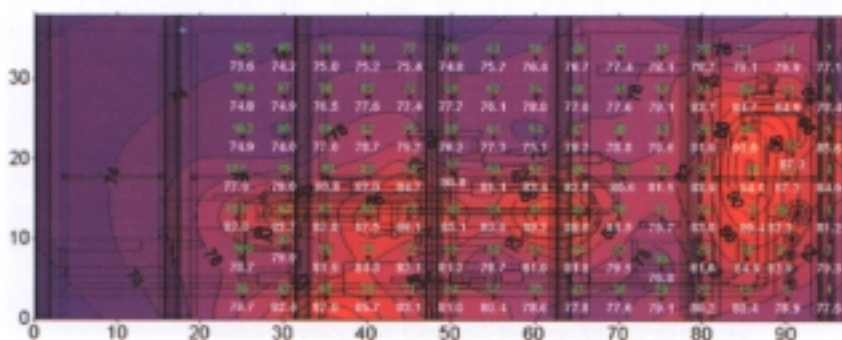
mulazione numerica con Ramsete, si sono ottenuti questi valori di potenza sonora delle singole macchine.

4) Mappatura con impianto in funzione

Mappatura con valori sperimentali



Mappatura con valori calcolati con Ramsete



CONCLUSIONI

L'applicazione pedissequa delle attuali normative tecniche (ISO 3744/46, ISO 11203/4) in ambienti industriali bassi e vasti porta ad una sistematica sottostima del contributo del campo sonoro riverberante. Ciò comporta l'attribuzione alle macchine di valori di emissione più elevati del reale.

Viene inoltre così sottostimata la possibilità di ridurre la rumorosità mediante trattamenti ambientali, che sono invece molto efficaci in questi stabilimenti.

Le estese campagne di rilievo sperimentale effettuate hanno consentito di evidenziare il fenomeno suddetto in dipendenza delle caratteristiche geometriche e di fonoassorbenza di diversi ambienti.

In particolare, la tecnica intensimetrica ha consentito la misurazione diretta del fattore di correzione ambientale, mentre la tecnica del decadimento con la distanza ha messo in luce il sistematico scostamento dalla teoria di Sabine.

Sulla base dei risultati sperimentali è stata ricavata una semplice formula empirica che consente il calcolo corretto del fattore di correzione ambientale pur rispettando la formulazione prevista dalle norme ISO.

Si è quindi saggiata la potenzialità offerta dai moderni metodi di calcolo numerico per la valutazione della propagazione sonora in ambienti non-Sabiniani, per confronto con rilievi sperimentali.

È risultato che, con una modellazione geometrica sufficientemente dettagliata e con un'accurata taratura dei coefficienti di assorbimento e dei livelli di potenza sonora delle macchine, si ottiene un ottimo accordo con i risultati sperimentali.

La metodica messa a punto e la disponibilità dei suddetti dati tarati consentono quindi la valutazione previsionale di nuovi comparti produttivi, con margini di errore grandemente ridotti rispetto a quanto sinora possibile con metodiche di calcolo valide solo in campi sonori Sabiniani.

Relazione al Convegno nazionale "Dal rumore ai rischi fisici: valutazione, prevenzione e bonifica negli ambienti di lavoro" - Modena, 17, 18 e 19 settembre 1998.