

I MODELLI MATEMATICI NEL CALCOLO PREVISIONALE E NELLA PROGETTAZIONE

I modelli matematici servono essenzialmente a due cose: valutare la rumorosità prodotta dal traffico veicolare o ferroviario, e stimare la riduzione di rumorosità ottenibile mediante diverse soluzioni antirumore.

Sono stati sviluppati negli scorsi anni numerosissimi modelli previsionali che coprono il primo aspetto; di essi alcuni incorporano anche il procedimento per il calcolo dell'attenuazione ottenibile dalle barriere.

Per impiegare proficuamente questi modelli di calcolo, di solito computerizzati, occorre disporre di attendibili dati in ingresso relativi al traffico; la mancanza o l'imprecisione di tali dati pregiudica sovente la precisione delle previsioni.

In alcuni paesi vige un modello standard di previsione, adottato ufficialmente (Germania, Gran Bretagna): il modello tedesco è stato impiegato anche in Italia, ponendolo dapprima a confronto con numerosi altri, nello studio di una situazione già nota sperimentalmente, ed utilizzandolo poi, estesamente per Valutazioni di Impatto Ambientale e per la progettazione di schermature antirumore.

In questo intervento si parlerà di modelli matematici nel calcolo previsionale e soprattutto nella progettazione degli interventi antirumore.

Il primo aspetto, quello previsionale, ci consente di ottenere una stima del livello sonoro prodotto da una strada o da una ferrovia.

Il secondo, invece, permette di stimare le possibili riduzioni ottenibili con l'impiego delle barriere antirumore e dell'asfalto fonoassorbente.

C'è quindi un elemento iniziale di valutazione dello stato di fatto o dell'impatto ambientale di un'opera, e successivamente una valutazione del beneficio dovuto all'intervento.

Non tutti i modelli consentono questo secondo aspetto.

Alcuni danno il livello sonoro delle strade, altri, in numero inferiore, quello delle ferrovie e altri ancora, pochi in verità, integrano al calcolo del livello la previsione dell'attenuazione tramite gli schermi antirumore.

Vediamo innanzitutto il primo aspetto della questione, la previsione del livello prodotto da una strada o da una ferrovia.

In primo luogo è necessario fornire dei dati in ingresso al programma di calcolo; spesso si tratta di modelli computerizzati, in altri casi si usano formule o grafici.

Comunque bisogna sempre partire avendo ben chiari i dati in ingresso (vedi Fig. 1).

Per la strada si tiene conto della portata oraria dei veicoli, della loro velocità, della percentuale di veicoli pesanti, del tipo di asfalto, della pendenza e dell'eventuale presenza di incroci o semafori.

Per la viabilità su rotaia i parametri sono corrispondenti: numero dei treni che transitano in un'ora, loro lunghezza, tipo di materiale rotabile, curvatura del binario, velocità in linea, punti in cui è necessaria una segnalazione acustica.

Sembra banale ricordare che bisogna disporre di questi dati al momento di fare una previsione, ma normalmente non si hanno a disposizione ed è difficilissimo procurarseli.

Anche se il modello matematico fosse molto preciso, i dati in ingresso sono solitamente di un'imprecisione tale che è inevitabile che la previsione dei livelli prodotti sia approssimata,

Il modello matematico funziona in vari modi: di norma si tratta di formule che possono essere computerizzate o rese sotto forma di grafico.

Sono semplici formulette di origine empirica, che nascono dalla correlazione di centinaia di migliaia di misure fatte da chi ha avuto la possibilità di eseguirle.

In Italia è difficile avere questa possibilità, finora c'è riuscito solo il CNR che ha prodotto un modello valido per le strade urbane.

I modelli di cui si parla sono in gran parte stranieri, risultato di campagne di ricerca finanziate dai governi e di validità statistica ben maggiore di quanto siano riusciti a fare i ricercatori nel nostro paese, animati certamente da molta buona volontà, ma con pochi mezzi.

I risultati di un modello previsionale sono gli elementi descrittivi di cui ha parlato in precedenza il collega di Modena.

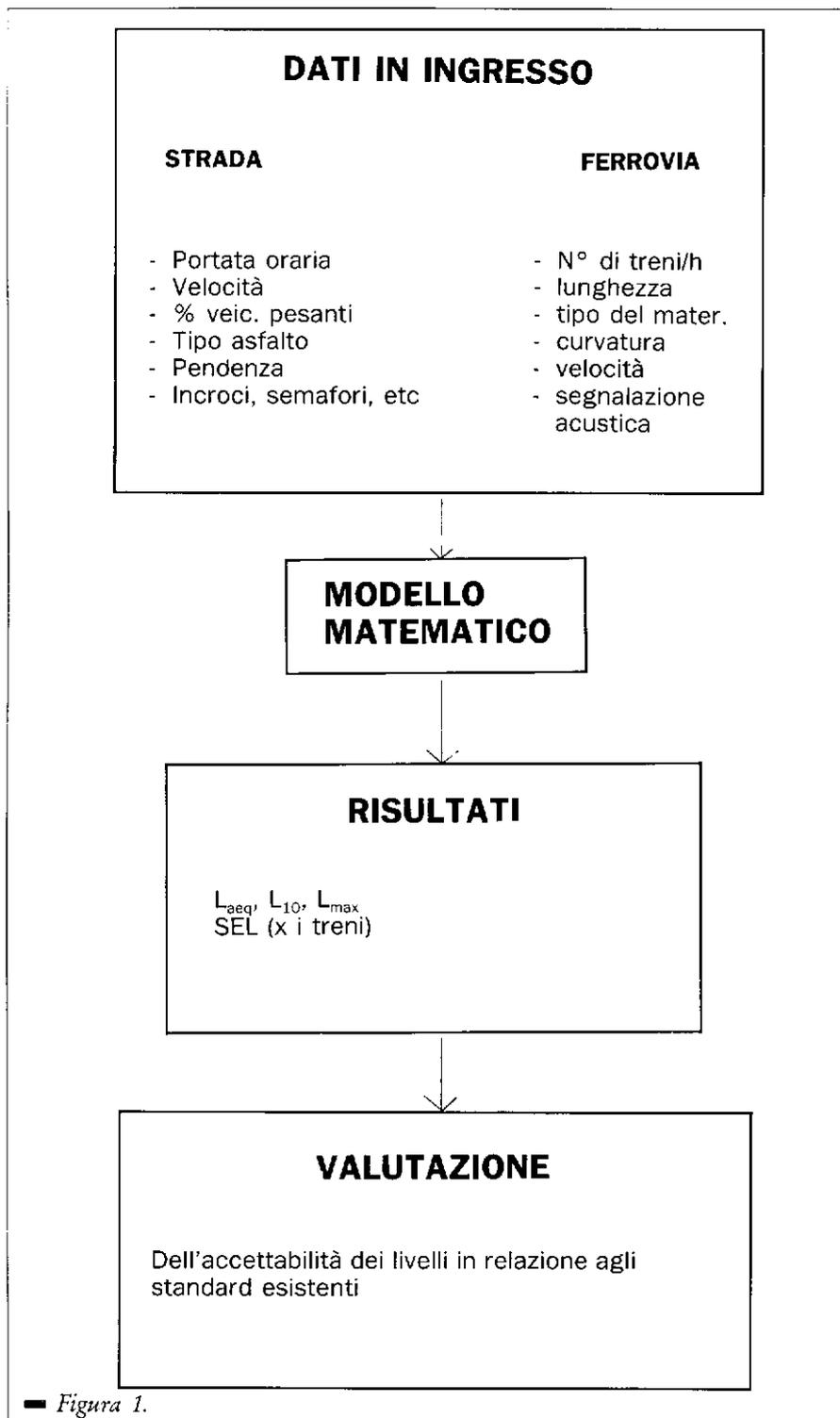
In particolare oggi si è tutti orientati verso il livello equivalente ponderato A come descrittore unico del disturbo.

In questo modo ci troviamo con un numero che va confrontato con i limiti presenti sul territorio.

Purtroppo, come è già stato rilevato, negli interventi precedenti, in Italia il problema dei limiti pare essere di difficile soluzione e in questa sede non resta altro che sperare in una rapida definizione dei livelli di rumorosità.

Si supponga dunque di avere ottenuto dal modello dei livelli previsti.

Se i limiti sono rispettati tutto procede per il meglio; se invece i livelli supe-



■ Figura 1.

rano i limiti di accettabilità, subentrano varie possibilità, la più semplice delle quali è modificare i dati di ingresso del modello.

In poche parole si fa il seguente ragionamento: se su una strada, su cui dovrebbero passare 2.000 veicoli l'ora, ne faccio transitare 3.000, ecco che rientro nei valori stabiliti. Non sempre però si può operare in questo modo; è possibile anche ridurre la velocità o la percentuale dei veicoli pesanti.

Se si passa al traffico ferroviario posso agire sul materiale rotabile e un intervento di questo tipo, cioè alla fonte, è molto più efficace che in ambito stradale.

Il parco automobilistico si rinnova molto lentamente, mentre quello ferroviario, se per esempio si decide di eliminare un determinato tipo di carri sostituendoli con altri, può avere un ricambio più rapido.

Tornando alla circolazione stradale, è possibile intervenire sulla pavimentazione prevedendo l'uso di asfalto fonoassorbente, oppure agire sulla pendenza in fase di progettazione di una nuova strada.

Altri elementi da prendere in considerazione sono l'eliminazione delle interruzioni e delle segnalazioni acustiche.

Infine è possibile installare le protezioni passive.

Si passa successivamente alla seconda parte del modello, quella che fornisce l'attenuazione da parte degli schermi.

Questo fattore è in gran parte funzione della sola geometria e non dipende dal tipo di schermo, perchè l'energia che lo attraversa è trascurabile, mentre il grosso dell'energia lo supera per diffrazione.

Tuttavia c'è un caso che in città si verifica spesso, la presenza di uno schermo su entrambi i lati della strada; in questa circostanza l'energia non supera la barriera solo per diffrazione, ma anche per riflessione sullo schermo contrapposto.

Confronto tra alcuni numerici di previsione del rumore da traffico

1. Misure sperimentali (D. Bertoni, A. Franchini, M. Magnoni)
2. Metodi numerici di previsione:
 - 2.1 CRTN (G. Brambilla)
 - 2.2 EMPA (R. Borchiellini, V. Giaretto, M. Masoero)
 - 2.3 EMPA (F. Ventura)
 - 2.4 STAMINA (F. Ventura M. Di Prete)
 - 2.5 STAMINA (D. Bertoni, A. Franchini, M. Magnoni)
 - 2.6 CETUR (V. Ganzaroli, P. Giacomini)
 - 2.7 CEE (R. Pompoli)
 - 2.8 RLS 81 (A. Farina, G. Semprini)
 - 2.9 OAL (A. Cocchi)

■ *Figura 2 - Elenco dei modelli di calcolo posti a confronto.*

E questo fattore, cioè il potere fonoassorbente della barriera contrapposta, va tenuto in debito conto nella realizzazione del modello di calcolo.

Passiamo alla scelta del modello matematico: ce ne sono decine, di questi 3-4 consentono anche il calcolo delle barriere.

Ma attenzione: questo calcolo spesso fa riferimento a dati di classificazione ottenuti secondo normative nazionali.

In un caso particolare di cui ha avuto esperienza diretta sono state impiegate le norme vigenti in Germania perchè i produttori di una barriera che avevano commissionato lo studio, avevano qualificato il prodotto secondo tali normative ed è diventato vincolante basare la ricerca su di esse, pena l'ottenimento di dati incompatibili con il modello stesso.

Si è parlato in questa sede delle rilevazioni effettuate sperimentalmente su un tratto dell'Autostrada del Sole, dopo che su questo tratto era stata realizzata una serie di previsioni impiegando numerosi modelli, in precedenza utilizzati da ricercatori di altre parti d'Italia.

Mi preme presentare brevemente i risultati di tale lavoro per portare un ulteriore esempio del grado di approssimazione dei vari modelli disponibili, a confronto con i valori sperimentali.

Nel caso in questione sono stati impiegati i modelli riportati in Fig. 2.

In figura 5 si può osservare il risultato.

La sezione stradale considerata è riportata in Figg. 3 e 4

Del modello inglese Crtn.

In alto sono riportati gli scarti dai valori sperimentali e in basso vedete gli stessi dati, ma sotto forma grafica.

Gli errori ottenuti possono arrivare a 5-6 decibel in positivo e a 4 in negativo. Un altro modello impiegato è stato l'americano Stamina, che tende quasi sempre a sovrastimare i livelli, fino a 5-6 decibel, come si può vedere dalla Fig. 6.

In Fig. 6 è visibile il risultato del modello impiegato da noi, l'RLs 81, tedesco; anch'esso sovrastima parecchio i valori.

Questo fatto si spiega perchè si tratta di modelli nati per costringere gli enti stradali a dotarsi di protezione antirumore.

Nel caso di quello tedesco il riferimento è una normativa ministeriale che costringe l'equivalente della nostra Società Autostrade a installare degli schermi tutte le volte che la strada si rivela rumorosa.

Infine abbiamo il modello grafico, della Cee, uno di quelli che in questa sperimentazione si è comportato meglio e ha dato luogo a scarti piuttosto contenuti.

Anch'esso è stato computerizzato; i suoi risultati sono visibili in Fig. 8. Viene analizzato in dettaglio, nel seguito, il modello tedesco RLS 81, con l'illustrazione sommaria del suo funzionamento ed un esempio dei risultati ottenibili.

La Fig. 9 illustra gli scopi del modello.

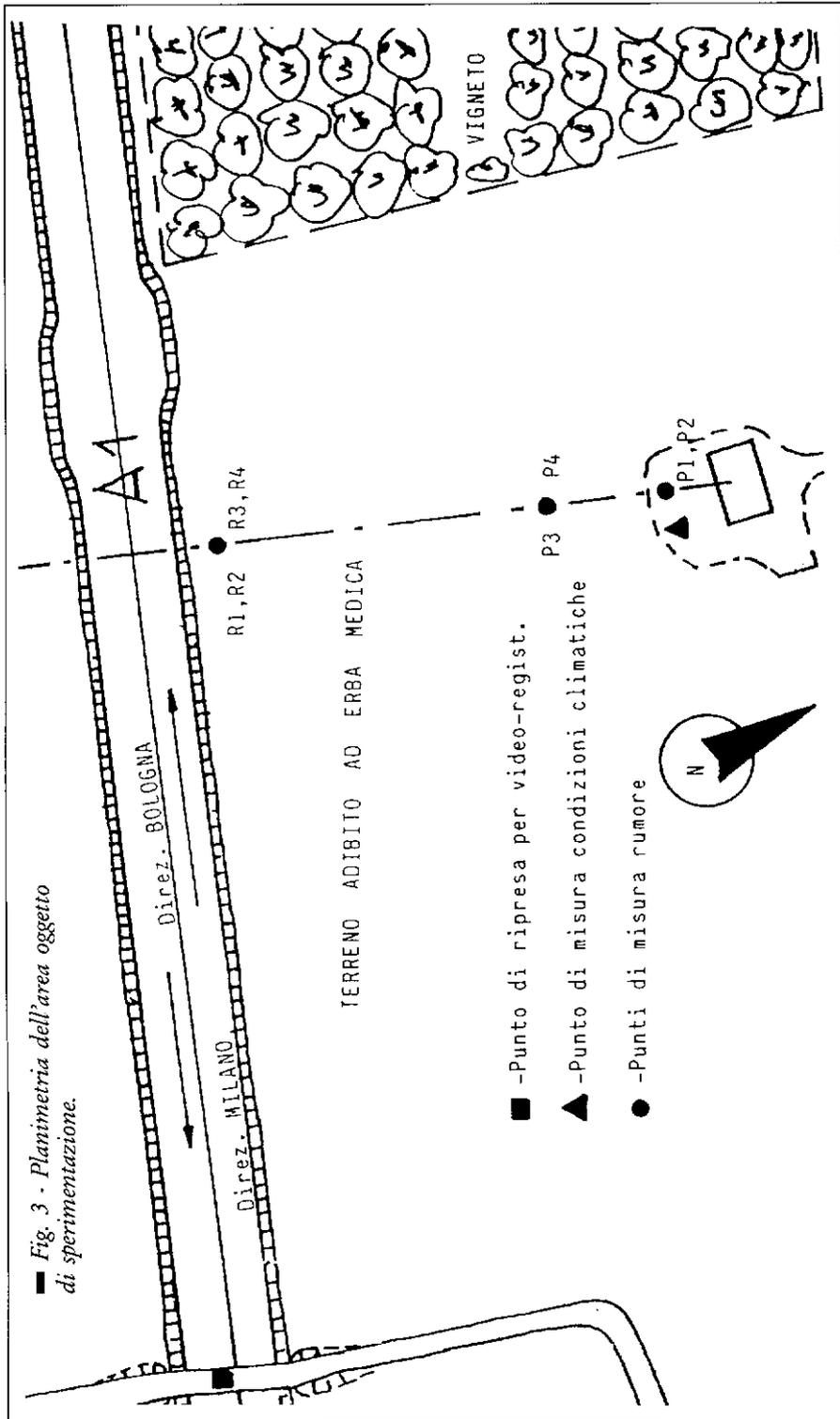
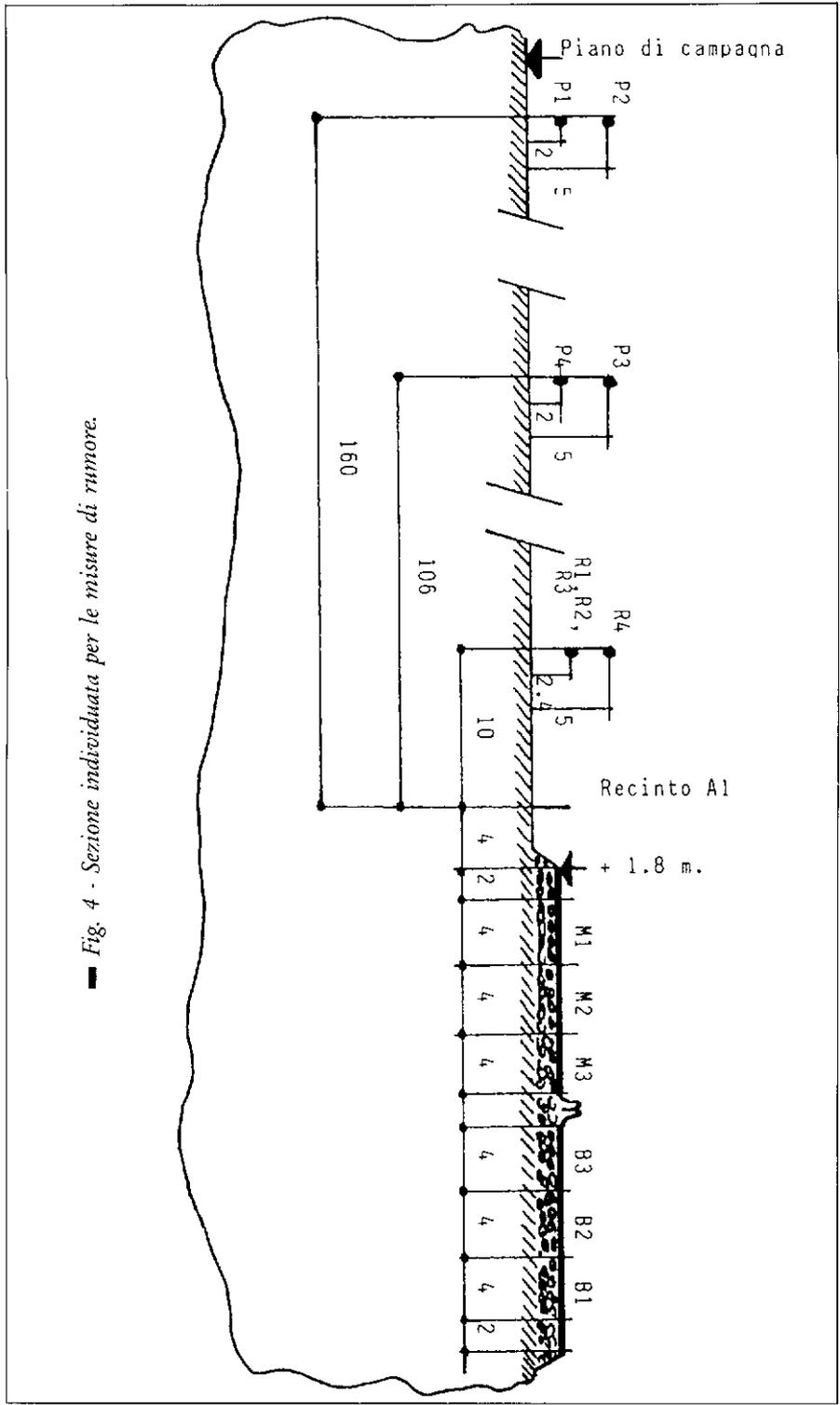


Fig. 4 - Sezione individuata per le misure di rumore.



Il modello Rls 81 oltre, a consentire la previsione del rumore prodotto dal traffico e dell'attenuazione delle barriere, consente la progettazione di barriere per sezioni stradali a norme Din.

Dei grafici, se la sezione stradale è norma Din, indicano lunghezza e altezza della barriera in funzione dell'attenuazione da ottenere.

Purtroppo, dato che le strade italiane non corrispondono alle sezioni tedesche, questa brillante proprietà del modello non è visualizzabile nel nostro paese.

Un'ultima considerazione merita la norma ZTV 81 per la classificazione delle barriere e qui torniamo al problema già citato in precedenza: quello relativo all'assorbimento.

Infatti il modello RLS 81 richiede la specificazione delle proprietà fonoassorbenti in termini di riduzione in dBH(A) del campo sonoro riflesso, determinata secondo la citata normativa ZTV-LSW '81.

I dati in ingresso richiesti del modello sono riportati in Fig. 10 sono sostanzialmente quelli elencati in precedenza.

La logica di calcolo prevede due casi principali.

Il primo, che chiameremo caso A, considera una strada lunga e diritta; in questa situazione il modello si riduce a una semplice formula.

Nel caso B, invece, bisogna suddividere la strada in tratti e calcolare l'energia proveniente da ciascuno, cosa che richiede inevitabilmente l'impiego del calcolatore.

Si determina il livello medio di emissione a una certa distanza (25 metri) e si apportano le correzioni in base a tutti gli altri fenomeni.

Infine si calcola la propagazione e si tiene conto delle eventuali barriere.

Vediamo nella Fig. 11 un esempio di che cosa si ottiene usando il modello, cioè la fase dei dati in ingresso, quelli relativi al traffico, al tipo di strada, eccetera; poi occorre specificare i dati geometrici su cui mappare i risultati. Verrà fornita una mappa di livelli, in questo caso in sezione verticale.

Quindi sono stati assegnati 30 punti in orizzontale e 21 in verticale ottenendo una griglia con cui costruire delle mappe per curve isolivello.

In uscita il programma salva i dati su disco per la successiva elaborazione grafica e mostra sullo schermo i livelli calcolati, le correlazioni apportate a causa di vari fenomeni (presenza di un boschetto, riflessioni multiple e così via), e l'attenuazione dovuta alle barriere; in Fig. 12 sono riportate le schermature di uscita dei dati per 2 diversi punti.

Si può notare che si tiene conto della riflessione sulla barriera contrapposta in funzione dell'assorbimento della barriera stessa.

In particolare si distinguono tre tipi di raggio, a seconda che il raggio riflesso sia a sua volta intercettato dalla barriera, la superi, oppure non compaia proprio perchè non viene riflesso affatto, come mostrato in Fig. 13.

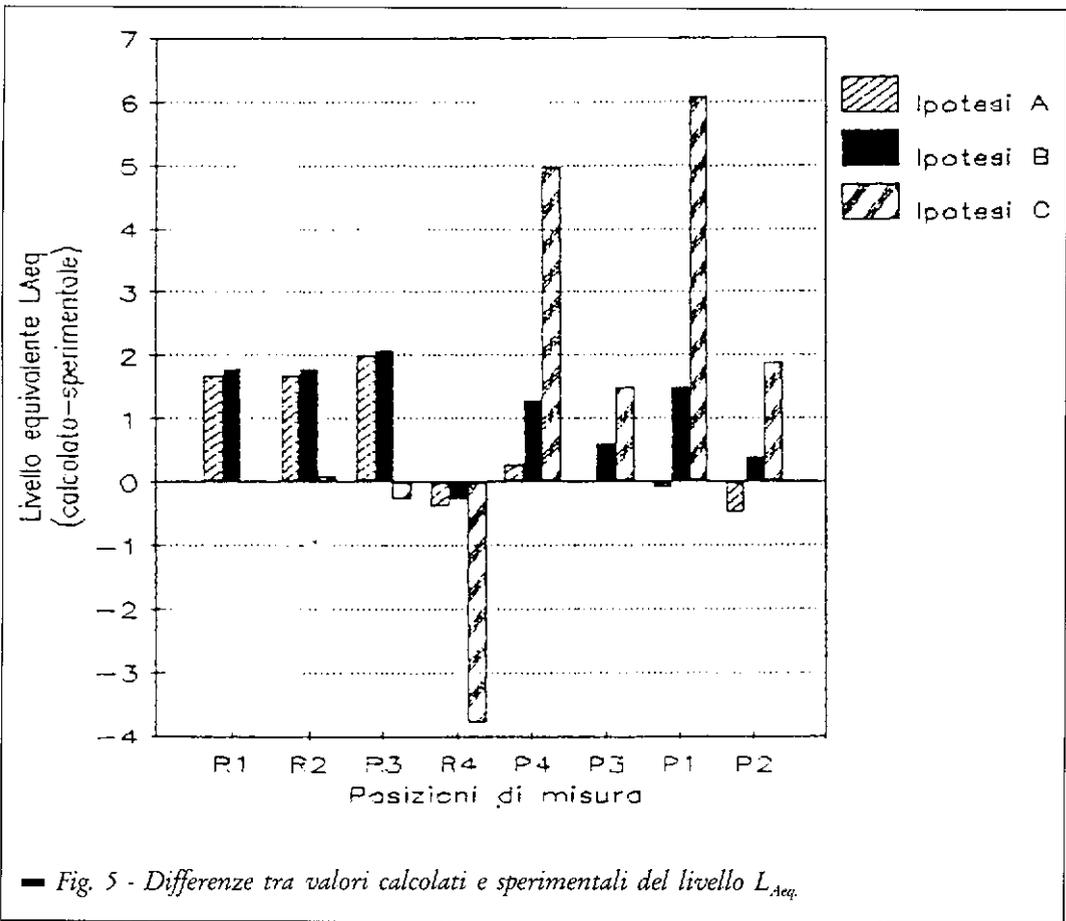
Successivamente si ottengono delle mappe isolivello tramite un altro programma di grafica che legge direttamente i dati.

Nelle Figg. 14 e 15 sono visibili 2 esempi di tali mappe.

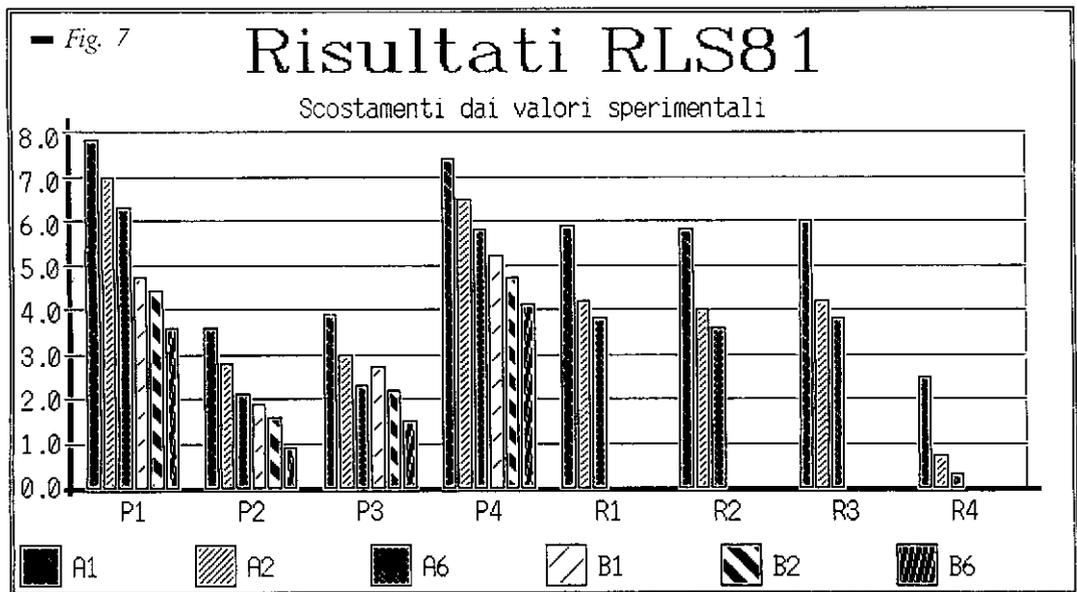
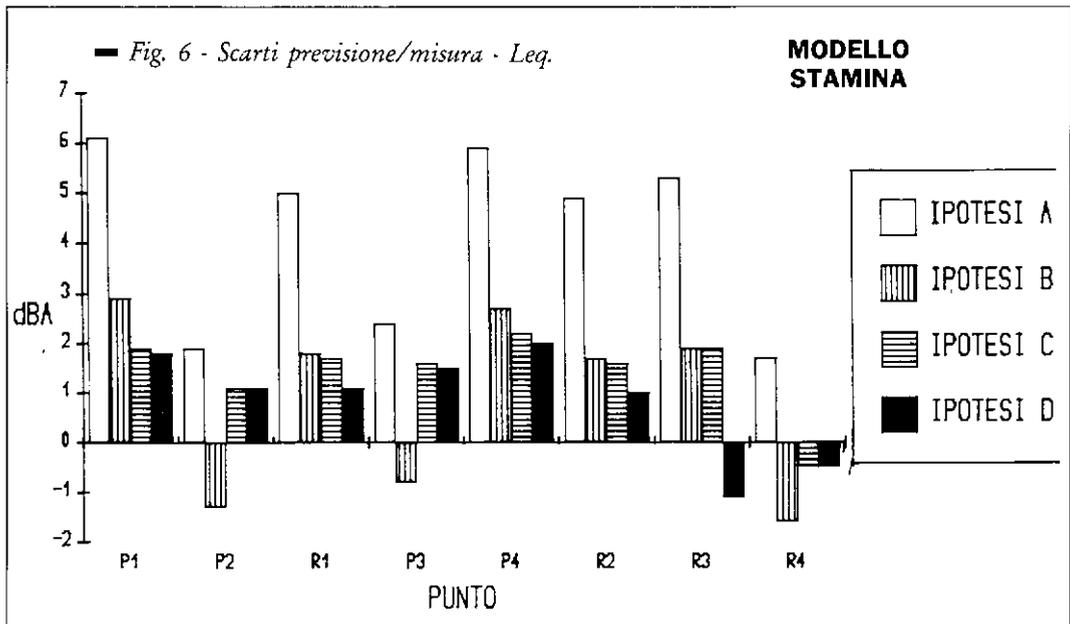
Posizione di misura	Ipotesi di calcolo		
	A	B	C
P1	-0.1	1.5	6.1
P2	-0.5	0.4	1.9
R1	1.7	1.3	0.0
P3	0.0	0.6	1.5
P4	0.3	1.3	5.0
R2	1.7	1.3	0.1
R3	2.0	2.1	-0.3
R4	-0.4	-0.3	-3.8
Δ medio	0.6	1.1	1.3
Dev. Stand.	1.0	0.3	3.1

MODELLO CRTN

■ Differenze tra valori calcolati e sperimentali del livello L_{Aeq}



■ Fig. 5 - Differenze tra valori calcolati e sperimentali del livello L_{Aeq} .



In questo caso erano state installate due barriere verticali e si può notare l'effetto schermante verso i piani bassi delle abitazioni; si vede anche l'incremento di livello rispetto al campo libero prodotto dalla riflessione sulla barriera contrapposta.

In questa zona la riflessione su di essa ha fatto aumentare i livelli rispetto al caso di assenza di barriera.

In sostanza, i piani alti dell'edificio si trovano in una situazione peggiore di quella antecedente all'installazione delle barriere.

La soluzione è stata modificare la tipologia della barriera (in origine di calcestruzzo parzialmente fonoassorbente) sostituendola con una, sempre in calcestruzzo, più bassa e sormontata da uno schermo fonoassorbente inclinato.

La nuova struttura non dà luogo a riflessioni, per cui l'aumento di livello è molto più contenuto e si verifica a quote superiori. (Fig. 15).

Vediamo un ultimo esempio: si tratta di uno studio di valutazione di impatto ambientale relativo alla progettazione di interventi antirumore.

La zona interessata era un tratto dell'Autostrada del Sole tra Borgo Panigale, Casalecchio e Sasso Marconi.

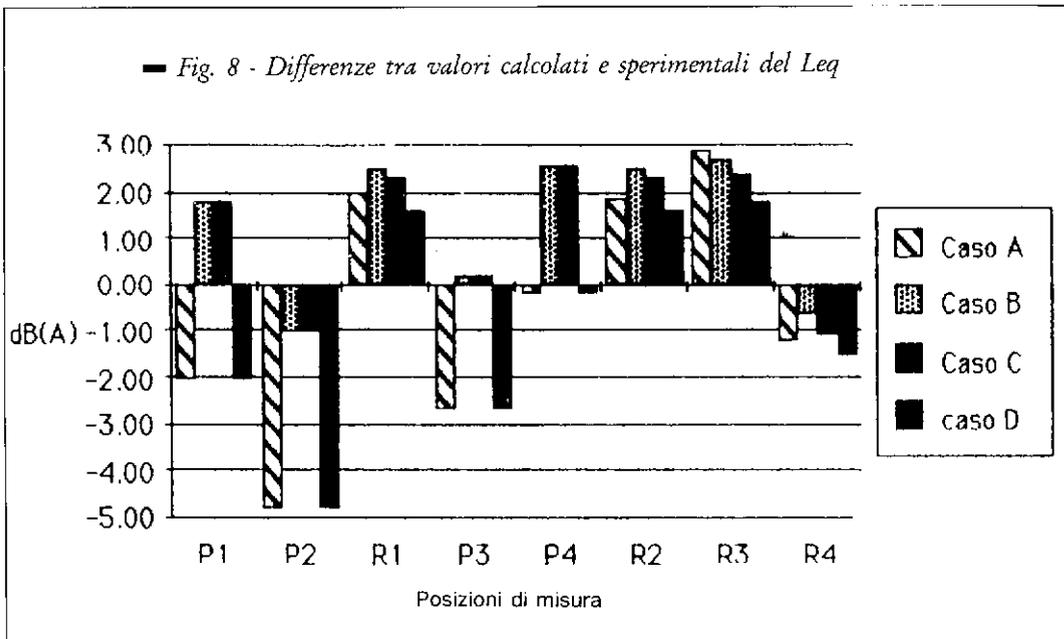
Era previsto un intervento contemporaneo sulla contigua ferrovia e sulla Strada Statale Porrettana.

Ci è stato chiesto di valutare i livelli sonori conseguenti e, se necessario, di installare elementi di protezione.

Fortunatamente siamo riusciti a procurarci i dati di ingresso per i modelli di calcolo per quanto riguarda sia il tratto autostradale che quello della statale e quello ferroviario.

Con questi dati e con una serie di misure sperimentali di controllo è stato possibile valutare la mappa isolivello dello stato di fatto.

Si è visto che in numerosi edifici i livelli superavano abbondantemente qualunque standard umanamente proponibile e si è quindi deciso di progettare gli interventi antirumore.



RLS '81

“Direttive per la protezione antirumore lungo le strade”
Pubblicato dal Ministero Federale per i Trasporti (Rep. Federale Tedesca)

Scopi

- Fornisce indicazioni sul progetto urbanistico.
- Permette il calcolo del livello sonoro in un sito (L_{eq}).
- Permette la verifica dell'attenuazione di barriere.
- Per sezioni stradali a norme DIN, consente il *progetto* delle barriere.
- Fa riferimento allo ZTV '81 per la classificazione delle barriere.

PREVISIONE DI L_{eq}

Dati in ingresso

- Portata e velocità di veicoli leggeri e pesanti.
 - Morfologia della zona, pendenza della strada.
 - Tipo di pavimentazione.
-
- Il modello è concepito per tenere conto di un debole vento che spira dalla sorgente al ricevitore (oppure inversione termica notturna)
 - Il modello *non tiene conto* della attenuazione dovuta al terreno.
-
- E' possibile analizzare situazioni molto complesse, con riflessioni, barriere doppie, interazioni fra strade diverse, etc.

Ancora una volta il calcolo degli interventi è stato fatto per sezioni e riferito al piano più alto degli edifici, laddove esistono maggiori problemi di contenimento del rumore.

In Fig. 16 vediamo una zona dove la statale corre parallela alla ferrovia; è ovvio che diventa necessario integrare il funzionamento di modelli di calcolo diversi.

Sono stati ottenuti dei livelli prima intesi come se l'intervento venisse effettuato senza barriere e in un secondo momento prevedendo delle barriere. Le attenuazioni prevedibili sono molto più modeste di quanto si possa immaginare, perchè si considerano i piani alti e non ci sono tutti gli effetti combinati di riflessioni multiple che riducono grandemente l'efficacia degli schermi.

Alla fine sono state prodotte delle tavole che riportano in pianta gli interventi antirumore previsti lungo la strada la ferrovia e l'autostrada per proteggere gli edifici circostanti (Fig. 17).

A questo punto è necessaria una disgressione sul rumore prodotto da una ferrovia.

In campo % ferroviario è difficile fare previsioni. In Fig. 18 è lo spettro del rumore da traffico stradale: è stabile e ripetibile, soprattutto se riferito all'autostrada.

Per i treni gli spettri non sono così stabili, o meglio, la composizione in frequenza è abbastanza stabile ma nettamente diversa (Fig. 19). Quindi un modello di calcolo che preveda correttamente la propagazione e l'attenuazione del rumore dovuto al traffico viario, non funziona altrettanto bene nel caso del traffico su rotaia, per di più, anche la direttività della sorgente ferroviaria è molto strana, mentre quella stradale è quasi unidirezionale. Inoltre c'è da considerare il fattore temporale: i treni non passano di continuo come le automobili.

Dai grafici di Fig. 20 si vede una rampa di salita (treno in avvicinamento), un plateau quando il treno transita e una rampa di discesa (treno in allontanamento).

Quindi un modello che dia semplicemente il livello equivalente non è sufficiente a delimitare il fenomeno ferroviario.

Diventa quindi necessario utilizzare modelli che descrivano l'intero profilo temporale.

Uno di questi è il modello di Cato (inglese), che consente di effettuare previsioni di questo tipo, in sezioni verticali.

Come negli altri casi utilizza per il calcolo delle barriere la teoria di Maekawa che permette il calcolo dell'attenuazione frequenza per frequenza. Successivamente, conoscendo lo spettro, diventa possibile ricostruire l'attenuazione complessiva in dB(A).

L'ultimo problema è quello della direttività.

Come potete vedere in Fig. 21 le curve non attenuate sono perfettamente circolari.

Ma in realtà ciò non avviene perchè il rumore ferroviario presenta due lobi di emissione direzionale che attualmente nessun modello di calcolo è in grado di descrivere correttamente.

 * modello rumore traffico stradale RLS-81 ***** strada lunga dritta *

numero totale di veicoli/ora	1400
% veicoli pesanti (0-100 %)	15
velocità massima auto (50-120 km/h)	80
velocità massima camion (50-80 km/h)	40
distanza assiale incrocio più vicino	0
pendenza percentuale strada (<=50 %)	0

1: asfalto non scanalato	2: calcestruzzo bituminoso
3: calcestr./asfalto scanal./rullato	4: selciato a superficie piana
5: selciato a superficie non piana	6: asfalto foncoassorbente

scelta del tipo di manto stradale: 1

TUTTO OK ??? (S/N)

 * modello rumore traffico stradale RLS-81 ***** strada lunga dritta *

N° di punti in orizzontale	30
N° di punti in verticale	21
distanza del punto più a sinistra dal centro strada (m)	40
distanza del punto più a destra dal centro strada (m)	30
altezza sul piano stradale del punto più basso (m)	0
altezza sul piano stradale del punto più alto (m)	20
altezza della barriera sinistra (0 se non c'è) (m)	3
altezza della barriera destra (0 se non c'è) (m)	4
distanza centro strada - barriera sinistra (m)	6
distanza centro strada - barriera destra (m)	8
altezza riflett.vertic.sinistro (0 se non c'è) (m)	3
altezza riflett.vertic. destro (0 se non c'è) (m)	3
distanza centro strada - rifl.vert.sinistro (m)	4
distanza centro strada - rifl.vert. destro (m)	6
Attenuazione rifless. barriera sinistra DLA, α , Str	4
Attenuazione rifless. barriera destra DLA, α , Str	8
NOME DEL FILE mappa.dat	

TUTTO OK ??? (S/N)

— Fig. 11

* modello rumore traffico stradale RLS-81 ***** strada lunga dritta *

Posizione: X = 0 Y= 0
Posizione relativa: d = 40 H= 0
livello di riferimento a 25 m = 69.2 dB(A)
correzione per tipo di manto = 0.0 dB(A)
correzione per incroci vicini = 0.0 dB(A)
correzione per pendenza = 0.0 dB(A)
correzione per distanza = -2.5 dB(A)
livello al ricev. senza ostac. = 66.6 dB(A)
correzione per schermature = -12.7 dB(A)
lunghezza aggiuntiva standard = 240.9 m
correzione per boschetto = 0.0 dB(A)
correzione per riflessioni = 0.0 dB(A)
tipo del raggio riflesso = 1
Livello riflesso non scherm. = 64.6 dB(A)
riduzione Lr_{refl} per schermat. = -9.6 dB(A)
livello rifl. barr. contrapp. = 55.0 dB(A)
LIVELLO TOT al ricevitore = 57.5 dB(A)

* modello rumore traffico stradale RLS-81 ***** strada lunga dritta *

Posizione: X = 0 Y= 15
Posizione relativa: d = 40 H= 15
livello di riferimento a 25 m = 69.2 dB(A)
correzione per tipo di manto = 0.0 dB(A)
correzione per incroci vicini = 0.0 dB(A)
correzione per pendenza = 0.0 dB(A)
correzione per distanza = -2.9 dB(A)
livello al ricev. senza ostac. = 66.3 dB(A)
correzione per schermature = -1.4 dB(A)
lunghezza aggiuntiva standard = 67.4 m
correzione per boschetto = 0.0 dB(A)
correzione per riflessioni = 0.0 dB(A)
tipo del raggio riflesso = 2
Livello riflesso non scherm. = 64.4 dB(A)
riduzione Lr_{refl} per schermat. = 0.0 dB(A)
livello rifl. barr. contrapp. = 64.4 dB(A)
LIVELLO TOT al ricevitore = 67.7 dB(A)

— Fig. 12

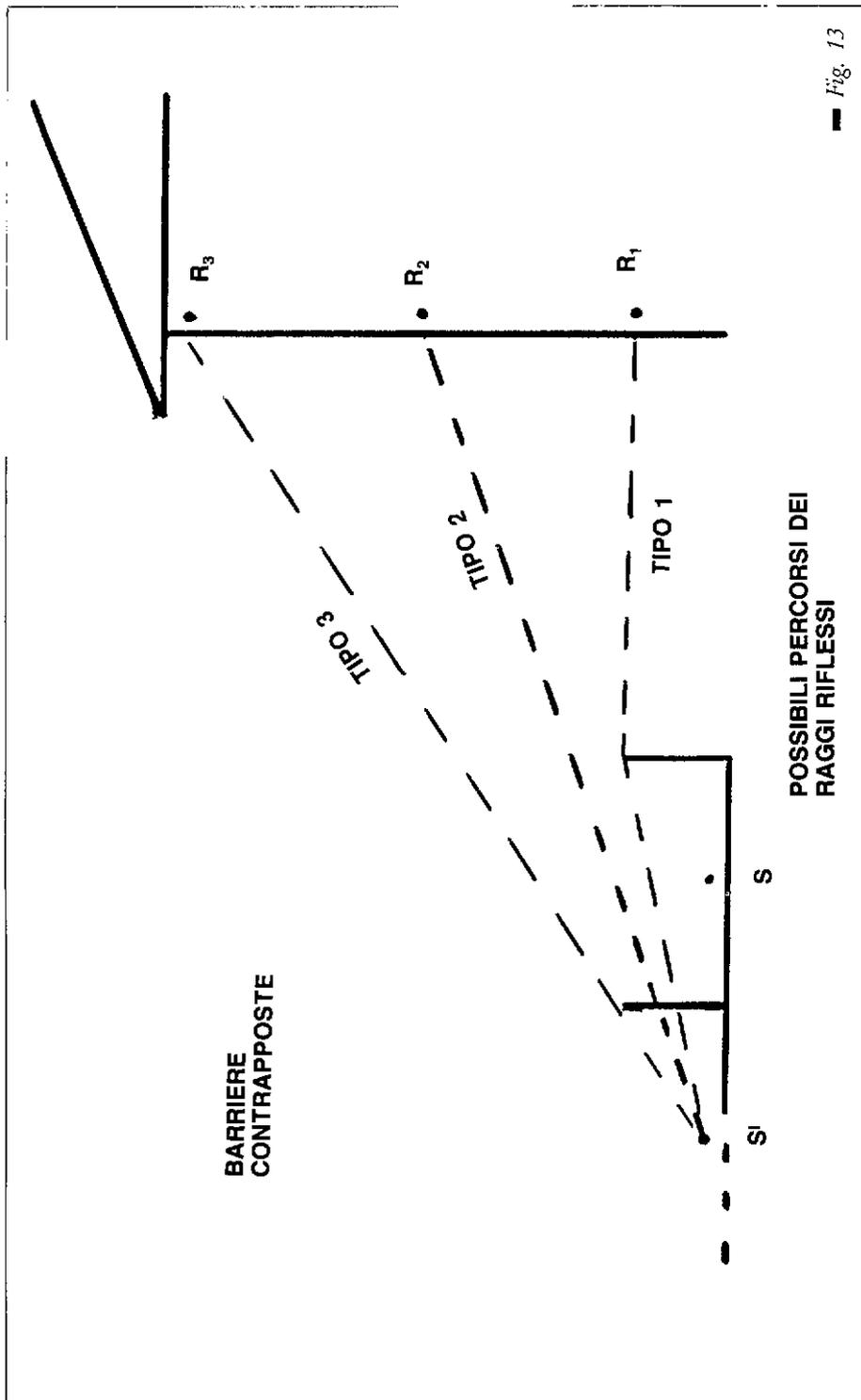
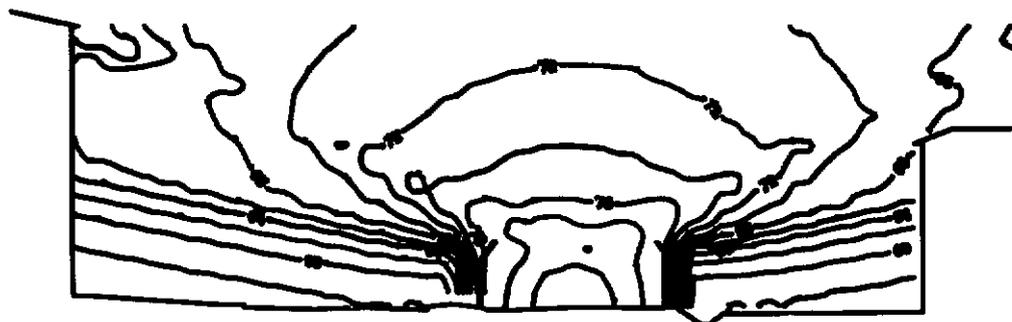


Fig. 13

Via del Partigiano - 1:200

Profili isolivello sonoro in dB(A)
ottenuti con il modello RLS-81

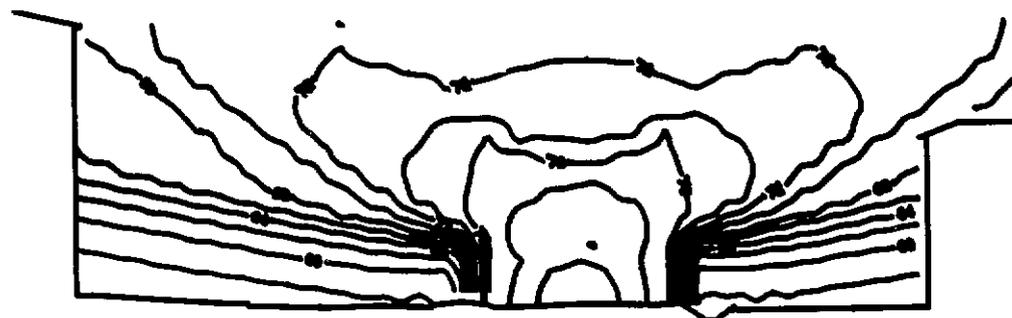


Sez. n.2

Altezza barriera 3+1.5 m

Via del Partigiano - 1:200

Profili isolivello sonoro in dB(A)
ottenuti con il modello RLS-81



Sez. n.2

Altezza barriera 4.5 m

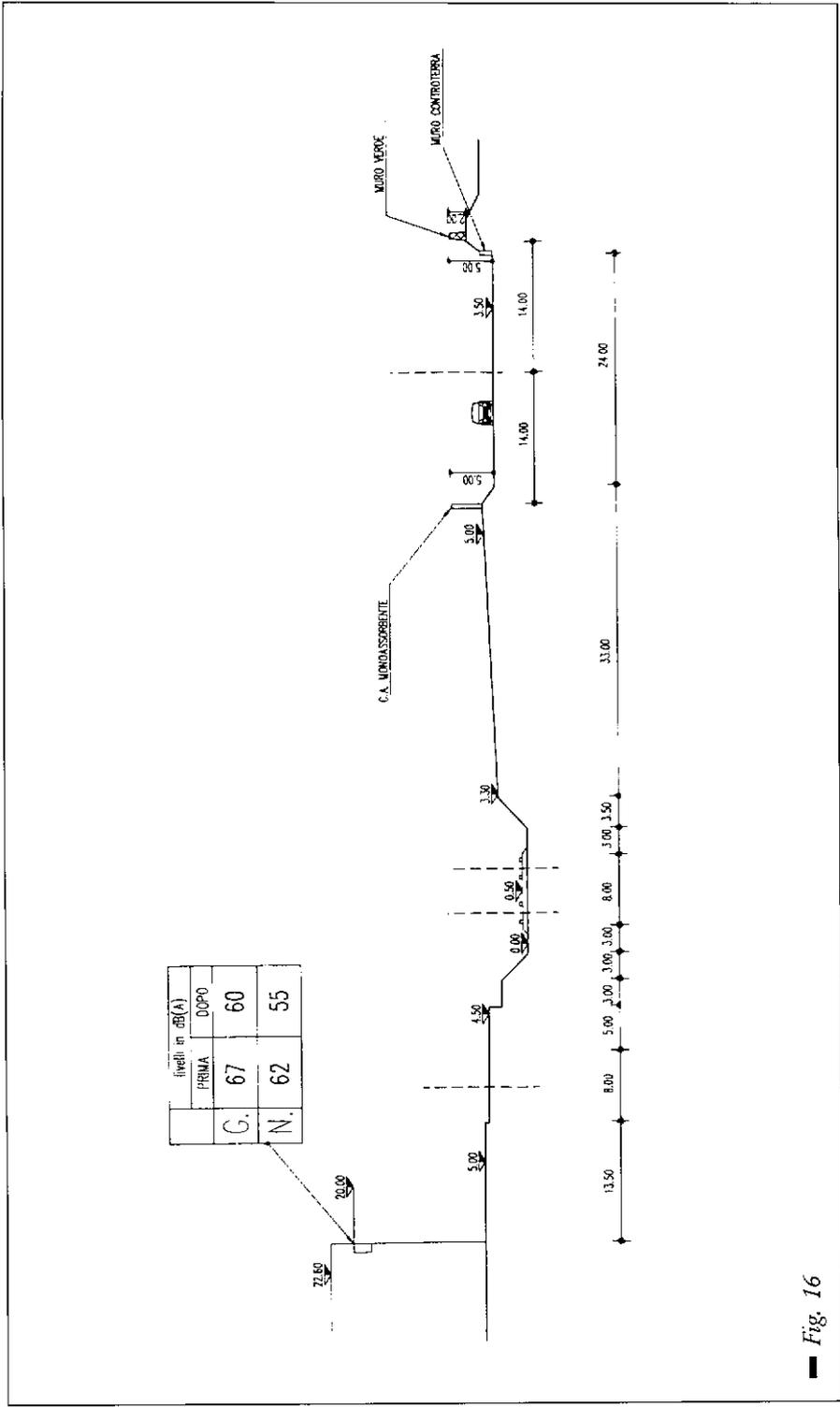
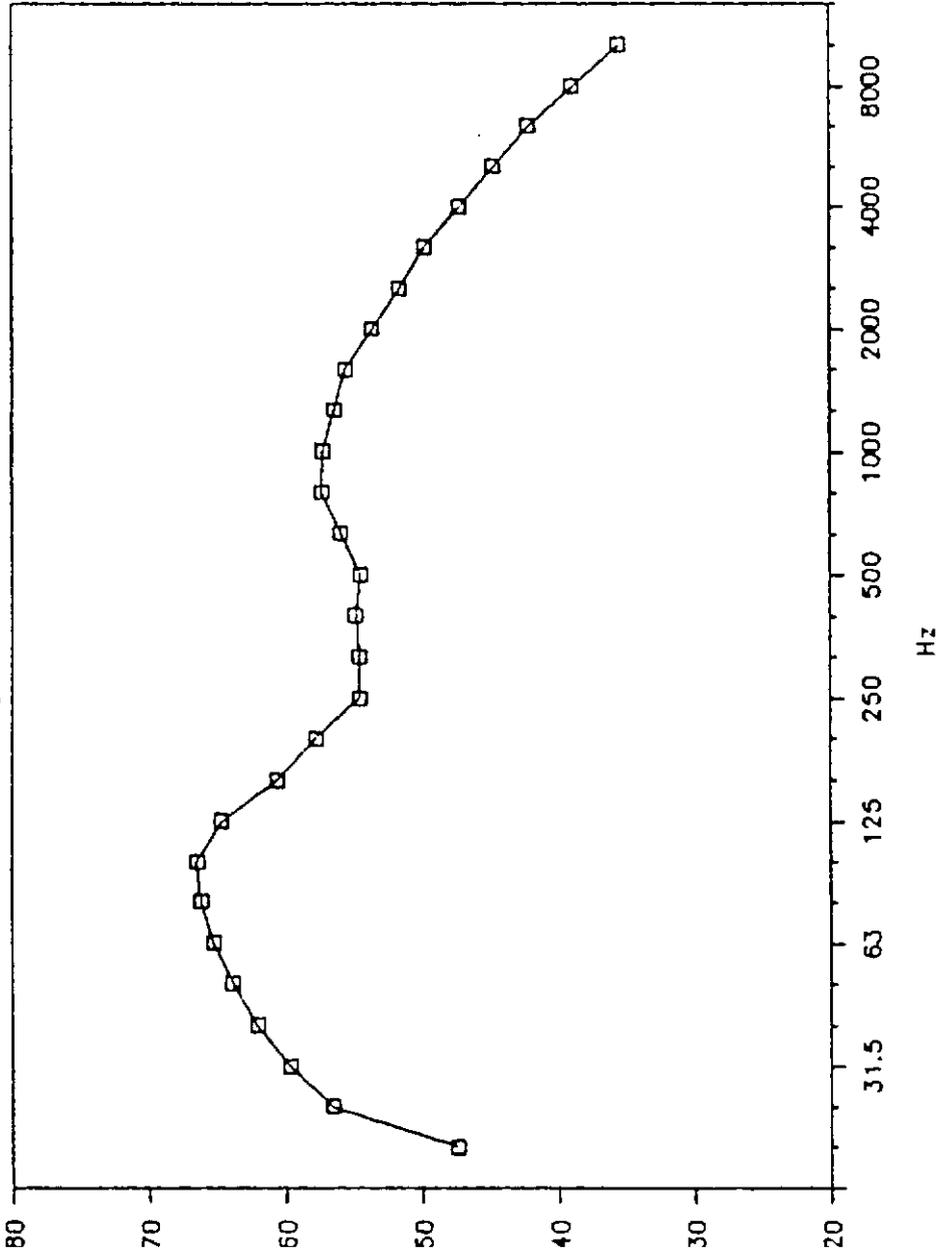


Fig. 16

SPETTRO RUMORE da Traffico MEDIO

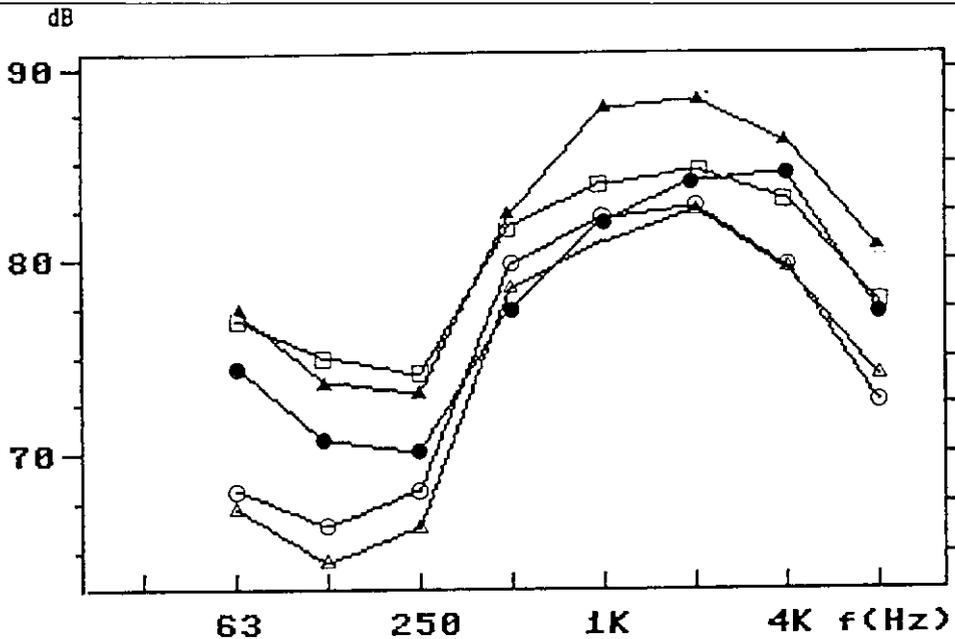
Misurato lungo Autostrada del Sole

Fig. 17



dB

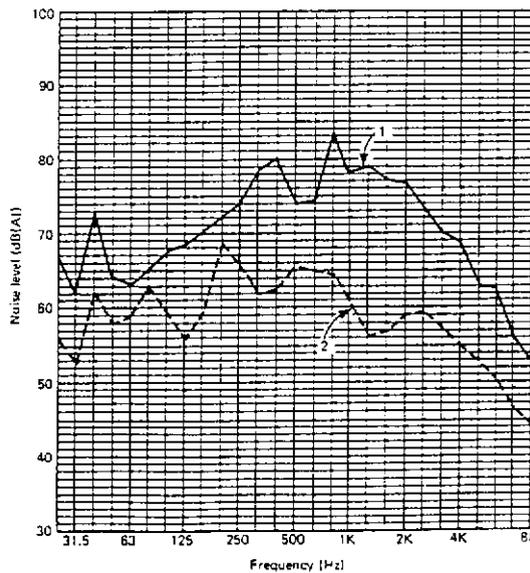
50



- Spettri di treni elettrici italiani.

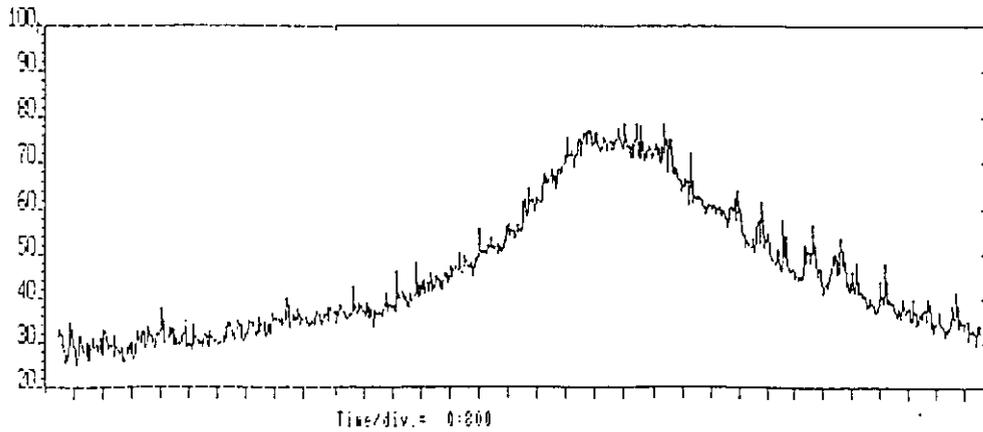
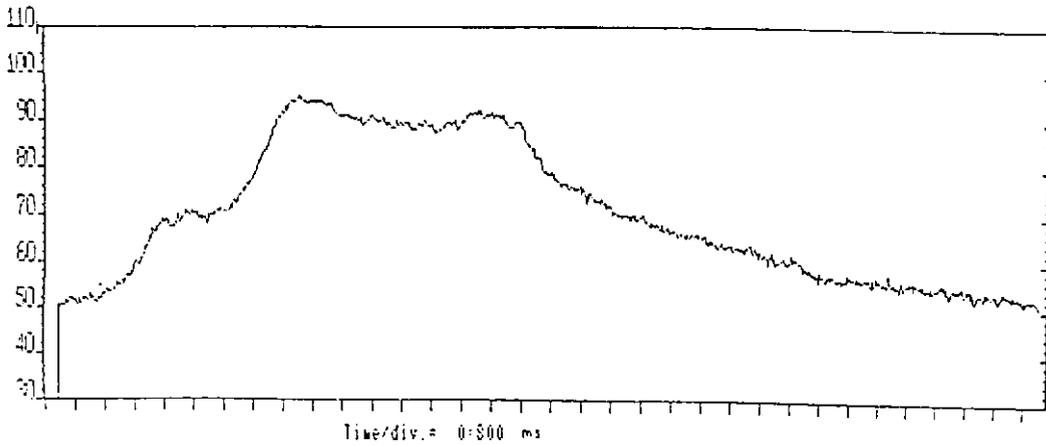
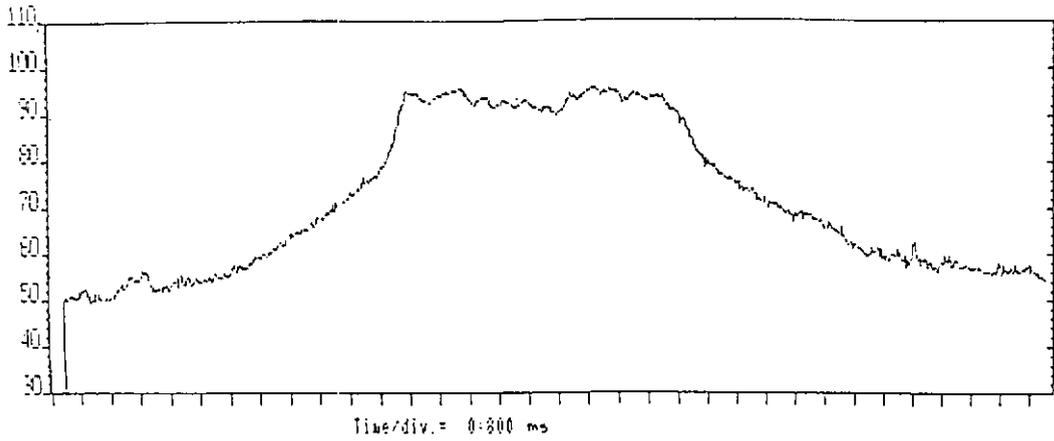
- : diretto, L = 200 m, V = 90 km/h
- △ : locale, L = 152 m, V = 101 km/h
- : diretto, L = 310 m, V = 123 km/h
- : diretto, L = 258 m, V = 138 km/h
- ▲ : intercity, L = 260 m, V = 161 km/h

— Fig. 18



- Spettri di rumore di tram urbani.

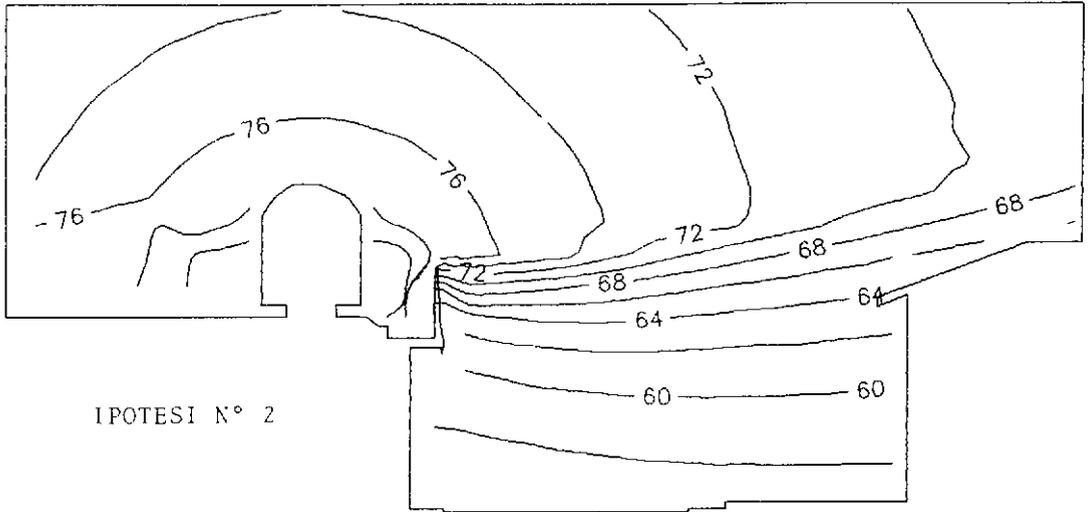
— Fig. 19



— Fig. 20 - Profili temporali al passaggio di un treno.

Ferrovia di Gemona

Livelli Sonori in dB(A)



Ferrovia di Gemona

Livelli Sonori in dB(A)

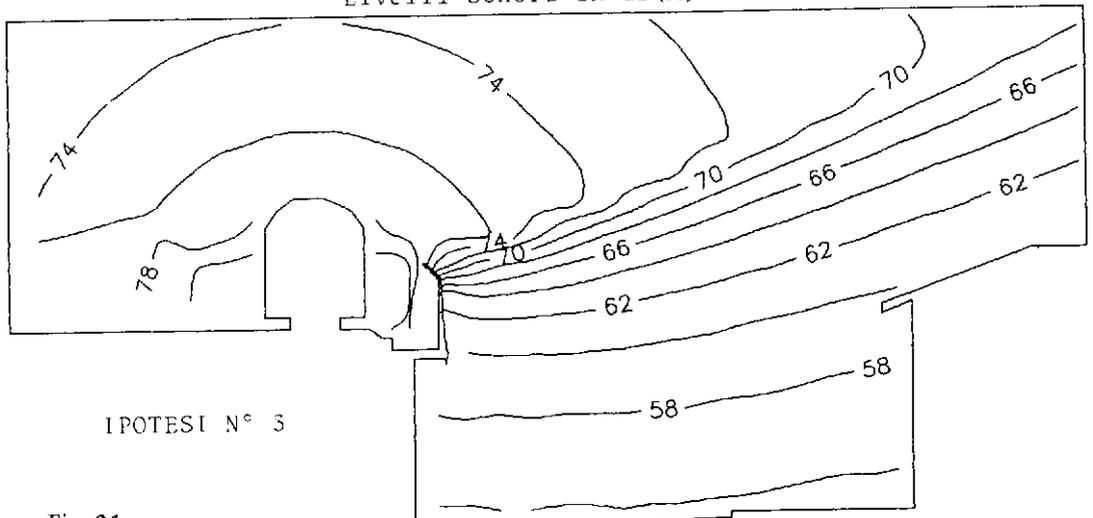


Fig. 21