



Ministero
dell'Ambiente
SIAR



Centro Interuniversitario di
Ricerca sull'Inquinamento
da Agenti Fisici

CRITERI PER L'ESECUZIONE DEI PIANI DI CONTENIMENTO ED ABBATTIMENTO DEL RUMORE PRODOTTO DALLE INFRASTRUTTURE STRADALI

Autore: **ing. Cinzia Buratti**

Docente di Tecnica del Controllo Ambientale presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Perugia.

Responsabile del Laboratorio di Controlli Ambientali – Sezione di Fisica Tecnica e Inquinamento Ambientale - CIRIAF di Perugia.

*Collana tecnico-scientifica
Tutela dell'Ambiente dall'Inquinamento Acustico
Volume n. 1*

Collana Tecnico-Scientifica MINISTERO DELL'AMBIENTE-CIRIAF
TUTELA DELL'AMBIENTE DALL'INQUINAMENTO ACUSTICO

Coordinamento: *Ministero dell'Ambiente - dott. Giuseppe Biondi*
CIRIAF Sede Centrale - prof. ing. Franco Cotana

Supporto tecnico ed editoriale: *ing. Cristiana Simoncini*
Dottoranda di Ricerca in Fisica
Tecnica Ambientale

Composizione e stampa: *p.i. Leandro Lunghi*

Convenzione tra Ministero dell'Ambiente SIAR
e Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici
(CIRIAF) per lo svolgimento di attività riguardanti le problematiche
tecnico-amministrative inerenti l'Inquinamento Acustico

Nota del coordinatore scientifico

Le Norme attuative della Legge Quadro 447/95 che lo Stato e le Regioni sono chiamati ad elaborare ed applicare richiedono conoscenze scientifiche approfondite sull'inquinamento acustico che riguardano le misure, l'emissione, la propagazione, l'assorbimento, l'isolamento acustico, le tecniche di contenimento, abbattimento e bonifica acustica con particolare riferimento al rumore prodotto dalle infrastrutture di trasporto, alla protezione acustica degli edifici e dei ricettori in generale.

Il CIRIAF (Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici) è un centro di ricerca a cui aderiscono oltre cento docenti universitari di 9 Atenei Italiani distribuiti sul territorio Nazionale e vari esperti di Enti istituzionali non accademici che si occupano della tutela dell'Ambiente. La rete di competenze scientifiche altamente qualificate messe in campo dal CIRIAF ha consentito una proficua collaborazione sinergica con il Ministero dell'Ambiente SIAR, dalla quale è scaturita questa collana tecnico-scientifica di 10 volumi nel campo della tutela dell'Ambiente dall'inquinamento acustico.

I primi sette volumi affrontano tematiche specifiche e sono rivolti a lettori già esperti di acustica applicata, il volume ottavo è invece rivolto a chi, per la prima volta, si avvicina alle problematiche dell'inquinamento acustico. I volumi nove e dieci sono infine una raccolta commentata di documenti che testimonia l'intenso lavoro svolto negli ultimi cinque anni dallo Stato e dalle Regioni nel dare piena attuazione alla Legge Quadro 447/95.

Un particolare ringraziamento va ai quattordici autori dei volumi appartenenti alle Università di Perugia, Firenze, Pisa, Genova, Roma "La Sapienza" e Politecnico di Bari; il loro intenso lavoro di esperti al massimo livello ed il supporto dei tecnici CIRIAF della sede centrale, hanno reso possibile questa collana.

prof. ing. Franco Cotana

Criteria per l'esecuzione di piani di contenimento del rumore stradale

**COLLANA TECNICO SCIENTIFICA CIRIAP – MINISTERO DELL'AMBIENTE:
"TUTELA DELL'AMBIENTE DALL'INQUINAMENTO ACUSTICO"**

- Volume 1:** *Criteria per l'esecuzione dei piani di contenimento ed abbattimento del rumore prodotto dalle infrastrutture Stradali.*
Autore: Ing. Cinzia Buratti
- Volume 2:** *Criteria per l'esecuzione dei piani di contenimento ed abbattimento del rumore prodotto dalle infrastrutture Ferroviarie.*
Autore: Ing. Francesco Asdrubali
- Volume 3:** *Criteria per l'esecuzione dei piani di contenimento ed abbattimento del rumore prodotto dalle infrastrutture Aeroportuali.*
Autori: Prof. Luciano Rocco, Arch. Gianfranco Cellai, Arch. Solange Sauro
- Volume 4:** *Criteria per l'esecuzione dei piani di contenimento ed abbattimento del rumore prodotto dalle infrastrutture Marittimo – Fluviali.*
Autore: Prof. Ugo Magrini
- Volume 5:** *Criteria per la progettazione degli interventi di bonifica acustica.*
Autore: Prof. Ettore Cirillo
- Volume 6:** *Criteria per la esecuzione degli interventi di bonifica acustica.*
Autori: Ing. Roberto Baruffa, Ing. Federico Rossi
- Volume 7:** *Criteria per la valutazione degli interventi di bonifica acustica.*
Autori: Prof. Enrico Maria Latrofa, Ing. Raffaele Latrofa
- Volume 8:** *Tecniche di misura ed abbattimento del rumore.*
Autore: Prof. Gino Moncada Lo Giudice
- Volume 9:** *Ricognizione ed analisi della applicazione dei decreti e dei regolamenti attuativi della legge 447/95.*
Autore: Arch. Emilia Guastadisegni
- Volume 10:** *Ricognizione analisi ed esame delle attività normative regionali ai sensi della Legge 447/95.*
Autore: Dott.ssa Alessia Mondello

Finito di stampare: Febbraio 2000

**CRITERI PER L'ESECUZIONE DEI PIANI DI CONTENIMENTO ED
ABBATTIMENTO DEL RUMORE PRODOTTO DALLE
INFRASTRUTTURE STRADALI**

INDICE

Introduzione	pag. 5
1. Riferimenti Normativi	pag. 7
1.1 <i>La Bozza di Decreto sulle infrastrutture di trasporto stradale</i>	pag. 7
1.2 <i>La Bozza di Decreto sui criteri di progettazione acustica delle costruzioni edilizie e delle infrastrutture di trasporto</i>	pag. 10
1.3 <i>Aspetti specifici del Decreto riguardante la misura del rumore</i>	pag. 12
2. Il Rumore da traffico stradale	pag. 14
2.1 <i>Caratteristiche del traffico stradale</i>	pag. 14
2.2 <i>Spettri del rumore stradale</i>	pag. 20
3. Modelli di previsione del rumore stradale ..	pag. 24
3.1 <i>Modello di previsione CNR</i>	pag. 27
3.2 <i>Modello di previsione CETUR</i>	pag. 31
3.3 <i>Modello di previsione del rumore per autostrade e</i>	

<i>superstrade</i>	pag. 34
<i>3.4 Modello di previsione basato sul calcolo del SEL</i>	pag. 35
<i>3.5 Modello ACIR – TM2</i>	pag. 40
4. <i>La bonifica delle infrastrutture di trasporto stradale</i>	pag. 47
<i>4.1 Tipologie di intervento</i>	pag. 47
<i>4.2 Interventi sulla sede stradale</i>	pag. 51
<i>4.3 Altri interventi</i>	pag. 57
5. <i>Casi di studio</i>	pag. 59
<i>5.1 La bonifica acustica del raccordo autostradale</i> <i>Perugia - Bettolle</i>	pag. 60
<i>5.2 Efficacia acustica di asfalti fonoassorbenti</i>	pag. 70
<i>5.3 Rumore stradale da rotolamento: un'indagine</i> <i>sperimentale</i>	pag. 74
<i>5.4 La bonifica acustica attraverso strumenti urbanistici:</i> <i>un intervento nel Comune di Terni</i>	pag. 82
6. <i>Bibliografia</i>	pag. 86

Introduzione

L'inquinamento acustico prodotto ad infrastrutture di trasporto, soprattutto stradali, ha una crescente rilevanza quale fattore di pressione sulla qualità della vita e sulla salute.

Il *Libro Verde* dell'Unione Europea individua il traffico stradale quale principale sorgente di rumore: questa affligge i nove decimi della popolazione europea esposta a livelli superiori a 65 dBA.

Circa l'esposizione al rumore stradale è interessante analizzare quali sono le tendenze che hanno caratterizzato questi ultimi quindici anni: dati forniti da diversi studi su larga scala in Europa hanno dimostrato che, sebbene i livelli di esposizione siano rimasti all'incirca costanti, rispetto a quelli dei primi anni Ottanta, la popolazione esposta a livelli superiori a 65 dBA è tuttora elevata e, cosa più preoccupante, è aumentata la popolazione esposta a livelli intermedi, tra 55 e 65 dBA, quale conseguenza di una rapida crescita del volume di traffico stradale.

Il presente opuscolo vuole fornire una panoramica del problema dell'inquinamento acustico dovuto a traffico stradale e sulle possibili linee di intervento nelle opere di bonifica, con una attenzione particolare alla situazione nazionale italiana.

I diversi argomenti saranno affrontati nei soli aspetti caratterizzanti le infrastrutture stradali, rimandando agli altri volumi della collana per i contenuti più generali o comunque meno inerenti al tema del presente lavoro.

Dopo una breve rassegna normativa specifica, saranno illustrati i principali aspetti di un piano di contenimento del rumore prodotto da infrastrutture stradali quali la misura del rumore stradale, i modelli di previsione e le principali tipologie di intervento. Saranno infine illustrati, a titolo esemplificativo, alcuni casi di studio.

1. Riferimenti Normativi

1.1 La Bozza di Decreto sulle infrastrutture di trasporto stradale

Gli orientamenti dei regolamenti attuativi di cui all'art. 11 della Legge Quadro 447/95 possono essere desunti dalla Bozza di Decreto sui criteri per la prevenzione ed il contenimento dell'inquinamento da rumore nelle infrastrutture stradali.

La bozza di decreto stabilisce le norme per la prevenzione ed il contenimento dell'inquinamento da rumore da applicarsi sia ad infrastrutture esistenti che di nuova realizzazione, nonché ad eventuali ampliamenti o potenziamenti.

Le infrastrutture viarie sono classificate in:

- Autostrade;
- Strade extraurbane principali;
- Strade extraurbane secondarie;
- Strade urbane di scorrimento;
- Strade urbane di quartiere;
- Strade locali urbane ed extraurbane.

La fascia territoriale di pertinenza di ciascuna infrastruttura è fissata a partire dal ciglio dell'infrastruttura stessa ed è pari a:

- 60 m per le autostrade, per le strade extraurbane principali e secondarie e

per le strade locali extraurbane;

- 30 m per le tratte autostradali di attraversamento di aree edificate, tangenziali e strade urbane di scorrimento, strade locali urbane e strade urbane di quartiere.

Qualora in tali fasce siano presenti altre infrastrutture viarie, la fascia di pertinenza stradale è data dall'unione delle rispettive fasce; nel caso di intersezione di fasce di infrastrutture diverse, prevalgono, nelle parti comuni, i valori più conservativi.

All'interno delle rispettive fasce di pertinenza, i valori di immissione dovuti all'esercizio sono così fissati.

a) infrastrutture in esercizio e loro potenziamento

- $Leq = 70$ dBA per il periodo diurno e $Leq = 60$ dBA per il periodo notturno per le autostrade, le strade extraurbane principali e secondarie;
- $Leq = 65$ dBA per il periodo diurno e $Leq = 55$ dBA per il periodo notturno per le tratte autostradali di attraversamento di aree edificate, tangenziali e strade urbane di scorrimento, strade locali extraurbane;
- $Leq = 60$ dBA per il periodo diurno e $Leq = 50$ dBA per il periodo notturno per strade locali e per le strade urbane di quartiere.

- b) *infrastrutture di nuova costruzione e ampliamento di quelle esistenti*
- Leq = 65 dBA per il periodo diurno e Leq = 55 dBA per il periodo notturno, per le autostrade, le strade extraurbane principali e secondarie;
 - Leq = 60 dBA per il periodo diurno e Leq = 50 dBA per il periodo notturno, per le tratte autostradali di attraversamento urbano, tangenziali e strade urbane di scorrimento.

I limiti suddetti sono sintetizzati in tab. 1.

TAB. 1 VALORI LIMITE DI IMMISSIONE IN ESERCIZIO DEL RUMORE PRODOTTO DA INFRASTRUTTURE STRADALI (BOZZA DI DECRETO SULLE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO STRADALE)			
Tipologia di infrastruttura stradale		Leq (dBA)	
Infrastrutture in esercizio e loro potenziamento	a) autostrade, strade extraurbane principali e secondarie	70	60
	b) tratte autostradali di attraversamento, tangenziali, strade urbane di scorrimento, strade locali extraurbane	65	55
	c) strade locali, strade urbane di quartiere	60	50
Infrastrutture di nuova costruzione e ampliamento di quelle esistenti	a) autostrade, strade extraurbane principali e secondarie	65	55
	b) tratte autostradali di attraversamento, tangenziali, strade urbane di scorrimento, strade locali extraurbane	60	50

1.2 La Bozza di Decreto sui criteri di progettazione acustica delle costruzioni edilizie e delle infrastrutture di trasporto

Fra i decreti di attuazione della Legge Quadro, è attualmente in corso di elaborazione ad opera del Ministero dei Lavori Pubblici un decreto riguardante i criteri per la progettazione e la ristrutturazione delle costruzioni edilizie e delle infrastrutture di trasporto, ai fini del contenimento dell'inquinamento acustico, in attuazione dell'art. 3, comma 1, lett. f) della suddetta legge.

Il decreto rappresenta un atto normativo di indubbia importanza in materia di inquinamento acustico, in quanto interviene in due settori particolarmente interessati dal problema, quali le costruzioni edilizie e le infrastrutture di trasporto.

Per le infrastrutture di trasporto sono forniti i criteri di progettazione sia per le opere esistenti che per quelle da realizzare.

I criteri di progettazione si distinguono in base alle diverse tipologie di infrastrutture di trasporto:

- autostrade, strade extraurbane, strade urbane;
- ferrovie, metropolitane, tramvie;
- canali e fiumi navigabili;
- porti;

- aeroporti.

Per le infrastrutture stradali, il decreto fornisce le specifiche che un progetto di bonifica deve contenere sia per opere nuove che già esistenti.

Ad esempio, se l'intervento interessa un'infrastruttura già esistente, è necessario che la progettazione proceda prendendo in considerazione i seguenti aspetti:

- a) classificazione dell'infrastruttura in base a quanto stabilito dal codice della strada;
- b) rilevazione dei flussi veicolari;
- c) rilevazione dello spettro di emissione acustica dell'infrastruttura, nel periodo di riferimento diurno e notturno;
- d) acquisizione della planimetria e delle sezioni significative della zona interessata, avendo cura di indicare gli edifici che si devono proteggere;
- e) mappatura acustica della zona interessata, rilevando inoltre per gli edifici da proteggere lo spettro medio del livello di rumore, in corrispondenza dell'edificio;
- f) calcolo dei massimi livelli di rumore immessi, in relazione ai limiti stabiliti dalla zonizzazione del territorio, con particolare riferimento agli edifici da proteggere;

- g) valutazione dei superamenti e scelta dei possibili interventi per riportare i livelli di rumore ai valori consentiti;
- h) stima della riduzione ottenibile con tali interventi; verifica in opera dell'efficacia raggiunta.

Nel caso in cui l'infrastruttura sia ancora da realizzare, la fase di progettazione si differenzia solamente per quanto riguarda la rilevazione dei flussi veicolari e degli spettri di emissione (fasi b) e c)). In questo caso, infatti, si deve procedere assumendo uno spettro tipo di emissione, da scegliere sulla base della classificazione stabilita in a) e secondo quanto specificato nella normativa tecnica prEN 1793-3/97 e ad una stima dei flussi veicolari.

Sono inoltre presentate le caratteristiche di alcuni possibili interventi di bonifica, quali l'impiego di asfalti fonoassorbenti, barriere antirumore naturali ed artificiali, etc., per le quali si rimanda al paragrafo 4 o più dettagliatamente ai Volumi 6 e 7 di questa collana.

1.3 Aspetti specifici del Decreto riguardante la misura del rumore

Le specifiche per effettuare le misure di rumore sono riportate nel Decreto del Ministero dell'Ambiente del 16/3/98, dove sono indicati il

livello di precisione della strumentazione e le modalità di misura.

Gli aspetti generali sul problema delle misure di rumore sono dettagliatamente trattati nel Volume 8 della Collana. Nel presente paragrafo saranno esclusivamente illustrati gli aspetti riguardanti la misura del rumore stradale.

Secondo le indicazioni del Decreto, “*essendo il traffico stradale un fenomeno avente carattere di casualità o pseudocasualità*”, il rilievo del rumore da esso prodotto deve essere effettuato per un tempo non inferiore ad una settimana.

Il Livello Equivalente Continuo deve essere rilevato, per ogni ora, per tutto l'arco delle ventiquattro ore: dai singoli dati sul livello equivalente continuo ponderato A si deve quindi calcolare:

- per ogni ora del giorno della settimana il livello equivalente diurno e notturno;
- i valori medi settimanali diurni e notturni.

Il decreto fornisce inoltre indicazioni sulla posizione del microfono: questo deve essere posto ad una distanza di 1m dalla facciata degli edifici esposti ai livelli di rumore più elevati e la quota da terra del microfono deve essere pari a 4m. In assenza di edifici, il microfono deve essere posto in corrispondenza della posizione occupata dai ricettori sensibili.

2. Il rumore da traffico stradale

2.1 Caratteristiche del traffico stradale

La tendenza rilevata nel periodo 1970 ÷ 95 circa l'estensione della rete infrastrutturale di trasporto sul territorio nazionale è stata caratterizzata da un aumento più che consistente della rete stradale e dal calo della dotazione della rete ferroviaria.

Ad oggi, l'estensione della rete stradale nazionale può essere stimata in oltre 300.000 km, di cui circa 6.400 km di autostrade, 45.000 km di strade statali e 260.000 km di strade provinciali e comunali extraurbane.

La dimensione dell'impatto acustico da queste derivato può essere dedotta anche dai dati sul parco veicoli circolanti: oltre 3 milioni (1992), dei quali 29.4 milioni rappresentato da autovetture, e circa 2.7 milioni da veicoli industriali.

In generale, le infrastrutture di trasporto stradale possono essere identificate in sorgenti di rumore con sviluppo dimensionale prevalente secondo un'unica direzione. Il livello di potenza acustica caratteristico di una strada e relativo ad un tratto di lunghezza finita dipende da diversi fattori, quali ad esempio:

- portata del flusso veicolare;
- numero di corsie per senso di marcia;
- dimensioni della carreggiata;
- tipologia dei veicoli e rapporto tra le numerosità delle diverse cate-

gorie.

Altri fattori intervengono allorché si valuta il livello equivalente prodotto misurabile in un punto del campo esterno:

- altezza del piano stradale rispetto alla quota del punto ricevente;
- lunghezza del tratto stradale le cui emissioni sono realmente contribuenti al livello di rumore nel punto;
- presenza di barriere naturali o artificiali, di dimensioni variabili, poste tra sorgente e ricevitore.

Il rumore emesso da ciascun veicolo può inoltre essere scomposto in diverse componenti: il rumore proveniente dalle diverse parti del veicolo, motore, impianto di scarico, trasmissione; il rumore proveniente dal contatto ruota pavimentazione e infine il rumore aerodinamico.

In generale il rumore emesso dal motore dipende dalle caratteristiche costruttive dello stesso, mentre la rumorosità prodotta dalla trasmissione e dallo scarico non rivestono particolare rilevanza. Al contrario, il rumore da rotolamento, ad eccezione di soli veicoli pesanti, diviene la principale fonte di rumorosità, che cresce con l'usura.

L'importanza relativa delle varie fonti di rumore dipende dal tipo di veicolo e soprattutto dalla sua velocità. In Fig. 1 è riportato l'andamento della rumorosità dovuta al gruppo propulsore e all'avanzamento (rotolamento e aerodinamica) al variare della velocità.

Nel caso dei veicoli pesanti il rumore prodotto dal motore prevale sempre sulla somma del rumore da rotolamento e aerodinamico (avanza-

mento). Nel caso di veicoli leggeri, per velocità inferiori a 60 km/h prevale il rumore emesso dal motore, per velocità superiori quello da rotolamento.

Il rumore aerodinamico dà un contributo significativo solo per velocità superiori a 150 km/h.

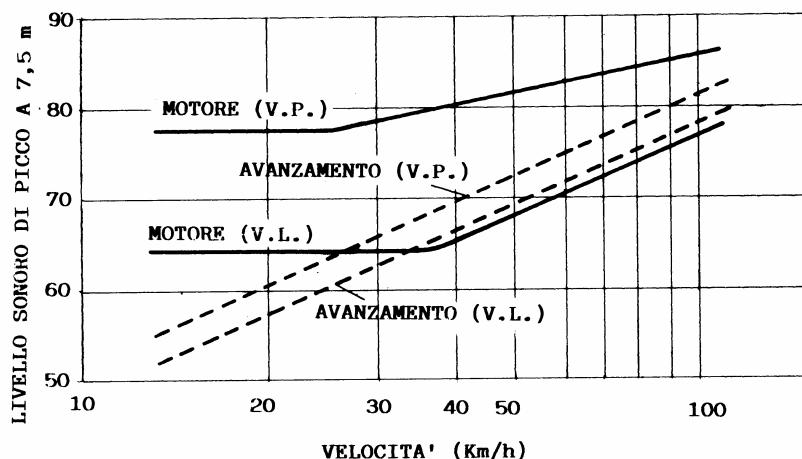


Fig. 1: Andamento della rumorosità dovuta al gruppo propulsore e all'avanzamento (rotolamento, aerodinamica), al variare della velocità (V.L. = veicoli leggeri, V.P. = veicoli pesanti) [6].

Non tutti i veicoli dello stesso tipo presentano lo stesso livello massimo di rumorosità (in dBA), ma si verifica una certa dispersione statistica; in Fig. 2 sono riportate le curve di distribuzione statistica cumulativa di vari tipi di veicoli, ottenute da misure urbane.

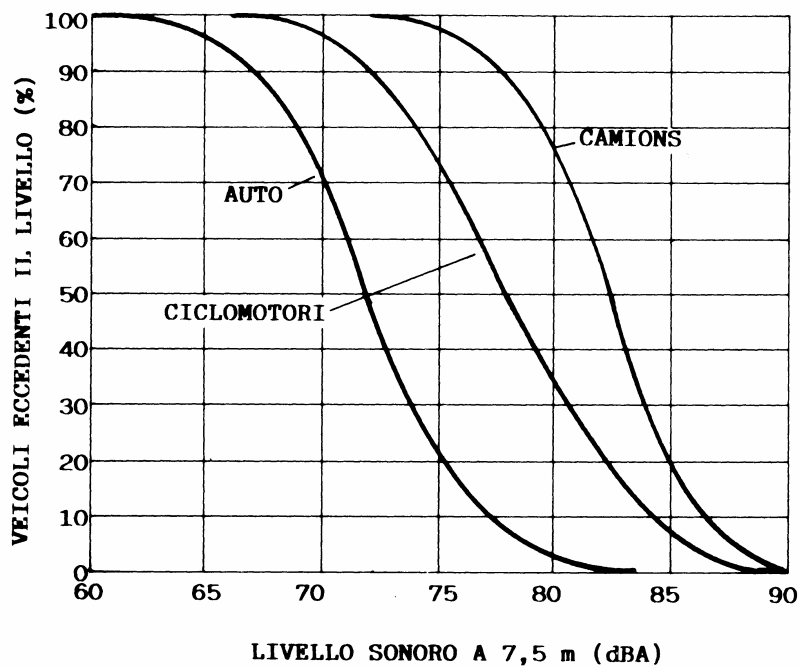


Fig. 2: Curves of statistical cumulative distribution for various types of vehicles. Percentage of vehicles that exceed a certain value of the noise level [6].

Also the driving style has an influence on the noise level produced by a car; in Fig. 3 the cumulative distributions of the noise produced by cars with a four-cylinder engine in three cases of driving: gentle, medium and aggressive: obviously the aggressive driving produces the highest noise (on average 5dB more than the gentle driving style).

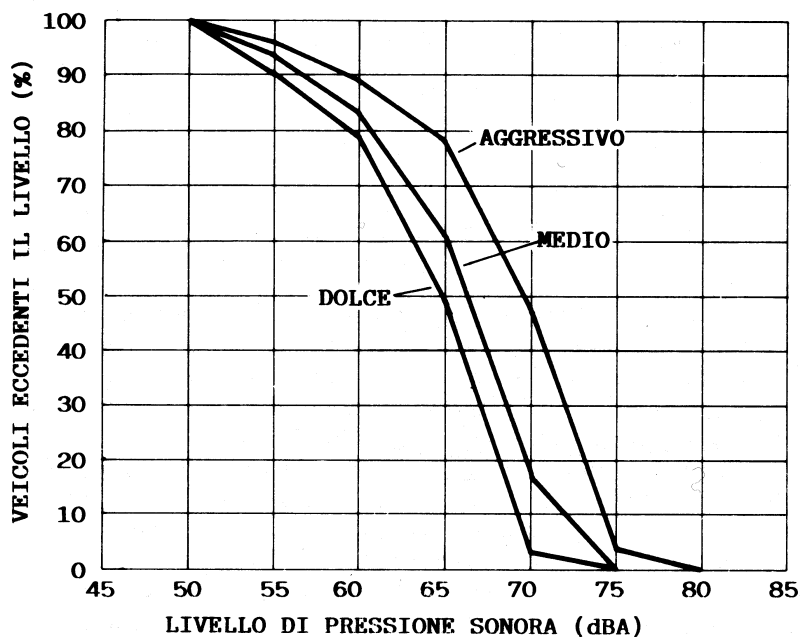


Fig. 3: Distribuzione cumulativa della rumorosità prodotta da automobili di media cilindrata nei tre casi di guida dolce, media e aggressiva [6].

La rumorosità indotta in un sito dal traffico stradale infine dipende da due classi di parametri: la distribuzione temporale dei veicoli (nelle varie ore del giorno o secondo il giorno della settimana) e le caratteristiche di circolazione del luogo (rettilineo, curva, presenza d'incroci o semafori, pendenza della strada, etc.).

Il Livello Equivalente Continuo prodotto da traffico stradale è correlato alla portata oraria della strada, che dipende dalla distribuzione tem-

porale dei veicoli e alla velocità media dei veicoli. Inoltre, per ogni tipo di strada esiste una correlazione fra velocità e portata oraria: la velocità generalmente decresce con la portata oraria, fino alla saturazione (portata massima), dopodiché si verifica una proporzionalità diretta fra portata e velocità (in queste condizioni la distanza fra i veicoli diviene costante).

Gli andamenti tipici sono descritti nei diagrammi di Fig. 4, per i casi di strada urbana e autostrada; in Fig. 5 è invece riportato l'andamento del Livello Equivalente al variare della portata: si può osservare che il livello più alto si registra nel caso di portata elevata, ma non massima; questo significa che è sbagliato considerare la portata massima di una strada come la condizione più gravosa dal punto di vista acustico.

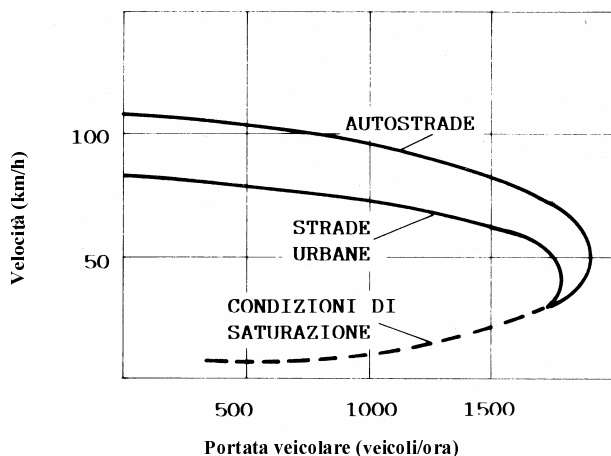


Fig. 4: *Correlazione tra velocità e portata veicolare [6]*

Infatti, come si vede dalla fig. 4, al crescere della portata la velocità diminuisce per effetto delle maggiori difficoltà di circolazione, quindi ad un certo punto la diminuzione di velocità prevale sull'incremento del numero di veicoli, ai fini del livello equivalente continuo di rumore e c'è quindi un'inversione di tendenza.

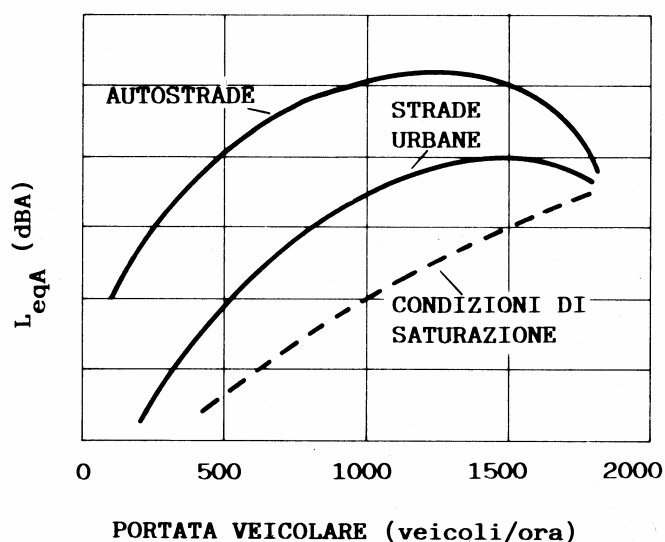


Fig. 5: Correlazione tra Livello Equivalente di rumore e portata veicolare [6]

2.2 Lo spettro del rumore stradale

Il traffico stradale è certamente la sorgente di inquinamento acustico preponderante in ambiente urbano: esso è capace di generare una vasta

gamma di spettri acustici, a seconda del tipo di strada, dalla portata oraria di veicoli, del tipo di veicoli, della velocità degli stessi, delle condizioni di traffico.

Esistono a proposito varie Normative che hanno cercato di definire uno spettro normalizzato del traffico stradale, da utilizzare per la misura in laboratorio delle caratteristiche di isolamento acustico di elementi delle costruzioni e delle barriere acustiche e sono di seguito riportate:

Normativa FRANCESE NF S 31-051 (dicembre 1985)

Mesure du pouvoir d'isolation acoustique des éléments de construction et de l'isolement des immeubles. Mesure en laboratoire du pouvoir d'isolation acoustique au bruit aérien des éléments de construction; AFNOR.

Tale normativa concorda con la ISO 140-3 e definisce uno spettro acustico del rumore stradale da utilizzare per la misura in laboratorio del potere fonoisolante di elementi di costruzioni. Lo spettro di riferimento usato nella Normativa Francese è stato elaborato a partire da misure in diverse condizioni di traffico stradale, con più e meno veicoli pesanti e varie velocità del flusso dei veicoli, perciò esso rappresenta un traffico medio.

Tale spettro è definito in bande di 1/3 di ottava con i Livelli di banda ponderati A, ed è normalizzato a 0 dB(A) cioè il livello globale (A) che si ottiene da esso è esattamente = 0 dB(A).

Normativa SVEDESE Nordtest Method NT ACOU 062 1987

Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources – Survey method using a reference sound source.

Lo spettro di riferimento usato nella Normativa Svedese è la media di misure in aree urbane ed è rappresentativo di un traffico misto urbano a velocità di 50 Km/h con circa il 10% di veicoli pesanti. Lo spettro acustico del rumore stradale è definito in bande di 1/3 di ottava con i Livelli di banda ponderati A, ed è normalizzato a 0 dB(A).

Normativa prEN 1793-3 May 1997

Dispositivi per la riduzione del rumore da traffico stradale – Metodo di prova per la determinazione della prestazione acustica. Spettro normalizzato del rumore da traffico.

Lo spettro acustico del rumore stradale è definito in bande di 1/3 di ottava con i Livelli di banda ponderati A, ed è normalizzato a 0 dB(A).

Società Autostrade

Lo spettro acustico del rumore stradale è definito in bande di 1/3 di ottava con i Livelli di banda ponderati A, ed è normalizzato a 0 dB(A). In più, per ogni banda viene fornito anche il Livello ponderato A non normalizzato (semplice traslazione dello spettro normalizzato).

Secondo tali valori il Livello globale ponderato (A) dell'intero spettro è 83,8 dB(A).

Tutti gli spettri normalizzati sono riportati Fig. 6. e nella Tabella 2.

Tabella 2: Spettri di rumore da traffico stradale

f (Hertz)	<i>NFS 31-051</i>	<i>NTACOU 062</i>	<i>PrEN 1793-3</i>	<i>SOCIETÀ AUTOSTRADE</i>	
	$L_{i(n)}\text{dB(A)}$	$L_{i(n)}\text{dB(A)}$	$L_{i(n)}\text{dB(A)}$	$L_{i(n)}\text{dB(A)}$	$L_i \text{dB(A)}$
100	-23	-20	-20	-21.8	62
125	-21	-20	-20	-21.8	62
160	-17.3	-18.5	-18	-21.8	62
200	-15.8	-17	-16	-17.8	66
250	-12.5	-15	-15	-16.8	67
315	-13.5	-14	-14	-16.3	67.5
400	-12.7	-13	-13	-13.8	70
500	-12.1	-11.5	-12	-13.3	70.5
630	-10.8	-11	-11	-13.3	70.5
800	-10.4	-9	-9	-10.8	73
1000	-9.9	-8.5	-8	-8.8	75
1250	-10.1	-9.5	-9	-7.8	76
1600	-9.9	-10	-10	-7.3	76.5
2000	-10.7	-11.5	-11	-10.8	73
2500	-10.6	-14.5	-13	-11.8	72
3150	-13.7	-15.5	-15	-14.3	69.5
4000	-16.9	-16.5	-16	-17.8	66
5000	-19.4	-18	-18	-20.3	63.5

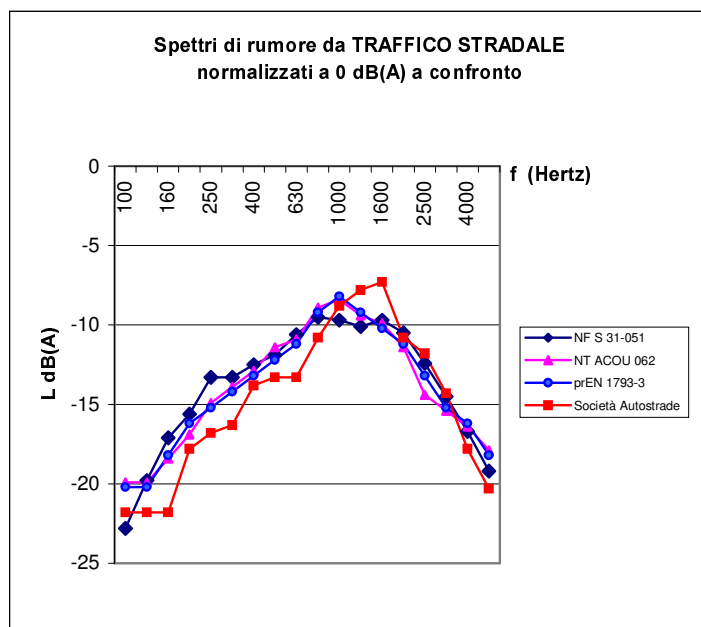


Fig. 6: Spettri normalizzati di rumore da traffico stradale

3. Modelli di previsione del rumore da traffico stradale

Un'infrastruttura stradale può essere descritta, quale sorgente di rumore, attraverso modelli matematici specifici che ne simulano l'emissione.

Attraverso tali modelli si possono prevedere gli effetti che il rumore stradale può produrre in un campo più o meno vasto, con la conseguente riduzione dei rilevamenti diretti e la possibilità di valutare l'impatto acusti-

co di infrastrutture non ancora esistente.

Attraverso tali modelli il livello di rumore prodotto può essere stimato a partire dai dati del traffico e delle caratteristiche topografiche della sorgente. I modelli basati su dati del traffico si basano su alcuni parametri, determinati da dati sperimentali, atti a caratterizzare la potenza della sorgente; questi parametri sono diversi nei vari Stati in quanto il parco macchine e le caratteristiche delle pavimentazioni stradali non sono le stesse.

Tra i modelli più utilizzati in Italia vanno citati il modello CNR (italiano) e il CETUR (francese); secondo tali modelli la stima dell'inquinamento acustico in un punto viene determinata dalla somma dei contributi energetici delle varie sorgenti; il livello sonoro ponderato in curva "A" si valuta sulla base dell'algoritmo descritto in figura 7.

Come si vede, oltre che delle caratteristiche del traffico, i modelli tengono conto di altre variabili quali: le caratteristiche della pavimentazione, la pendenza dell'asse stradale (CNR), ma anche di coefficienti adimensionali di omogeneizzazione tra veicoli leggeri e pesanti (CETUR).

In alcune situazioni, infine, può essere utile simulare la sorgente non solo in termini di livello di potenza, ma anche di spettro di emissione; a tal fine sono disponibili gli spettri normalizzati o rilevabili sperimentalmente, di cui al par. 2.2.

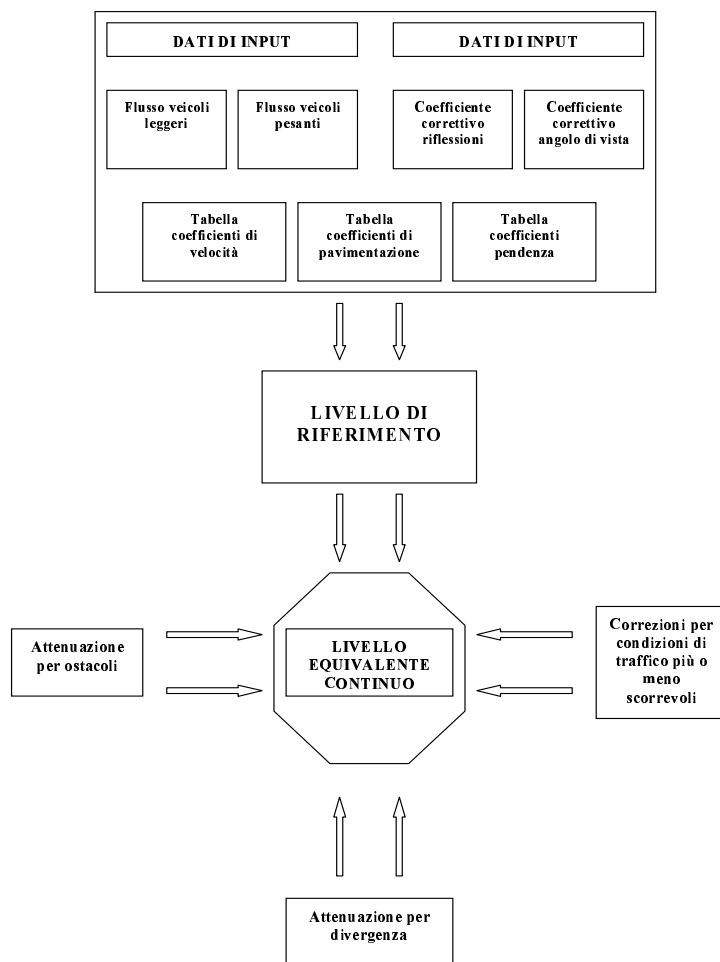


Fig. 7: Structure of the CNR and CETUR estimation algorithms

Di seguito sono riportate nel dettaglio le caratteristiche di quattro modelli maggiormente usati nella stima e previsione del rumore stradale.

3.1 Modello di previsione CNR

Il contributo di una strada di carattere urbano (presenza di edifici attorno alla sede stradale e presenza non trascurabile del capo riverberato) al livello sonoro equivalente ponderato A in un determinato punto può essere determinato mediante un algoritmo avente la seguente struttura:

$$L_{eq} = L_{rif} + \Delta_{bar} + \Delta_{div} + \Delta_{traf} \quad (3.1)$$

dove:

L_{eq} = livello sonoro equivalente, espresso in dB(A);

L_{rif} = livello sonoro di riferimento, espresso in dB(A);

Δ_{bar} = attenuazione dovuta alla interposizione di un ostacolo tra la sorgente e il ricevente, espressa in dB(A);

Δ_{div} = attenuazione dovuta a divergenza, ovvero alla distanza dalla sorgente, espressa in dB(A);

Δ_{traf} = termine correttivo in particolari condizioni di traffico, espresso in dB(A).

Il livello sonoro di riferimento L_{rif} rappresenta il livello sonoro in corrispondenza della sede viaria, mentre Δ_{bar} e Δ_{div} rappresentano i termini correttivi che tengono conto rispettivamente della distanza dalla stra-

da del punto stima e di diverse condizioni di traffico.

Il calcolo del livello sonoro di riferimento viene effettuato distinguendo le tipologie di strada in:

- strade ad "U", ossia costeggiate da edifici da entrambi i lati e tali che il rapporto tra l'altezza degli edifici e la larghezza della strada sia maggiore o uguale a 0,2;
- strade ad "L", ossia costeggiate da edifici da un solo lato e tali che il rapporto tra l'altezza degli edifici e la larghezza della strada sia minore o uguale a 0,2;
- strade aperte, ossia libere su entrambi i lati.

Nel seguito, per semplicità di trattazione, la strada ad "L" e la strada "Aperta" verranno accomunate in un unico caso di riferimento, evidenziando le eventuali differenze.

Il valore di L_{rif} si suppone costante all'interno della carreggiata sia nel caso di strade costeggiate da edifici che nel caso di strade ad "L" o "Aperite". Il livello sonoro in mezzeria coincide pertanto con il livello sonoro in corrispondenza della facciata di edifici eventualmente presenti, che costeggiano la strada o ai lati esterni della strada. Il livello sonoro di riferimento viene valutato in entrambi i metodi con la relazione seguente:

$$L_{rif} = A + 10 \times \log(Q_{VL} + E Q_{PL}) + \Delta_r + \Delta_V + \Delta_S + \Delta_P + \Delta_{\theta} \quad (3.2)$$

dove:

A = costante espressa in dB(A);

Q_{VL} = flusso di veicoli leggeri (peso minore di 3,5 t), espresso in veicoli/h;

Q_{PL} = flusso di veicoli pesanti (peso maggiore di 3,5 t), espresso in veicoli/h;

E = coefficiente adimensionale di omogeneizzazione tra veicoli leggeri e pesanti;

Δ_R = coefficiente correttivo per tener conto della riflessione del suono sulle facciate degli edifici eventualmente presenti ai lati della strada, espresso in dB(A);

Δ_V = coefficiente correttivo di velocità, espresso in dB(A),

Δ_S = coefficiente correttivo di pavimentazione, espresso in dB(A);

Δ_P = coefficiente correttivo di pendenza dell'asse stradale, espresso in dB(A);

Δ_ϑ = coefficiente correttivo per simulare le emissioni sonore di sorgenti lineari di lunghezza finita, espressa in dB(A).

I valori numerici assegnabili ai parametri sopra elencati sono riportati nella Tabella 4, per le due situazioni tipiche di strada ad "U" e strada ad "L" o "aperta".

L'interposizione di un ostacolo tra la sorgente ed il ricevente determina un abbattimento del livello sonoro percepito Δ_{bar} .

In ambiente urbano, gli ostacoli sono principalmente costituiti dagli edifici.

Il livello sonoro di riferimento, pertanto, costante all'interno della sede viaria, subisce un abbattimento oltrepassando il fronte dei fabbricati eventualmente presenti a lato della strada stessa. L'entità di tale riduzione risulta di difficile quantificazione, se non si ricorre a studi e valutazioni di dettaglio a microscala, che prescindono dagli scopi del modello di simulazione in esame. A livello indicativo, si può considerare che l'effetto barriera prodotto da una fila di edifici valga:

$$\Delta_{\text{bar}} = 5 \text{ [dBA]} \quad (3.3)$$

Il livello sonoro percepito dall'osservazione, a parità di tutte le altre condizioni, è funzione della distanza tra questo e la sorgente di emissione. Aumentando tale distanza si ha un'attenuazione del livello sonoro percepito.

La correlazione tra distanza e livello sonoro è di tipo logaritmico:

$$\Delta_{\text{div}} = 10 \log(d/d_0) \text{ [dBA]}$$

dove:

d_0 = distanza di riferimento, espressa in m ed assunta pari a 25 metri;

d = distanza dell'osservatore dall'asse della sede stradale, espressa in m.

Benché questo termine di attenuazione costituisca un'approssimazione di massima della riduzione del livello sonoro di riferimento, le espressioni adottate dal modello risultano senz'altro adeguate alla finalità dell'applicazione, ovvero nella definizione di opportuni interventi di bonifica acustica.

Viene inoltre introdotto un coefficiente Δ_{traf} per tenere conto delle

condizioni di moto dei veicoli in area urbana.

Il modello CNR assume:

$\Delta_{\text{traf}} = 0$ dB(A) per condizioni di traffico scorrevoli;

$\Delta_{\text{traf}} = +1$ dB(A) in prossimità di incroci;

$\Delta_{\text{traf}} = -1,5$ dB(A) per condizioni di traffico congestionato (velocità del flusso veicolare minore di 30 Km/h)

3.2 Modello di previsione CETUR

La validità del presente modello, analogo quello appena descritto è stata verificata per strade di carattere extraurbano.

Il livello sonoro di riferimento è ancora calcolato mediante la relazione:

$$L_{\text{eq}} = L_{\text{rif}} + \Delta_{\text{bar}} + \Delta_{\text{div}} + \Delta_{\text{traf}} \quad (3.4)$$

dove i singoli termini hanno il significato specificato in precedenza.

La relazione che esprime L_{rif} è:

$$L_{\text{rif}} = A + 10 \times \log(Q_{\text{VL}} + E \times Q_{\text{PL}}) + \Delta_{\text{r}} + \Delta_{\text{V}} + \Delta_{\text{S}} + \Delta_{\text{P}} + \Delta_{\text{g}} \quad (3.5)$$

I valori da attribuire ai singoli termini della relazione sono indicati nelle tabelle 4, 4A, 4B, 4C, 4D, ove sono riportati anche i corrispondenti valori attribuiti con il modello CNR.

$$\Delta_{\text{div}} = -12 \log(d) \quad [\text{dBA}] \quad (3.6)$$

$$\Delta_{\text{traf}} = 0 \quad [\text{dBA}] \quad (3.7)$$

Tab. 4 - TERMINI PER IL CALCOLO DEL LIVELLO DI RIFERIMENTO				
	<i>2° MODELLO</i>		<i>1° MODELLO</i>	
	Strada ad "U"	Strada aperta o ad "L"	Strada ad "U"	Strada aperta o ad "L"
A [dB(A)]	+55	+20	+35,1	+35,1
E	(1)	tabella 4A	8	8
Δ_R [dB(A)]	$-10 \times \log(L)$	0	+4	(2)
Δ_V [dB(A)]	(3)	$20 \times \log(V)$	tabella 4B	tabella 4B
Δ_S [dB(A)]	0	0	tabella 4C	tabella 4C
Δ_P [dB(A)]	(4)	(4)	tabella 4D	tabella 4D
Δ_{ϑ} [dB(A)]	$10 \times \log(\vartheta/180)$	$10 \times \log(\vartheta/180)$	$10 \times \log(\vartheta/180)$	$10 \times \log(\vartheta/180)$

Note:

(1) Tabella 4A, valori corrispondenti a Strada di Quartiere e Strada Locale.

(2) Lato edificio: $\Delta_R = 2,5$;

Lato aperto: $\Delta_R = 1,5$;

(3) Per velocità ≤ 60 km/h $\Delta_V = 0$

Per velocità > 60 km/h $\Delta_V = (V-60)/10$

(4) $\Delta_S = 0$, in quanto ricade già nella stima del parametro E.

dove:

L = Larghezza della sede stradale [m];

V = Velocità del flusso veicolare [km/h];

ϑ = Angolo di visuale sotto il quale l'osservatore vede la sorgente sonora lineare

TAB. 4A - COEFFICIENTE ADIMENSIONALE DI OMOGENEIZZAZIONE TRA VEICOLI LEGGERI E VEICOLI PESANTI					
PENDENZA	$\leq 2\%$	3%	4%	5%	$\geq 6\%$
Superstrada /Autostrada E₁	E = 4	5	5	6	6
Strada a scorrimento veloce E₂	7	9	10	11	12
Strada urbana E₃	10	13	16	18	20

TAB 4B - COEFFICIENTE CORRETTIVO DI VELOCITÀ	
VELOCITA' DEL FLUSSO VEICOLARE [km/h]	Δ_V [dB(A)]
30 - 50	0
60	+1,0
70	+2,0
80	+3,0
100	+4,0
TAB. 4C: COEFFICIENTE CORRETTIVO DI PENDENZA	
PENDENZA [%]	Δ_P [dB(A)]
≤ 5	0
6	+0,6
7	+1,2
8	+1,8
9	+2,4
10	+3,0
Ad ogni % in più	+0,6
TAB. 4D - COEFFICIENTE CORRETTIVO DI PAVIMENTAZIONE	
PAVIMENTAZIONE	Δ_S [dB(A)]
Asfalto liscio	-0,5
Asfalto ruvido	0
Conglomerato cementizio	+1,5
Pavimentazione in blocchi	+4,0

3.3 Modello di previsione del rumore per autostrade e superstrade

La validità del presente modello è limitata a sorgenti quali superstrade e autostrade: si basa sulla conoscenza dei dati relativi alla composizione e all'intensità del traffico. Il modello consente il calcolo del livello equivalente di rumore ponderato A, in giorni feriali, semplicemente a partire dalla velocità massima consentita v e dalla distanza dall'asse della carreggiata d , secondo le seguenti espressioni:

$$\text{LeqA}=(84.7+0.087v)-(6.405-0.02v)\ln(d) \quad (3.8)$$

tempo di riferimento diurno (6.00-22.00)

$$\text{LeqA}=(80.2+0.088v)-(6.381-0.022v)\ln(d) \quad (3.9)$$

tempo di riferimento notturno (22.00 - 6.00)

La formula è di tipo cautelativo e dà una stima per eccesso del livello di rumore. L'errore varia con la velocità e la distanza: per $d > 15m$ e $60 < v < 120 Km/h$ è compreso tra 1 e 4 dBA circa.

3.4 Modello previsionale basato sul calcolo del SEL

Si riporta infine il modello basato sul calcolo del SEL (Single Event Level) medio rilevato per ciascuna categoria di veicoli. Il SEL è definito come il valor medio del livello sonoro ponderato A, mantenuto costante per un tempo pari ad un secondo, al quale è associata una energia sonora totale pari a quella dell'evento sonoro reale.

Attraverso tale modello il valore del livello equivalente continuo ponderato A è calcolato, in base alla composizione del traffico, a partire dal valore del SEL medio per ogni tipologia di veicolo.

Gli errori introdotti possono essere elevati quando il flusso veicolare è molto modesto o irregolare: in particolare è stato evidenziato che in presenza di traffico scarso, orientativamente inferiore ai 50 veicoli/ora, il valore calcolato del $Leq(A)$ risulta poco attendibile.

In tale circostanza è necessario aggiungere a tale valore un livello convenzionale di rumore $Leq(A),res$ (livello equivalente di rumore con traffico molto scarso o inesistente attribuibile al traffico veicolare che è presente nelle strade più vicine al sito di misura).

$Leq(A)$ risulta pertanto:

$$Leq(A) = 10 \log(10^{0,1 Leq(A),res} + 10^{0,1 Leq(A),sel}) \quad (3.10)$$

Se non è dato conoscere $Leq(A),res$ si possono assumere i seguenti valori:

ore diurne (6 - 22)

$Leq(A),res = 35$ dBA per le zone residenziali e protette;

$Leq(A),res = 40$ dBA per le zone miste con attività commerciali ed artigianali poco rumorose;

$Leq(A),res = 45$ dBA per le zone ad intensa attività umana, in quelle in prossimità di strade di grande traffico, nelle zone prevalentemente industriali e in quelle industriali.

Durante la notte (22 - 6) i valori suddetti devono intendersi ridotti di 10 dBA.

Il secondo termine della (3.10) $Leq(A),sel$ è calcolabile secondo la:

$$Leq(A),SEL = 10 \log \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^S n_i 10^{0,1 SEL_i} \right) \quad (3.11)$$

e quindi per $T = 3600$ s:

$$Leq(A),SEL = 10 \log \left(\sum_{i=1}^S n_i 10^{0,1 SEL_i} \right) - 35,6 \quad (3.12)$$

Nella (3.12) n_i rappresenta il numero dei veicoli della i -esima categoria che passano davanti al punto di osservazione durante l'intervallo di misura T ed è rapportato agli specifici valori di SEL_m (SEL medio) propri delle categorie di veicoli suddette.

Per tener conto in qualche modo degli effetti di riflessione delle strutture verticali, SEL_m assume valori diversi per strade chiuse, con L/H' rilevato in corrispondenza del sito di misura tale che $0,5 < L/H' \leq 2,0$ (L = larghezza della strada ed H' = altezza dell'edificio più basso), e per strade aperte o prive di edifici limitanti con $L/H' > 2$.

Per l'esplicitazione della (3.12) è necessario valutare il numero di autoveicoli/h (n_1), quello dei veicoli industriali leggeri (n_2) e pesanti (n_3) dei motocicli (n_4) e dei ciclomotori (n_5), in relazione alla specifica tipologia stradale del sito di misura.

Utilizzando i valori di SEL riportati nella tab. 5, la (3.12) si esplicita nelle due seguenti espressioni per il calcolo del livello equivalente continuo di rumore orario:

$$Leq(A),h,SEL = 10\log(n_1 10^{7,65} + n_2 10^{8,00} + n_3 10^{8,60} + n_4 10^{8,45} + n_5 10^{7,85}) - 35,6 \quad (3.13)$$

per strade chiuse con $0,5 < L/H \leq 2$:

$$Leq(A),h,SEL = 10\log(n_1 10^{7,60} + n_2 10^{7,95} + n_3 10^{8,45} + n_4 10^{8,20} + n_5 10^{7,75}) - 35,6 \quad (3.14)$$

per strade aperte con $L/H > 2$.

Tab. 5: SEL MEDIO PER DIVERSE TIPOLOGIE DI VEICOLI IN RELAZIONE ALLA TIPOLOGIA STRADALE					
Tipo di strada	Autoveicoli	Veicoli industriali leggeri	Veicoli industriali pesanti	motocicli	ciclomotori
strade chiuse	76,5	80,0	86,0	84,5	78,5
strade aperte	76,0	79,5	84,5	82	77,5

Effettuando gli sviluppi matematici della (3.13) e della (3.14) si ot-

tiene:

per strade chiuse:

$$Leq(A), h, SEL = 10 \log(n_1 4,467 + n_2 10 + n_3 39,811 + n_4 28,184 + n_5 7,079) + 34,3 \quad (3.15)$$

per strade aperte:

$$Leq(A), h, SEL = 10 \log(n_1 3,981 + n_2 8,913 + n_3 28,184 + n_4 15,849 + n_5 5,623) + 34,4 \quad (3.16)$$

I metodi di predeterminazione, basati sulla valutazione dei contributi energetici per singolo evento, offrono, tra l'altro, il vantaggio di poter valutare le variazioni di rumorosità che si determinano modificando la percentuale delle componenti veicolari nell'insieme dei flussi di traffico (ad esempio soppressione o riduzione del transito di autoveicoli industriali pesanti) o intervenendo direttamente sulle sorgenti (ad esempio, riduzione dei livelli massimi di rumorosità ai fini della omologazione dei veicoli).

La (3.10) può, successivamente, essere affinata utilizzando tutta una serie di fattori di correzione (ΔL) che vengono di seguito riportati:

ΔLZ = fattore di correzione per le caratteristiche geometriche del sito di misura: deve essere valutato paria +1 dBA qualora si utilizzino i valori di SEL per le strade chiuse, nel caso che il rapporto L/H' sia inferiore a 0,5; sempre utilizzando i suddetti valori di SEL sarà uguale a -0,5 dBA per strade con edifici da un solo lato;

ΔLV = fattore di correzione per la velocità media dei veicoli; deve essere preso in considerazione per le strade di grande comunicazione o per

autostrade, assumendo valori di +2 dBA per ogni incremento di 15 km/h della velocità media dei veicoli in transito nella fascia di velocità compresa tra 60 e 120 km/h;

ΔL_p = fattore di correzione per la pendenza della strada: è di 0 dBA per pendenze fino al 4%, mentre per le pendenze superiori aumenta di 0,6 dBA per ogni incremento unitario della pendenza della strada stessa.

ΔL_r = fattore di correzione per le caratteristiche del manto stradale: pari a -3 dBA per asfalti fonoassorbenti, a 0 dBA per asfalto liscio, a +2 dBA per cemento e a +4,5 dBA per manto lastricato scabro o pavè;

ΔL_d = parametro di correzione per la distanza: poiché il livello sonoro continuo (ponderato A) L_{Aeq} diminuisce di 3 dBA a ogni raddoppio della distanza, si può porre:

$$\Delta L_d = -10 \log\left(\frac{r}{r_{rif}}\right) - L_{es} \quad (3.17)$$

dove:

r e r_{rif} sono assunti perpendicolarmente al treno dei veicoli.

Il valore assunto da L_{es} è nullo quando $r < 300m$ mentre per valori superiori:

$$L_{es} = 0,005 \cdot D \quad (3.18)$$

L'espressione per il calcolo dell' L_{Aeq} basata su misure di SEL, può essere, pertanto, così completata:

$$Leq(A) = 10 \log(10^{0,1Leq(A).res} + 10^{0,1Leq(A).SEL}) + \Delta L_z + \Delta L_r + \Delta L_p + \Delta L_r + \Delta L_d \quad (3.19)$$

3.5 Modello ACIR-TM2

Esistono in Letteratura numerosi altri modelli non specifici, che qui non si riportano in maniera dettagliata per ragioni di brevità, che possono però essere usati nella previsione di rumore prodotto da infrastrutture di trasporto stradale; uno di questi è il modello ACIR –TM2, elaborato dal CIRIAF Sezione di Perugia, che si articola in diversi codici di calcolo.

Il modello, il cui schema di funzionamento è riportato in Fig. 8, consente la schematizzazione tridimensionale del sito e delle sorgenti di rumore e si articola nei seguenti codici di calcolo:

- Cd1 - Codice per le sorgenti puntiformi;
- Cd2 - Codice per le sorgenti lineari verticali;
- Cd3 - Codice per le superfici piane;
- Cd4 - Codice per le strade;
- Cd5 - Codice per le sorgenti lineari orizzontali.

A ciascuna sorgente di rumore il modello associa un codice di calcolo il quale fornisce, in termini di livello di rumore e di spettro acustico, il

contributo di quella specifica sorgente in un punto di stima; a tale fine è necessario introdurre nel modello i seguenti dati:

- spettri notturni e diurni delle sorgenti di rumore;
- distanza fra il punto di stima e la sorgente;
- angolo di vista della sorgente dal punto di stima;
- angolo formato fra il piano passante per la sorgente e l'asse che congiunge il microfono alla sorgente stessa;
- dimensioni della sorgente (altezza e larghezza).

Il modello può essere opportunamente calibrato mediante 2 fattori di correzione (fattore correttivo diurno " K_d " e fattore correttivo notturno " K_n "); la calibrazione del modello viene effettuata modificando il valore di K_d e K_n fino a che la stima del livello di rumore (diurno e notturno) fornita dal modello stesso differisce al massimo di 1 dBA dal risultato delle misure di verifica.

Inoltre, in base alle distanze fra le sorgenti ed il punto di stima, il modello ACIR-TM2 applica ai contributi di tutte le sorgenti presenti, frequenza per frequenza, le attenuazioni dovute all'assorbimento dell'aria e stabilite nella norma ISO 9613. Tutti i contributi delle singole sorgenti sono infine sommati logaritmicamente, ottenendo così lo spettro di rumore complessivo nel punto di stima. Tale spettro viene ulteriormente modificato in base alla scelta di particolari condizioni meteorologiche. I risultati sono forniti con e senza ponderazione A. Quando il modello produce in un punto risultati inferiori ai livelli di fondo diurni e notturni,

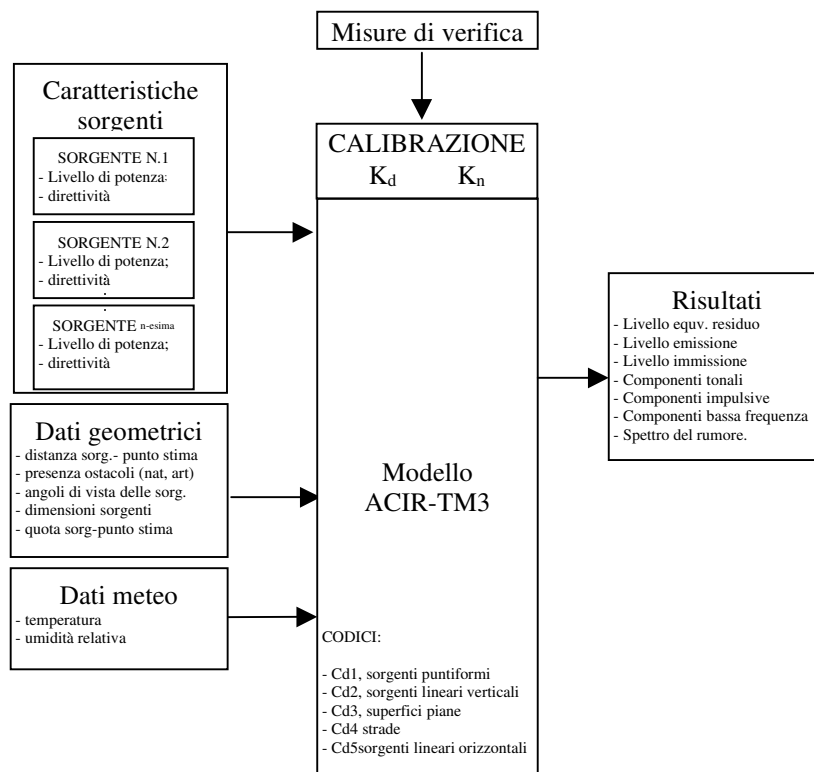


Fig. 8: Schema di funzionamento del modello CIRIAF

automaticamente questi ultimi vengono sostituiti al livello di rumore stimato; i livelli di fondo sono pertanto ulteriori dati di ingresso al modello.

I singoli codici di calcolo possono essere utilizzati anche per la caratterizzazione delle sorgenti sonore; in tal caso i dati di ingresso del modello sono i risultati di rilievi fonometrici, i dati meteorologici ed i dati geome-

trici; il codice fornisce, in uscita, le caratteristiche acustiche delle specifiche sorgenti in termini di Livello di Potenza.

Il codice Cd 4 è il codice specifico per la definizione delle caratteristiche di emissione delle strade ed è basato sulle seguenti ipotesi:

- flusso veicolare omogeneo;
- direzione di massima propagazione del rumore relativa al piano bisettore del diedro costituito dal piano stradale e dal piano normale a quest'ultimo passante per la mezzzeria;
- sorgente concentrata lungo la linea di mezzzeria;
- si ignora il carattere intermittente del traffico;
- le caratteristiche del singolo veicolo non intervengono in modo diretto nel modello.

In base alle suddette ipotesi, l'intensità acustica angolare può essere espressa dalla seguente legge (convalidata da dati sperimentali):

$$I(\alpha) = I_n \cdot \cos^3 \alpha \quad (3.20)$$

con I_n = intensità angolare, valutata per la direzione relativa alla bisettrice.

Essendo:

$$\frac{dW}{d\omega} = I(\alpha) \quad (3.21)$$

con: W = potenza della sorgente;

risulta:

$$W = \int_{\Omega} I(\alpha) \cdot d\omega = \int_{\Omega} I_n \cdot \cos^3 \alpha \cdot d\omega = \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_n \cdot \cos^3 \alpha \cdot 2\pi \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha = \frac{\pi}{2} I_n \quad (3.22)$$

dove:

$$d\omega = \frac{dA}{r^2} \text{ con } dA = 2\pi r \cdot r \cdot d\alpha = 2\pi r^2 \sin \alpha \cdot d\alpha \quad (3.23)$$

essendo inoltre $d\omega = 2\pi \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha$ si ottiene:

$$I(\alpha) = \frac{2 \cdot W}{\pi} \cos^3 \alpha \quad (3.24)$$

quindi:

$$J(\alpha) = I(\alpha) \cdot \frac{d\omega}{dA} = I(\alpha) \cdot \frac{1}{r^2} = \frac{2 \cdot W}{\pi \cdot r^2} \cos^3 \alpha \quad (3.25)$$

Si definiscono pertanto:

$$Q(\alpha) = \frac{J(\alpha)}{J_{\text{omnid.}}} = \frac{I(\alpha)}{r^2} \cdot \frac{4\pi r^2}{W} = 8 \cdot \cos^3 \alpha \quad (3.26)$$

$$ID(\alpha) = 10 \log Q(\alpha) = 9 + 30 \log(\cos \alpha) \quad (3.27)$$

dove:

$Q(\alpha)$ = fattore di direttività;

$J_{\text{omnid.}}$ = intensità di potenza di una sorgente omnidirezionale valutata alla stessa distanza di $J(\alpha)$;

$ID(\alpha)$ = indice di direttività.

Si introducono inoltre le grandezze:

W' = potenza della sorgente per unità di lunghezza [Watt/m];

dJ = intensità di potenza per unità di lunghezza;

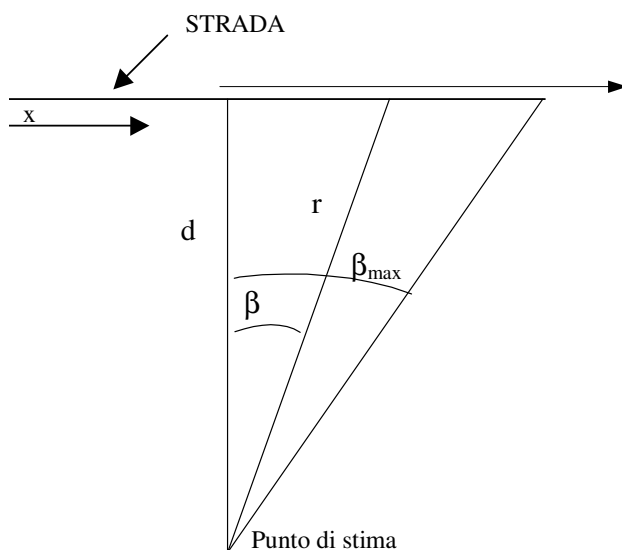


Fig. 9: Schema di riferimento per l'elaborazione del modello delle strade.

Con riferimento alla Fig. 9 risulta:

$$dJ(\alpha) = \frac{W' \cdot dx}{4\pi \cdot r^2} \cdot Q(\alpha) \quad (3.28)$$

$$J(\alpha) = 2 \cdot \int_0^{\beta_{max}} \frac{W'}{4\pi \cdot r^2} \cdot Q(\alpha) \cdot r \cdot d\beta = \frac{W' \cdot Q(\alpha)}{4\pi \cdot d} \cdot \sin(\beta_{max}) \quad (3.29)$$

In base alla definizione di potenza e pressione acustica si ottiene:

$$L_p = L_W - 8 - 10 \log r + ID(\alpha) \quad (3.30)$$

$$ID(\alpha) = 10 \log(Q(\alpha)) + 10 \log(\sin\beta) \quad (3.31)$$

ovvero:

$$L_p = L_W - 8 - 10 \log r + B(\beta) + ID'(\alpha) \quad (3.32)$$

in cui:

$$ID'(\alpha) = 9 + 30 \log(\cos\alpha) \quad (3.33)$$

$$B(\beta) = 10 \log(\sin\beta) \quad (3.34)$$

$$J_0 = P_0^2 / \rho_0 c_0 \quad (3.35)$$

P_0 = pressione acustica di riferimento = $20 \cdot 10^{-6}$ Pa;

$\rho_0 c_0$ = resistenza acustica caratteristica dell'aria;

L_p = livello di pressione acustica misurato;

L_W = livello di potenza della sorgente.

Avendo stabilito per ipotesi che la direzione preferenziale di propagazione del rumore è quella lungo il piano bisettore del diedro costituito dal piano stradale ed il piano ad esso normale passante per la mezzzeria, si effettua la sostituzione:

$$\alpha = (45^\circ + \gamma) \quad (3.36)$$

da cui:

$$L_p = L_W - 8 - 10 \log r + B(\beta) + ID'(\gamma) \quad (3.37)$$

$$ID'(\alpha) = 9 + 30 \log(\cos(45^\circ + \gamma)) \quad (3.38)$$

$$B(\beta) = 10 \log(\sin\beta) \quad (3.39)$$

Le relazioni (3.37), (3.38) e (3.39) sono usate dal modello CIRIAF per la stima del livello di rumore prodotto dalla strada.

4. La bonifica delle infrastrutture di trasporto stradale

4.1 Tipologie di intervento

Gli interventi di bonifica per ridurre l'inquinamento acustico dovuto ad infrastrutture di trasporto stradali possono essere classificati in:

- *interventi di tipo attivo*: che agiscono direttamente sulla sorgente del rumore riducendone il livello di emissione;
- *interventi di tipo passivo*: che ostacolano la propagazione del rumore, aumentando l'assorbimento di energia sonora tra la sorgente e il ricettore.

Tra gli interventi di tipo attivo, sono da segnalare quelli di tipo amministrativo, gestiti nell'ambito di strumenti tecnico/amministrativi (il Piano Urbano del Traffico e della Viabilità), gli interventi sui veicoli .

Sensibili miglioramenti possono essere ottenuti con l'introduzione di nuovi sistemi di abbattimento del rumore allo scarico di motori a combustione interna e con norme più restrittive circa l'omologazione di vetture e automezzi pesanti (è indirizzato in tal senso l'orientamento normativo co-

munitario, che imporrà alle industrie produttrici di ridurre il rumore all'origine prodotto da autoveicoli).

Tra gli interventi di tipo passivo possono invece considerarsi:

- l'impiego di asfalti fonoassorbenti e piattaforme ferroviarie speciali;
- l'installazione di schermature con barriere acustiche;
- interventi sui ricettori.

L'impiego di *asfalti fonoassorbenti* può essere considerato come intervento sia attivo che passivo; questi, infatti, non solo riducono le emissioni prodotte dal contatto pneumatico-strada, ma sono anche in grado di assorbire una parte di energia sonora emessa dalle altre parti del veicolo.

Le *barriere antirumore* sono ostacoli atti a modificare e/o limitare la propagazione delle onde acustiche; secondo i materiali usati e del tipo di assemblaggio, possono essere:

- prevalentemente fonoassorbenti;
- prevalentemente fonoisolanti;
- prevalentemente diffrattive;

realizzate con diverse combinazioni di elementi aventi le precedenti caratteristiche.

La Bozza di decreto riguardante i criteri di corretta progettazione e buona esecuzione di infrastrutture di trasporto indica che:

- le barriere prevalentemente fonoassorbenti devono essere caratterizzate da un indice di isolamento acustico (misurato secondo le norme ISO 140/3/78, ISO 717/1/82, EN 1793/2), $D_{IL} > 25\text{dB}$;

- le barriere fonoisolanti e fonoassorbenti devono essere caratterizzate da un indice di isolamento acustico (misurato secondo le norme ISO 140/3/78, ISO 717/1/82, EN 1793/2), $D_{IL} > 25\text{dB}$ e coefficiente di assorbimento (misurato secondo le norme ISO 354/1985 e EN 1793/1) non inferiore ai valori riportati in Tab. 6.

Dal punto di vista del materiale si distinguono le seguenti tipologie di barriere:

- *barriere naturali o vegetali*, costituite da elementi naturali quali: terra, alberi, cespugli e vegetazione in generale; talvolta la vegetazione, specializzata per tipo di essenza e disposizione sul terreno prospiciente l'infrastruttura e/o nelle zone ad essa circostanti, é messa a dimora sopra supporti appositamente realizzati, che possono essere parte integrante dell'infrastruttura;
- *barriere artificiali*, costituite da pannelli di diversi materiali: cemento, legno, alluminio, acciaio, materie plastiche trasparenti, come metacrilato o policarbonato, montati su supporti infissi nel terreno o collegati alle opere infrastrutturali;
- *barriere miste*, costituite da supporti artificiali in calcestruzzo, acciaio, legno, che favoriscono lo sviluppo di essenze vegetali.

Dal punto di vista dell'impatto visivo, sono preferibili le barriere vegetali o miste, mentre le barriere artificiali possono presentare problemi di armonizzazione con il paesaggio.

TAB. 6 – VALORI DEL COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO (misurato secondo la ISO 354/85 e EN 1793/1)	
Frequenza (Hz)	Coefficiente (α_s)
125	0.20
250	0.50
500	0.65
1000	0.80
2000	0.75
4000	0.50

Per tratti lunghi, superiori al km, è opportuno alternare diversi tipi di barriera ed arricchire con vegetazione anche le zone con barriere artificiali; si ottiene così un parziale assorbimento e filtraggio di fumi e particolati, oltre al migliore inserimento nell'ambiente naturale. Sono preferibili sistemazioni di tipo mimetizzato, che riducano la discontinuità fisica ed estetica tra la protezione e l'ambiente circostante.

Per i lunghi tratti, inoltre, si devono prevedere sistemi di superamento delle barriere (almeno ogni 500 m) per tutti gli utilizzatori dell'infrastruttura, e la possibilità di accesso e camminamento all'esterno delle stesse, per consentire la manutenzione dell'infrastruttura; tali accessi vanno stabiliti di volta in volta, a seconda delle opere da mantenere: vegetazione, cavi telefonici, recinzione, servizi elettrici, spurgo fossi, ispezione opere infrastrutturali e così via.

Se, nonostante gli interventi sulle infrastrutture, non é possibile rag-

giungere i livelli di rumore stabiliti dalla Legge, si può agire sui ricettori, migliorando le caratteristiche di isolamento acustico e/o di fonoassorbimento di facciata degli edifici interessati dal rumore.

Nel seguito sono presentati i principali interventi di tipo attivo (sulla sede stradale) e di tipo passivo (barriere acustiche e interventi sui ricettori).

4.2 Interventi sulla sede stradale

Il rumore provocato dal transito dei veicoli è dovuto a tre fattori principali:

- a) *rumore meccanico DMN* (del motore, dello scarico della marmitta, delle vibrazioni meccaniche interne, del sistema di raffreddamento, degli organi meccanici di guida);
- b) *rumore pneumatico/strada* (vibrazionale di rotolamento *TPVN*, pompaggio dell'aria di rotolamento tra pneumatico e strada *TPAN*, altri rumori di frizionamento e vibrazione degli aggregati che costituiscono la superficie della strada *OTN*);
- c) *rumore aerodinamico ADN*.

Il rumore dovuto al rotolamento è predominante a partire da circa 50 Km/h per le autovetture, e da 70 km/h per i mezzi pesanti.

Fin dai primi anni del 1980 sono state condotte ricerche su asfalti

drenanti e fonoassorbenti. Gli asfalti devono essere in grado di drenare l'acqua per evitare l'effetto aquaplaning e il ventaglio di schizzi, devono essere porosi, per avere un elevato coefficiente di assorbimento, in particolare alle frequenze medio-basse, ed infine devono mantenere le loro caratteristiche inalterate per alcuni anni. Il volume d'aria contenuto nei pori è, di solito, compreso tra il 15 e il 20% del volume della struttura porosa; purtroppo la polvere, le sostanze oleose e le impurità tendono a riempire i pori, per cui si ha un progressivo decadimento delle prestazioni acustiche del manto.

Un altro problema, che si manifesta soprattutto nei climi freddi, è rappresentato dall'immagazzinamento dell'acqua nei pori e dalla formazione di lastre di ghiaccio a seguito dell'abbassamento rapido della temperatura. In tal caso il rimedio consiste nell'utilizzare del sale come forma di prevenzione; la quantità richiesta è tuttavia da sei a sette volte maggiore di quella necessaria per asfalti tradizionali e questo comporta maggiori costi di esercizio e manutenzione dell'infrastruttura.

L'attenuazione introdotta da asfalti fonoassorbenti varia in funzione di molti fattori: tipo di veicolo, velocità, tipo di pneumatici, condizioni atmosferiche; a titolo puramente indicativo, i valori dell'attenuazione ottenibili sono dell'ordine di 2 ÷ 4 dB.

Le ricerche in questo settore sono ancora in corso; si stanno sviluppando sperimentazioni per i tratti stradali urbani, dove le velocità sono più basse ed il manto stradale deve attenuare anche il rumore di origine mec-

canica DMN o almeno assorbire significativamente alcune componenti alle frequenze più disturbanti.

Una stima della riduzione del livello di rumore prodotta da un asfalto fonoassorbente è data dalla seguente relazione di Meiarashi [20]:

$$\Delta L = 10 \log_{10} (\alpha_p / \alpha_d) \quad (4.1)$$

dove :

α_p =Coefficiente di assorbimento dell'asfalto tradizionale denso

α_d =Coefficiente di assorbimento dell'asfalto fonoassorbente

Allo stato attuale, studi approfonditi hanno condotto ai seguenti risultati:

- *Autovetture*: riduzione da 0 a 5 dB (massima riduzione per TPAN e TPVM al disotto di 80 Km/h, mentre per OTN e ADM al disopra di 100 Km/h);
- *Autocarri leggeri*: riduzione da 2 a 4 dB (massima riduzione per DMN al disotto di 80 Km/h, mentre per OTN e ADM al disopra di 100 Km/h);
- *Autocarri pesanti*: riduzione da 2 a 5 dB (massima riduzione per DMN, OTN e ADN al disotto di 80 Km/h, mentre per TPAN al disopra di 100 Km/h).

Altre ricerche, tuttora in corso, riguardano l'uso di manti stradali diversi dall'asfalto.

Uno dei materiali ormai largamente utilizzato nelle costruzioni stradali e' il calcestruzzo. Nella realizzazione di manti stradali fonoassorbenti

il calcestruzzo viene trattato in modo opportuno sulla superficie, in modo da ottenere una finitura dura, porosa e con bassa rugosità (minore di un millimetro). Tale manto mostra un discreto assorbimento acustico e l'attenuazione del rumore può raggiungere i 6 dBA.

Un altro interessante tipo di pavimentazione fonoassorbente è stato recentemente proposto da alcuni ricercatori giapponesi: si tratta di una superficie stradale porosa ed elastica denominata PERS (Porous Elastic Road Surface). Il PERS è un nuovo composto, costituito da granuli di gomma combinati con uretano, che può essere incollato sul vecchio manto stradale con colla di poliuretano. La superficie così ottenuta sembra superare bene i test che di solito vengono condotti sulle comuni pavimentazioni stradali, in particolare il test di permeabilità ed il test di resistenza allo scorrimento. Quanto alle capacità di abbattimento del rumore, dalle prove effettuate è risultato che l'attenuazione prodotta dal PERS supera da 2 a 10 volte l'attenuazione ottenibile con l'asfalto poroso-drenato (porosità 20 %). In particolare, alla velocità di 60 Km/h, sono state ottenute attenuazioni di 13 dBA per gli autoveicoli leggeri e di 6 dBA per i veicoli pesanti.

Le caratteristiche superficiali della strada, quali la micro e la macro tessitura degli elementi superficiali, e morfologiche del pneumatico, quali le dimensioni superficiali dell'impronta e la scolpitura, sono oggi oggetto di studi finalizzati ad aumentare la sicurezza del veicolo, intesa come possibilità di esplicare con efficacia le azioni di frenatura e di controllo della

traiettorie (in curva, in fase di sorpasso ecc.), in qualsiasi condizione atmosferica.

Nella Tab. 7 sono riassunte tali caratteristiche, secondo la terminologia internazionale adottata dal CNR nelle sue *“Istruzioni sulla pianificazione delle manutenzioni stradali”*; nella Tab. 8 si riporta invece una classificazione della struttura superficiale della strada secondo il tipo di tessitura. L'ultima colonna della Tab. 8 riporta il grado di rumorosità generato: i dati rivelano come spesso pavimentazioni sicure siano anche molto rumorose; solo due tipi di tessiture sono completamente soddisfacenti: il tipo poroso e l'abrasivo spigoloso, se realizzate con materiali opportuni.








Un altro sistema di contenimento del rumore, con interventi sulla sede stradale, ed in particolare per i viadotti, è costituito dall'adozione di “giunti silenziosi” ovvero di giunti a tampone viscoelastico. Questi sono costituiti da:

- un dispositivo di drenaggio delle acque di sottopavimentazione;
- un dispositivo di sostegno del tampone bituminoso (tipicamente in acciaio) in grado di consentire le dilatazioni termiche;
- un tampone, in conglomerato bituminoso, in grado di consentire i movimenti di tipo viscoso previsti.

Grazie a tale struttura articolata è notevolmente ridotto il rumore prodotto dal contatto ruota-giunto.

Tab. 7- TERMINOLOGIA PER LA TESSITURA E PER LE IRREGOLARITÀ DELLA SUPERFICIE STRADALE			
<i>DEFINIZIONE</i>	<i>CAMPO DI LUNGHEZZE DELLE ONDULAZIONI</i>	<i>CARATTERISTICHE FISICHE SUPERFICIALI</i>	<i>CARATTERISTICHE INFLUENZATE (traffico, veicolo, ambiente)</i>
MICROTESSITURA	$\lambda < 0.5 \text{ mm}$	tessitura superficiali inerti; asperità dell'aggregato;	aderenza, in condizione di pavimentazioni asciutta o mediamente bagnata usura pneumatico rumore esterno
MACROTESSITURA	$0.5 \text{ mm} < \lambda < 50 \text{ mm}$	dimensioni, forma e distribuzione degli inertidrenaggio superficiale asperità dell'aggregato sottigliezza giunti numero fessure striature	aderenza, particolarmente nei riguardi del pericolo di aquaplaning usura del pneumatico resistenza al rotolamento rumore esterno dovuto al contatto pneumatico strada rumore interno dovuto al contatto pneumatico-strada
MEGATESSITURA	$50 \text{ mm} < \lambda < 5 \text{ mm}$	Buche; ondulazioni della superficie stradale; singoli fori sulla pavimentazioni ammalorati dimensioni dei blocchetti nella pavimentazioni in pietra;	aderenza controllo del veicolo danneggiamento del pneumatico danneggiamento e deterioramento del veicolo comfort di guida rumore esterno intermittente rumore interno dovuto al contratto pneumatico-strada resistenza al rotolamento
IRREGOLARITÀ'	$50 \text{ mm} < \lambda < 40 \text{ mm}$	come per la megatessitura, con l'aggiunta di : irregolarità dovute alla posa in opera, danni al gelo	come per la megatessitura, con l'aggiunta di: comfort di guida, ultrasuono danneggiamenti agli edifici dovuto alle vibrazioni

Tab. 8: Struttura superficiale strada secondo il tipo di tessitura

RIVESTIMENTO	TESSITURA		DEFLUSSO	ACQUA	SICUREZZA	SILENZIOSITA'	
	MICRO	MACRO	VISCOSO	DINAMICO			
LISCIO		LISCIA	FINA	*	△	○○	□□□□
SPIGOLOSO LUCIDO		LISCIA	MEDIA	*	△△△	○	□□□
ABRASIVO FINE		RUGOSA	FINA	****	△	○○	□□□□
ABRASIVO SPIGOLOSO		RUGOSA	MEDIA	****	△△△	○○○○	□□
STRIATO		LISCIA	GROSSA	**	△△△△	○○	□
BCCIARDATO		RUGOSA	GROSSA	****	△△△△	○○	□□
POROSO		MEDIA	GROSSA	***	△△△△	○○○○	□□□□

4.3 Altri interventi

E' forse utile accennare ad altri tipi di intervento, non applicabili su larga scala, ai quali poter ricorrere per la realizzazione di interventi di bonifica di infrastrutture di trasporto stradale, ovvero l'intervento sui ricettori sensibili.

Una prima classe di interventi riguarda il rivestimento delle facciate, con l'adozione di intonaci, le cui caratteristiche prestazionali in termini di fonoisolamento sono in fase di progettazione, e/o materiali fonoassorbenti ed elementi di rivestimento caratterizzati da opportune geometrie e porosità che favoriscono l'assorbimento dell'energia acustica.

Una seconda classe di interventi riguarda il miglioramento delle proprietà fonoisolanti degli elementi più deboli delle facciate, con l'adozione

di finestre antirumore aventi un isolamento acustico migliore delle normali finestre.

L'indice di isolamento di una finestra deve essere determinato secondo le modalità previste dalle norme ISO 140/3-95, 140/4-78, 717/1-82 e successivi aggiornamenti. In genere le finestre antirumore sono realizzate con un telaio, contro telaio e ante in alluminio con taglio termico ed acustico. Nella parte superiore sono dotate di un apposito aeratore che permette il necessario ricambio d'aria dell'ambiente nel quale è installata. L'aeratore è dotato di apposita serranda che consente di regolare il flusso d'aria. In alcuni casi l'alluminio può essere rivestito con finiture in legno, così da nascondere la struttura metallica di base. La finestra è dotata di doppio vetro; i vetri sono del tipo multistrato con strati incollati con una membrana trasparente anelastica in grado di assorbire e dissipare sotto forma di calore l'energia associata alle vibrazioni indotte dal rumore sulle lastre di vetro.

La portata d'aria con ventilazione naturale deve essere $Q = 90 \text{ m}^3/\text{h}$ (o superiore) per ogni metro di larghezza della finestra, con differenza di pressione di 10 Pa. Le suddette caratteristiche devono essere certificate.

Negli ultimi dieci anni, a fianco di interventi di tipo passivo tradizionale e sui ricettori, sono stati proposti numerosi prototipi per la riduzione del rumore basati su tecniche di controllo attivo. Alcuni di tali prototipi sono stati realizzati presso il Laboratorio di Acustica del CIRIAF di Perugia.

La marmitta elettronica, ad esempio, è un nuovo sistema per la

riduzione del rumore allo scarico di motori alternativi a combustione interna a quattro tempi; il sistema sostituisce la tradizionale marmitta terminale di scarico, il rendimento del motore aumenta di circa il 5% con attenuazione del rumore paragonabile a quella delle tradizionali marmitte passive. Il funzionamento della marmitta elettronica è basato sulla tecnica del controllo attivo del rumore: un circuito elettronico, collegato ad un sensore di velocità di rotazione del motore, alimenta due altoparlanti che generano un segnale acustico, l'antirumore, uguale ma opposto in fase a quello prodotto dal motore; i due segnali acustici interferiscono fra loro in modo distruttivo all'uscita del condotto dei gas combusti; si ottiene in tal modo una netta riduzione delle emissioni acustiche, dell'ordine di 8 ÷ 10 dBA.

5. Casi di studio

Nei paragrafi che seguono sono riportati alcuni progetti riguardanti particolari interventi di bonifica o casi di studio che approfondiscono alcuni aspetti originali delle tipologie di intervento precedentemente descritte.

Il primo caso di studio riguarda un importante progetto di bonifica di un tratto autostradale che prevede sia interventi di tipo passivo *tradizionali*, quali l'impiego di barriere antirumore artificiali e naturali, sia interventi

diretti sui ricettori, quali le finestre antirumore.

Il secondo caso illustra l'efficacia di un particolare intervento sulla sede stradale, ovvero l'impiego di asfalti fonoassorbenti.

Il terzo caso riporta i risultati di una indagine sperimentale sul rumore stradale da rotolamento e del progetto di un nuovo dispositivo elettroacustico per la riduzione del rumore con metodi di controllo attivo.

Il quarto caso infine riferisce di una bonifica acustica basata su interventi di tipo urbanistico, come ad esempio la deviazione del traffico stradale da un'area ad un'altra.

5.1 La bonifica acustica del raccordo autostradale Perugia – Bettolle

Come prima spiegato i parametri che influiscono nel caso di inquinamento da rumore prodotto da traffico stradale sono essenzialmente le caratteristiche geometriche della strada, il flusso orario dei veicoli, gli ostacoli posti sul percorso dell'onda sonora, la presenza di superfici riflettenti al contorno.

La Regione Umbria, nell'ambito di una Convenzione - Quadro sull'inquinamento acustico dovuto alle infrastrutture di trasporto, ha commissionato al CIRIAF (Centro Interuniversitario per la Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici) – Sezione Fisica Tecnica e Inquinamento Ambientale di Perugia – il progetto di bonifica acustica di alcuni

tratti del raccordo autostradale Perugia – Bettolle e della superstrada E45, che rappresentano un importante caso di studio nella definizione di criteri guida nella realizzazione di piani di bonifica di infrastrutture di trasporto stradale.

Il raccordo da bonificare è una delle più importanti arterie stradali della Regione Umbria, in quanto realizza il collegamento di Perugia tra l'Autostrada del Sole A1 e la superstrada E45 Orte - Cesena.

Il raccordo autostradale e la E45 sono infrastrutture a due corsie per ogni senso di marcia, senza corsia di emergenza, con spartitraffico centrale del tipo "New Jersey". Il tracciato del raccordo, in prossimità di Perugia, è caratterizzato da tratti in viadotto e tratti in rilevato e dalla presenza di 4 gallerie: Volumni, Piscille, Prepo e Madonna Alta.

La superstrada E45 (Orte - Cesena) attraversa la città di Ponte S. Giovanni ed è caratterizzata da un intenso traffico veicolare, in parte locale ed in parte di lunga percorrenza (Roma - Cesena). La presenza di traffico a lunga percorrenza, specialmente pesante, si è incrementata a partire dal giugno 1996, quando è stato completato il tratto appenninico della E45; la E45 rappresenta infatti una comoda alternativa alla "Autostrada del Sole" nel collegamento Roma – Nord Italia, in quanto priva di pedaggio. In località Collestrada la E45 si collega alla S.S. 75 raccogliendo il traffico proveniente dalla S.S.3 Flaminia, ossia da Foligno, Assisi e dalla zona industriale di Bastia Umbra.

Lo studio si è avvalso dei risultati del Piano di Risanamento Acustico

del Comune di Perugia redatto dall'allora Istituto di Energetica dell'Università degli Studi di Perugia negli anni 1995/97, nell'ambito del Programma Triennale per la Tutela dell'Ambiente. Nell'ambito di tale studio, furono implementati codici di calcolo originali e proposte soluzioni innovative per quanto riguarda gli interventi di bonifica acustica.

I tratti di superstrada presi in considerazione ai fini delle bonifiche acustiche sono stati 10, individuati in punti particolarmente critici dell'infrastruttura. Ogni intervento di bonifica, nei 10 tratti individuati, è stato articolato in quattro fasi.

La prima fase è stata caratterizzata dalla descrizione del tratto considerato dal punto di vista planimetrico, come mostra la fig. 10, ed altimetrico.

La seconda ha interessato la valutazione dello stato di inquinamento acustico presente nell'area circostante il tratto esaminato. A questo proposito, nell'ambito del Piano di Risanamento Acustico del Comune di Perugia, effettuato in ottemperanza alle disposizioni del D.P.C.M. 1/3/91 e della L.Q. 26/10/95 n°447, il territorio comunale è stato suddiviso in sei classi; ad ogni classe sono associati i limiti massimi diurni e notturni del rumore ambientale. Lo stato attuale della rumorosità presente nell'area circostante il tratto stradale considerato è stato rappresentato mediante una mappatura acustica: il territorio è suddiviso in aree omogenee, in ciascuna area il rumore è compreso in un intervallo di valori di ampiezza pari a 5 dBA.

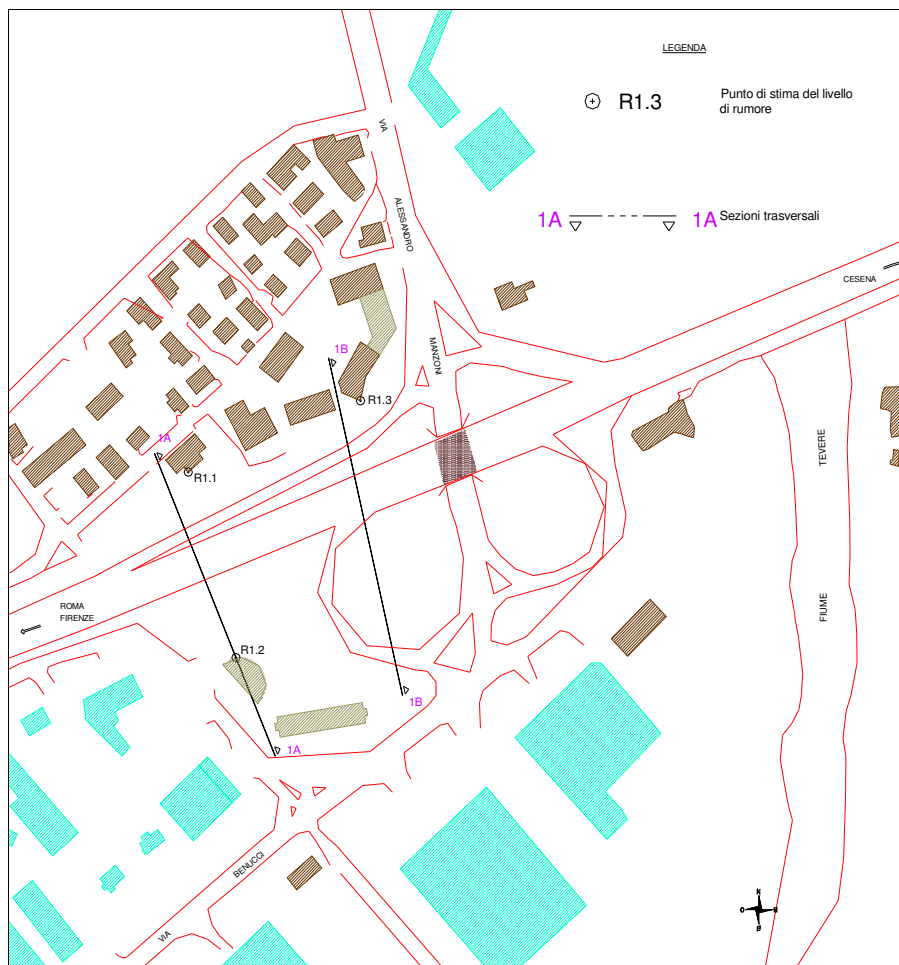


Fig. 10: Planimetric map of a section affected by a land reclamation intervention

Confrontando la mappatura acustica con la zonizzazione, si sono individuate le aree in cui vengono superati i limiti di legge. Confrontando inoltre la situazione diurna con quella notturna, si è individuata la condizione più gravosa.

I risultati del confronto sono stati riportati tramite Elaborati grafici relativi a ciascun tratto, come mostra la fig. 11, attraverso una rappresentazione che mostra lo scostamento tra la mappatura e la zonizzazione in termini di numero di classi di rumorosità superate.

La terza fase è relativa alla proposta per l'abbattimento del rumore.

L'ultima fase riguarda la valutazione dei livelli di rumore, in seguito alla realizzazione degli interventi proposti, in base ai quali è stato possibile verificare l'effettiva funzionalità degli interventi stessi. In particolare, il dimensionamento degli elementi di protezione acustica è effettuato tramite un modello matematico originale, che tiene conto delle caratteristiche dei materiali impiegati, dell'altezza delle protezioni, della distanza tra sorgente di rumore e ricettore.

Le simulazioni sono riferite al periodo di riferimento notturno, in cui si sono riscontrati i superamenti dei limiti maggiori.



Fig. 11: Acoustic mapping of the considered section: exceedance limits

Al fine delle simulazioni, le due carreggiate del tratto di strada in esame sono state considerate come due sorgenti sonore distinte, la cui potenza è stata desunta dai dati misurati nell'ambito del Piano di Risanamento Acustico del Comune di Perugia.

Il modello usato consente di valutare il livello del rumore in corrispondenza del ricettore in assenza ed in presenza delle barriere, di verificare l'efficacia degli interventi proposti e di scegliere pertanto le altezze e le disposizioni in pianta che garantiscono i migliori benefici.

In considerazione delle caratteristiche dell'infrastruttura, nei vari tratti studiati le diverse soluzioni progettuali proposte possono essere riassunte nelle seguenti categorie di intervento:

- *Installazione di barriere artificiali antirumore*

Tale intervento è stato previsto in tratti o situazioni dove scarso era lo spazio a disposizione, su rampe o tratti di infrastruttura in rilevato, in presenza di edifici molto vicini alla strada.

- *Isolamento acustico delle abitazioni*

La soluzione è stata adottata in presenza di situazioni particolarmente severe, in presenza di edifici pluripiano, dove interventi con semplici barriere sarebbero potuti risultare non pienamente efficaci per gli ultimi piani.

- *Infoltimento della vegetazione presente*

La disponibilità di spazio presente tra le rampe di accesso al raccordo autostradale e la carreggiata della strada statale E45, vede realizzabile un infoltimento della vegetazione che consente in particolare di schermare la rumorosità proveniente dalla carreggiata della stessa E45. Per schermare il rumore proveniente dalla carreggiata della E45, è stato proposto l'infoltimento della vegetazione, in parte già presente, per una larghezza variabile a seconda del tratto considerato. Tale intervento garantisce, in alcuni casi, la richiesta riduzione di rumore in alternativa all'installazione di barriere artificiali.

In fig. 12 e 13 sono riportate, a titolo di esempio, le soluzioni proposte per uno dei tratti da bonificare; l'intervento previsto consiste in una barriera semitrasparente di altezza pari a 6.5 m installata sui soli lati esterni della carreggiata e in una barriera artificiale verticale, anch'essa con elemento antidiffrattivo. Nei tratti di superstrada su rilevato le barriere sono dotate di propria fondazione su micropalo. In corrispondenza della rampa di accesso alla E45, in direzione Roma, si è reso necessario proteggere gli edifici con barriere semitrasparenti disposte solamente lungo il lato che fiancheggia gli edifici stessi. E' stata prevista inoltre l'installazione di un riduttore antidiffrattivo in alluminio, da posizionare sulla sommità della barriera stessa. L'incremento dell'attenuazione apportata dal riduttore è compreso tra 2 e 4 dB.

Fig. 12: *Acoustic barrier in a curved section without anti-diffractive element*

Fig. 13: *Acoustic barrier in vertical section with anti-diffractive element*

5.2 Efficacia acustica di asfalti fonoassorbenti

L'indagine, condotta dalla A.R.P.A.E.R (ARPA Emilia Romagna – Sezione di Reggio Emilia) è stata pianificata al fine di condurre un confronto tra i livelli di rumore prima e dopo l'applicazione di un asfalto drenante fonoassorbente, in una strada ad intenso traffico ed a scorrimento veloce, Via del Partigiano, nel quadrante nord – est della città di Reggio Emilia, nella quale inefficaci sarebbero risultati altri tipi di intervento, in quanto la strada è costeggiata da edifici ad uso residenziale di 4 ÷ 5 piani.

Il particolare asfalto utilizzato ha una struttura porosa a celle aperte, ottenuta utilizzando una particolare miscela di ghiaie calibrate, una ridottissima percentuale di sabbie ed un particolare legante bituminoso; lo spessore del nuovo manto risulta essere non superiore a 3 cm.

Le misure del livello sonoro sono state fatte con un fonometro montato su di un mezzo mobile ed eseguite in modo da produrre *history* costituite da livelli equivalenti di breve durata, 1.5 o 15 minuti, ininterrottamente per due giorni. Contemporaneamente sono anche state rilevate informazioni sul traffico, come il numero dei veicoli transitati, divisi per tipologia, e il numero dei veicoli transitati divisi per classe di velocità.

La relazione empirica che segue fornisce il valore della grandezza Livello di Traffico (LT):

$$LT = 10 \log [VT (3 V_{mp})^2] - K$$

con:

VT = volume di traffico (calcolato secondo quanto riportato in [1] come somma del numero dei veicoli leggeri e del numero dei veicoli pesanti moltiplicato per otto);

V_{mp} = velocità media ponderata, calcolata dividendo per il numero totale dei veicoli, la sommatoria dei prodotti del numero di veicoli di ogni classe per la velocità nominale della classe stessa;

K = fattore arbitrario che trasla verso l'alto o verso il basso la curva del livello di traffico senza modificare la forma. Attraverso tale parametro si può arrivare a sovrapporre la curva LT con quella misurata.

La differenza fra i fattori $K_{\text{ante operam}}$ e $K_{\text{post operam}}$ fornisce con buona approssimazione il guadagno in decibel ottenuto.

I risultati, secondo quanto riportato in tab. 9 e 10 e figg. 14 e 15, dimostrano come la riduzione dei livelli sonori globali è di quasi 4 dBA nel periodo diurno e di quasi 5.5 dBA nel notturno. La maggiore riduzione registrata nel periodo notturno è imputabile al fatto che la velocità è notevolmente maggiore e il rumore causato dall'effetto di compressione dell'aria dai pneumatici su un asfalto tradizionale, aumenta con l'aumentare della velocità.

Tab. 9 : Risultati delle misure e dei rilevamenti di traffico prima della realizzazione dell'asfalto fonoassorbente (rif. Fig. 14)

Ante operam	Diurno	Notturmo
Livello di traffico	71.3	65
Livello di rumore	71.3 dBA	64.9 dBA
Velocità media	67 km/h	76 km/h
Volume traffico	2675 Veic.7/h	418 Veic.7/h

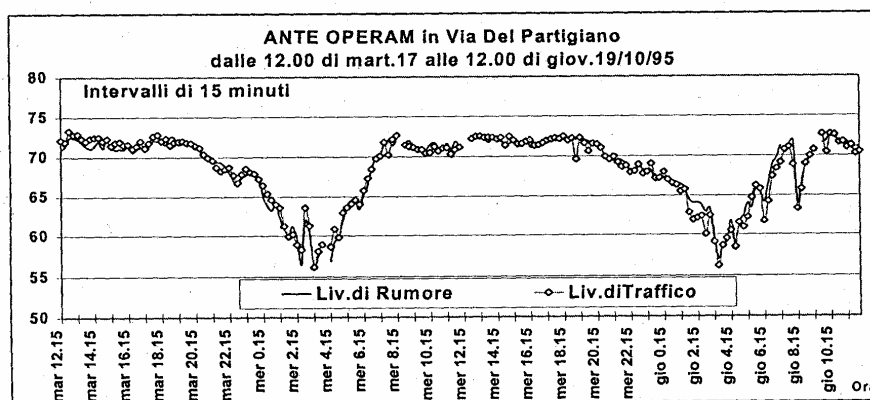


Fig. 14: Andamento dei livelli di rumore e del traffico

Tab. 10 : Risultati delle misure e dei rilevamenti di traffico dopo la realizzazione dell'asfalto fonoassorbente (rif. Fig. 15)

Post operam	Diurno	Notturmo
Livello di traffico	67.9	54.9
Livello di rumore	67.8 dBA	59.6 dBA
Velocità media	70 km/h	83 km/h
Volume traffico	2709 Veic.7/h	346 Veic.7/h

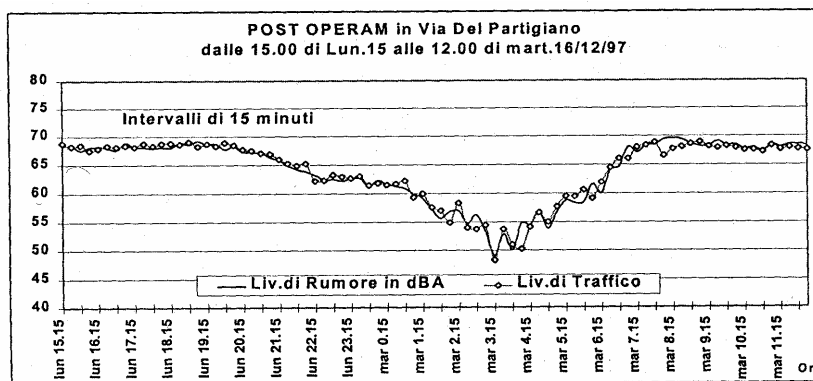


Fig. 15: Andamento dei livelli di rumore e del traffico

5.3 Rumore stradale rotolamento: risultati di un'indagine sperimentale

Il presente paragrafo riporta i risultati di un'indagine sperimentale cui ha preso parte anche l'Autore nell'ambito delle attività di ricerca del CIRIAF – Sezione di Fisica Tecnica e Inquinamento Ambientale di Perugia, volte alla realizzazione di un prototipo di parafrangente elettronico per la riduzione del rumore da rotolamento con metodi di controllo attivo.

I meccanismi di generazione del rumore da rotolamento sono legati a diversi fenomeni: la compressione e l'espansione dell'aria nella parte anteriore e posteriore della ruota APM, *air pumping mechanism*, la *vibrazione-deformazione* del fianco del pneumatico sotto l'azione combinata del carico e del rotolamento TWV, *tyre wall vibration*, la risonanza delle cavità del battistrada scolpite nel pneumatico ARR, *air resonant radiation*.

Caratteristiche del pneumatico

La sperimentazione è stata condotta utilizzando pneumatici del tipo alta velocità (fino a 240 km/h), modello 195 /60 /V R15. Il battistrada, di larghezza pari a 195 mm, è realizzato con intagli orizzontali e verticali che disegnano figure ripetitive.

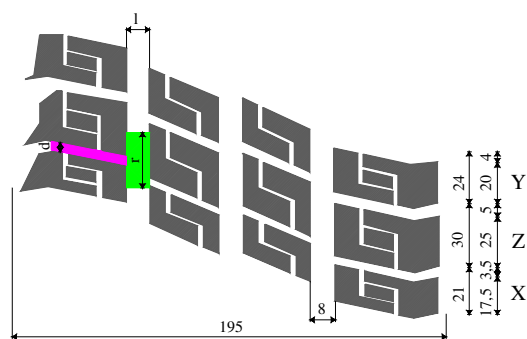


Fig. 16: Particolare e foto del pneumatico con la distribuzione degli intagli trasversali della battistrada X, Y, Z (misure in mm).

Se in un determinato istante si considera la parte del pneumatico che poggia al suolo, le cavità interne, scolpite nella parte centrale della ruota, costituiscono un volume chiuso in cui l'aria può entrare o uscire soltanto attraverso i canali orizzontali, ai bordi della battistrada (vedi particolare fig. 16). L'aria contenuta nelle cavità interne rappresenta un elemento elastico, mentre l'aria nei canali orizzontali più esterni rappresenta una massa oscillante. Il fenomeno di risonanza viene eccitato dall'impatto ruota - strada; le frequenze generate dipendono soprattutto dalle dimensioni geometriche e dalla sequenza degli intagli e possono essere calcolate mediante

la seguente relazione:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL_e}} \quad (5.1)$$

dove:

c = velocità del suono nell'aria (m/s)

S = sezione di uscita dei canali orizzontali (m^2), data dal prodotto tra lo spessore s del battistrada e la larghezza d del canale di uscita;

V = volume delle cavità interne attribuibile al canale di uscita considerato (m^3), dato dal prodotto tra lo spessore s del battistrada, la larghezza l e la lunghezza r del canale interno;

L_e = lunghezza equivalente del canale di uscita (m).

La (5.1), applicata al pneumatico in esame (vedi fig. 16), può essere semplificata assumendo $c = 340$ m/s; $l = 0.008$ m; $L_e = 0.045$ m; si ottiene in tal modo la seguente relazione:

$$f_0 = 541 \sqrt{\frac{d}{0.036 r}} \quad (5.2)$$

Effettuazione delle prove

I pneumatici sono montati su una autovettura Alfa 164 2000 turbo-benzina. I rilevatori sono due microfoni montati nella parte anteriore e posteriore della ruota retrostante sinistra dell'autovettura, secondo la disposizione in fig. 17. Le misure sono state condotte sia con pneumatico usurato (battistrada spessore 4,0 mm), sia con pneumatico nuovo (battistrada spessore 7,7 mm), per velocità comprese tra 50 e 130 km/h.

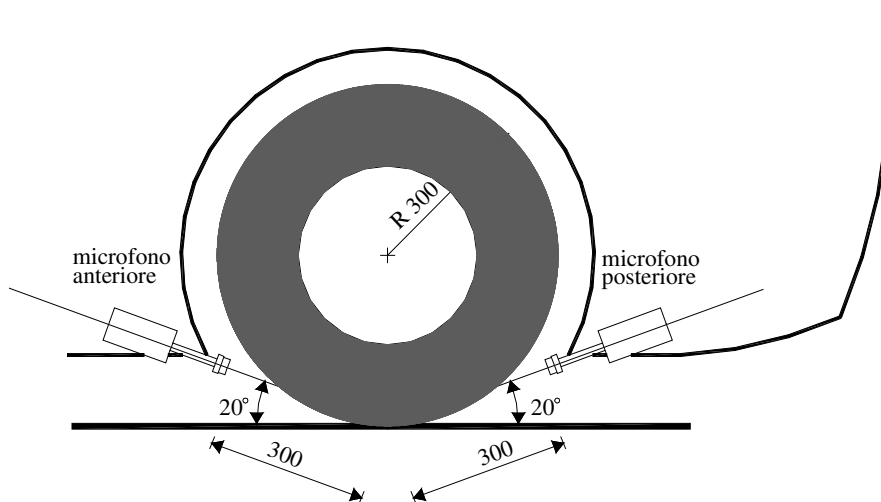


Fig. 17: schema della posizione dei microfoni di misura durante le prove.

Le prove sono state effettuate sul raccordo autostradale Perugia - Bettolle, nel tratto compreso tra le uscite di Corciano e Magione. Il tratto ha una lunghezza di 7 km. Il manto stradale è liscio ed uniforme; il traccia-

to è pressoché rettilineo, privo di viadotti.

I dati sono stati registrati e depurati di tutte le anomalie (difetti transitori del manto stradale ed interferenze prodotte durante il sorpasso di altri automezzi) ed analizzati in Laboratorio.

Nelle figg. 18 e 19 sono riportati, rispettivamente in dB_{lin} e dBA, gli spettri del rumore relativi alla parte posteriore della ruota nel caso di pneumatici nuovi e usati, al variare della velocità del veicolo da 50 a 130 km/h. Come si può notare dalla fig. 18, gli spettri sono caratterizzati da elevati livelli delle componenti in bassa frequenza; all'aumentare della frequenza fino a 500-600 Hz, i livelli scendono quasi linearmente di 5 o 6 dB per ottava. Tale andamento può essere messo in relazione con le frequenze fondamentali di rotolamento del pneumatico che, per le velocità da 50 a 130 km/h, cadono nel campo degli infrasuoni da 7 a 20 Hz, accompagnate da armoniche di ordine superiore fino a 100 Hz. Il meccanismo di emissione acustica è legato alla vibrazione-deformazione del fianco della ruota TWV; le armoniche generate, sebbene di notevole intensità, non producono un disturbo rilevante (almeno se si assume come indice di valutazione del disturbo il livello equivalente continuo di rumore ponderato A); ben più disturbanti sono le armoniche comprese tra 600 e 3000 Hz, come si evince dalla fig. 19.

Tra 600 Hz e 3000 Hz lo spettro è il risultato della sovrapposizione delle componenti rotazionali APM ed irrotazionali ARR. La somma dei due fenomeni genera un picco del livello di pressione acustica, il cui mas-

simo varia, al variare della velocità dell'autoveicolo, tra 1000 e 1600 Hz. In particolare il massimo si ha intorno ai 1000 Hz per velocità comprese tra 50 e 70 km/h, intorno a 1250 Hz per velocità da 90 a 110 km/h ed intorno ai 1600 Hz per velocità di 130 km/h.

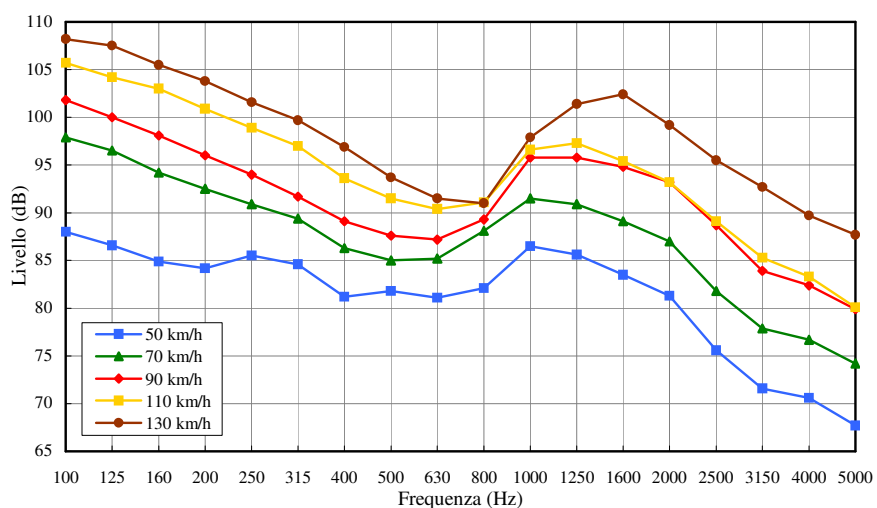


Fig. 18: spettri del rumore di rotolamento in dB(lin) misurati nella parte posteriore del pneumatico nuovo per diverse velocità del veicolo.

Lo spettro di rumore relativo alla velocità di 50 km/h presenta un'anomalia rispetto agli altri intorno ai 250 Hz, ove è presente un massimo relativo; infatti a basse velocità diventa significativo il contributo del rumore prodotto dal terminale di scarico del motore, che si somma a quello generato dal rotolamento; tale contributo è invece completamente mascherato ne-

gli altri casi, a velocità più elevate.

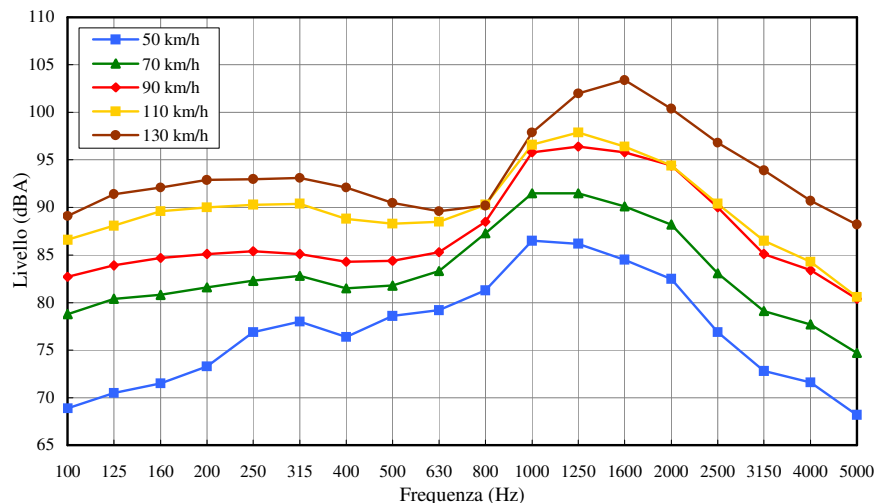


Fig. 19: spettri del rumore di rotolamento in dB(A) misurati nella parte posteriore del pneumatico usurato del 50 % per diverse velocità del veicolo.

Dall'analisi dei risultati è emerso quanto segue:

- l'usura dei pneumatici produce un incremento dei livelli per banda in 1/3 di ottava compreso tra 3 e 6 dB nel campo di frequenze tra 400 e 5000 Hz; ciò comporta un incremento del livello equivalente di rumore ponderato A di circa 5 dBA;
- gli spettri di rumore mostrano la presenza di armoniche di elevata intensità nel campo da 800 a 2500 Hz, dovute a meccanismi di genera-

zione del rumore sia rotazionali APM che irrotazionali ARR;

- a frequenze inferiori a 100 Hz sono presenti ulteriori armoniche TWV, la cui intensità, sebbene paragonabile a quella delle armoniche di cui al precedente punto b), non produce effetti disturbanti significativi, almeno se si assume come indice di disturbo il livello equivalente di rumore ponderato A;
- al variare della velocità del veicolo gli spettri del rumore emesso sono rappresentati da curve pressoché della stessa forma, ma traslate tra loro, con livelli medi crescenti all'aumentare della velocità. L'armonica più disturbante passa con gradualità da circa 1000 Hz a 1600 Hz quando la velocità viene incrementata da 50 a 130 km/h.

Si ha perciò una modesta e graduale variazione degli spettri di rumore con con il regime di rotazione del pneumatico. La correlazione delle armoniche più disturbanti con la velocità del veicolo e con il disegno del battistrada (a parità di pavimentazione), sono i risultati più significativi di questa indagine sperimentale, pertanto sono utili per lo studio dei meccanismi di generazione e la progettazione di sistemi di controllo passivo e/o attivo del rumore da rotolamento.

5.4 *La bonifica acustica attraverso strumenti urbanistici: un intervento nel Comune di Terni*

Nella definizione di criteri generali di progettazione di interventi di bonifica acustica è utile ricordare che esistono anche strumenti urbanistici per la limitazione di emissioni sonore come, ad esempio, i Piani Urbani del Traffico, i Piani dei Trasporti Provinciali e Regionali, la pianificazione e gestione del traffico stradale e ferroviario.

In particolare gli strumenti di intervento sul traffico stradale, che possono essere sia a breve, medio che lungo periodo, comprendono: interventi sulla circolazione (deviazioni, sensi unici, limiti di velocità), organizzazione di trasporti urbani alternativi (locomozione elettrica), realizzazione di intere nuove infrastrutture.

L'esempio di seguito riportato riferisce di un intervento basato su uno dei criteri sopra esposti, ovvero sulla deviazione del traffico.

L'intervento in questione è stato pianificato nell'ambito del Piano di Risanamento Acustico del Comune di Terni, realizzato dall'allora Istituto di Energetica dell'Università di Perugia ed attualmente in fase conclusiva, nell'ambito del Piano Triennale per l'Ambiente 1994 ÷ 1996.

Con riferimento alla Fig. 20, il sito da bonificare, costituito dalla via Brodolini, è una strada di larghezza pari a 3.5 metri per ogni senso di marcia. Gli edifici presenti ai lati della strada sono in linea, di carattere residenziale, distano dall'asse stradale circa 12 metri e sono caratterizzati da

un'altezza pari a 12 metri. Via Brodolini può essere classificata come strada di quartiere e, allo stato attuale, assolve l'importante funzione di collegare Via M. di Filippo con Via Turati.

Sulla base della mappatura e della zonizzazione acustica dell'area in esame, si è riscontrato il superamento dei limiti di due classi di rumorosità, pari cioè ad un valore compreso tra 5 e 10 dBA oltre il limite di zona, in una fascia che si sviluppa attorno alla strada. L'area comprende tutti i ricettori sensibili (edifici residenziali, scuole e uffici) individuati ai fini del dimensionamento delle opere di protezione acustica.

Lo stato di inquinamento acustico nella zona interessata è essenzialmente prodotto dal flusso di veicoli che attraversano il Quartiere per portarsi da Via M. di Filippo a Viale Filippo Turati e viceversa (fig. 20).

In considerazione delle caratteristiche dell'infrastruttura si è proposto un intervento di bonifica acustica basato sulla deviazione del flusso veicolare, come risulta dalla fig. 20. Poiché allo stato attuale la strada che interessa il quartiere non è soltanto una strada di servizio, ma anche una strada di collegamento tra Via M. di Filippo e Viale Filippo Turati, si propone la costruzione di una strada alternativa che, da Via M. di Filippo, arrivi all'incrocio tra Viale Filippo Turati e Viale Trento, by-passando il quartiere.

Attraverso tale intervento si è stimata una riduzione del traffico veicolare di Via Brodolini pari al 75%.

La valutazione delle attenuazioni sonore ottenibili è stata effettuata

tramite un modello matematico che consente di stimare, a partire dal numero di veicoli transitanti lungo una strada e dalle caratteristiche della stessa, il livello equivalente di rumore prodotto ad una certa distanza dalla mezzogiornata stradale. La simulazione è stata effettuata sia nel periodo di riferimento diurno sia in quello notturno e i risultati ottenuti sono riportati nella tabella 11: si ottengono valori dell'attenuazione dell'ordine di 7 dBA, che consentono di abbassare il livello di pressione sonora al disotto del limite massimo di immissione sia diurno che notturno.

Tab. 11 : *Attenuazioni del livello di rumore in dBA introdotte dagli interventi di bonifica acustica di progetto in prossimità dei ricettori più esposti*

Periodo di riferimento	Ricettore	Leq stato attuale (dBA)	Leq stato di progetto (dBA)	Attenuazione (dBA)	Limite massimo di immissione (D.P.C.M 14/11/97) (dBA)
Nottorno	R1	52.75	46.06	6.69	50
Diurno	R1	65.35	58.13	7.22	60

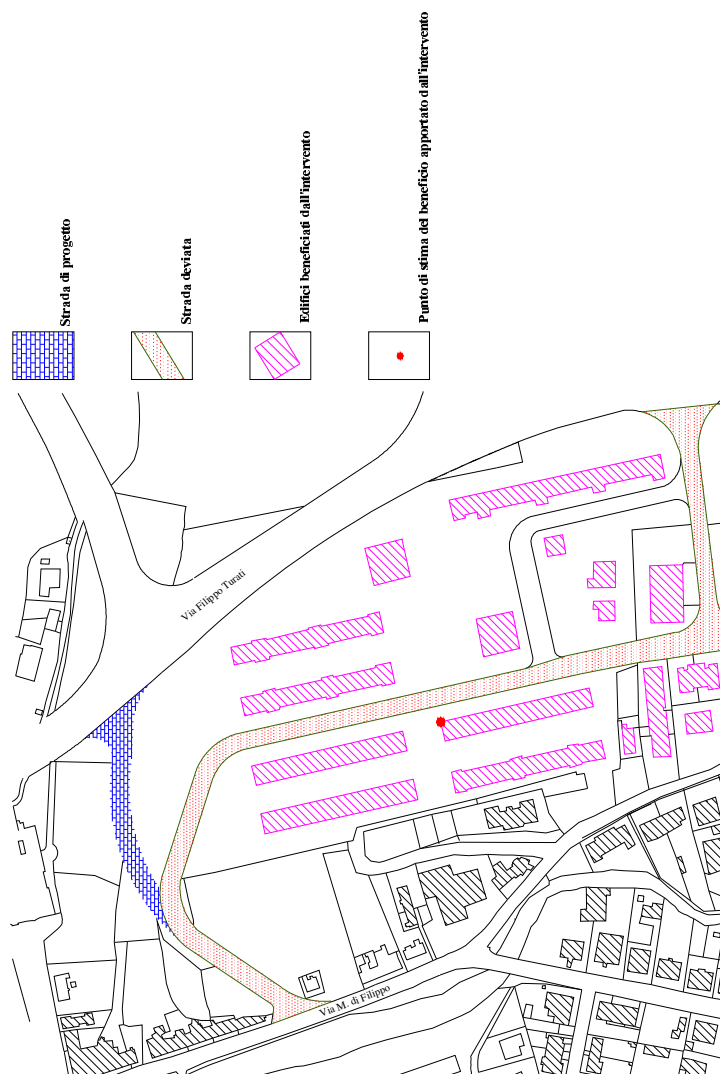


Fig. 20: Piano di Risanamento Acustico del Comune di Terni: progetto di bonifica acustica per mezzo di deviazione del traffico dalla zona degli edifici disturbati.

6. Bibliografia

- [1] **G. Brambilla, G.B. Cannelli, S. Santoboni:** "Valutazione e previsione dell'inquinamento acustico urbano. Mappa del rumore di Roma". CNR O. M. Corbino, Rapporto Scientifico N. 56 Roma, luglio 1984.
- [2] **A. Alexandre:** "Traffic noise abatement: what has been done? What needs to be done?", Comune di Modena, USL n. 16 di Modena, Atti del Convegno Internazionale "Il rumore urbano e il governo del territorio", Modena, 1-2-3 Marzo 1988.
- [3] **R. Ferri, W. Buciol:** "Il rumore da traffico veicolare: correlazione tra livelli sonori e indici di disturbo", Comune di Modena, USL n. 16 di Modena. Convegno Internazionale "Il rumore urbano e il governo del territorio", Modena, 1-2-3 marzo 1988, Atti.
- [4] **A.C. Bertetti, C. Lombardi, M. Masoero:** "L'impatto acustico del traffico autostradale, valutazione sperimentale di modelli previsionali", Comune di Modena, USL n. 16 di Modena. Convegno Internazionale " Il rumore urbano e il governo del territorio", Modena 1-2-3 marzo 1988, Atti.
- [5] **F. Honsell:** "Contributi alla valutazione del fonoinquinamento da traffico: l'interazione tra misure dirette e procedure di calcolo", in "Atti del XVII Convegno Nazionale (AIA) ", Parma 12-13-14 aprile 1989, Facoltà di Ingegneria, Università di Parma.
- [6] Atti del seminario: "Metodi numerici di previsione del rumore da traffico", a cura di **R. Pompoli**, Parma, 12 Aprile 1989. Facoltà di Ingegneria, Università di Parma.
- [7] **G. Brero, G. Dealessandri:** "Un nuovo tipo di approccio per la misura dell'inquinamento acustico ambientale dovuto a rumorosità indotta da traffico stradale", Convegno Nazionale Rumore e Vibrazioni, valutazione, prevenzione, bonifica. Bologna 20-21 novembre 1990, Modena 22-24 novembre 1990.
- [8] **A.C. Bertetti et Al.:** "L'impatto acustico del traffico autostradale: valutazione sperimentale di modelli previsionali", Atti Conv. Internaz., Modena 1990.

- [9] **G. Mucci, L. Rocco:** "Barriere antirumore per il traffico stradale", Maggioli Editore, Rimini 1993.
- [10] **F. Cotana, F. Rossi, L. Santarpia:** *Riduzione dell'impatto ambientale nei trasporti: costruzione di un dispositivo per il controllo attivo del rumore allo scarico*, 49° Congresso Nazionale ATI, Perugia, 26-30 settembre 1994
- [11] **F. Cotana, F. Rossi, L. Santarpia:** "Noise Control on Air Ducts: Evolution of Active Systems and Perspectives"; Inter Noise '93, Leuven (Belgio), agosto 1993.
- [12] **C. Fagotti, A. Poggi:** "Traffic Noise Abatement Strategies. The Analysis of a Real Case not Really Effective", AICB - 18th International Congress for Noise Abatement, Traffic Noise in Europe, Bologna 11-13 settembre 1995.
- [13] **G. Biondi, E. Guastadisegni, C. Piendibene:** "Rumore: dal D.P.C.M. 1/3/1991 alla legge quadro ed i suoi decreti attuativi", XXIII Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica, Bologna 12-14 ottobre 1995.
- [14] **S. Meirashi et Al:** "Quantitative comparison between Noise Reduction – Factor of Drainage Asphalt Pavement". Applied Acoustic Vol. 44, n. 2 pp. 165-167, 1995
- [15] **F. Asdrubali, F. Cotana, F. Rossi:** "La Legge Quadro sull'inquinamento acustico.", L'Ingegnere Umbro, aprile 1996.
- [16] **F. Cotana:** "Aspetti attuativi della Legge Quadro" Gruppo Scientifico Italiano Studi e Ricerche, Giornate di studio su Inquinamento Acustico Milano, 15 maggio 1996.
- [17] **M. Felli et Al:** "Una nota sui Piani comunali di risanamento acustico", Atti del XXIV Convegno Nazionale AIA, Trento, 1996.
- [18] **F. Cotana, C. Buratti, F. Rossi:** "Misure di rumore e mappatura acustica del territorio", XXIV Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica. Trento, 12-14 giugno 1996.
- [19] **A. Denk:** *Misure di protezione dall'inquinamento acustico dovuto al traffico*, XXIV Convegno Nazionale AIA Trento 12-14 giugno 1996.
- [20] **S. Meiaraschi et al.:** "Noise Reduction Characteristics of Porous Elastic Road Surfaces", Applied Acoustics, Vol.47, n.3, pp 239-250, 1996.

- [21] **S. Dall'Oglio:** *"I Decreti sui criteri di progettazione delle costruzioni edilizie e delle infrastrutture di trasporto"*, Atti delle Giornata di studio "Legge Quadro sull'Inquinamento Acustico n.447/95", Perugia, 20 maggio 1997.
- [22] **F. Cotana, M. Felli, F. Rossi:** *An Active Noise Control Device for Electric Power Plants*, Active 97 Symposium, Budapest 21-23 Agosto 1997.
- [23] **G. D'Angiolino:** *"Regolamento per le infrastrutture di trasporto stradale"*, Atti delle Giornata di studio "Legge Quadro sull'Inquinamento Acustico n.447/95", Perugia, 20 maggio 1997.
- [24] **F. Cotana, M. Felli:** *Congegno elettroacustico per la riduzione del rumore prodotto dal rotolamento di pneumatici sulla pavimentazione stradale e di ruote ferrate sui binari*, Camera di Commercio di Perugia, d. Brevetto n. PG97A0021, Perugia 12 agosto 1997.
- [25] **G.J. Kim et Al.:** *Identification of the Airborne Component of Tyre-induced Vehicle Interior Noise*, Applied Acoustics, Vol 51 n. 2, pp. 141-156, 1997.
- [26] **F Cotana, C. Buratti:** *"Indagine sperimentale sul rumore stradale da rotolamento"*, XXVII Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica. Genova, maggio 1999.
- [27] **M. Confetti, M. Poli, R. Barbolini:** *"Efficacia acustica di asfalti drenanti fonoassorbenti"*, XXVII Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica. Genova, maggio 1999.