

ARPAT
Agenzia
Regionale per la
Protezione
Ambientale della
Toscana



Comune di Firenze

Prestazioni acustiche di asfalti fonoassorbenti a doppio strato



David Casini - Simone Secchi - Cesare Fagotti - Andrea Poggi

Rapporto giugno 1998

Prestazioni acustiche di asfalti fonoassorbenti a doppio strato

Rapporto giugno 1998

ARPAT

Dipartimento Provinciale di Firenze

Unità Operativa di Fisica Ambientale

David Casini Simone Secchi Cesare Fagotti Andrea Poggi

Ringraziamenti

Lo studio è stato svolto nell'ambito di un progetto finanziato dal piano triennale dell'ambiente 1994-97, mediante una convenzione tra il Comune di Firenze e l'ARPAT.

Indice

Introduzione	5
1.1 Premesse	6
1.2 Obiettivi della sperimentazione	9
Scelta del campione per l'analisi	11
2.1 Descrizione del contesto ambientale	12
2.2 Descrizione dell'asfalto sperimentato	14
Risultati della sperimentazione	16
3.1 Correlazione tra flussi di traffico e livello sonoro equivalente	16
3.2 Decadimento spaziale	21
3.3 Coefficiente di assorbimento acustico	29
3.4 Considerazioni	33
3.5 Conclusioni	35
3.6 Prospettive	36
Appendice A - metodi di misura del coefficiente di assorbimento	38
Appendice B - metodi per la previsione del campo sonoro	40
B.1 Metodi previsionali impiegati	44
B.2.1 Metodo del pyramid tracing	48
B.2.2 Metodo ISO 9613	50
Appendice C - quadro completo dei risultati	53
C.1 Misure di coefficiente di assorbimento acustico	54
C.2 Misure di decadimento spaziale	60
C.3 Misure di livello di pressione sonora	69
Riferimenti	77

Capitolo 1

Introduzione

La Legge Quadro sull'inquinamento acustico (n.447/95) stabilisce i principi fondamentali in materia di tutela dell'ambiente esterno e dell'ambiente abitativo. Tale legge si preoccupa non solo della salvaguardia della salute, ma anche del conseguimento nel tempo di un clima acustico ottimale per il comfort delle persone. Vengono inoltre definiti i provvedimenti per la limitazione delle immissioni sonore, che possono essere di varia natura (amministrativa, tecnica, costruttiva e gestionale). La legge riconosce quindi l'importanza di strumenti quali i piani urbani del traffico e più in generale i piani urbanistici, oltre agli interventi di tipo attivo sulle sorgenti o di tipo passivo lungo le vie di propagazione o sui ricettori, e prevede un loro uso coordinato nei Piani di Risanamento Acustico.

Nella Legge Quadro sono fissate le condizioni per le quali le amministrazioni comunali sono tenute a predisporre i Piani di Risanamento Acustico, una volta approntata la suddivisione acustica del territorio in aree omogenee per destinazione d'uso. Il termine "Piano di Risanamento" indica in genere un insieme di provvedimenti che, per quanto attiene alla gestione territoriale, siano in grado di perseguire gli obiettivi definiti in sede di pianificazione. La Legge Quadro introduce inoltre una novità in tema di prevenzione, fissando obblighi di valutazione previsionale d'impatto acustico per la realizzazione di nuove "sorgenti" di rumore, e l'obbligo di valutazione previsionale del clima acustico per l'edificabilità in prossimità delle sorgenti di rumore già esistenti. Pertanto, molte delle attività di risanamento, ma anche di controllo e di studio, dipenderanno dalla capacità di simulare l'esistente o gli interventi da realizzare, modellizzando dal punto di vista acustico le sorgenti e l'ambiente in cui avviene la propagazione sonora per calcolare l'esposizione dei ricettori.

Così come sancito nei contenuti della Legge Quadro, la necessità di una progressiva riduzione dei livelli di rumore, al fine del raggiungimento dei valori di qualità, costituirà un forte impegno per le amministrazioni locali, per cui mancano tuttavia ad oggi riferimenti procedurali ed esperienze consolidate [1]. In ogni caso fermo restando l'obiettivo generale del contenimento del rumore, un Piano di Risanamento Acustico sarà contraddistinto, come già accennato, da provvedimenti di varia natura, di tipo amministrativo (proposte ed indirizzi in sede di attività pianificatoria) normativo e regolamentare e di veri e propri interventi concretizzabili in opere di mitigazione. L'efficacia di ogni singola azione può tradursi in guadagni acustici magari

non eclatanti rispetto all'entità dell'inquinamento acustico, ma che, per effetto integrato con altri tipi d'intervento e su ambiti temporali adeguati, può rivelarsi soddisfacente rispetto agli obiettivi programmati.

Nell'ottica contemplata dalla Legge Quadro, viene condotta a Firenze una sperimentazione che prende in esame una delle possibilità tecniche utilizzabili per il contenimento dei livelli di rumore ambientale. In particolare, l'Unità Operativa di Fisica Ambientale dell'A.R.P.A.T. di Firenze sta effettuando una campagna di misure che riguardano le prestazioni acustiche di un asfalto fonoassorbente a doppio strato steso nel mese di settembre 1997, nelle vie La Pira e Lamarmora. Lo studio viene eseguito nell'ambito di una convenzione tra A.R.P.A.T. e Comune di Firenze della durata di 15 mesi, il cui obiettivo principale è la valutazione delle prestazioni acustiche dell'asfalto e del loro decadimento nel tempo.

I risultati completi dell'analisi saranno disponibili solo a conclusione della sperimentazione che prevede lo studio comparativo di altri manti fonoassorbenti impiegati in ambito urbano, con caratteristiche costruttive differenti, ed un'osservazione per almeno 12 mesi; tuttavia già adesso (maggio-giugno '98) è possibile trarre alcune conclusioni, oggetto del presente lavoro, per quanto riguarda l'asfalto steso in via La Pira e in via Lamarmora, che potranno servire alla Pubblica Amministrazione nella scelta degli indirizzi e delle soluzioni da adottare per il contenimento dell'inquinamento acustico.

I dati raccolti nel corso delle campagne di misure e lo studio fin qui condotto dall'U.O. di Fisica Ambientale, hanno già prodotto la pubblicazione di due comunicazioni scientifiche [2, 3] che rappresentano un approfondimento di carattere più specificatamente tecnico a compendio e integrazione del presente lavoro.

1.1 Premesse

Lo sviluppo delle ricerche sul comportamento dei materiali da utilizzare nella realizzazione delle strade, che avessero proprietà drenanti e fonoassorbenti, ha portato allo studio e all'impiego di conglomerati bituminosi con caratteristiche di strati porosi a partire dagli anni ottanta.

Questi asfalti sono di norma composti da aggregati di taglia 0/10 mm o 0/12 mm, con un vuoto nella curva granulometrica in corrispondenza delle dimensioni medie (2/6 mm). In tal modo, i restanti elementi sono i più piccoli (0/2 mm, in proporzione di circa il 15%) e i più grandi (6/10, per circa l'85%). Il legante è o bitume puro o, in molti casi, di tipo modificato

(mediante l'aggiunta di polimeri o polverino di gomma e l'eventuale arricchimento di fibre) e viene usato in una proporzione leggermente superiore rispetto agli asfalti densi tradizionali [4]. Quest'amalgama determina, all'interno della struttura, una presenza di vuoti, che dev'essere di norma non inferiore al 20%.

L'utilizzo e la sperimentazione di questo tipo di asfalti sono stati dettati fino ad oggi principalmente da esigenze legate alla sicurezza sulle strade, prima ancora che al tema dell'inquinamento acustico. Tra i problemi che si manifestano sugli asfalti lisci tradizionali durante la guida, vanno ricordati il ristagno dell'acqua sulle carreggiate, in grado di provocare il fenomeno di "acquaplaning", ed i getti d'acqua sollevati dai veicoli che possono ridurre la visibilità. Tutto ciò può essere causa di numerosi incidenti. L'applicazione dei manti porosi, riducendo sensibilmente gli effetti del ristagno d'acqua, consente al veicolo di mantenere una buona aderenza sulla strada.

Le problematiche legate alla sicurezza hanno portato ad adottare i manti drenanti soprattutto in strade a scorrimento veloce (autostrade, circonvallazioni, superstrade, ecc.). L'interesse iniziale rivolto a tali contesti, ha indirizzato verso di essi le prime indagini sul contributo degli asfalti all'abbattimento del rumore [5], trascurando in un primo tempo il loro possibile utilizzo in ambito urbano.

Gli studi fino ad oggi condotti prevalentemente in regimi di transito dei veicoli con velocità superiori a 50 km/ora (contesti extraurbani), hanno individuato come sorgente principale di rumore il meccanismo d'interazione fra ruota ed asfalto dovuto al rotolamento. Tale generazione di rumore viene a determinarsi per il concorso di vari effetti (rumori di *shock*, fenomeno dell'*air-pumping*, "effetto corno", fenomeno dello *slip and stick*) [4]; le esperienze sin qui condotte hanno evidenziato il ruolo favorevole della porosità di un manto drenante sulla generazione e l'assorbimento del rumore risultante dai fenomeni prima citati. Uno dei meccanismi di funzionamento acustico è, infatti, legato all'elevata percentuale di vuoti caratteristica di questi asfalti, grazie alla quale avviene la dissipazione del suono. Le molecole d'aria contenute nella cavità vengono messe in vibrazione e urtando contro le pareti degli inerti danno origine ad una trasformazione di energia acustica in energia termica. E' il ben noto fenomeno di assorbimento acustico dei materiali porosi.

In linea di massima, viene riconosciuto che conglomerati bituminosi dello spessore di circa 4 cm, percentuale di vuoti superiore al 18% e fino al 25%, con dimensione degli aggregati

0/10 o 0/12, sono in grado di dimezzare l'energia acustica globalmente emessa da una sorgente posta sopra di essi (riduzione di 3 dB) a confronto con un asfalto denso tradizionale [4].

Rispetto all'applicazione di un manto fonoassorbente, la precisazione del contesto ambientale (urbano o extraurbano) non è di secondaria importanza, perché non appare del tutto chiaro e scontato a priori che i benefici dovuti a questo tipo di asfalti in ambiti a scorrimento veloce, ampiamente documentati in letteratura, si trasferiscano automaticamente al contesto urbano.

Esistono, infatti, molteplici aspetti per cui i due ambiti presentano caratteristiche molto differenti. Tra questi si sottolinea, per esempio, come lo spettro tipico di rumorosità autostradale è sostanzialmente diverso da quello riscontrabile in ambito cittadino, a causa della differente composizione del traffico e di condizioni di flusso (velocità elevata, assenza di fenomeni di accelerazione e frenata, ecc.). Qualitativamente, in contesti a scorrimento veloce, rispetto a un tipico spettro di rumore da traffico urbano, le componenti a bassa frequenza sono ridotte, mentre, al contrario, i contributi a frequenza più alta sono maggiori.

In ambito urbano, inoltre, appare difficile ipotizzare che i meccanismi di generazione del rumore siano gli stessi, dato che le velocità sono generalmente inferiori a 50 km/ora ed inoltre è frequente il fenomeno di code; ciò fa ritenere che il rotolamento non possa essere considerato la componente principale del rumore da traffico cittadino, ma prevalga il rumore prodotto dal motore.

Le prime sperimentazioni sull'efficacia acustica di asfalti porosi stessi in contesti urbani, sono state condotte in Francia nella seconda metà degli anni ottanta, rivelando guadagni acustici paragonabili a quelli riscontrati in abiti a scorrimento veloce (circa 3dB) [4].

Anche in Italia, alcuni esperimenti recenti condotti a Modena [6] sulla pavimentazione di una strada urbana a grande flusso di traffico, con asfalto drenante monostrato (spessore di 5 cm, porosità pari al 18%, resistenza al flusso d'aria 15800 Pa s/m²) hanno confermato una riduzione a bordo strada di 3dBA in termini di livello equivalente (L_{Aeq}) rispetto al rumore prodotto dal traffico in transito sull'asfalto tradizionale preesistente, a parità di condizioni di emissione (entità e tipologia di traffico).

Gli studi precedenti sulle prestazioni in opera dei manti fonoassorbenti a singolo strato utilizzati in ambito urbano [4, 6], sono però concordi nell'evidenziare che questa iniziale efficacia acustica decade in modo molto pronunciato già nel corso del primo anno, in conseguenza dell'intasamento dei pori dell'asfalto (per deposizioni di polveri, olio, materiale derivante

dall'usura dei pneumatici, ecc.). Questo problema appare di gran lunga il più significativo al fine di ottimizzare il rapporto costi/benefici nella ricerca di soluzioni alternative rispetto agli asfalti tradizionali.

Per completare il quadro di riferimento degli studi e delle soluzioni adottate nella realizzazione di manti stradali con proprietà acustiche, occorre aggiungere che, nel corso degli anni, sono stati applicati in alcune strade di Firenze dei conglomerati bituminosi di tipo modificato non drenanti (vie Coluccio Salutati, Datini, Giovanni dalle Bande Nere, via degli Artisti, Frà Bartolomeo, Martelli, Maragliano, Salviati, San Domenico, Volterrana – le gore, viadotto dell'Indiano – rampe in riva dx).

Gli studi fin qui condotti dall'Unità Operativa di Fisica Ambientale dell'A.R.P.A.T. di Firenze su alcuni di questi asfalti (via Coluccio Salutati, via Giovanni dalle Bande Nere) hanno mostrato una riduzione dei livelli di 2-3 dB al confronto con altre strade cittadine di analoga tipologia, ma con asfalto tradizionale. Si tratta comunque di indicazioni che richiederebbero ulteriori approfondimenti e campagne di misura specifiche volte a determinare in modo più preciso il guadagno acustico effettivamente raggiunto; in primo luogo si rende indispensabile la conoscenza del dato sul livello di rumore misurato nella stessa sede stradale precedentemente all'intervento di messa in opera del conglomerato bituminoso, e secondariamente occorre approntare un programma di monitoraggio per valutare il deterioramento delle proprietà acustiche nel corso del tempo.

Nell'ambito di questi studi, recentemente sono state eseguite delle misure preliminari anche in via Fra Bartolomeo, con lo scopo di determinare alcuni parametri acustici ambientali e il coefficiente di assorbimento acustico (generalmente indicato con α) del conglomerato bituminoso modificato (non drenante).

1.2 Obiettivi della sperimentazione

Il rapido deperimento nel tempo del potere drenante e delle proprietà acustiche, in seguito all'ostruzione delle porosità in un asfalto a singolo strato, ha portato a sviluppare e sperimentare una nuova generazione di asfalti a doppio strato drenante [7, 8]. Tali manti stradali, per la loro struttura costituita da uno strato superiore a granulometria fine, che funziona da filtro per le impurità, e da uno strato inferiore a granulometria grossa per l'evacuazione dell'acqua meteorica, sono progettati per eliminare il problema dell'intasamento dei pori sfruttando la capacità auto-pulente dovuta al passaggio dei veicoli [7].

La ricerca condotta a Firenze si propone proprio di studiare l'applicazione di questi asfalti di nuova generazione in qualche strada con caratteristiche tipiche di città d'impianto antico.

Data la novità dello studio condotto dall'U.O. di Fisica Ambientale, in considerazione dell'esiguità se non della completa mancanza di preesistenti ricerche condotte su questo tipo di asfalti in contesti urbani, l'indagine si è particolarmente concentrata sugli aspetti di maggior interesse pratico per la Pubblica Amministrazione, ovverosia sul guadagno acustico del manto e sulla sua durata nel tempo. Ciò nonostante, il compito di fornire indicazioni utili ed eventualmente di elaborare vere e proprie proposte operative riguardanti il futuro impiego di tali asfalti, hanno coinvolto molteplici aspetti che vanno ben al di là del semplice "monitoraggio", abbracciando problematiche di autentica ricerca scientifica.

Il quadro sintetico degli obbiettivi che hanno riguardato la sperimentazione sull'asfalto fonoassorbente a doppio strato steso nelle vie Lamarmora e La Pira, è pertanto rappresentato dai seguenti punti:

1. valutazione dell'efficacia acustica dell'asfalto in condizioni reali di messa in opera;
2. durata nel tempo delle proprietà fonoassorbenti (confronto con le prestazioni di un monostrato impiegato in ambito urbano);
3. individuazione dei meccanismi di funzionamento nell'abbattimento del rumore e degli effetti collaterali connessi;
4. valutazione della diversa efficacia in strade di varia tipologia, cioè quanto conta il campo sonoro riverberato che si produce nella via e se risulta modificabile dall'asfalto;
5. individuazione delle metodiche di misura in opera per determinare le caratteristiche degli asfalti.

Capitolo 2

Scelta del campione per l'analisi

2.1 Descrizione del contesto ambientale

La sperimentazione è stata eseguita in una strada del centro cittadino (via Lamarmora e via La Pira) caratterizzata da una geometria variabile. Infatti, un tratto della strada (l'intera via Lamarmora, fig. 1) è delimitata su entrambi i lati da edifici alti tra i 18 ed i 20 metri e distanti circa 12,5 metri tra loro. In questo tratto di strada si crea quindi un campo acustico semiriverberante, caratterizzato cioè da un incremento del livello sonoro dovuta alle riflessioni multiple sulle facciate.



Figura 1: Via Lamarmora in corrispondenza del Liceo Scientifico “Castelnuovo”.

Un altro tratto di strada (parte di via La Pira, fig. 2) è invece caratterizzato da sezione a L, con edifici su un solo lato, alti tra i 6 ed i 15 metri. L'altro lato della strada, larga circa 13 metri, è limitato dalla recinzione dell'orto botanico. L'ambiente acustico che si crea in questa zona è pertanto differente da quello precedente e si avvicina di più al “campo libero”, in quanto le riflessioni delle onde sonore sulle facciate acquistano minore peso.



Figura 2: Via La Pira in corrispondenza dell'orto botanico.

La strada, dal punto di vista del traffico che la interessa, ha caratteristiche fortemente “urbane”, in quanto è connotata da intenso traffico con velocità di percorrenza ridotta ed elevata percentuale di bus urbani e motorini.

Alcuni dati sui transiti rilevati in via Lamarmora in due periodi a distanza di un anno sono riportati in tabella 1. I valori sono espressi in numero di veicoli all'ora come media per il periodo diurno (dalle 6 alle 22) e per il periodo notturno (dalle 22 alle 6).

Numero di veicoli ora		Moto	Auto	Pesanti	Bus	Totale
21 febbraio 1997	diurno (6-22)	412	233	5	48	698
	nott. (22-6)	35	73	0	6	113
10 febbraio 1998	diurno (6-22)	417	252	2	75	745
	nott. (22-6)	39	75	0	8	122

Tabella 1: Flussi di traffico caratteristici del tratto di strada in corrispondenza del Liceo Castelnuovo.

Le velocità dei veicoli rientrano nei valori tipici delle strade urbane e sono in linea di massima nella media non superiori ai 50 km/h.

Il programma originario della sperimentazione prevedeva l'esame anche di un'altra strada (viale Giannotti), con una larghezza decisamente superiore. L'obiettivo era quello di verificare le prestazioni del tappeto fonoassorbente in differenti contesti acustici sia per quanto concerne l'altezza e la distanza tra gli edifici che per la tipologie e la velocità dei veicoli. Inoltre l'intervento su due strade poteva permettere la sperimentazioni di differenti tipi di asfalti, con granulometria variata. Poiché l'asfaltatura del viale Giannotti non è stata realizzata, si è scelto

di intervenire in un secondo tempo su un'altra via con differente tipologia: via Volterrana in corrispondenza della strettoia del centro abitato del Galluzzo. Si tratta in questo caso di una via molto stretta, circa 6 metri di lunghezza compresi i marciapiedi, ma con elevato flusso di traffico in una sola direzione. L'asfaltatura di questa strada, iniziata a fine maggio '98 permetterà di concludere la campagna di misure relative ad esse a metà del 1999.

2.2 Descrizione dell'asfalto sperimentato

L'asfalto steso nelle vie La Pira e Lamarmora è costituito da due strati a differente granulometria con spessore di circa 2,5 e 5 cm. La granulometria dei due strati è riportata nella tabella seguente:

Setacci		Percentuale passante	
ASTM	cm	Strato 1	Strato 2
5/8	1.6	100	100
1/2	1.27	83.1	100
3/8	0.95	23.4	100
1/4	0.63	15.8	97.1
10	0.2	14.7	28.0
40	0.0425	11.2	11.4
80	0.018	10.0	9.0
200	0.0075	8.0	6.1

Tabella 2: granulometria dello strato inferiore (1) e dello strato superiore (2) dell'asfalto a doppio strato impiegato.

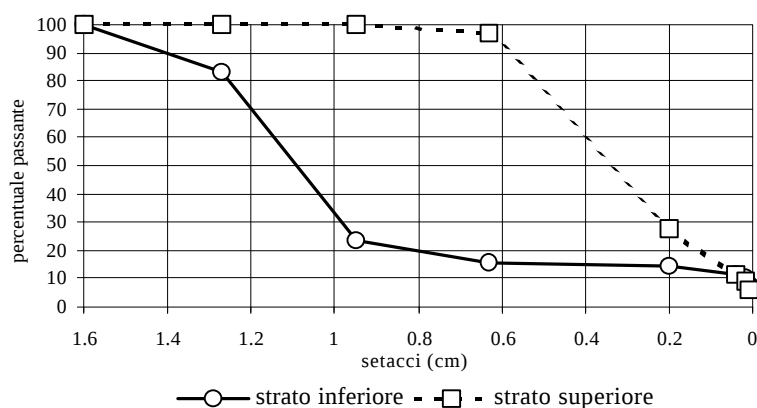


Figura 3: curva granulometrica dei due strati di asfalto.

I valori riportati sono stati misurati secondo la metodologia standard da un laboratorio di prova su quattro campioni per ciascuno dei due strati dell'asfalto.

Altre caratteristiche fisiche dei due strati del conglomerato sono riportate in tabella 3.

Caratteristica	Strato 1 (inf.)	Strato 2 (sup.)
Percentuale bitume su inerti (%)	4,5	5,3
Percentuale bitume su conglomerato (%)	4,3	5,0
Percentuale vuoti del conglomerato (%)	22,7	19,6
Massa volumica apparente (kg/m ³)	1.538	1.580

Tabella 3: caratteristiche fisiche dei due strati di asfalto.

Sono state inoltre condotte delle prove di laboratorio su alcune carote del diametro di 10 cm prelevate direttamente dalla sede stradale per determinare il coefficiente di assorbimento acustico (paragrafo 3.3) e la resistenza al flusso d'aria (misure eseguite dai laboratori dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris di Torino e da quelli del Centre Scientifique et Technique du Batiment di Grenoble, Francia).

La resistenza al flusso d'aria è stata misurata secondo la metodologia della norma ISO 9053 [9] sull'intero campione, non essendo stata possibile la misura sui singoli strati, data la difficoltà a sezionarlo.

La resistività specifica al flusso, misurata su due carote prelevate subito dopo l'asfaltatura ed a distanza di due mesi da questa, è risultata rispettivamente pari a 340 Pa s/m ed a 290 Pa-s/m. In base ai dati di questi due campioni, l'asfalto non sembra aver subito intasamento dei pori nel corso dei primi due mesi, essendo la resistenza al flusso d'aria addirittura diminuita. Si tratta comunque di un campione estremamente limitato e per di più facente riferimento a sezioni differenti della strada.

Capitolo 3

Risultati della sperimentazione

L'analisi sulle prestazioni dell'asfalto fonoassorbente ha riguardato tre distinti aspetti:

- Misure del livello sonoro equivalente eseguite a bordo strada prima e dopo la stesura dell'asfalto, da correlarsi con i flussi di traffico, distinti per categorie di veicoli. Queste misurazioni permettono di esaminare il contributo dell'asfalto fonoassorbente nell'abbattimento del livello di rumorosità per singole categorie di veicoli ed il decadimento delle prestazioni nel tempo.
- Misure di decadimento spaziale del livello di pressione sonora con sorgente stazionaria. Queste misure forniscono indicazioni sulla riduzione del livello di potenza delle sorgenti che operano sull'asfalto fonoassorbente e sugli effetti di interferenza che si generano nella propagazione a media e lunga distanza. I valori sperimentali ottenuti prima e dopo la stesura dell'asfalto fonoassorbente sono stati posti a confronto con i risultati di simulazioni eseguite con differenti metodi.
- Misure di coefficiente di assorbimento acustico. Si tratta del parametro più usato per la descrizione dei materiali fonoassorbenti ed è pertanto un riferimento di primaria importanza. I risultati sperimentali ottenuti in opera prima e dopo la stesura dell'asfalto ed a diversi gradi di invecchiamento sono stati posti a confronto con i risultati di misure di laboratorio.

3.1 Correlazione tra flussi di traffico e livello sonoro equivalente

La misura del livello equivalente pesato A (L_{Aeq}) eseguita a bordo strada permette una lettura immediata del grado di disturbo acustico presente nella zona esaminata. Tuttavia, dai dati riportati in tabella 1, si notano variazioni non trascurabile dei flussi orari di veicoli pur nello stesso mese di due anni successivi; le misure sul numero di transiti e sul livello sonoro equivalente sono state eseguite tra marzo 1997 e proseguiranno per tutto il 1998.

Anche i dati riportati in appendice C3 (livello di pressione sonora in diversi periodi dell'anno) mostrano variazioni tra i livelli registrati in giorni consecutivi di entità paragonabile con le grandezze che si devono valutare. Le fluttuazioni di circa 1 dB sui dati delle misure, impediscono di apprezzare con precisione le variazioni dovute al contributo degli asfalti, in quanto stimabili dello stesso ordine di grandezza.

Vi è quindi una variabilità oraria, giornaliera ed una stagionale del livello sonoro attribuibile al traffico veicolare che dipende da una molteplicità di parametri. Il bisogno di effettuare un confronto fra dati omogenei prima e dopo la messa in opera del fonoassorbente, ovvero sia a parità di condizioni di ricezione e di emissione (entità e tipologia di traffico) comporta la necessità di calcolare la dipendenza funzionale (correlazione) tra flussi di traffico e livello sonoro. Infatti, i fattori principali che influenzano i livelli di rumore misurati sono, oltre all'acustica stradale:

- la dislocazione della postazione di misura sulla sede stradale;
- i volumi di traffico;
- la velocità dei veicoli;
- la composizione dei transiti (tipologia di autoveicoli).

Nel tipo di analisi condotta, la velocità dei mezzi non rientra nelle variabili controllate e pertanto i risultati ottenuti vanno considerati come valori medi rispetto a questa grandezza. Gli altri dati, flussi di traffico e livelli di rumore corrispondenti, sono stati registrati utilizzando un carrello parcheggiato a bordo strada (fig.4) dotato di telecamera collegata a un videoregistratore e di strumentazione per misure di fonometria (il microfono è posto a circa 4.5 m dall'asfalto); per garantire il confronto fra dati omogenei, tale carrello è stato di volta in volta collocato nelle stesse postazioni di rilevamento.

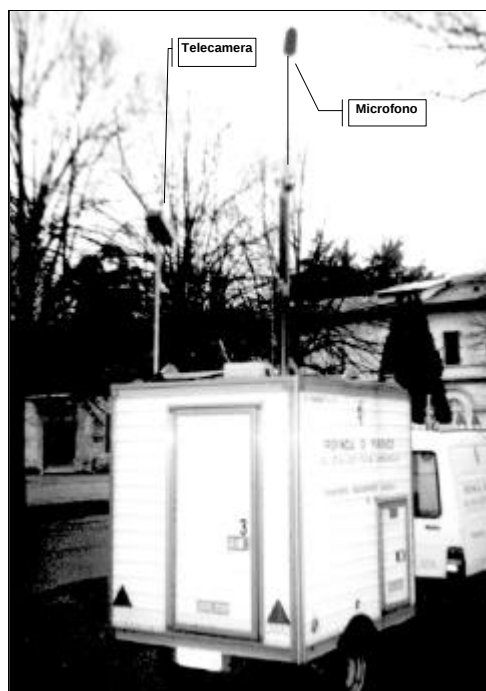


Figura 4: Carrello per la misura dei livelli di rumore (microfono) e dei transiti (telecamera).

Mediante un software statistico, i livelli di rumore (variabile dipendente) e i flussi di auto, motoveicoli, autobus e pesanti (variabili indipendenti) sono stati sottoposti a regressione multipla nonlineare, in base a una dipendenza funzionale di tipo logaritmico deducibile da ragioni teoriche.

$$L_{Aeq} = A + 10 \text{ Log}_{10}(\text{auto} + C \cdot \text{moto} + B \cdot \text{pesanti} + D \cdot \text{autobus}) \quad (1)$$

I termini auto, moto, pesanti e autobus (ATAF) che compaiono nell'equazione, esprimono i flussi (numero di transiti) per categoria di veicolo corrispondente, e i parametri A, B, C e D rappresentano le variabili della regressione. Il significato fisico di A è quello di livello equivalente, da attribuire a un veicolo “medio” identificabile con l'automobile (prescindendo da altre caratteristiche quali per es. la cilindrata, la velocità di transito, ecc.); i parametri B, C e D rappresentano i “pesi acustici” delle componenti del traffico pesanti, motocicli e autobus rispettivamente (1) in rapporto al contributo delle auto (peso acustico = 1). Dall'equazione 1 è poi possibile ricavare il livello attribuibile alle categorie motocicli e pesanti, supponendo per entrambi un flusso unitario e un numero nullo di transiti relativi alle altre due tipologie di mezzi (auto = pesanti = 0 e auto = moto = 0, rispettivamente).

Quindi si può dire che, per parità di numero di transiti, la differenza di rumorosità media tra auto e pesanti è $10 \cdot \text{Log}_{10}(B)$, quella tra auto e motocicli è $10 \cdot \text{Log}_{10}(C)$ e quella tra auto e autobus è $10 \cdot \text{Log}_{10}(D)$.

$$L_{Aeq}(\text{pesanti}) = A + 10 \cdot \text{Log}_{10}(B) \quad (2)$$

$$L_{Aeq}(\text{motocicli}) = A + 10 \cdot \text{Log}_{10}(C) \quad (3)$$

$$L_{Aeq}(\text{autobus}) = A + 10 \cdot \text{Log}_{10}(D) \quad (4)$$

Nella situazione in oggetto, la regressione migliore (in grado di massimizzare la correlazione flussi/livelli di rumore e minimizzare il numero di variabili di fit) si ottiene ponendo $C = 1$ e $D = B$. In questo caso, quindi, il modello non è in grado di discriminare il rumore delle auto da quello dei ciclomotori e quello dei mezzi pesanti da quello degli autobus ATAF. Nel seguito pertanto si farà riferimento a due categorie di veicoli acusticamente equivalenti agli effetti del L_{Aeq} , che verrà indicata con la nomenclatura di “veicoli leggeri” e di “veicoli pesanti”.

L'adozione di un simile modello consente di correggere le misure di rumore fatte nelle varie campagne per ricondurle ad una situazione standard con i medesimi volumi e la medesima composizione del traffico, rendendo più precisa la determinazione dell'effetto dell'asfalto.

Inoltre, sia pure in modo approssimato, consente di stimare l'effetto dell'asfalto rispetto a ciascun tipo di veicolo.

Per valutare l'efficacia fonoassorbente di un asfalto e la sua durata nel tempo si rendono necessarie varie campagne di misura: la prima effettuata prima della messa in opera, la seconda a manto appena steso e le altre a distanza di tempo, per verificare il decadimento delle caratteristiche acustiche. In termini di livelli di rumore, le proprietà fonoassorbenti del manto sono valutabili in base alla riduzione dei termini A (veicoli leggeri) e B (veicoli pesanti) rispetto ai corrispondenti risultati ricavati nel caso dell'asfalto preesistente (di tipo tradizionale).

I risultati della sperimentazione condotta fino ad oggi, sono riassunti nelle figure 5 e 6. Dalla figura 5 appare con evidenza che il modello impiegato non consente di separare il contributo per categoria di veicoli, data la grossa incertezza associata ai risultati. Per questa via, non risulta così possibile stimare l'efficacia dell'asfalto.

Poiché l'errore riguarda l'attribuzione del peso acustico relativo, ma non la precisione della misura (livello di pressione e numero di transiti/ora) si è inteso dare una valutazione globale del guadagno apportato dal manto, senza introdurre una distinzione fra leggeri e pesanti.

A tal fine, i pesi acustici (B), ricavati in base alla procedura di separare il contributo dei veicoli, sono stati utilizzati per calcolare un "flusso equivalente totale" cui riportare i transiti relativi a ciascuna campagna di misure. In pratica, per valutare l'efficacia dell'asfalto, si è modificato ulteriormente il modello iniziale fissando il parametro B uguale a una costante, pari alla media pesata sui valori calcolati nelle varie campagne. In tal modo, la variabile A della regressione viene a rappresentare il livello di rumore del veicolo medio, senza distinzione fra leggeri e pesanti.

La figura 6 rappresenta il guadagno acustico medio dell'asfalto, calcolato secondo la nuova procedura. Dai risultati si osserva un contributo iniziale di circa 3.5 dBA e una riduzione di 0.4 dBA in 9 mesi.

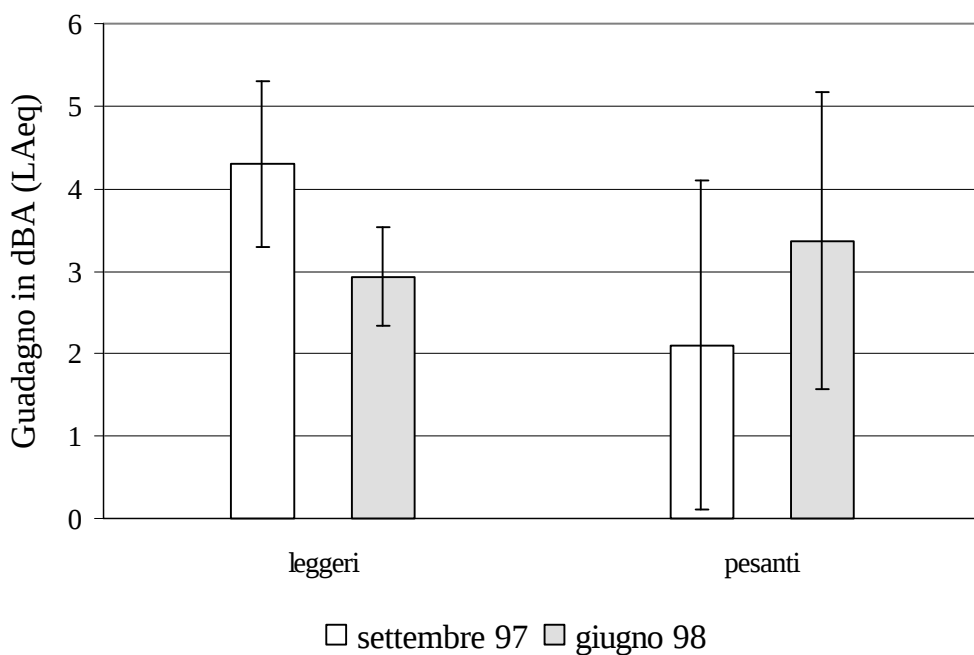


Figura 5: guadagno acustico del drenante e relative barre di errore per veicoli leggeri e pesanti; i dati si riferiscono al tratto di strada a U (c/o liceo scientifico Castelnuovo) ad asfalto appena steso (settembre '97) e al termine del periodo previsto dalla sperimentazione (giugno '98).

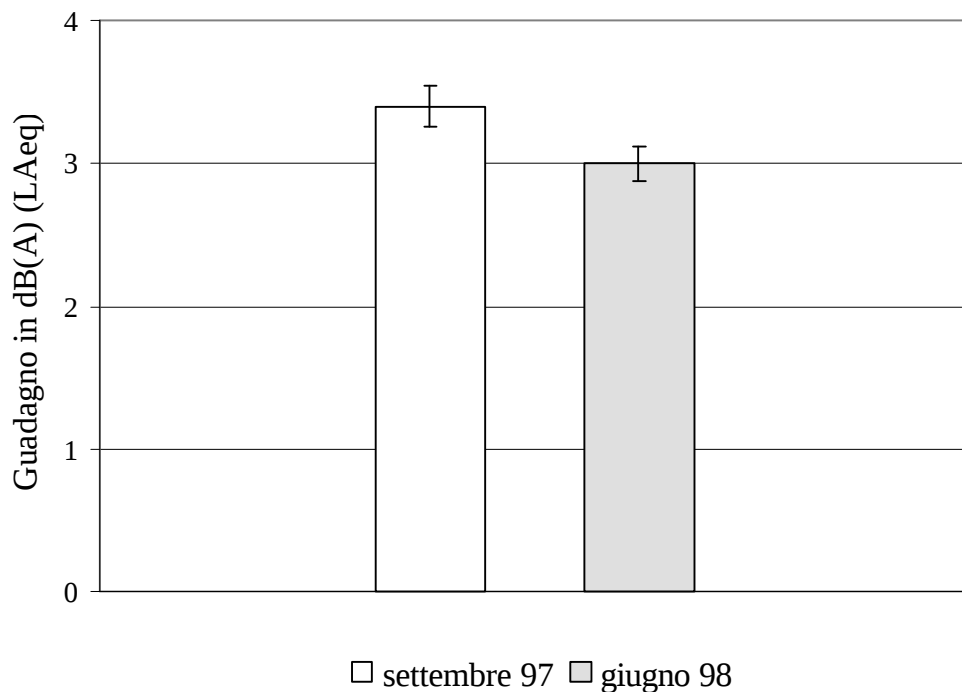


Figura 6: guadagno acustico medio del drenante e relative barre di errore; i dati si riferiscono al tratto di strada a U (c/o liceo scientifico Castelnuovo) ad asfalto appena steso (settembre '97) e al termine del periodo previsto dalla sperimentazione (giugno '98).

3.2 Decadimento spaziale

L'analisi delle prestazioni dell'asfalto effettuata mediante correlazione tra flussi di traffico e livello sonoro equivalente si avvale di una sorgente sonora, il traffico, che per propria natura non è controllabile. Una metodologia alternativa a questa consiste invece nell'impiego di una sorgente sonora di potenza nota e stazionaria (cioè in cui il livello di emissione rimanga costante nel tempo). Se la posizione della sorgente e dei microfoni rimane la stessa al variare dell'asfalto e del suo grado di invecchiamento, la misura rende conto delle differenze nel livello di pressione sonora dovute alla presenza dell'asfalto.

Una sorgente sonora posta in uno spazio aperto privo di ostruzioni (campo libero) genera un livello sonoro che diminuisce all'aumentare della distanza dalla sorgente; in particolare, a partire da una certa distanza tra sorgente e ricevitore, il livello sonoro dovrebbe diminuire di 6 dB ad ogni raddoppio della distanza.

In un ambiente chiuso con pareti riflettenti, all'energia sonora proveniente direttamente dalla sorgente si aggiunge anche quella che ritorna dopo essere stata riflessa anche diverse volte dalle pareti. In questo modo il livello sonoro cresce e la dipendenza dalla distanza dalla sorgente diminuisce così che, in linea teorica, il campo sonoro dovrebbe essere uniforme se si fa eccezione della zona più prossima alla sorgente (ipotesi di Sabine, valida per ambienti di dimensioni ridotte).

Le situazioni che si rilevano in pratica negli ambienti chiusi sono quasi sempre intermedie tra le due descritte, in conseguenza del fatto che le superfici di confine sono caratterizzate da un assorbimento acustico differenziato e possono essere distanti tra loro (come avviene negli ambienti industriali che, per le loro dimensioni, si avvicinano quasi a spazi aperti).

In questo ambito si è applicato un metodo [10] che, per verificare l'importanza delle riflessioni sonore in un ambiente (riverbero), misura il decadimento del livello sonoro al crescere della distanza dalla sorgente.

Anche uno spazio aperto, come una via cittadina, dal punto di vista acustico si comporta come un ambiente riverberante, nel quale le misure mostrano che il decadimento del livello sonoro è quasi sempre minore dei 6 dB per ogni raddoppio della distanza dalla sorgente, per la presenza di ostruzioni di varia natura che aggiungono un contributo sonoro a quello diretto. Per questo motivo la presenza di ostruzioni come edifici nelle vicinanze della sorgente, oltre a modificare la distribuzione del campo sonoro, rendendolo più uniforme al variare della distanza dalla sorgente, creano anche un incremento del livello sonoro.

Ovviamente la modifica del campo sonoro è funzione delle caratteristiche delle ostruzioni e del suolo che, se sono poco riflettenti, fanno sentire poco la propria influenza. Ci si aspettava quindi che l'applicazione di un asfalto fonoassorbente potesse modificare le condizioni di riverberazione della strada.

Il tipo di analisi condotta ha quindi fatto riferimento al parametro descritto, la riduzione del livello sonoro al raddoppio della distanza dalla sorgente, indicato nel seguito con “DL2” [10], per esaminare le prestazioni dell'asfalto fonoassorbente. Si pensava, infatti, che la presenza dell'asfalto potesse modificare la distribuzione del campo sonoro avvicinandolo a quello tipico di un “campo libero”, con forti riduzioni del livello sonoro all'aumentare della distanza dalla sorgente (per una descrizione più dettagliata dei fenomeni connessi alla propagazione sonora in campo esterno si rimanda all'appendice B).

Oltre alle misure dirette, per comprendere meglio il peso dei diversi fenomeni che interagiscono nella distribuzione del campo acustico e quindi sulla efficacia dell'asfalto fonoassorbente, sono state eseguite delle simulazioni secondo diverse metodologie di analisi, ottimizzate per tenere conto in maniera differenziata dei suddetti fenomeni. I risultati delle simulazioni sono stati posti a confronto con i dati sperimentali rilevati sia in via Lamarmora, in corrispondenza del liceo scientifico Castelnuovo, sia in via La Pira, in corrispondenza dell'ingresso dell'orto botanico (capitolo 2). Le misure sono state effettuate prima e dopo la stesura dell'asfalto fonoassorbente, in differenti periodi, per verificare il decadimento nel tempo delle prestazioni.

La curva di decadimento del livello di pressione sonora in campo libero è stata misurata disponendo la cassa acustica al suolo (fig. 7). I punti di misura sono collocati a 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24 e 32 metri di distanza sull'asse principale della cassa, permettendo così di analizzare la curva di distribuzione spaziale del livello di pressione sonora sia nel campo vicino (2-4 m) che in quello a media distanza dalla sorgente (6-24 m) [10].

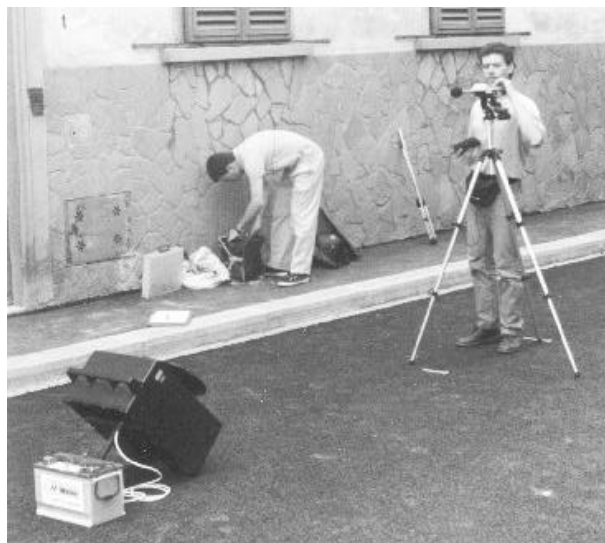


Figura 7: Misure per determinare il decadimento spaziale del livello di pressione sonora (DL2).

La valutazione teorica è stata effettuata in tre modi diversi, avvalendosi di un tracciatore di piramidi nato per lo studio di ambienti interni, secondo la metodologia della norma ISO 9613-2 [11] e secondo quella delle sorgenti immagine.

Il software impiegato per il primo metodo (Ramsete 1.4, fig. 8 e 9), al pari di quello delle sorgenti immagine, ipotizza riflessioni speculari senza cambiamento di fase delle onde sonore, mentre il modello ISO 9613 permette di tenere conto in maniera semplificata anche dell'effetto interferenza, o effetto suolo (per la descrizione di questi aspetti si rimanda all'appendice B).

Per poter effettuare le simulazioni acustiche è necessario riprodurre al calcolatore l'ambiente esaminato sia in termini di dimensioni che di caratteristiche acustiche (assorbimento acustico). Le dimensioni della strada e degli edifici nei due tratti oggetto dell'indagine sono state rilevate direttamente, mentre l'assorbimento acustico è stato misurato per l'asfalto ed ipotizzato per i diversi materiali che costituiscono le facciate, sulla base di dati sperimentali certificati. In particolare, il coefficiente di assorbimento dell'asfalto fonoassorbente è stato posto uguale al massimo dei valori misurati (appendice C.1) in Ramsete, e a 0,5 nel caso delle sorgenti immagine (calcolo in dB(A)). Il "ground factor" della ISO 9613-2, parametro che permette di valutare in maniera sintetica l'effetto suolo, è stato invece posto uguale a 0 e 1 rispettivamente per l'asfalto tradizionale e fonoassorbente.

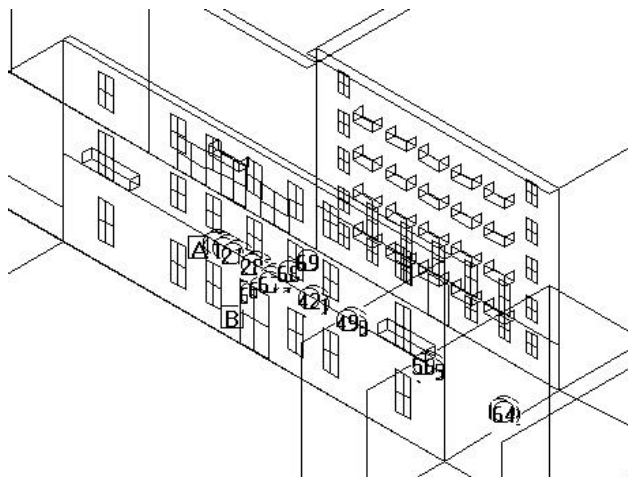


Figura 8: Modello geometrico della parte di strada con sezione a U (davanti al liceo scientifico Castelnuovo, in via Lamarmora).

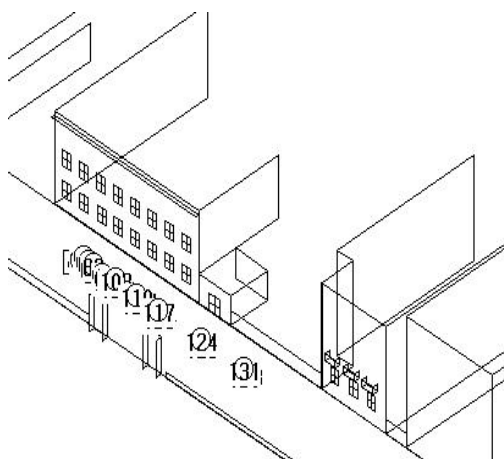


Figura 9: Modello geometrico della parte di strada con sezione a L (davanti all'ingresso dell'orto botanico, in via La Pira).

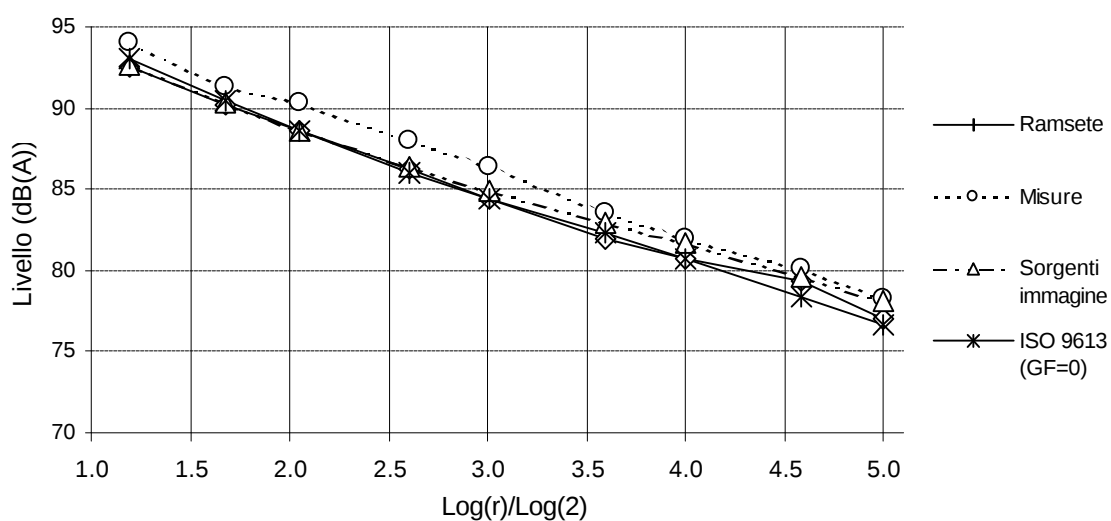


Figura 10: Curve di distribuzione spaziale del livello di pressione sonora nella strada con sezione a U ed asfalto tradizionale: confronto tra risultati teorici e di calcolo.

Le figure 10 e 11 mostrano le curve di decadimento per la strada con sezione a U, con asfalto tradizionale e fonoassorbente rispettivamente, mentre i risultati relativi alla sezione a L della strada sono riportati solo in forma sintetica in tabella 4. I risultati ottenuti per la strada con sezione a U possono comunque essere generalizzati anche per questo secondo tipo di strade.

Le distanze tra microfono e sorgente sonora (cassa acustica), riportate in ascissa, sono su scala logaritmica: il raddoppio della distanza relativa a due punti corrisponde quindi su questa scala ad un aumento di una unità.

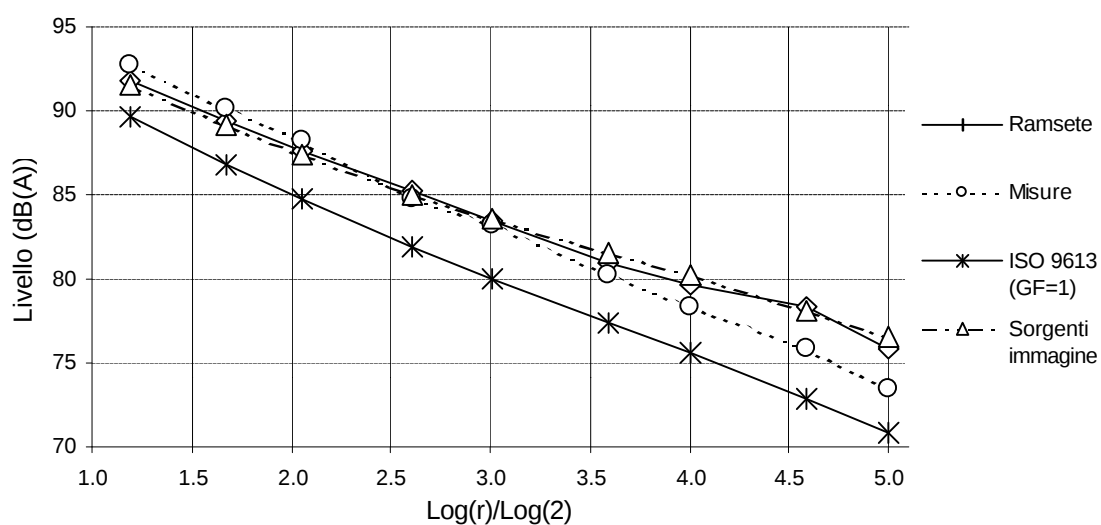


Figura 11: Curve di distribuzione spaziale del livello di pressione sonora nella strada con sezione a U ed asfalto fonoassorbente: confronto tra risultati teorici e di calcolo.

Si nota che mentre tutti tre i modelli riproducono molto fedelmente la situazione misurata con asfalto tradizionale, i metodi di calcolo basati sull'acustica geometrica (Ramsete, sorgenti immagine) sottostimano il contributo dell'asfalto fonoassorbente, mentre il modello ISO 9613-2 approssima bene il dato sperimentale con questo asfalto il termini di pendenza (fig. 11), ma ne sovrastima l'effetto in termini assoluti. A 32 metri si ottiene una differenza di quasi 4 dB(A) tra il dato sperimentale e quelli ottenuti con il tracciante di piramidi o con il metodo delle sorgenti immagine. Il DL2, calcolato nella zona vicina alla sorgente (tra 2 e 4 metri) ed in quella a media distanza (tra 6 e 24 metri) non presenta considerevoli variazioni e pertanto il risultato presentato in tabella 4 è relativo alla pendenza della curva di decadimento su tutto il tratto tra 2 e 32 metri.

	Misura	Ramsete	ISO 9613-2	Sorgenti immagine
Sezione a U	(4.1) 5,0	(4,0) 4,1	(4.2) 4,8	(3.7) 3,8
Sezione a L	(4.9) 6,1	(4.6) 4,7	(5.3) 5,9	(5.2) 5,2

Tabella 4: Valori misurati e calcolati del DL2 con asfalto tradizionale (tra parentesi) e fonoassorbente.

La discrepanza tra risultati sperimentali e teorici, riscontrata per l'asfalto fonoassorbente con il modelli geometrici, evidenzia pertanto l'esistenza di fenomeni differenti dal semplice assorbimento acustico inizialmente ipotizzato, che causano una riduzione del livello sonoro a distanze elevate dalla sorgente maggiore di quella prevista.

Questa prima conclusione ha indotto ad approfondire l'analisi della distribuzione spaziale del livello di pressione sonora esaminando un altro parametro: l'eccesso del livello di pressione sonora (*excess of sound pressure level*, nel seguito indicato con "DLf"). Questo, per una determinata distanza da una sorgente sonora omnidirezionale, rappresenta la differenza tra il livello sonoro misurato e quello che si avrebbe con la medesima sorgente, in campo libero su piano riflettente (riduzione di 6 dB per raddoppio della distanza dalla sorgente) [2].

Se misurato lungo una retta a distanza crescente dalla sorgente, in un campo semiriverberante costituito da una strada fronteggiata da due edifici continui e paralleli alla direzione di misura, l'eccesso dovrebbe aumentare al crescere della distanza dalla sorgente, come conseguenza delle riflessioni multiple che avvengono sulle facciate degli edifici.

Oltre a considerazioni qualitative sulla distribuzione del campo sonoro, il DLf permette anche di comprendere meglio i meccanismi di azione delle superfici fonoassorbenti. Una riduzione del livello sonoro nei punti prossimi alla sorgente può significare un forte assorbimento localizzato dell'energia sonora, fenomeno utile soprattutto per i veicoli che irradiano verso il

basso, come le auto o gli autobus; la riduzione del livello a distanze maggiori può significare invece la presenza di fenomeni attenuativi sulla propagazione sonora.

Nelle figure 12 e 13 è rappresentata la variazione del DLf per i due tratti di strada, con asfalto tradizionale (linea a tratti) e con asfalto fonoassorbente nuovo (linea continua); il quadro completo dei risultati delle misure è riportato in appendice C.

Nel caso del tratto in via Lamarmora (sezione a U, fig. 12), il DLf è pari a 3,2 dB(A), con asfalto tradizionale, come valore medio pesato tra 2 e 32 metri, e a 0,5 dB(A), con asfalto fonoassorbente, con un valore nei pressi della sorgente intorno a 0. Ciò significa che l'asfalto fonoassorbente nuovo crea un campo acustico che, nonostante la presenza di edifici alti sui due lati della strada, si avvicina a quello del "campo libero".

Esaminando il comportamento alle frequenze di 500 e 4000 Hz, si osserva una notevole dispersione delle curve, per il caso dell'asfalto fonoassorbente. In particolare, nella banda di ottava di centro 500 Hz, nella quale si ha peraltro il picco di assorbimento acustico da parte dell'asfalto fonoassorbente (paragrafo 3.3), si ha un andamento decrescente del DLf per distanze comprese tra 3 e 8 metri e valori negativi tra 6 e 24 metri dalla sorgente.

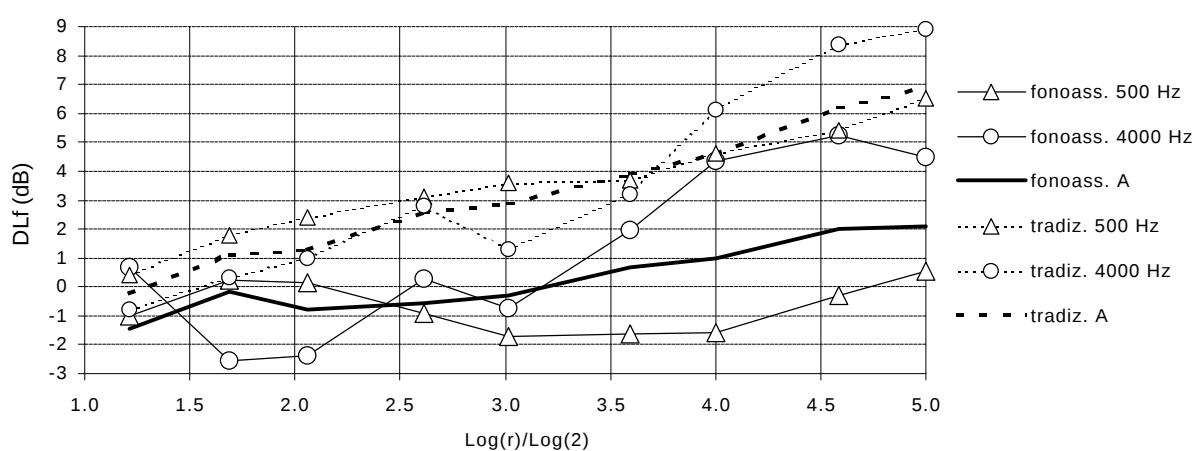


Figura 12: DLf a 500, 4000 Hz e pesato A in via Lamarmora (sezione a U) con asfalto fonoassorbente (linee continue) e tradizionale (linee a tratti).

La misura dell'eccesso del livello di pressione sonora è stata eseguita anche in differenti periodi successivi all'asfaltatura per esaminare il decadimento delle prestazioni dell'asfalto nel tempo.

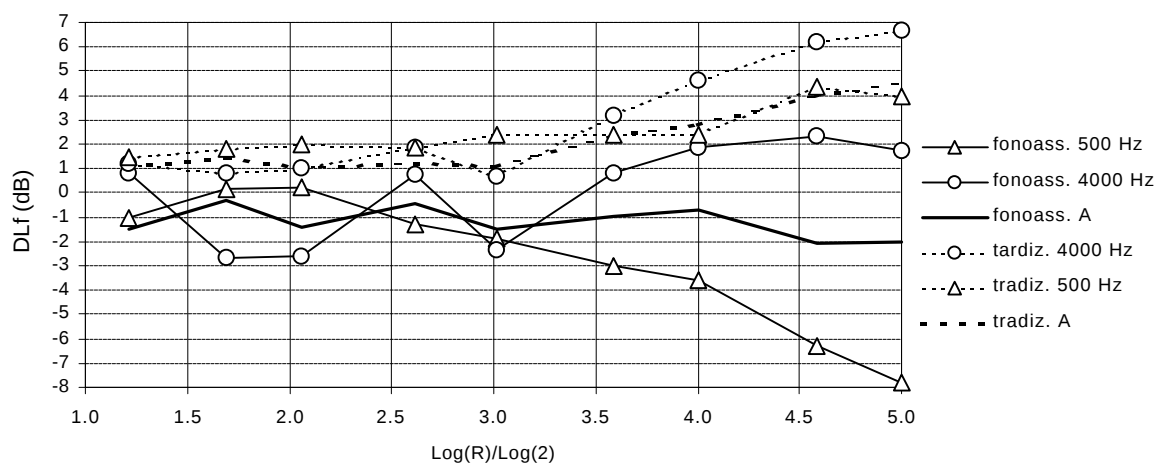


Figura 13: DLf a 500, 4000 Hz e pesato A in via La Pira (sezione a L) con asfalto fonoassorbente (linee continue) e tradizionale (linee a tratti).

La figura 14 evidenzia il DLf in funzione della distanza dalla sorgente in via Lamarmora, con asfalto tradizionale ed asfalto fonoassorbente a differenti gradi di invecchiamento, calcolato sul livello globale pesato A.

Si può notare che l'eccesso del livello di pressione sonora, a distanza di 8 mesi dall'asfaltatura, si è mantenuto quasi agli stessi livelli che con asfalto nuovo.

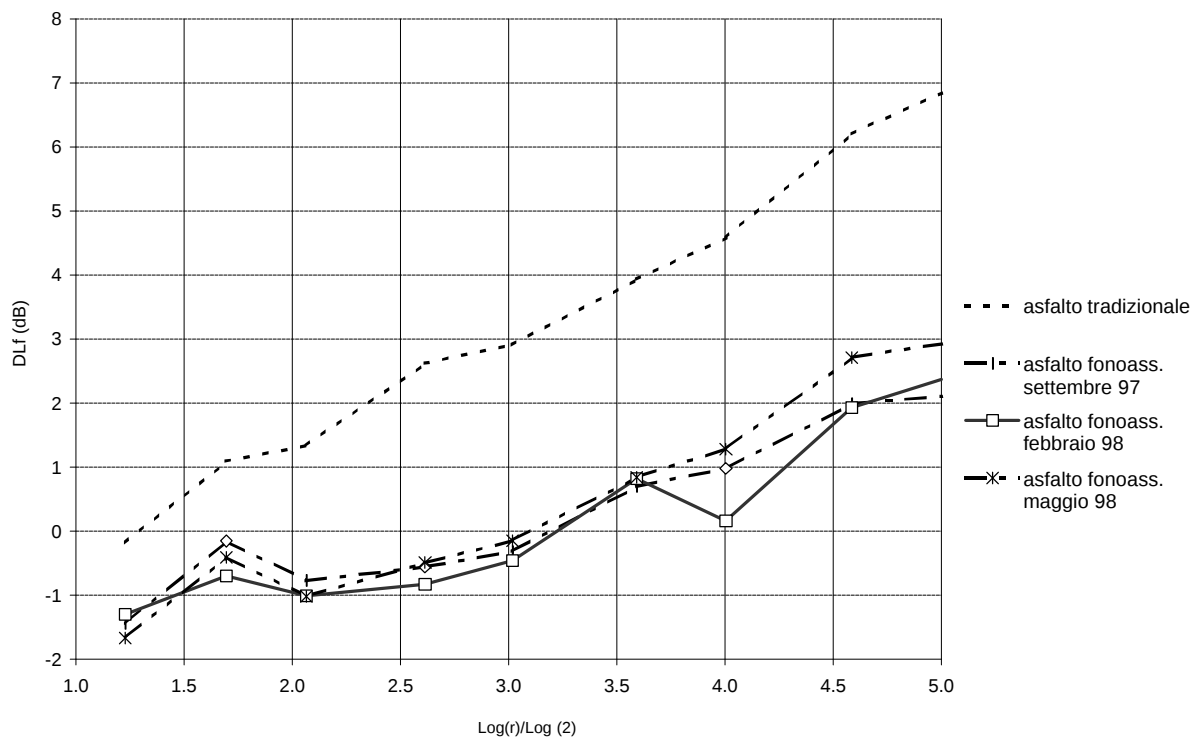


Figura 14: DLf pesato A in via Lamarmora (sezione a U): asfalto tradizionale ed asfalto fonoassorbente con differenti gradi di invecchiamento.

Come si vede, dunque, l'effetto dell'asfalto fonoassorbente è di produrre sia una riduzione del livello sonoro in prossimità della sorgente, rispetto a quello che si avrebbe posizionando questa su una superficie riflettente, per via dell'assorbimento locale dell'energia acustica (paragrafo 3.3), sia, soprattutto, di determinare un'ulteriore riduzione a distanza maggiore, per gli effetti sulla propagazione.

L'attenuazione sonora durante la propagazione, nel caso in esame, è dovuta principalmente all'effetto suolo, ovvero all'interferenza distruttiva tra onde sonore dirette ed onde riflesse dall'asfalto.

È noto che superfici molto reattive come manti erbosi o terreni arati sono in grado di produrre cambiamenti di fase sulle onde sonore incidenti; questo può far sì che le onde riflesse siano sfasate rispetto a quelle dirette, creando eventualmente una riduzione del livello sonoro maggiore a quella dovuta al solo assorbimento di energia sonora da parte del suolo (appendice B).

I grafici delle figure 12 e 13, che si accordano bene con le valutazioni teoriche da letteratura, che prevedono il massimo effetto dell'interferenza alle medie frequenze di analisi (250 – 1000 Hz) [12], permettono di affermare che anche l'asfalto a doppio strato è in grado di dare luogo a considerevoli effetti di interferenza nella propagazione sonora.

In conclusione di questo paragrafo, si può affermare che la sola valutazione del coefficiente di assorbimento acustico dell'asfalto, definito come quantità reale positiva data da un rapporto di energie, non può spiegare i risultati sperimentali ottenuti. Le misure effettuate evidenziano che l'asfalto fonoassorbente a doppio strato deve essere considerato al pari delle superfici molto reattive e che il suo effetto nella riduzione del livello di pressione sonora è in parte da attribuire agli effetti di interferenza tra le onde sonore dirette e quelle riflesse dall'asfalto (effetto suolo).

3.3 Coefficiente di assorbimento acustico

Il coefficiente di assorbimento dell'energia acustica (α) è certamente il parametro più usato per la certificazione delle proprietà fonoassorbenti dei materiali e pertanto è considerato un riferimento di primaria importanza per verificarne l'efficacia. Tuttavia, dai risultati presentati nei paragrafi precedenti, appare chiaro che esistono ragioni per cui il tradizionale parametro α non è in grado di esprimere indicazioni sufficienti rispetto alle proprietà intrinseche

dell'asfalto drenante a doppio strato. Riassumendo, ciò dipende schematicamente e principalmente dai seguenti motivi

- il principio di funzionamento acustico dell'asfalto non è riducibile al semplice assorbimento dell'energia sonora (effetto suolo, vedi paragrafo 3.2 e appendice B);
- il parametro α ricavato non tiene conto della dipendenza dell'assorbimento dall'angolo di riflessione delle onde sonore sulla superficie stradale, in quanto è misurato per incidenza normale.

Nonostante ciò, la misura di α può fornire un'indicazione diretta sull'evoluzione della porosità dell'asfalto. Pertanto è stata dedicata una notevole attenzione alla misura periodica di questo parametro.

La misura del coefficiente di assorbimento dei materiali viene di norma effettuata con metodologie di laboratorio su campioni di dimensioni variabili, secondo la tecnica, dai pochi cm² ad alcune decine di m².

La ricerca ha costituito anche un'occasione per sperimentare e confrontare tra loro procedure innovative per la misura "in situ" di questo parametro. Per determinare α sono state quindi utilizzate le tecniche del segnale pseudo-impulsivo MLS [3, 14] e un metodo intensimetrico [16], a confronto con il metodo standardizzato del tubo di Kundt applicato su delle carote (diametro 10 cm) estratte dall'asfalto (sulle tecniche di misura, vedi appendice A). In quest'ultimo caso, le prove di laboratorio sono state eseguite dal Centre Scientifique et Technique du Batiment di Grenoble (Francia) con toni puri, e dall'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris di Torino col metodo della funzione di trasferimento, utilizzando un segnale stazionario a larga banda.

La figura 16 mostra i grafici di α relativi alle due misure con il tubo di Kundt e ad una delle tecniche "in situ" impiegate (MLS) al fine di valutare una correlazione tra i risultati dell'asfalto in opera sulla strada e le prestazioni di campioni dello stesso. A fronte di un andamento qualitativo simile, si registrano apprezzabili differenze rispetto al metodo standard del tubo di Kundt.



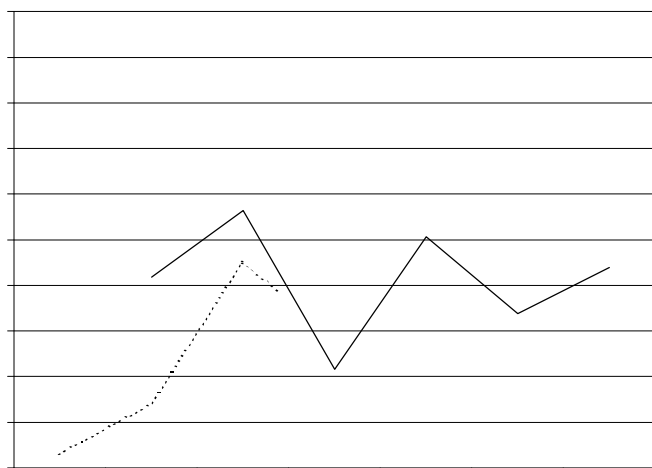
Figura15: La strumentazione impiegata per le misure in situ del coefficiente di assorbimento acustico.

Dall'insieme delle misure raccolte emergono alcuni aspetti rilevanti legati alla determinazione di un α attendibile agli effetti della caratterizzazione dell'asfalto

- utilizzando metodologie di misura differenti, si ricavano curve di α in funzione della frequenza analoghe per forma, ma che presentano una significativa dispersione dei valori se analizzate per singole bande; nessuna tecnica è altresì da ritenersi più attendibile rispetto alle altre [3];
- nonostante l'uniformità della realizzazione del manto, α varia da punto a punto sulla sede stradale, mostrando inoltre una dipendenza da molteplici fattori fra cui l'azione di agenti atmosferici; si evidenzia quindi un'instabilità spaziale e temporale che non dipende dalla misura [3].

Nonostante queste difficoltà che impediscono di assegnare una curva caratteristica all'asfalto in prova, si possono comunque estrarre delle informazioni importanti da queste misure:

- come ordine di grandezza, α è mediamente di poco inferiore a 0.4;
- l'andamento di α nel tempo non mostra un trend marcato nel medio periodo;
- ci sono delle diminuzioni alterne a recuperi associati alla probabile azione di dilavamento e pulizia del manto dovuta alla pioggia.



3.4 Considerazioni

Da un riesame dei parametri utilizzati per valutare le proprietà acustiche dell'asfalto fonoassorbente (guadagno acustico in termini di L_{Aeq} , $DL2$, DLf e α) è possibile estrarre alcune osservazioni a margine che meglio forniscono un'idea del contributo dovuto al manto, al di là del solo dato di misura.

Il parametro di più immediata interpretazione per stabilire l'efficacia è il guadagno acustico ottenuto dal confronto tra i valori correlati del livello equivalente a bordo strada prima della stesura dell'asfalto fonoassorbente e dopo, a diversi gradi di invecchiamento. Dall'esame della figura 5, riportata nel paragrafo 3.1, si nota un decadimento lento delle prestazioni a paragone di quello riportato in letteratura per altri tipi di asfalti fonoassorbenti. Questo dato risulta confermato dall'analisi degli altri parametri che parimenti mostrano un peggioramento nel tempo molto moderato (figura 14, paragrafo 3.2).

Limitatamente ai dati di cui si dispone è possibile tentare delle proiezioni sul lungo periodo, per stabilire entro quando il manto fonoassorbente sarà acusticamente equivalente a un asfalto tradizionale. Nell'ipotesi che il decadimento prosegua anche nei prossimi mesi con tasso uniforme di circa 0.04 dB/mese, come si evince dalla figura 6, si può prevedere una riduzione a zero del guadagno acustico nell'arco di 6 anni e mezzo dall'asfaltatura. Più precisamente, dalla figura 6, sulla base degli errori associati alle stime, si possono estrapolare due situazioni limite sulla durata futura dell'asfalto: una proiezione minima di 4 anni ed una massima di oltre 10 anni.

Tuttavia, è necessario sottolineare che in generale i processi di degrado hanno un'evoluzione non lineare, per cui ad un decadimento rapido nel primo periodo di vita, è possibile ipotizzare che segua uno più lento. Secondo quest'ipotesi, che si rende opportuno verificare nel proseguimento della sperimentazione, l'efficacia dell'asfalto si potrebbe mantenere, pur a livelli ridotti, per un periodo di tempo maggiore. Tale periodo di vita utile dovrebbe inoltre essere confrontato con il deterioramento delle proprietà di resistenza meccanica del manto, per stabilirne nel complesso le qualità, i limiti e i tempi di durata.

Per quanto attiene agli altri risultati sperimentali ottenuti, si sottolinea ancora come l'efficacia acustica dell'asfalto sia da attribuire a due fenomeni:

- l'assorbimento locale di energia sonora;
- l'attenuazione sonora lungo la propagazione delle onde sonore.

Entrambi gli effetti possono essere posti in relazione con la struttura porosa del manto, che gli attribuisce una proprietà fonoassorbente particolarmente accentuata ad alcune frequenze (intorno ai 500 Hz). Il meccanismo fisico alla base delle proprietà acustiche dell'asfalto può essere ricondotto a quello di risonatori di Helmholtz [8]. L'uso di un manto superficiale ricco di vuoti, di piccole dimensioni, contribuisce alla formazione all'interno dello strato di una serie di canali sufficientemente stretti e sottili che sono in contatto con le cavità più pronunciate presenti nello strato inferiore del drenante. Vengono così a formarsi, nell'insieme dei due strati sovrapposti a causa dell'interconnessione tra i vuoti di diverse dimensioni, numerose microstrutture tipo "imbuto" che svolgono così ruolo attivo nell'abbattimento del rumore per risonanza. Tale meccanismo è differente da quello che interviene negli asfalti fonoassorbenti monostrato.

Fino ad oggi ci si è limitati a citare il meccanismo dei risonatori di Helmholtz solo in relazione all'assorbimento locale dell'energia, tuttavia l'impedenza meccanica di tali risonatori ha una parte complessa dalla quale scaturiscono i fenomeni di interferenza e l'attenuazione della propagazione sonora.

Per capire il contributo significativo dovuto agli effetti propagativi e quindi che l'assorbimento locale di energia (α , paragrafo 3.3) influisce solo in parte alla riduzione della rumorosità, è possibile a titolo di esempio fare una casistica sotto ipotesi semplificate.

Se il meccanismo di riduzione del rumore fosse dovuto solo al fonoassorbimento, supponendo un manto caratterizzato da un α pari a 0,5 (quindi in media maggiore di quello rilevato sperimentalmente, dell'ordine di 0.4) si avrebbe un abbattimento del livello sonoro di 3 dB nel caso di una sorgente che irradia tutta l'energia sonora verso il basso (automobile). Per sorgenti omnidirezionali (motocicli) che cioè irradiano il suono uniformemente in tutte le direzioni, la riduzione è di 1,25 dB. Poiché nella realtà i veicoli si caratterizzano come sorgenti aventi direttività media tra quella uniforme e quella concentrata verso il basso, ci si può aspettare che anche il guadagno acustico per assorbimento locale di energia sia intermedio tra 1,25 e 3 dB. I valori rilevati del guadagno acustico per asfalto fonoassorbente nuovo, dell'ordine di 4 dB, si spiegano quindi solo riferendosi anche al secondo fenomeno di attenuazione citato: quello lungo il percorso di propagazione (effetto suolo), che è quindi responsabile del 50% dell'effetto ottenuto.

Tale considerazione è giustificata anche dalle conclusioni riportate al paragrafo 3.2 relativamente all'eccesso di livello di pressione sonora DL_f . Questo parametro, a differenza del

DL2, permette infatti di valutare in maniera differenziata il contributo dell'asfalto relativo ai due meccanismi di azione citati.

Poste queste premesse, è necessario fare una distinzione sulle opportunità di impiego degli asfalti fonoassorbenti in situazioni differenti. In un contesto a scorrimento veloce o extraurbano, si è generalmente interessati a tutelare i luoghi abitati eventualmente attraversati, non a filo strada, per cui agli effetti del cammino sonoro la direzione da considerare è quella trasversale alla strada; in tal caso, il contributo del fonoassorbente si gioca tutto in termini di assorbimento locale dell'energia acustica, in quanto i fenomeni propagativi sono irrilevanti dato il piccolo tratto di percorrenza sull'asfalto (qualche metro). In ambiente urbano risulta altresì molto importante il fenomeno della propagazione longitudinale per ridurre l'esposizione al rumore, cui contribuiscono anche le riflessioni multiple e gli effetti di diffusione dovuti alle facciate degli edifici prospicienti la strada.

3.5 Conclusioni

Dall'analisi dei risultati presentati nei precedenti paragrafi è possibile tracciare un quadro sintetico delle conclusioni che si possono trarre a 9 mesi dall'asfaltatura delle vie oggetto del presente studio.

- L'efficacia da nuovo del manto fonoassorbente a doppio strato messo in opera nelle vie Lamarmora e La Pira è confrontabile con quella di un asfalto poroso monostrato;
- la durata nel tempo delle sue prestazioni fonoassorbenti è migliore di quella dichiarata in letteratura per un monostrato in viabilità urbana;
- ad oggi, non è possibile stabilire con certezza quanto dureranno le proprietà acustiche dell'asfalto;
- il risultato più rilevante e originale della ricerca condotta, è stato il riscontrare l'importanza del fenomeno della propagazione sonora sul manto fonoassorbente a doppio strato (effetto suolo) rispetto ad altri aspetti su cui fino ad oggi è stata posta l'enfasi nel valutare il contributo di tali asfalti all'abbattimento del rumore (regolarità della superficie e assorbimento locale di energia sonora);
- Le tradizionali misure del coefficiente di assorbimento dell'energia acustica (α) non sono un descrittore esaustivo e riproducibile delle proprietà degli asfalti.

Sulla base dell'evidenza che l'effetto principale del contributo dovuto all'asfalto dipende dagli effetti della propagazione che modificano la curva di decadimento spaziale (paragrafo 3.2) si consiglia, per l'impiego futuro di questi asfalti, la messa in opera in contesti nei quali c'è una grossa porzione di asfalto fra ricevitore e sorgente (viali larghi, edifici prospicienti a ridosso della sede stradale, ecc.).

3.6 Prospettive

Rimangono ancora da approfondire molteplici aspetti della sperimentazione sugli asfalti e tuttavia tale lavoro di studio appare indispensabile per scegliere nel futuro i manti fonoassorbenti più promettenti da un punto di vista di bonifica acustica.

Si possono individuare due capitoli che riguardano gli sviluppi della ricerca: uno relativo all'asfalto e l'altro alle tecniche di misura e sui metodi previsionali. Riguardo al primo, riassumendo per punti, le prospettive di indagine sono le seguenti:

- verifica delle prestazioni in rapporto a soluzioni costruttive del manto fonoassorbente diversificate per granulometria e spessore;
- valutazione dell'efficacia in strade di sezione molto ridotta;
- monitoraggio della durata delle prestazioni acustiche su medi e lunghi periodi.

Riguardo al primo e secondo punto, è stata recentemente terminata (giugno '98) la stesura di un nuovo manto fonoassorbente a doppio strato in via Volterrana nel tratto fra via Senese e via Giandonati (Galluzzo – Firenze); si tratta di una strada molto stretta, per la quale è stata impiegata una soluzione granulometrica differente dal caso precedente (via La Pira e via Lammara). Dalla nuova sperimentazione che verrà condotta, si potranno avere indicazioni utili per gli aspetti non ancora chiariti, da cui ricavare proposte operative più precise per l'impiego futuro di questo tipo di asfalti.

In ordine al secondo capitolo di studio sulle metodiche di misura e sulle stime previsionali, si individuano i seguenti punti da approfondire:

- potenziamento e sviluppo delle tecniche per determinare α (in ordine alla stabilità e ripetibilità della misure e relativamente alle misure a incidenza non-normale);

- importanza dello sfasamento indotto sull'onda sonora dalla riflessione sull'asfalto (misura della parte immaginaria di α , considerato come parametro complesso anziché puramente reale);
- studio della possibilità di effettuare stime previsionali volte a valutare gli effetti di impatto acustico e i benefici legati ad interventi di risanamento sulla sede stradale, utilizzando software di simulazione del campo sonoro (vedi appendice B) o impiegando opportuni parametri acustici ambientali; in particolare, si intende approfondire la possibilità di predire l'effetto suolo sulla base della parte immaginaria di α .

Un altro fronte d'indagine futuro, fino ad oggi sviluppato in modo alquanto parziale, riguarda le prestazioni acustiche dei conglomerati bituminosi di tipo modificato già impiegati in

Appendice A - metodi di misura del coefficiente di assorbimento

Le tecniche standardizzate per la determinazione del coefficiente di assorbimento acustico dei materiali presentano difficoltà ad essere utilizzate “in situ”. Pertanto, nell’ambito dello studio condotto si è fatto ricorso a tecniche innovative per cui l’assenza di standardizzazione pone dei dubbi sull’affidabilità del dato ottenuto. Per indagare su questo problema, sono state utilizzate “in situ” le tecniche del segnale pseudo-random MLS (secondo due diverse metodologie) e dell'intensimetria, a confronto con il metodo standardizzato del tubo di Kundt. Sono state quindi analizzate le differenti tecniche impiegate per determinare il coefficiente di assorbimento (per incidenza normale) e i limiti di ciascun tipo di misura. I risultati di tale indagine sono riportati per esteso in [3].

Il metodo del segnale pseudo-random, o pseudo-impulsivo, consiste nell’inviare sulla superficie da analizzare una sequenza binaria deterministica di massima lunghezza (MLS) con caratteristiche simili ad una successione di valori casuali, ripetuta periodicamente [13,14]. Tale tecnica consente di acquisire la risposta all’impulso del sistema con maggiore immunità dal rumore di fondo rispetto al metodo impulsivo tradizionale. Un microfono posto fra la sorgente sonora ed il campione di prova, secondo lo schema base normalizzato dall’ente normativo francese AFNOR [15], registra sia l’onda incidente diretta che quella riflessa. Poiché la risoluzione in frequenza è pari all’inverso dell’ampiezza della finestra temporale di analisi utilizzata per isolare i due segnali, una geometria “vicina” (ovvero con il microfono in prossimità della superficie) può comportare una bassa risoluzione in frequenza e la sovrapposizione di una porzione significativa dell’onda diretta con quella riflessa. Ci sono due metodiche per ottenere con questa tecnica finestre temporali sufficientemente estese. La prima, da noi utilizzata, consiste nell’aumentare la distanza microfono-superficie, e quindi nel distanziare tra di loro il segnale diretto e quello riflesso. Le misure sono state quindi effettuate collocando ad un’altezza di circa 3 m dal suolo la sorgente (una cassa da 10 litri, riempita di materiale assorbente, con altoparlante Dynaudio 15W75-08 $\phi=145$ mm) ponendo il microfono a distanze comprese fra 1.25-1.80 m dall’asfalto. Il segnale MLS è stato generato e acquisito mediante il software Aurora utilizzando un PC portatile con una frequenza di campionamento di 48 kHz; la risposta all’impulso è stata successivamente analizzata con il software MLSSA.

Il secondo metodo, permette di lavorare con il microfono anche molto vicino alla superficie (qualche cm). La strategia consiste nell’acquisire due risposte all’impulso: una dell’onda diretta, sovrapposta alla riflessa, e l’altra della sola diretta, ottenuta orientando il gruppo sorgente-microfono opportunamente. Sottraendo questa seconda misura dalla prima, è possibile isolare ed elaborare la componente riflessa e quella diretta in modo tale che non esiste più il vincolo della separazione tem-

porale fra i due segnali. Ovviamente in questo metodo l'operazione di sottrazione dei due segnali è molto critica. Con riferimento a questa tecnica, è in corso di stesura il primo tentativo di normazione delle misure MLS, per la determinazione dell'isolamento delle barriere.

Ad un primo tentativo di applicare questa seconda metodologia con il nostro “setup”, si sono subito evidenziate problematiche che non lo rendevano idoneo, quali la frequenza di campionamento troppo bassa, l'insufficiente rigidità della struttura sorgente-microfono, e soprattutto una differente risposta della cassa acustica a seconda delle sue orientazioni rispetto alla verticale che impediscono di ottenere in maniera semplice una risposta priva di riflessioni [3]. Pertanto abbiamo utilizzato solo la prima delle due tecniche MLS.

I risultati delle misure effettuate con il metodo pseudo-impulsivo sono riportati per esteso in appendice C.

La tecnica intensimetrica utilizzata è basata sulla referenza [16]. La sorgente del segnale (stazionario a larga banda), è posta ad una certa altezza dal suolo di modo che le onde acustiche incidenti possono essere assimilate a onde piane, eseguendo le misure dei valori dell'intensità lungo le tre direzioni cartesiane in prossimità della superficie riflettente (pochi cm). Dalle intensità misurate e dalla densità di energia (calcolate a partire dalla pressione e dalla velocità misurate dall'intensimetro) si può ricavare α dalla relazione $\alpha = 1 - |I_{\text{riflessa}}|/|I_{\text{diretta}}|$.

I dati relativi a questa metodologia sono stati raccolti utilizzando strumentazione Brüel&Kjær (l'analizzatore 2144 e la sonda intensimetrica 3520, montata con i microfoni 4183 da ½”). Le misure fatte hanno impiegato un distanziatore di 12 mm ed uno di 50 mm, raccordate a 500 Hz, limitando superiormente lo spettro di assorbimento a 5 kHz.

Un risultato relativo alla misura di intensimetria è riportato in [3].

Le misure in laboratorio del coefficiente di assorbimento sono state effettuate impiegando il metodo del tubo di Kundt, con segnale random (misure eseguite dai laboratori dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris di Torino) [17] e con segnale sinusoidale (misure effettuate dall'istituto francese Centre Scientifique et Technique du Batisement di Grenoble, Francia) [18]. Per questo tipo di analisi sono state estratte alcune carote di 10 cm di diametro (D) dalla sede stradale. Tale dimensione ha comportato il limite in alta frequenza di 2 kHz, nello spettro di α (secondo la ISO/DIS 10534 [18], $f_{\text{max}} \leq 200/D$).

Appendice B - metodi per la previsione del campo sonoro

La previsione del campo sonoro in un qualsiasi ambiente, interno o esterno, implica lo studio di due aspetti: la caratterizzazione della sorgente sonora e la modalità della propagazione sonora tra sorgente e ricevitore.

La propagazione sonora in ambienti esterni interessa problematiche molto differenti rispetto a quella in ambienti interni. Infatti, mentre in ambiente interno può essere ritenuta valida con buona approssimazione l'ipotesi di uniformità del campo sonoro, con la conseguenza di poter trascurare gran parte dei fenomeni legati alla direttività delle onde sonore, in ambiente esterno tali fenomeni diventano importanti.

In generale, nota la potenza sonora (L_w) e la direttività della sorgente sonora, vi sono differenti altri fattori che possono modificare la propagazione sonora in esterni, per cui si definiscono dei termini di attenuazione che sono riassunti dalla B1 [11]:

$$L_p = L_w + D - A_{div} - A_{atm} - A_{ground} - A_{screen} - A_{misc} \quad (B1)$$

in cui:

L_p = livello di pressione sonora nel punto del ricevitore (dB);

L_w = livello di potenza della sorgente sonora (dB);

D = termine correttivo per direttività della sorgente ($D = 0$ per sorgenti omnidirezionali) (dB);

A_{div} = attenuazione per divergenza geometrica delle onde (dB);

A_{atm} = attenuazione per assorbimento dell'aria (dB);

A_{ground} = attenuazione per "effetto suolo" (dB);

A_{screen} = attenuazione per presenza di barriere (dB);

A_{misc} = attenuazione per vari effetti (presenza di edifici o di vegetazione, gradiente termici, vento, ecc.) (dB).

I termini di attenuazione possono assumere valore positivo, se creano riduzione del livello di pressione sonora, o negativo, se creano incremento del livello.

Per la specificità del presente studio, riferito alla propagazione sonora su distanze limitate, i termini di attenuazione dovuti all'assorbimento dell'aria, alla presenza di barriere, ai gradienti termici ed al vento non vengono considerati. Invece, assumono importanza i termini di

attenuazione dovuti alla divergenza geometrica, all'effetto suolo ed alla riflessione sulle facciate.

L'assenza di un campo sonoro diffuso, o riverberante, fa sì che la distribuzione del campo sonoro in esterni possa essere influenzata da fenomeni quali l'interferenza costruttiva o distruttiva tra onde sonore dirette ed onde riflesse dal suolo (effetto suolo) e la diffusione delle onde.

Il fenomeno dell'*interferenza* è legato alla natura ondulatoria del suono e può portare a contributi sia costruttivi che distruttivi sulla propagazione sonora. Quando si ha interferenza tra due onde sonore di fase opposta il risultato è una riduzione del livello di pressione sonora che può raggiungere teoricamente valori di 20 – 30 dB per onde sfasate di 180°; quando invece le onde sono in fase, l'incremento può raggiungere 6 dB (raddoppio della pressione sonora). L'effetto di interferenza dipende dalla natura del suolo, dall'angolo di incidenza delle onde sonore (quindi dal rapporto tra altezza media sorgente-ricevitore e distanza) e dalla frequenza. A basse frequenze il suolo non è generalmente abbastanza reattivo da generare grandi cambiamenti di fase tra le onde sonore incidenti e riflesse. A frequenze alte, invece, la differenza tra il percorso diretto r_d e quello riflesso r_r non è più trascurabile rispetto alla lunghezza d'onda del suono (fig. B1); per questo al cambiamento di fase indotto dalla riflessione del suolo si aggiunge quello dovuto alla differenza di cammino tra onda diretta e riflessa. A queste frequenze, pertanto, l'effetto suolo risulta in genere meno accentuato o del tutto assente.

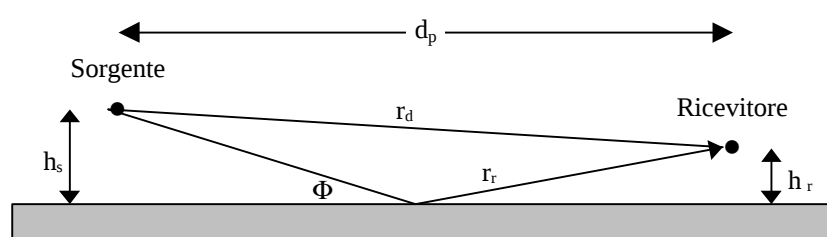


Figura B1: Grandezze geometriche che caratterizzano l'effetto suolo.

La figura B2 evidenzia il valore teorico, in funzione della frequenza, dell'attenuazione del livello di pressione sonora che si ha nella propagazione sopra un prato rispetto a quella su una superficie dura [12]. L'effetto "distruttivo" dell'interferenza comporta valori positivi del termine di attenuazione. Valori dell'attenuazione superiori a 20 dB sono da considerarsi comunque non realistici, per cui le due curve per alte e basse frequenze vengono raccordate per non superare questo limite (linea a tratti).

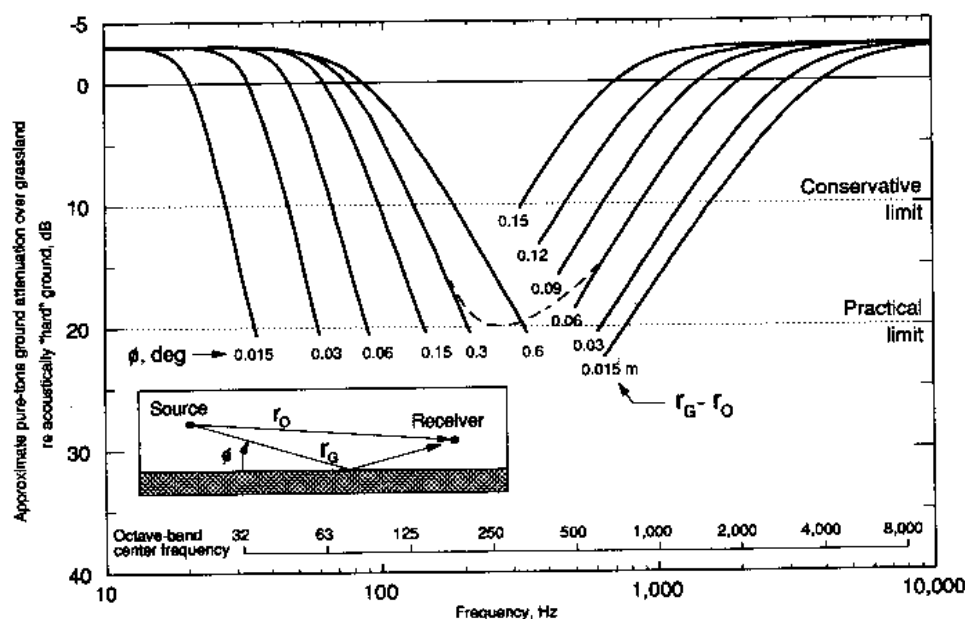


Figura B2: Attenuazione sonora per toni puri dovuta alla propagazione sopra un prato, rispetto alla attenuazione dovuta alla propagazione su una superficie dura; le diverse curve si riferiscono per le alte frequenze (destra), alla differenza tra percorso diretto e riflesso; alle basse frequenze (sinistra) all'angolo di incidenza (immagine tratta da [12])

Il grafico di figura B3 mostra invece un risultato sperimentale dell'attenuazione in cui i valori sono stati ottenuti per differenza da due misurazioni eseguite dall'Unità Operativa di Fisica Ambientale su un prato e su una superficie dura, in entrambi i casi in campo libero, cioè in assenza di altre riflessioni oltre a quella del suolo.

Le tre curve corrispondono ad altrettanti punti di misura del livello di pressione sonora a differenti distanze dalla sorgente (32, 24 e 16 metri). Per il confronto con le curve di figura B2, in cui i valori sono convenzionalmente cambiati di segno, tali distanze corrispondono rispettivamente ad angoli di incidenza dell'onda sonora sul suolo di 3°, 4° e 6° ed a differenze tra percorso diretto e percorso riflesso di 0,02, 0,03 e 0,04 metri. Il riscontro tra dati teorici e sperimentali per questo particolare tipo di superficie (prato) è quindi buono se non si prendono in considerazione attenuazioni superiori a 15 dB.

In pratica i fenomeni di interferenza avvengono prevalentemente quando il suono viene riflesso da una superficie "reattiva", in grado cioè di cambiare fase alla onda sonora incidente, e comportano generalmente riduzioni del livello di pressione sonora a distanze medio grandi dalla sorgente e nelle bande di frequenza centrali (250 - 2000 Hz).

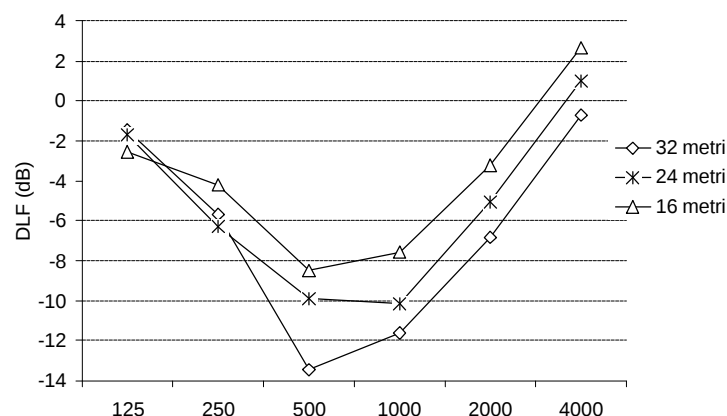


Figura B3: Effetto dell'interferenza dovuto alla propagazione su un prato (misure eseguite dall'U.O. di Fisica Ambientale; altezza sorgente 30 cm, altezza ricevitore 140 cm).

Le superfici in grado di creare interferenza sono solitamente superfici non dure o dotate di notevole porosità. Pertanto, agire sull'effetto suolo per ridurre il livello di pressione sonora in ambiente esterno è una strategia poco usata, in quanto le finiture solitamente impiegate per le pavimentazioni esterne sono dure. I primi risultati dello studio sulle prestazioni degli asfalti fonoassorbenti a doppio strato hanno invece evidenziato come questi siano in grado di creare riduzioni del livello di pressione sonora anche sulla base dell'effetto dell'interferenza.

La *diffusione* delle onde sonore è un fenomeno che riguarda gran parte delle superfici riflettenti. Queste possono essere schematicamente distinte in base all'ampiezza dell'angolo in cui viene concentrata l'energia riflessa (fig. B4). Una superficie speculare riflette tutta l'energia sonora nella direzione che forma con la normale al punto di incidenza un angolo uguale a quello compreso tra questa e la direzione di incidenza. Una superficie perfettamente diffondente riflette l'energia sonora in maniera uniforme in tutte le direzioni.

In particolare, il tipo di riflessione subita dalle onde sonore incidenti su una superficie è funzione del rapporto tra la loro lunghezza d'onda e la dimensione delle asperità. Quando le asperità della superficie hanno una dimensione confrontabile con quella della lunghezza d'onda incidente, la riflessione è di tipo diffuso. Per questo, una superficie può essere caratterizzata da riflessione speculare per determinate frequenze (basse) e riflessione mista o diffusa per altre frequenze. Questo avviene correntemente nella pratica, per cui le modanature in rilievo di una facciata possono rendere diffondente una facciata a frequenze medio alte ma non a quelle basse.

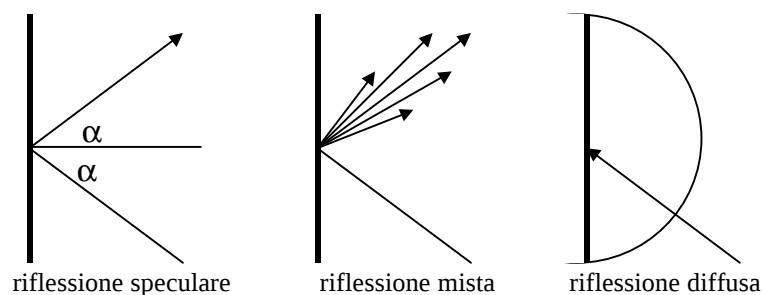


Figura B4: differenti tipi di riflessioni da parte delle superfici.

B.1 Metodi previsionali impiegati

I fenomeni dell'interferenza e della diffusione sonora interessano anche gli ambienti interni poiché semplicemente caratterizzano il meccanismo dell'interazione tra onde sonore ed elementi di confine. Tuttavia, la presenza di un ambiente chiuso che aumenti il numero delle riflessioni delle onde sonore da parte delle superfici interne, incrementando il contributo sonoro "riflesso" rispetto a quello direzionale, permette di trascurare molti di questi fenomeni.

La previsione della propagazione sonora in ambienti esterni risulta per questi motivi più complessa di quella in ambienti interni.

I modelli di calcolo attualmente disponibili valutano in maniera molto differenziata i diversi fenomeni che influenzano la propagazione sonora; alcuni impiegano algoritmi semplificati definiti dalla normativa internazionale e basati su dati sperimentali, altri introducono ipotesi semplificative che permettono di trascurare alcuni fenomeni ma li rendono idonei solo a situazioni specifiche.

Al problema dell'affidabilità del modello di calcolo della propagazione sonora in ambiente esterno, si aggiunge quello della caratterizzazione della sorgente sonora in termini di potenza e di direttività. Solo alcuni dei modelli previsionali attualmente disponibili sono in grado di prendere in considerazione anche questi aspetti.

Dal punto di vista della propagazione sonora, l'ambiente urbano presenta caratteristiche che si possono ritenere intermedie tra quelle degli ambienti interni e quelle degli ambienti esterni. Infatti la presenza di edifici che si fronteggiano per lunghi tratti di strada permette di avere un numero considerevole di riflessioni delle onde sonore, creando un campo sonoro che si può definire "semiriverberante". A questo proposito è importante anche la forma delle facciate, che può incrementare la quantità di energia sonora rinviata verso il basso, se caratterizzata da

molte parti in aggetto, come balconi o tettoie, o viceversa lasciare sfuggire le onde sonore (fig. B5).

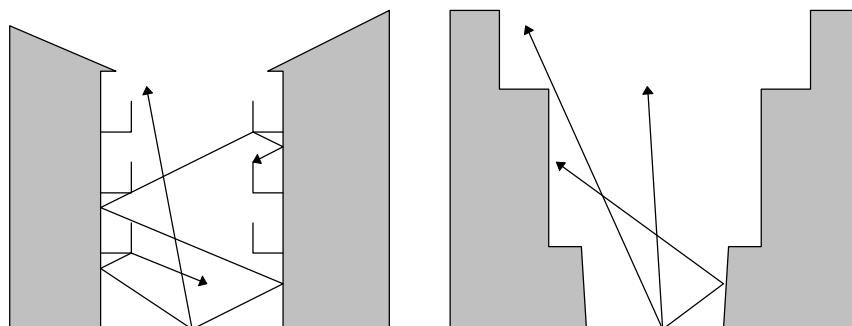


Figura B5: Influenza della forma della facciata sulla diffusione del campo sonoro.

È quindi importante che il modello previsionale usato in ambiente urbano possa tenere conto della reale natura delle superfici presenti, in particolare di quella delle facciate, sia in termini di forma che di materiali.

I modelli di calcolo presenti sul mercato possono essere distinti in due principali categorie: da una parte quelli destinati alla valutazione di grandi porzioni di terreno, che richiedono geometrie molto semplificate e tengono generalmente conto in maniera più o meno semplificata di differenti fenomeni sulla propagazione sonora (effetto suolo, gradienti termici, influenza del vento, ecc.); dall'altra i modelli destinati ad analisi di dettaglio di piccole porzioni di territorio, che trascurano per lo più i problemi della propagazione sonora in esterni, in virtù delle brevi distanze considerate. Questi ultimi, in genere, traggono origine da modelli ideati per lo studio di ambienti interni, eventualmente adattati per tenere conto dei principali fenomeni presenti all'esterno.

L'insieme di queste considerazioni ha orientato la scelta del modello di calcolo da impiegarsi per lo studio previsionale delle prestazioni degli asfalti fonoassorbenti nelle vie La Pira e Lamarmora. In particolare, dovendo analizzare le prestazioni dell'asfalto fonoassorbente in una strada a U con edifici alti su entrambi i lati, è stato scelto un modello in grado di seguire il percorso dei "raggi sonori" fino ad una considerevole riduzione dell'energia sonora portata ed in grado di tenere conto anche in maniera dettagliata della forma delle facciate (presenza di balconi ed altri aggetti).

Il principio base dell'algoritmo impiegato, meglio descritto nel seguito, è quello dell'acustica geometrica, per cui le onde sonore vengono considerate come raggi rettilinei, trascurando o semplificando notevolmente tutti i fenomeni legati alla loro natura ondulatoria. Nel

caso dello studio della propagazione sonora dovuta ad una sola sorgente sonora puntiforme, le riflessioni subite dai raggi sonori generati da questa, considerate sempre speculari, vengono quindi a creare delle nuove sorgenti di potenza attenuata secondo il coefficiente di assorbimento delle superfici riflettenti; tali sorgenti vengono definite “sorgenti immagine” ed il metodo elementare che si basa su questi presupposti “metodo delle sorgenti immagine”.

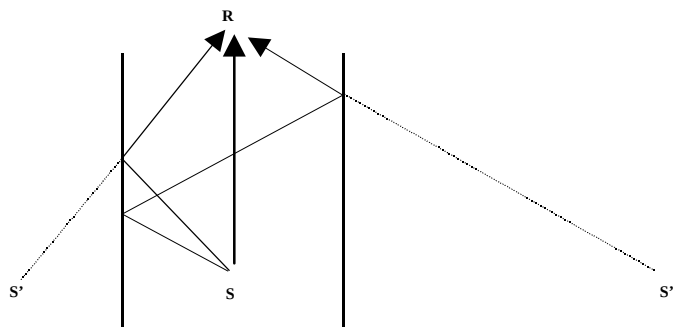


Figura B6: Metodo delle sorgenti immagine: sono evidenziate le sorgenti immagine di primo e secondo ordine.

Quando l’ambiente in cui si deve effettuare la simulazione acustica è caratterizzato da un notevole numero di riflessioni, il metodo delle sorgenti immagine diventa molto complesso ed è fondamentale l’ausilio di un software. In ambienti caratterizzati da un numero limitato di riflessioni, come in genere gli ambienti esterni, questo metodo può essere utile per una prima valutazione di massima del livello sonoro presente in determinati punti.

In queste condizioni il livello di pressione sonora in un punto a distanza r dalla sorgente può essere determinato in base alla seguente relazione:

$$L_p = 10 \lg \left(10^{\frac{L_{pd}}{10}} + \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{pri}}{10}} \right) \quad (B2)$$

dove:

L_{pd} è il livello di pressione dovuto alla propagazione diretta da sorgente a ricevitore (B3);

L_{pri} è il livello di pressione dovuto alle onde riflesse dalla i esima superficie riflettente (B4).

I livelli di pressione per propagazione diretta e riflessa si ottengono rispettivamente dalle (B3) e (B4).

$$L_{pd} = L_w - 20 \lg(r_d) - 11 \text{ (dB)} \quad (B3)$$

$$L_{pri} = L_w - 20 \lg(r_i) + 10 \lg(1-\alpha) - 11 \text{ (dB)} \quad (B4)$$

Dove:

L_w = livello di potenza della sorgente (omnidirezionale) (dB);

r_d = distanza tra sorgente e ricevitore (m) (fig. B1);

r_i = distanza complessiva sorgente - superficie riflettente – ricevitore (m);

α = coefficiente di assorbimento acustico della superficie riflettente (rapporto tra l'energia assorbita e quella incidente).

Il secondo ed il terzo termine dell'equazione B3 ($-20\lg(r_d) - 11$) servono a tenere conto della divergenza geometrica delle onde sonore (attenuazione con la distanza), mentre il terzo termine della B4 ($10\lg(1 - \alpha)$) dell'assorbimento acustico da parte della superficie riflettente.

Il software impiegato, mentre ha permesso la valutazione accurata della componente del campo sonoro riflessa dalle facciate, considerando anche l'effetto parzialmente assorbente di queste, non ha permesso di tenere conto in alcun modo del fenomeno dell'interferenza tra le onde sonore, dovuto a particolari tipi di suolo. Tale aspetto è stato considerato in un primo momento trascurabile sia per l'asfalto tradizionale che per quello fonoassorbente. I primi risultati dell'analisi sulle prestazioni dell'asfalto fonoassorbente hanno invece posto in evidenza come la riduzione del livello sonoro in ambito urbano dovuta a questi asfalti sia in parte dovuta proprio al meccanismo dell'interferenza distruttiva tra le onde sonore. In base a ciò sono state fatte simulazioni del campo sonoro anche avvalendosi di altre metodologie di calcolo.

Le valutazioni dell'effetto suolo generato dagli asfalti fonoassorbenti a doppio strato sono molto scarse nella letteratura tecnica, sia per la loro recente introduzione sul mercato, sia perché questa particolarità viene accentuata proprio nell'impiego in ambito urbano, dove la propagazione sonora interessa lunghi tratti di asfaltatura.

La valutazione semplificata degli effetti di interferenza nella propagazione in ambiente esterno è possibile secondo una metodologia descritta dalla norma internazionale ISO 9613-2 [11]. In questo caso, mentre è possibile tenere conto dei molteplici fenomeni di attenuazione, tra cui quello dell'interferenza, o "effetto suolo", risulta complicato valutare le riflessioni multiple dovute alle facciate o ad altri elementi riflettenti posti attorno alla sorgente. Nel caso specifico dello studio di strade urbane, l'applicazione del modello normativo alla valutazione delle riflessioni multiple è semplificato dal fatto che generalmente le facciate degli edifici sono parallele e continue. Per questo, oltre all'analisi basata sull'acustica geometrica, è stata fatta anche una valutazione in base alla metodologia ISO.

B.2.1 Metodo del pyramid tracing

Il modello di calcolo adottato per la simulazione sulla base dell'acustica geometrica è quello del pyramid tracing del software Ramsete. Tale metodo sostituisce i raggi sonori del ray tracing tradizionale con dei fasci (piramidi) che permettono di ridurre notevolmente il tempo di calcolo pur mantenendo elevata la precisione del risultato. Il software permette di studiare modelli geometrici anche molto complessi, tenendo conto anche della doppia diffrazione e, in maniera semplificata, della diffusione.

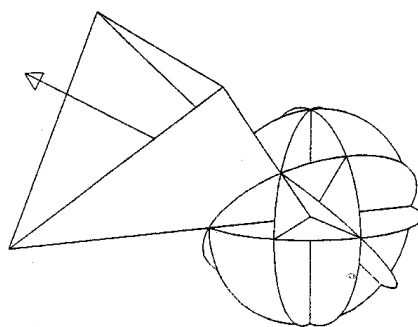


Figura B7: Metodo per la generazione delle “piramidi sonore” con centro nella sorgente acustica puntiforme, in Ramsete (immagine tratta dal manuale d’uso del programma).

La diffusione sonora viene riprodotta dal software come una riflessione speculare casuale; il raggio riflesso (ovvero l’asse della piramide) viene cioè direzionato in modo casuale dopo ogni impatto su una superficie. Negli ambienti interni, dato l’elevato numero di riflessioni subite da ogni raggio sonoro, questo porta statisticamente ad approssimare l’effetto della riflessione perfettamente diffusa. Il software, nato per l’analisi degli ambienti interni, utilizza pertanto questo artificio per simulare la diffusione, per la quale è possibile selezionare il numero di impatti delle piramidi sulle superfici di confine dopo i quali la riflessione passa da speculare a casuale (diffusa). Se però il numero di riflessioni che una piramide subisce prima di esaurirsi è ridotto, come avviene negli ambienti esterni, l’ipotesi statistica che porta ad approssimare la diffusione non è più valida e questa valutazione può causare anche errori. Un altro problema legato all’impiego di questo metodo per simulare la riflessione diffusa è che la caratteristica diffondente può essere solo attribuita a tutte le superfici o a nessuna a partire da un certo numero di riflessioni delle piramidi. Anche questo aspetto comporta problemi in ambiente esterno, dove vi sono determinate superfici che sono caratterizzate da riflessione speculare (l’asfalto) mentre altre che possono essere più o meno diffondenti, indipendentemente dal numero di riflessioni subite dai raggi prima dell’impatto su di esse. L’uso di questo metodo di

calcolo ha permesso di fare un modello geometrico dettagliato delle strade oggetto di studio al fine di valutare l'affidabilità della previsione, con e senza l'asfalto fonoassorbente (fig. B8).

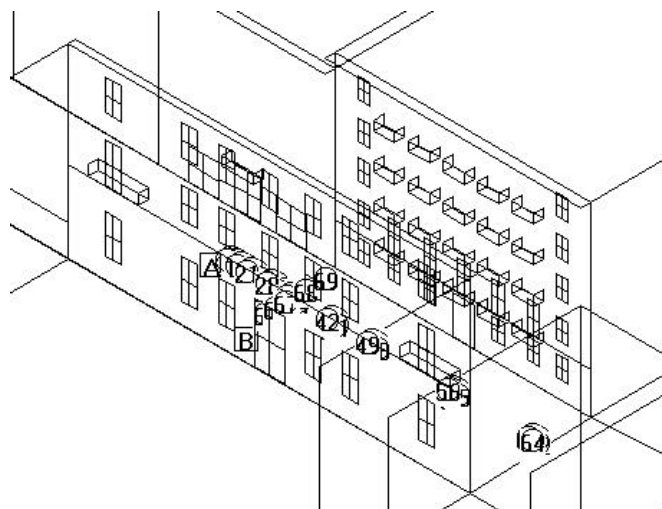


Figura B8: modello geometrico realizzato per le simulazioni con il tracciatore di piramidi, nel tratto di strada con sezione a U.

Il grado di dettaglio impiegato nella modellazione geometrica è stato tale da riprodurre sporgenze ed aggetti della facciata fino ad una dimensione di circa 1 metro. Infatti, elementi di piccole dimensioni possono avere nella realtà l'effetto di diffondere i raggi sonori di media e piccola lunghezza d'onda (medio - alte frequenze), mentre nella simulazione quello di rifletterli in maniera speculare, creando quindi falsi effetti di concentrazione dell'energia sonora in determinate posizioni. Un esame accurato dovrebbe pertanto prevedere un grado di precisione differenziato a seconda del campo di frequenze da analizzare, cioè un modello via via meno dettagliato al diminuire della frequenza di analisi. Per ovvie ragioni di praticità e di ripetibilità del metodo di analisi è stato comunque scelto di fare un modello unico con un livello di precisione medio. Sono state quindi riprodotte le sporgenze maggiori quali le gronde ed i balconi mentre sono state trascurate tutte le cornici e le modanature delle facciate.

Oltre alle grandezze geometriche dell'ambiente studiato, i dati in ingresso nel modello di calcolo sono:

- livello di potenza sonora in bande di ottave delle sorgenti (solo sorgenti puntiformi);
- direttività delle sorgenti sonore;
- coefficiente di assorbimento acustico di tutte le superfici presenti (facciate, asfalto, ecc.);
- parametri di calcolo (grado di diffusione delle superfici, ovvero numero di impatti dopo il quale la riflessione passa da speculare a casuale; precisione del calcolo, ecc.).

B.2.2 Metodo ISO 9613

Il metodo normativo di calcolo dell'attenuazione sonora nella propagazione in ambienti esterni [11] permette una valutazione approssimata ed empirica dei diversi contributi già espressi dalla (B1).

Il metodo è applicabile in condizioni meteorologiche favorevoli alla propagazione sonora e cioè per la propagazione sottovento [11, 12] o in condizioni di inversione termica, come avviene ad esempio durante le ore notturne. Tali condizioni determinano una curvatura del percorso di propagazione delle onde sonore da sorgente a ricevitore con concavità rivolta verso il basso (fig. B9), che riduce l'effetto del suolo sulla porzione centrale del percorso.

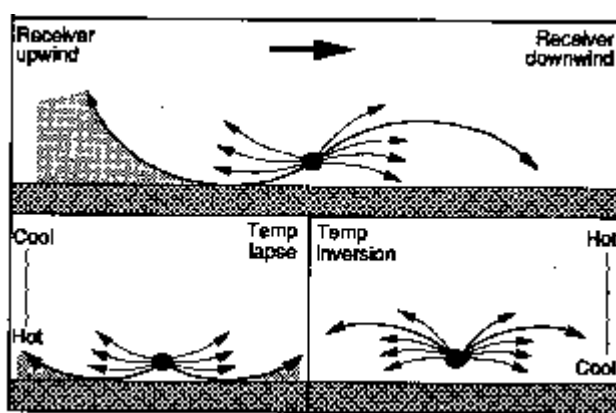


Figura B9: Effetto del vento (sopra) e dei gradienti termici (sotto) sulla propagazione sonora (immagine tratta da [12]).

In presenza di condizioni meteorologiche differenti, la stima risulta meno accurata, fornendo valori dell'attenuazione minori di quelli reali.

Nella valutazione delle prestazioni acustiche di tappeti fonoassorbenti, il termine di attenuazione di maggior rilievo è quello dovuto all'effetto suolo (B1), che viene valutato dalla norma introducendo un nuovo parametro, definito "ground factor" G . Questo è un numero variabile tra 0 e 1 in funzione delle caratteristiche del suolo, essendo massimo per superfici molto reattive ($G=1$), come manti erbosi o superfici porose, e minimo per superfici dure ($G=0$), come pavimentazioni, acqua o cemento liscio.

Il metodo è applicabile solo per superfici piane orizzontali o con pendenza costante.

L'attenuazione viene valutata distinguendo la superficie del suolo compresa tra sorgente e ricevitore nelle seguenti tre zone:

- zona della sorgente, che si estende dalla sorgente verso il ricevitore per una distanza di circa 30 volte l'altezza di questa, h_s , con un massimo pari a d_p (fig. B1);

- zona del ricevitore, che si estende dal ricevitore verso la sorgente per una distanza di circa 30 volte l'altezza di questo, h_r , con un massimo pari a d_p ;
- zona intermedia, compresa, se possibile, tra la zona della sorgente e quella del ricevitore.

Il modello prevede pertanto il calcolo di tre distinti termini di attenuazione per effetto suolo per le tre zone, la cui somma fornisce il termine da impiegare nell'equazione B1:

$$A_{\text{ground}} = A_s + A_r + A_m \quad (\text{B5})$$

I valori di A_s , A_r e A_m vengono calcolati in funzione della frequenza, in bande di ottave, mediante le seguenti formule:

3q (63Hz)

$$A_s - A_r - 1,5 - G - 1,5 - 3e^{-\left(\frac{f}{63}\right)^{0,75}} - 5,7e^{-\left(\frac{f}{63}\right)^{0,75}} \left(1 - e^{-\left(\frac{f}{63}\right)^{0,75}}\right); A - 3q(1-G)(125\text{Hz})$$

$$A_s - A_r - 1,5 - G - 1,5 - 8,6e^{-\left(\frac{f}{125}\right)^{0,75}} - 1 - e^{-\left(\frac{f}{125}\right)^{0,75}}; A - 3q(1-G)(250\text{Hz})$$

$$A_s - A_r - 1,5 - G - 1,5 - 14e^{-\left(\frac{f}{250}\right)^{0,75}} - 1 - e^{-\left(\frac{f}{250}\right)^{0,75}}; A - 3q(1-G)(500\text{Hz})$$

$$A_s - A_r - 1,5 - G - 1,5 - 5e^{-\left(\frac{f}{500}\right)^{0,75}} - 1 - e^{-\left(\frac{f}{500}\right)^{0,75}}; A - 3q(1-G)(1000\text{Hz})$$

$$A_s - A_r - 1,5 - G(1 - G); A - 3q(1-G)(2000-8000\text{Hz})$$

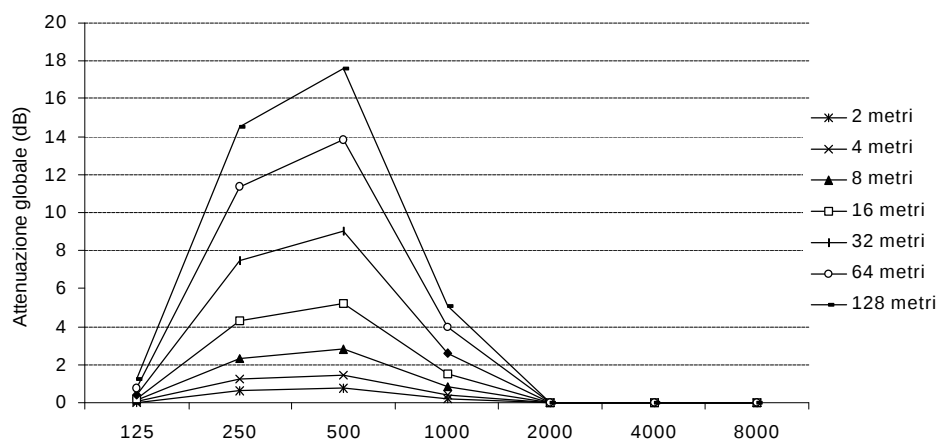


Figura B10: Attenuazione globale per effetto suolo, A_{ground} (B1), in funzione della frequenza e della distanza tra sorgente e ricevitore con $h_s = 0,3$, $h_r = 1,4$ e ground factor $G = 1$ (massimo effetto di interferenza).

La norma fornisce metodi di calcolo semplificati anche per gli altri contributi all'attenuazione dell'equazione B1, non riportati in questa relazione. Noti questi, è quindi possibile effettuare il calcolo del livello di pressione sonora in un punto posto ad una determinata distanza da una sorgente sonora [11].

La valutazione dei livelli sonori in ambiente esterno risulta semplificata nel caso di geometrie semplici e di pochi punti di valutazione. In casi differenti, come quando è richiesta una mappatura estesa dei livelli sonori, la valutazione deve essere possibilmente supportata da una procedura automatizzata [19].

L'accuratezza del metodo ISO 9613 nella previsione dei livelli sonori in ambiente esterno può essere limitata anche dalla direttività della sorgente sonora, in quanto questa viene valutata solo in modo semplificato.

Appendice C - quadro completo dei risultati

Vengono di seguito riportati per esteso i risultati di tutte le misure eseguite e le piante per l'individuazione dei punti di misura.



Figura C1: Individuazione della zona in cui sono state eseguite le misure.

Le misurazioni in opera hanno riguardato tre aspetti:

- assorbimento acustico, rilevato in nove punti differenti (da A a I, fig. C2);
- curve di decadimento spaziale, rilevate in due zone caratterizzate da geometria diversa della sezione stradale (1 e 2, fig. C3);
- livello continuo equivalente di pressione sonora, rilevato in tre punti differenti (1, 2 e 3, fig. C4).

C.1 Misure di coefficiente di assorbimento acustico

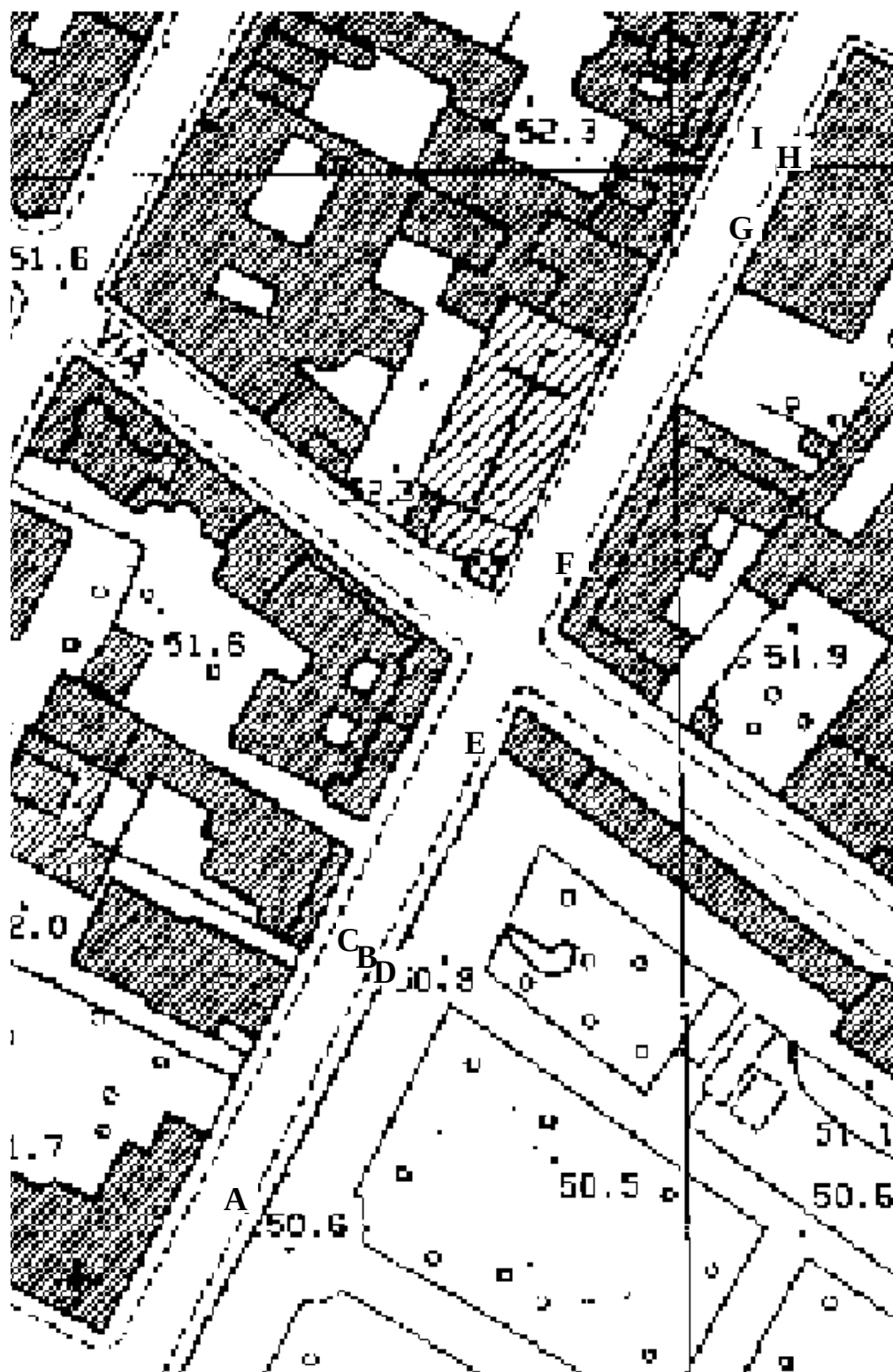
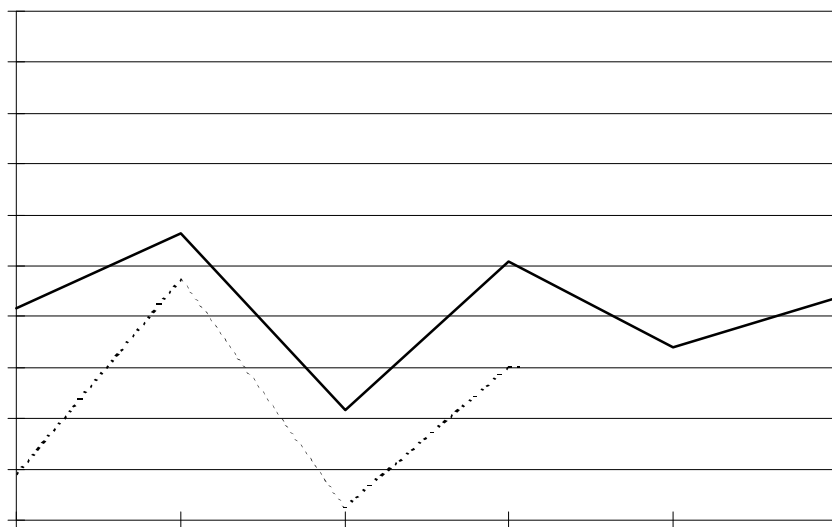
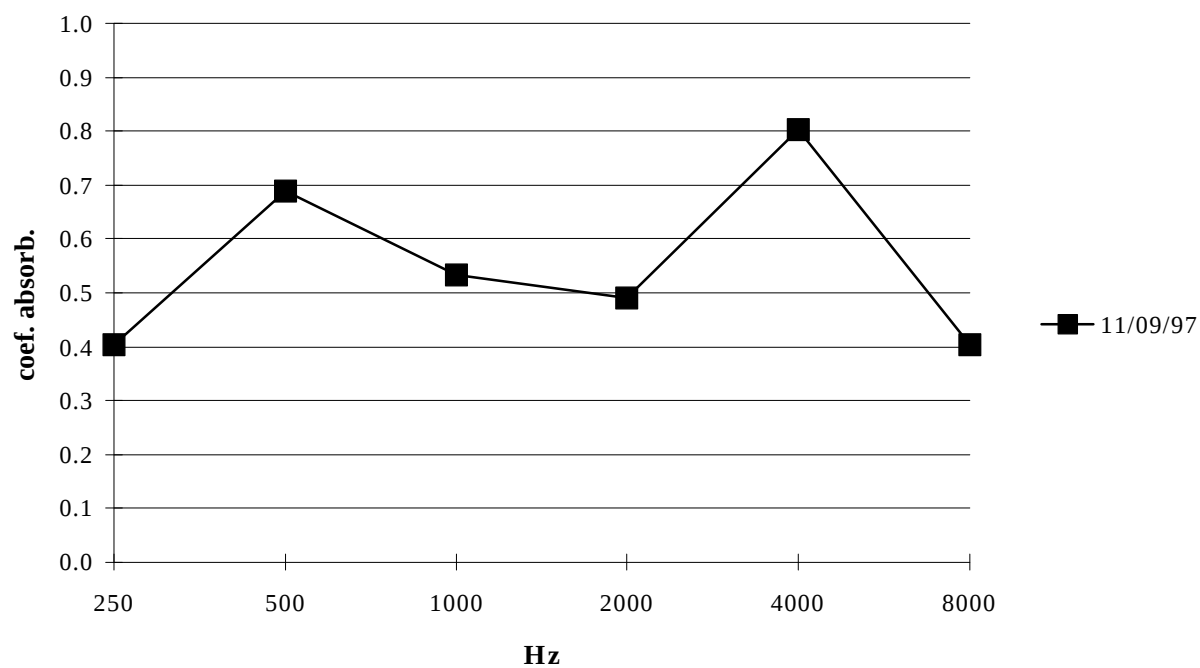


Figura C2: Individuazione dei punti in cui sono state eseguite le misure di assorbimento acustico in opera (tutti i punti, ad eccezione di C, D e I, sono posti sull'asse della strada).

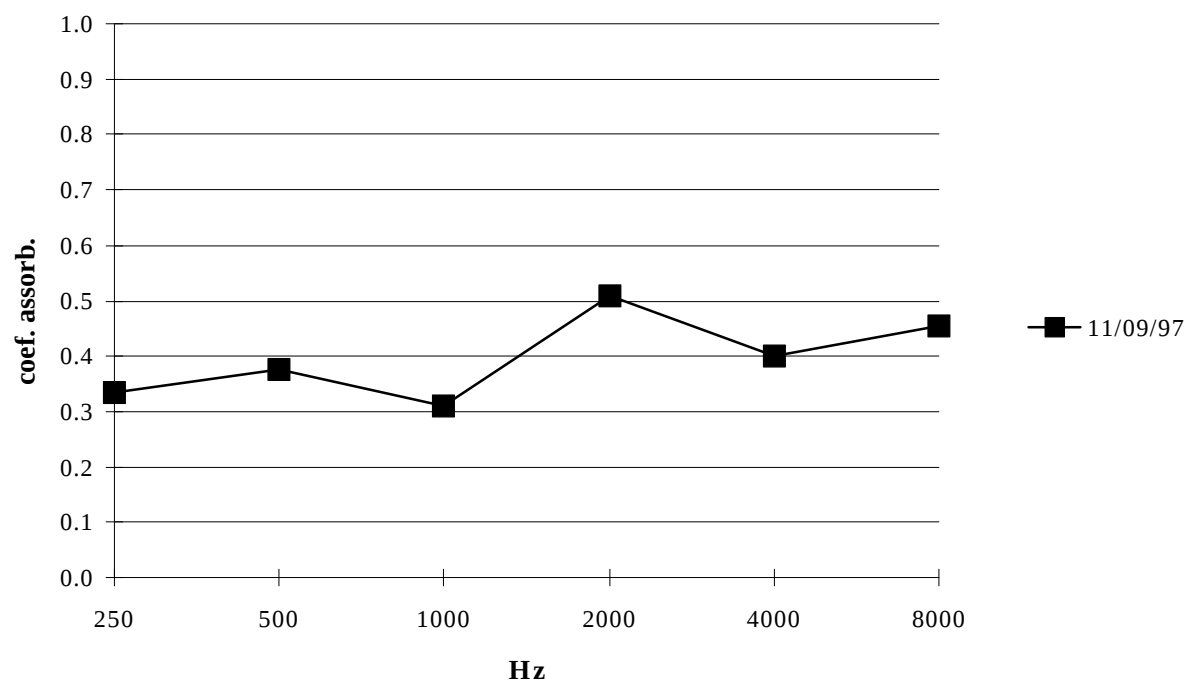
Punto di misura A

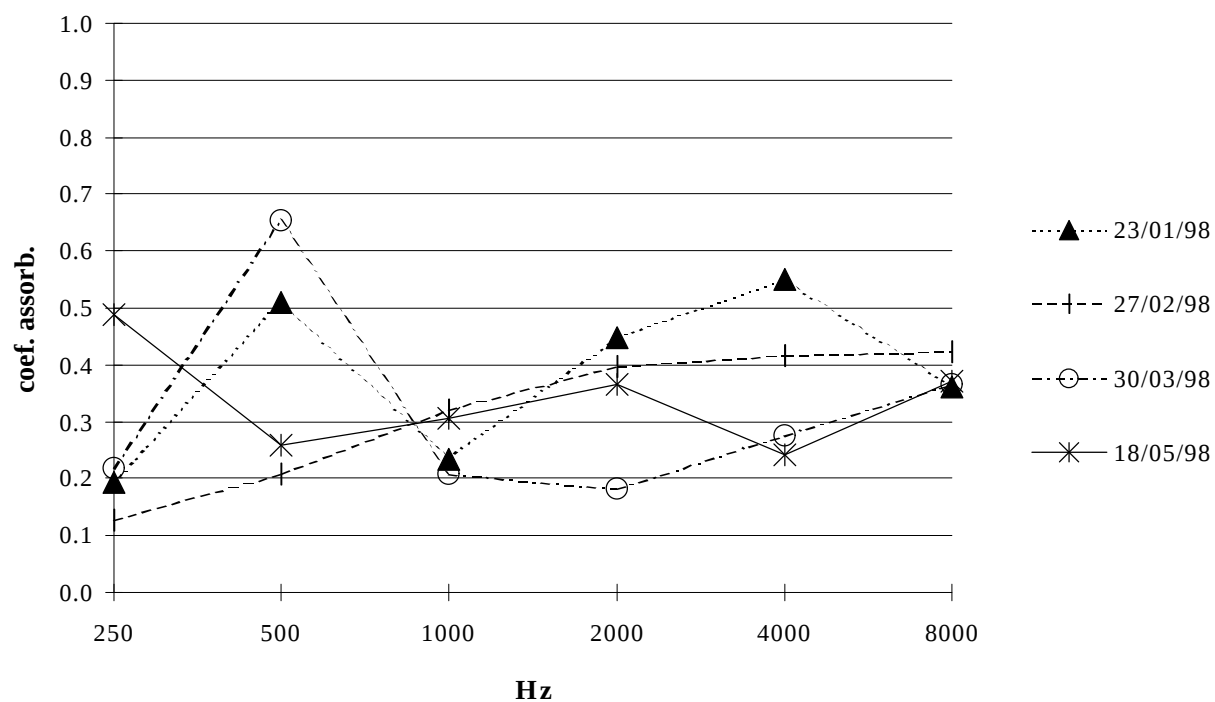
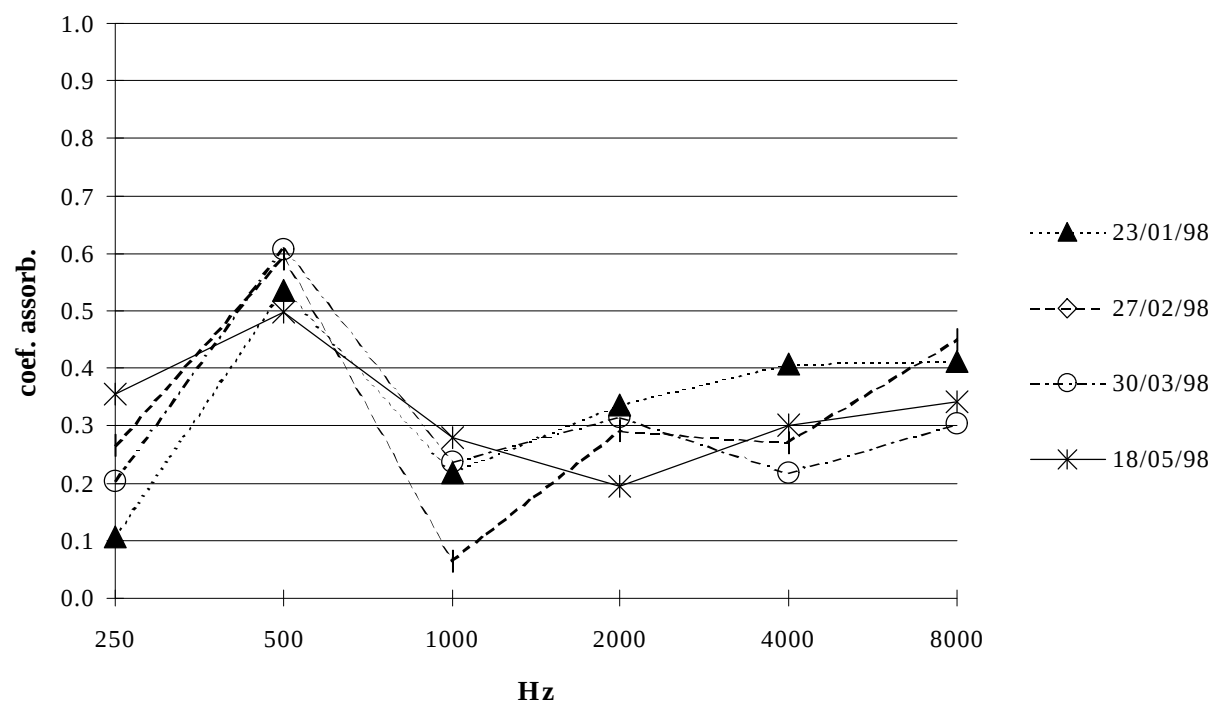


Punto di misura C

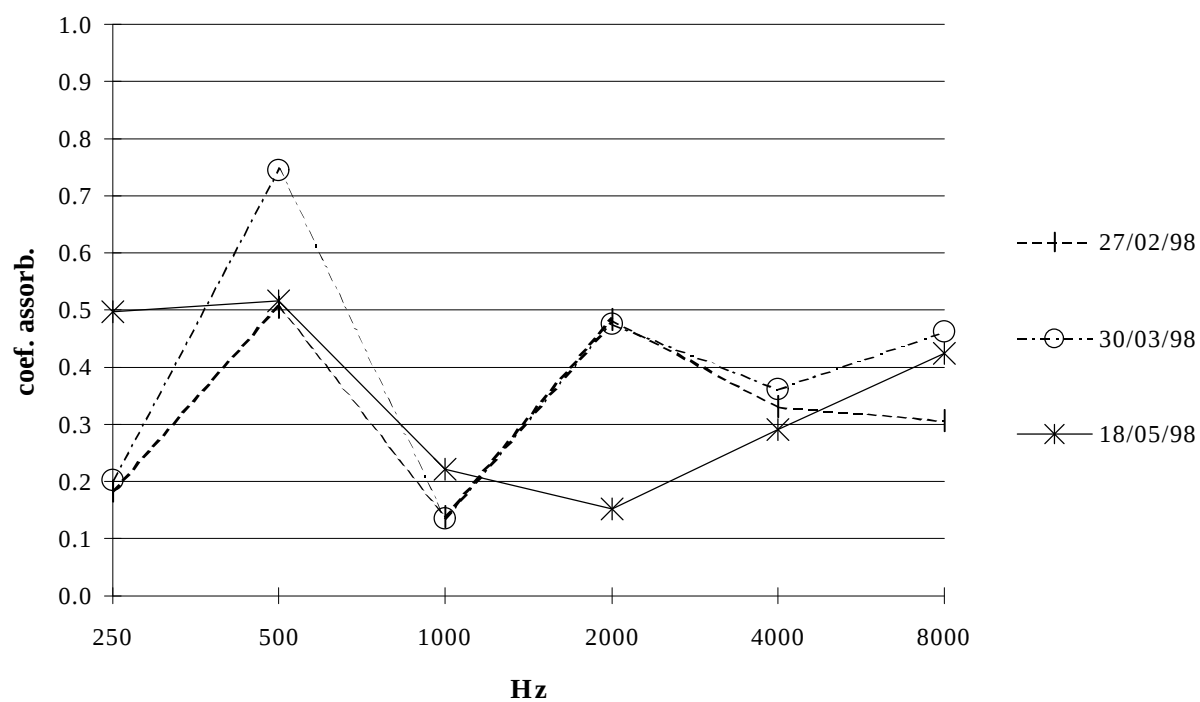


Punto di misura D

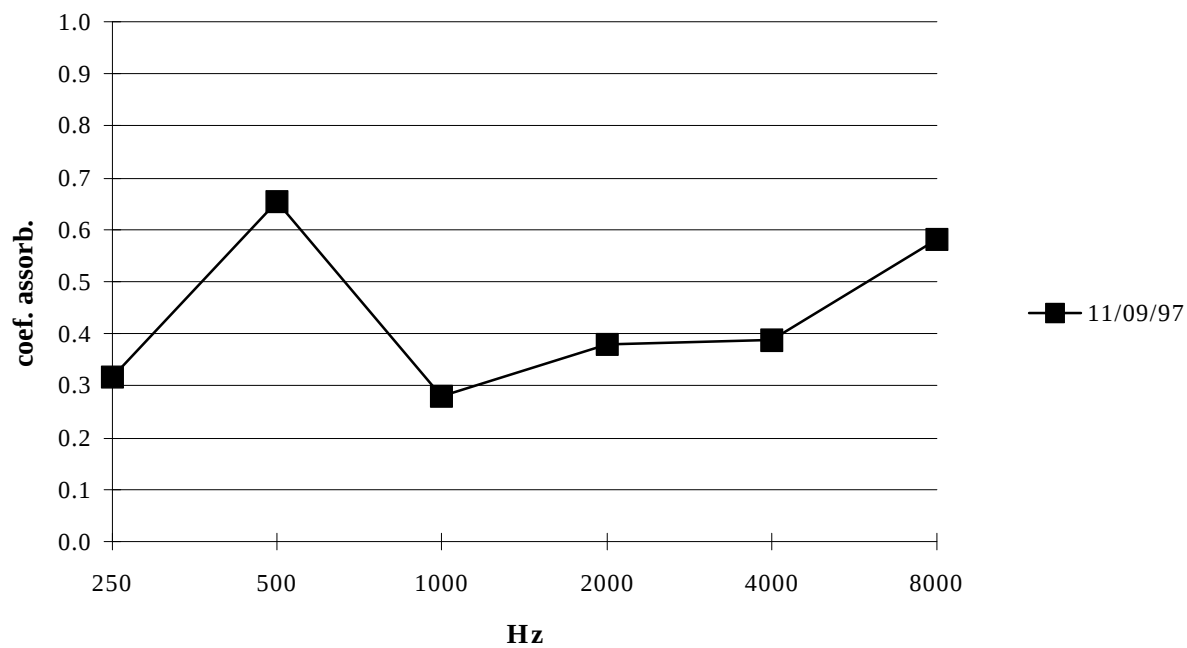


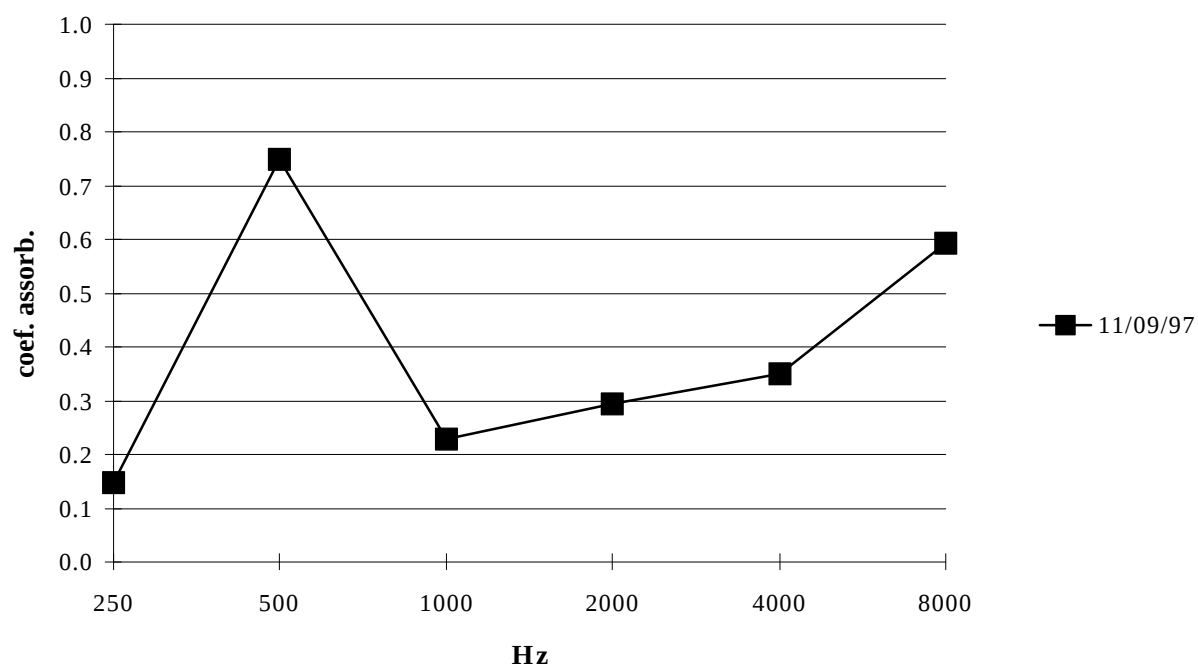
Punto di misura E**Punto di misura F**

Punto di misura G



Punto di misura H



Punto di misura I

C.2 Misure di decadimento spaziale

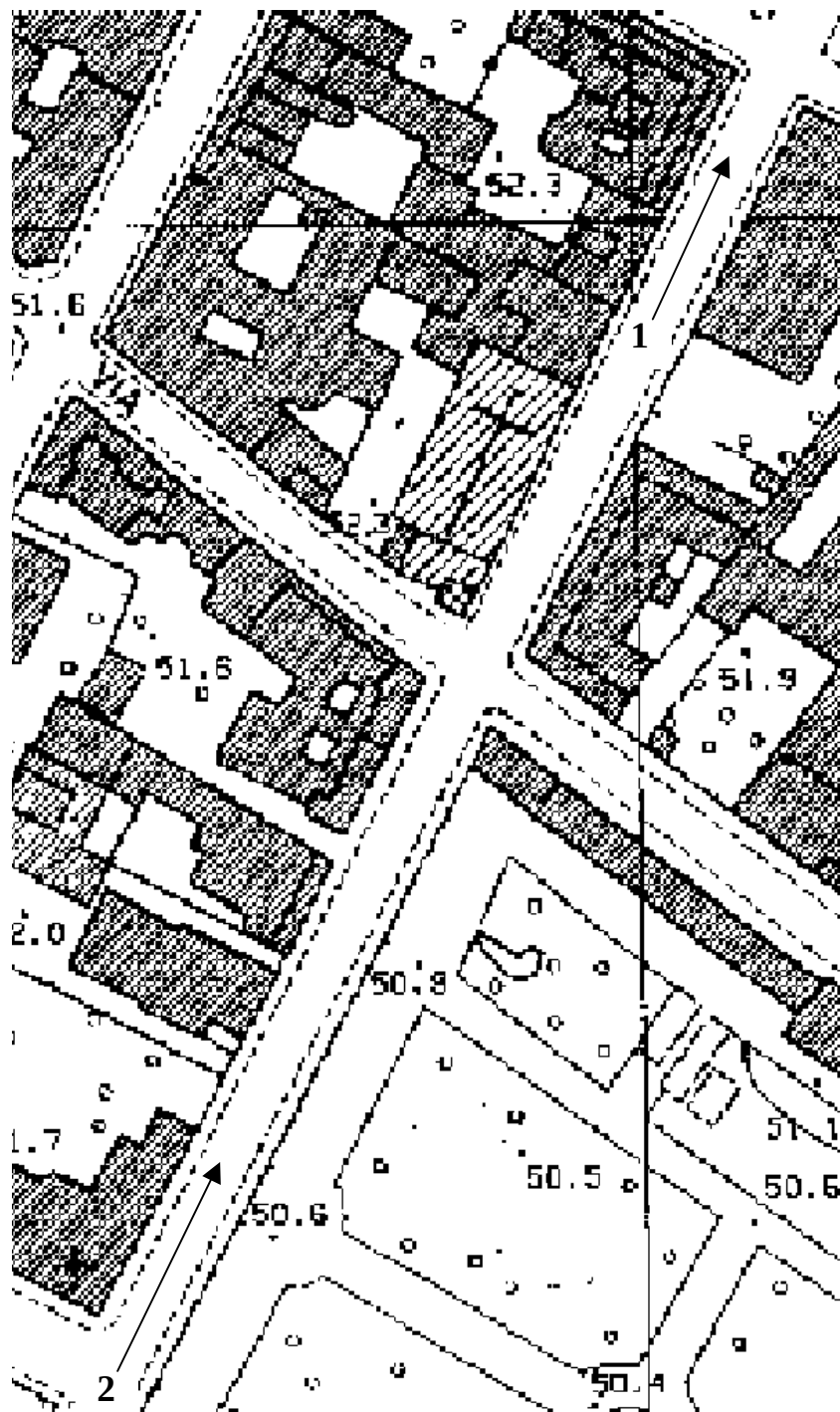
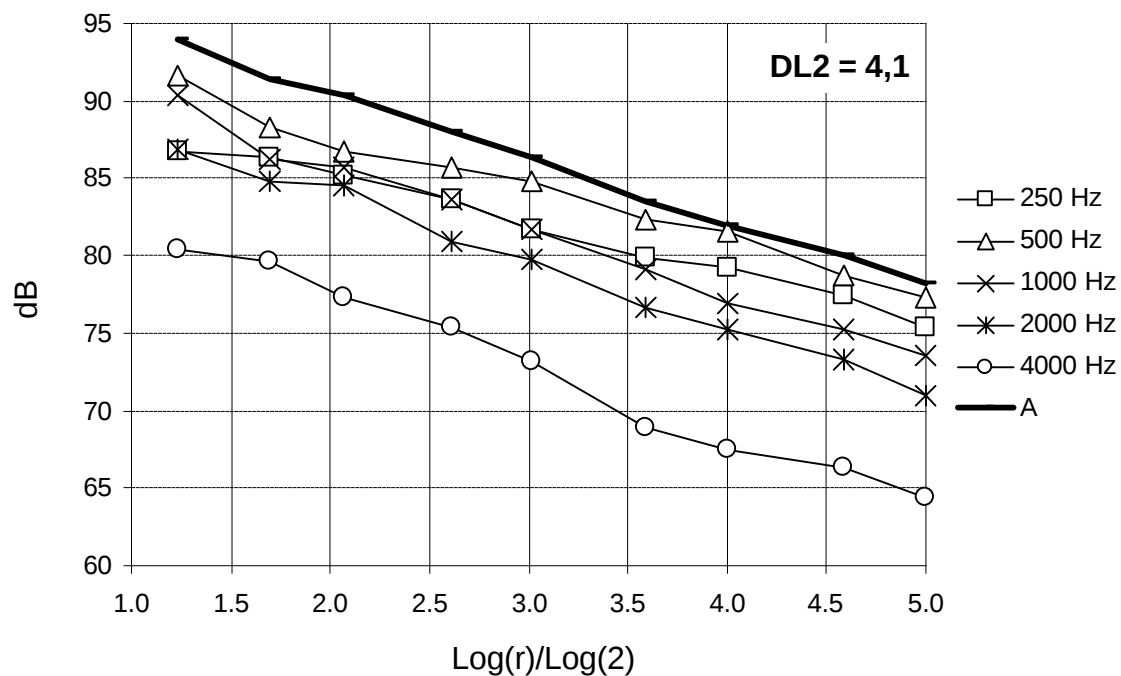
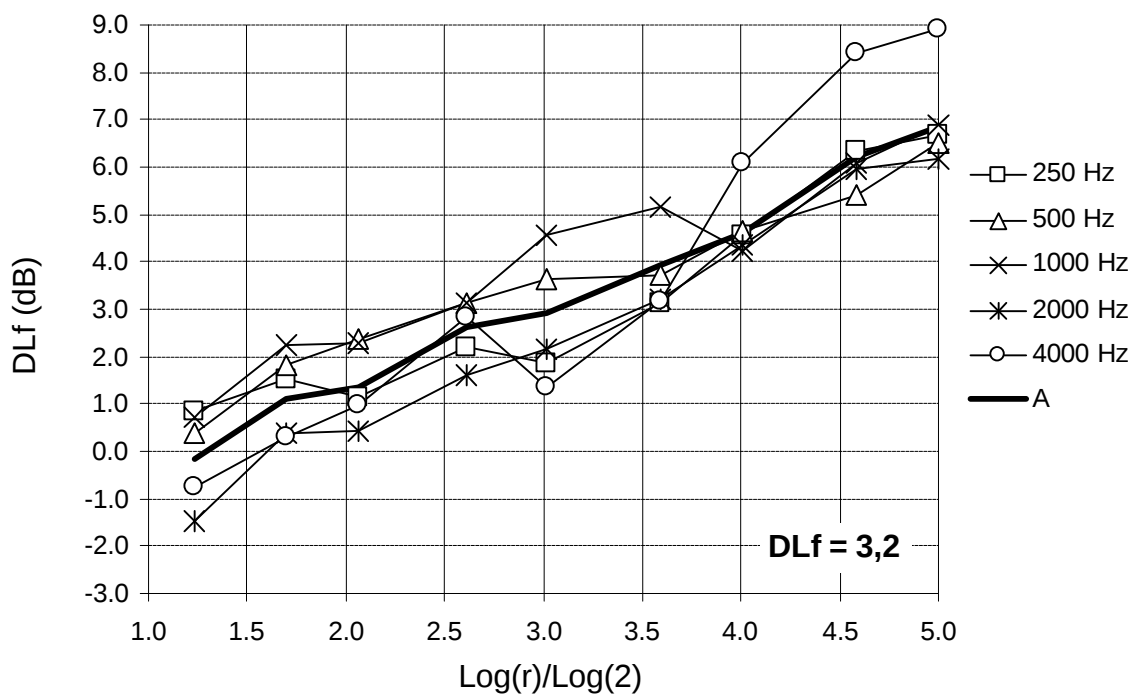
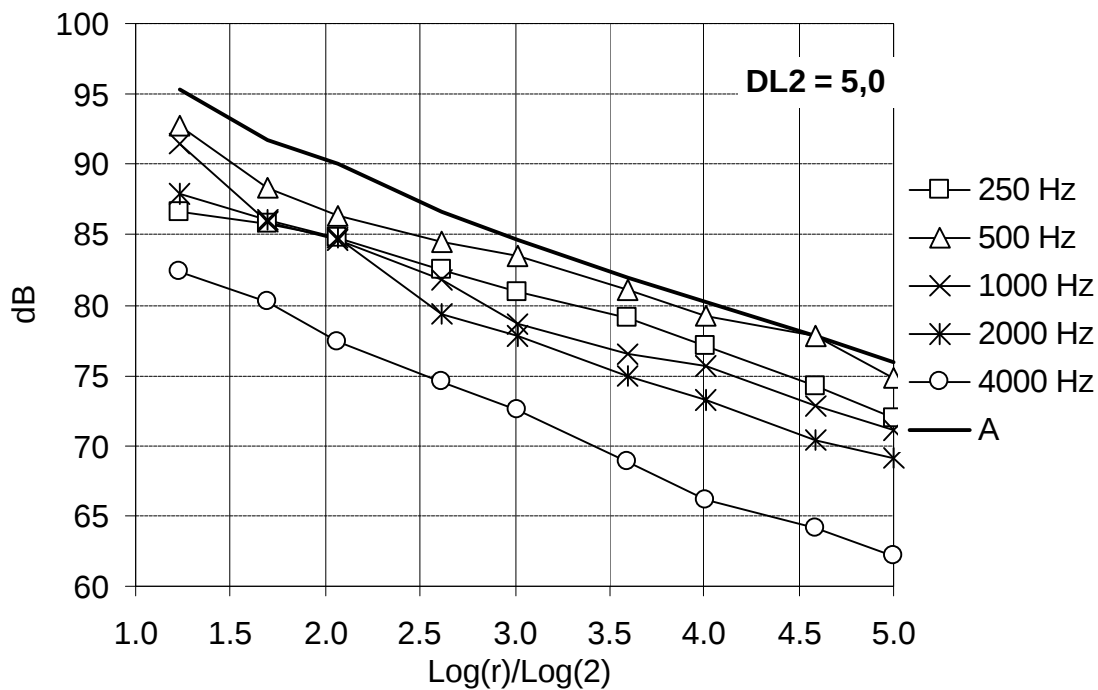
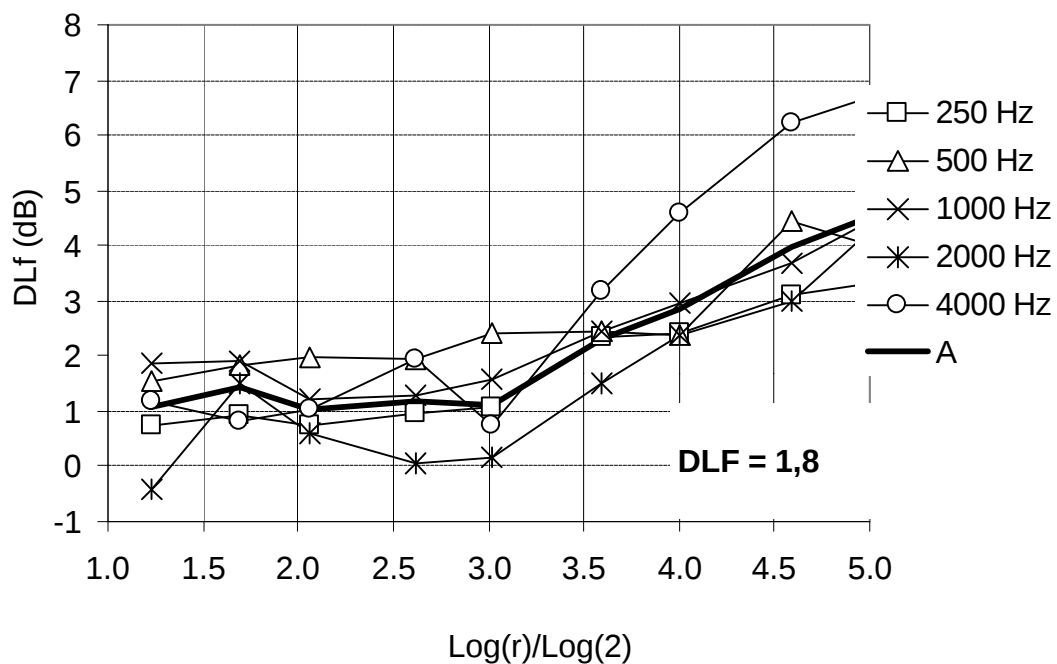
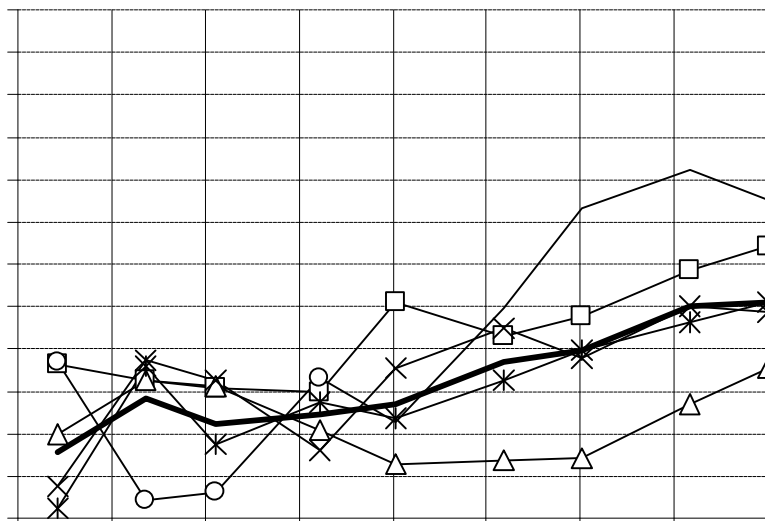


Figura C3: Individuazione dei punti in cui sono state eseguite le misure di decadimento spaziale.

Asfalto preesistente**Liceo scientifico Castelnuevo (punto 1)**

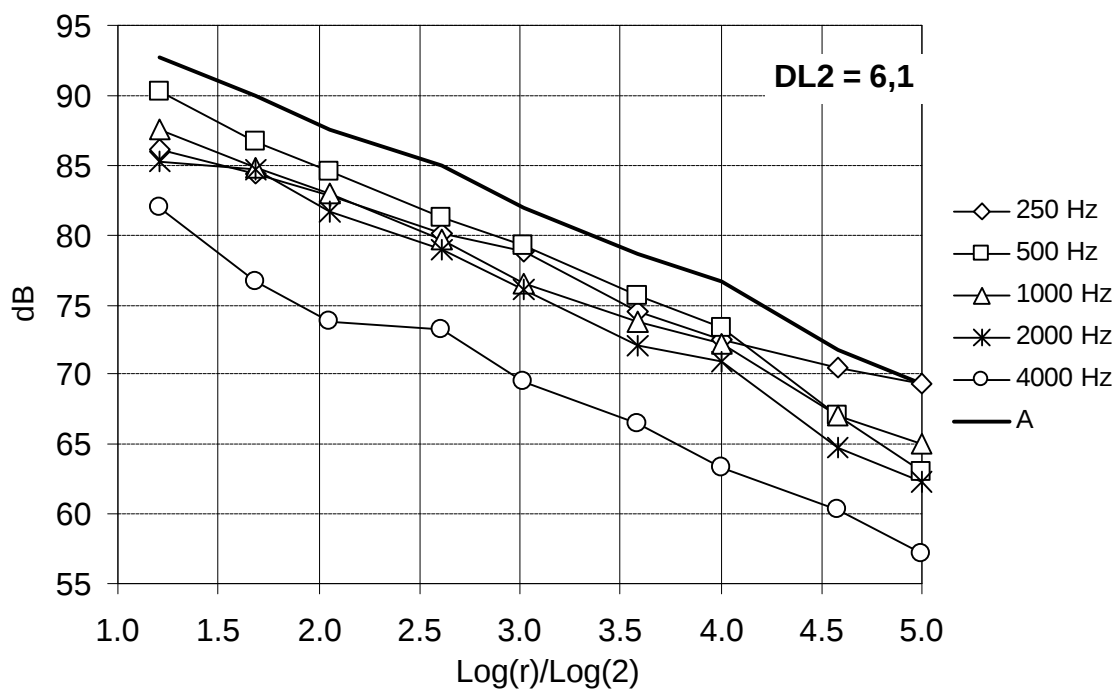
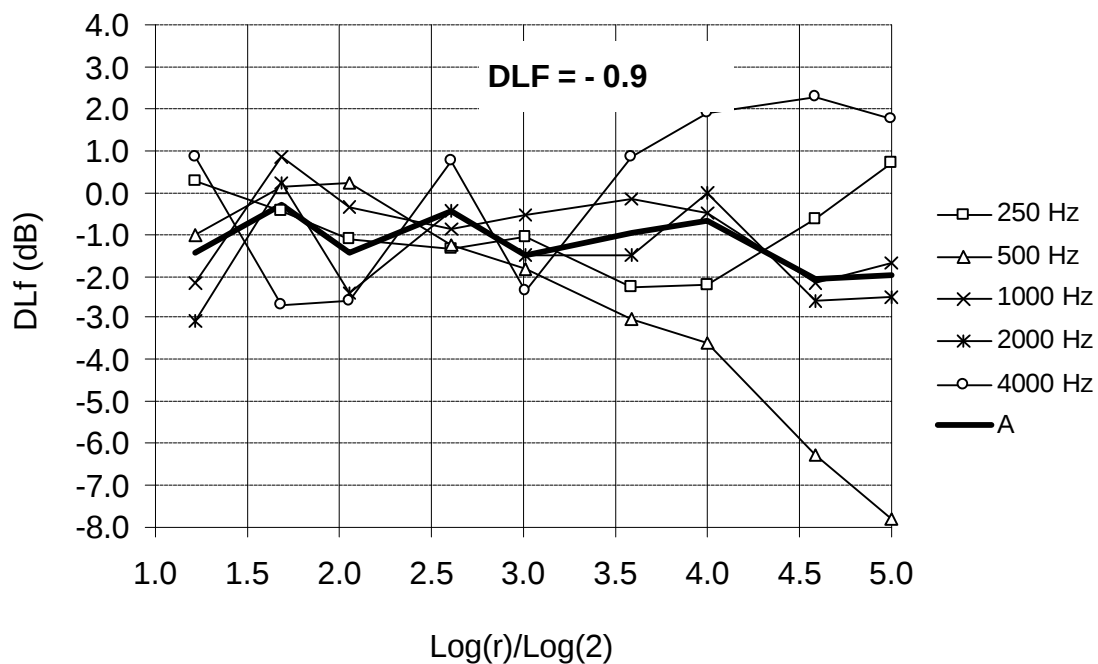
Asfalto preesistente **Orto Botanico (punto 2)**

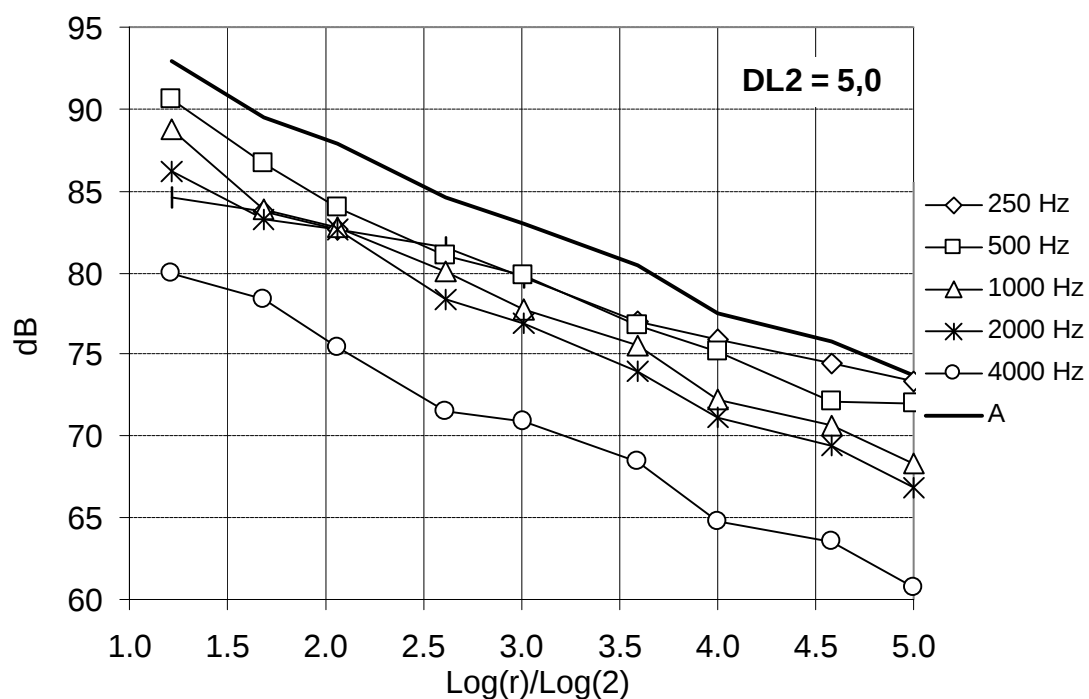
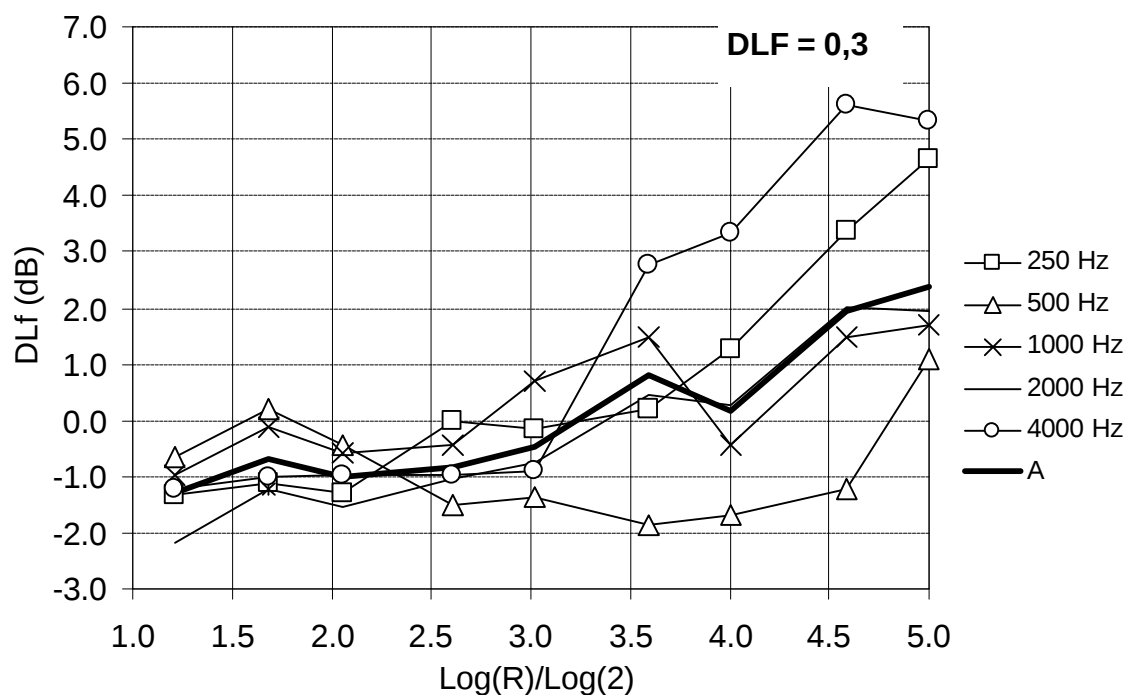


Asfalto fonoassorbente nuovo (settembre 1997)**Liceo scientifico Castelnuevo (punto 1)**

Asfalto fonoassorbente nuovo (settembre 1997)

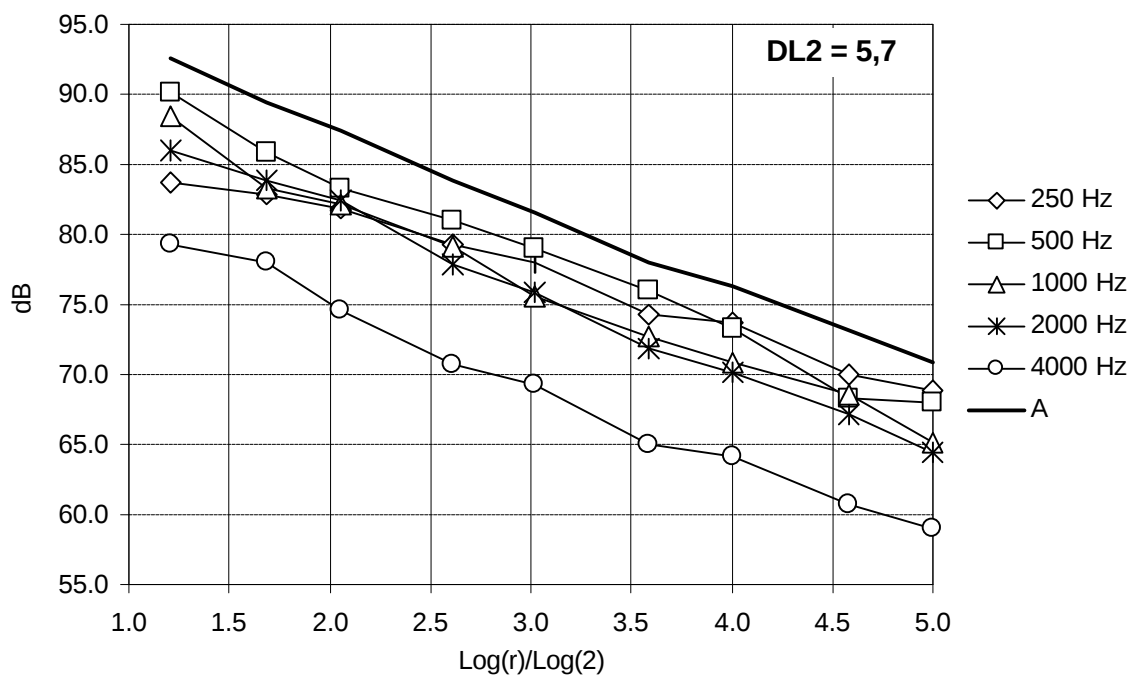
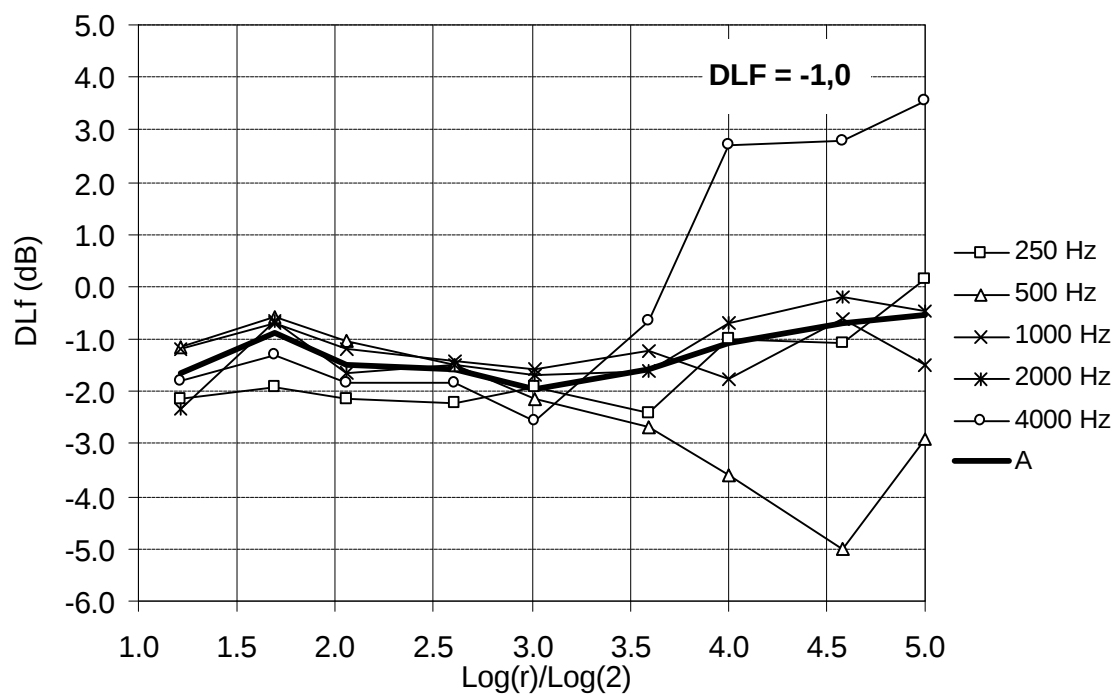
Orto botanico (punto 2)



Asfalto fonoassorbente invecchiato (febbraio 1998)**Liceo scientifico Castelnuevo (punto 1)**

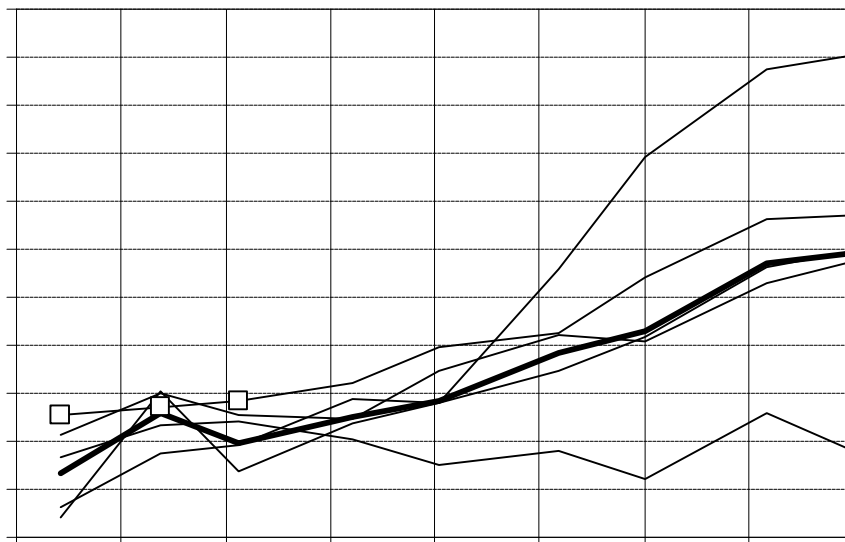
Asfalto fonoassorbente invecchiato (febbraio 1998)

Orto botanico (punto 2)



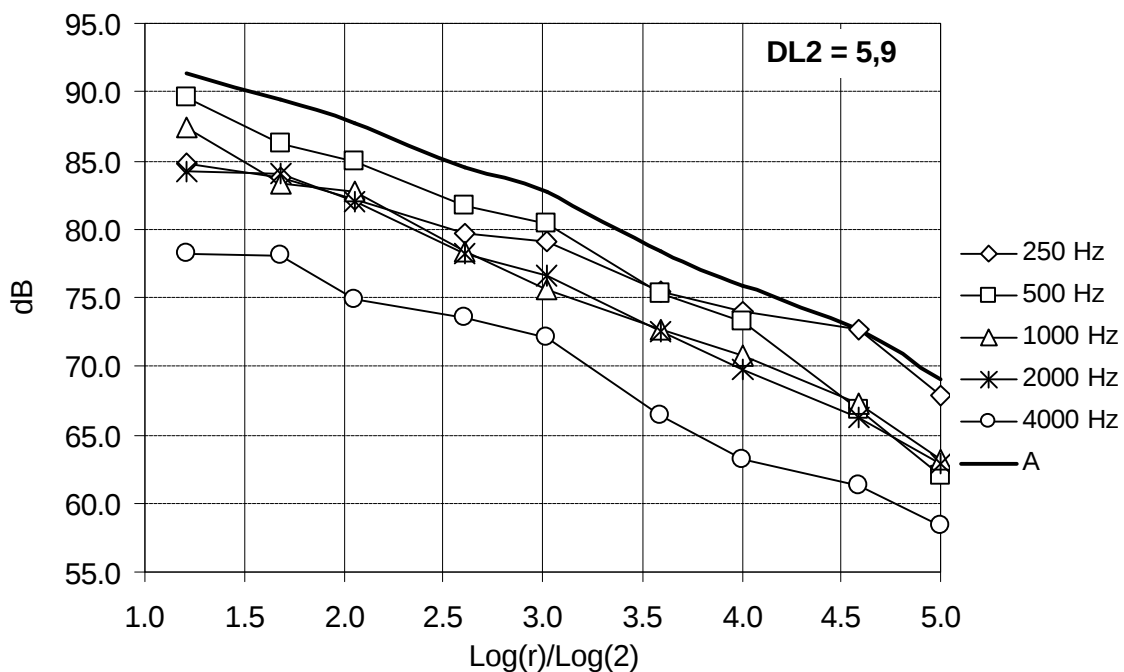
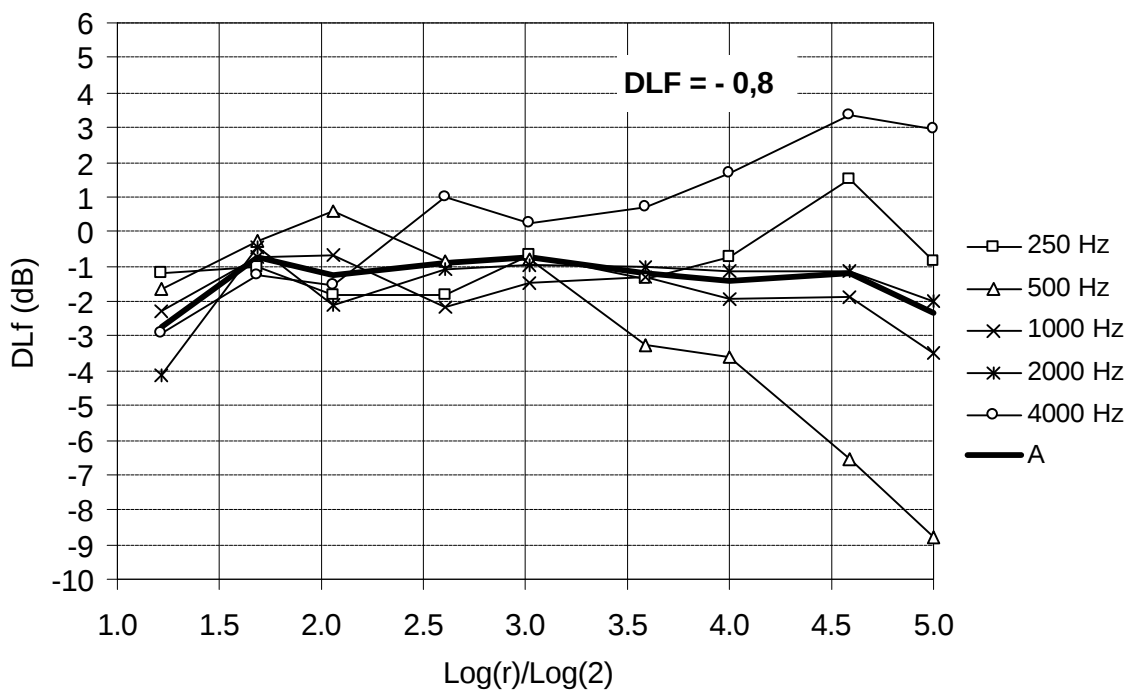
Asfalto fonoassorbente invecchiato (maggio 1998)

Liceo scientifico Castelnuevo (punto 1)



Asfalto fonoassorbente invecchiato (maggio 1998)

Orto botanico (punto 2)



C.3 Misure di livello di pressione sonora

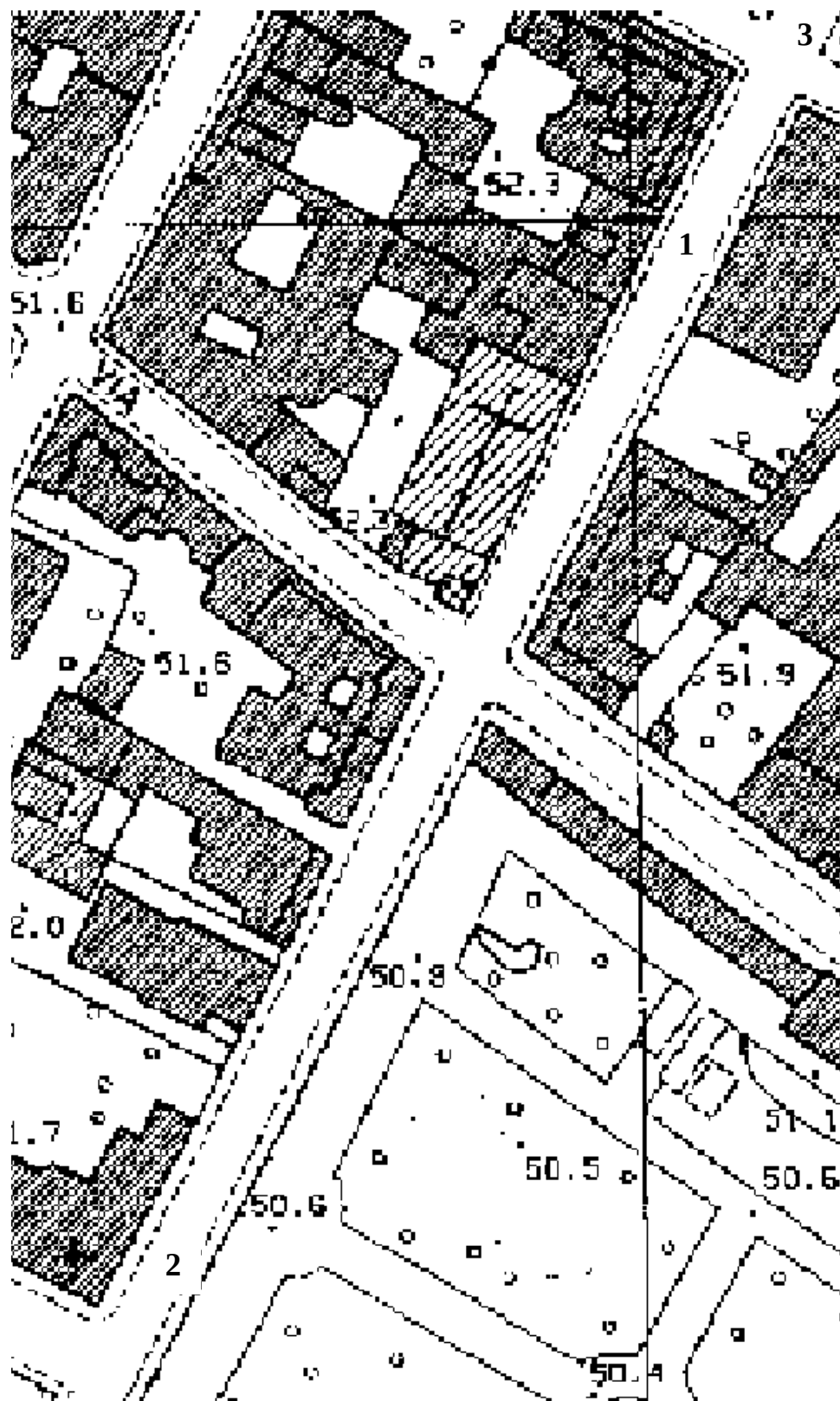
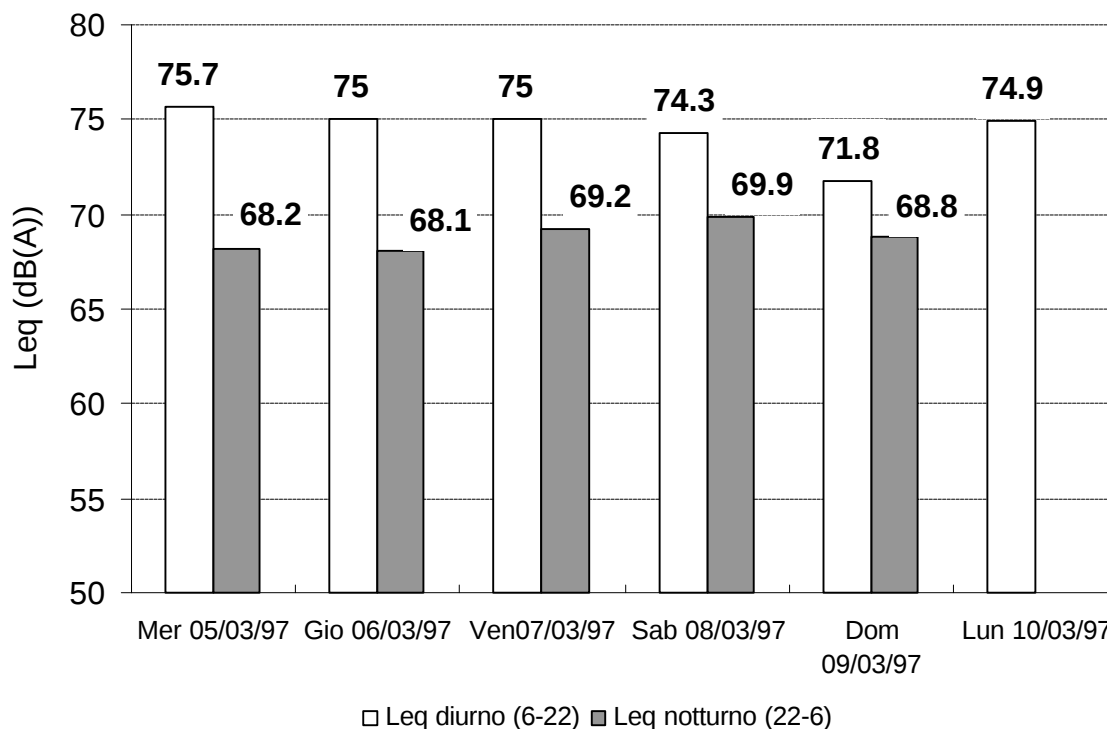
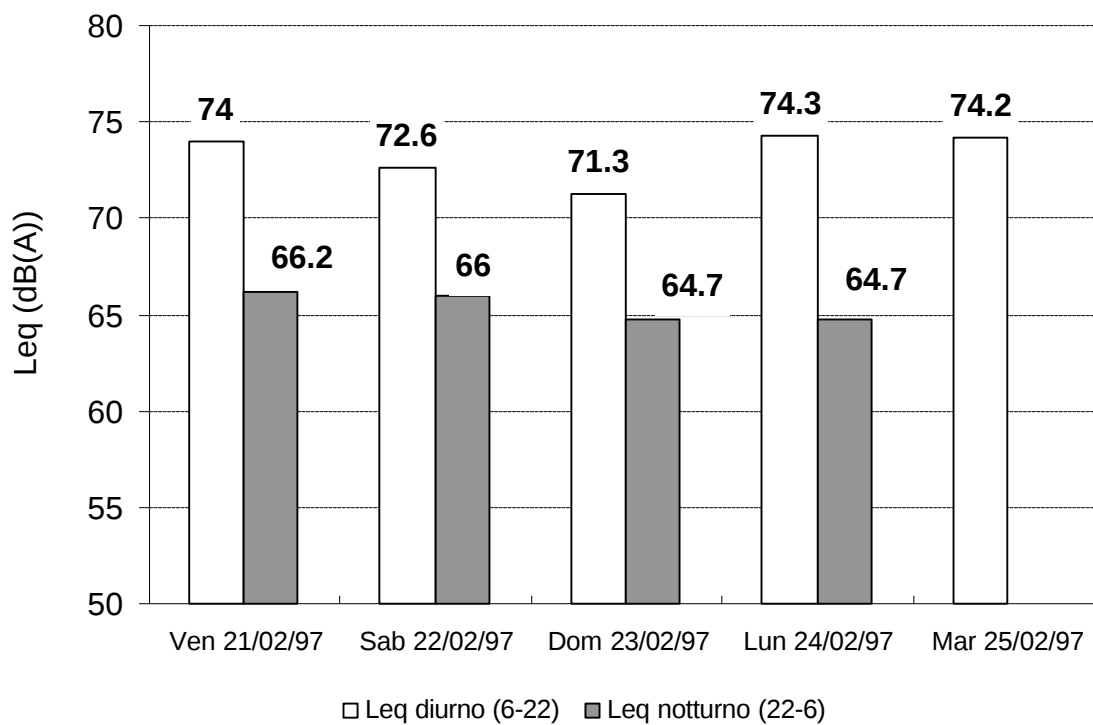


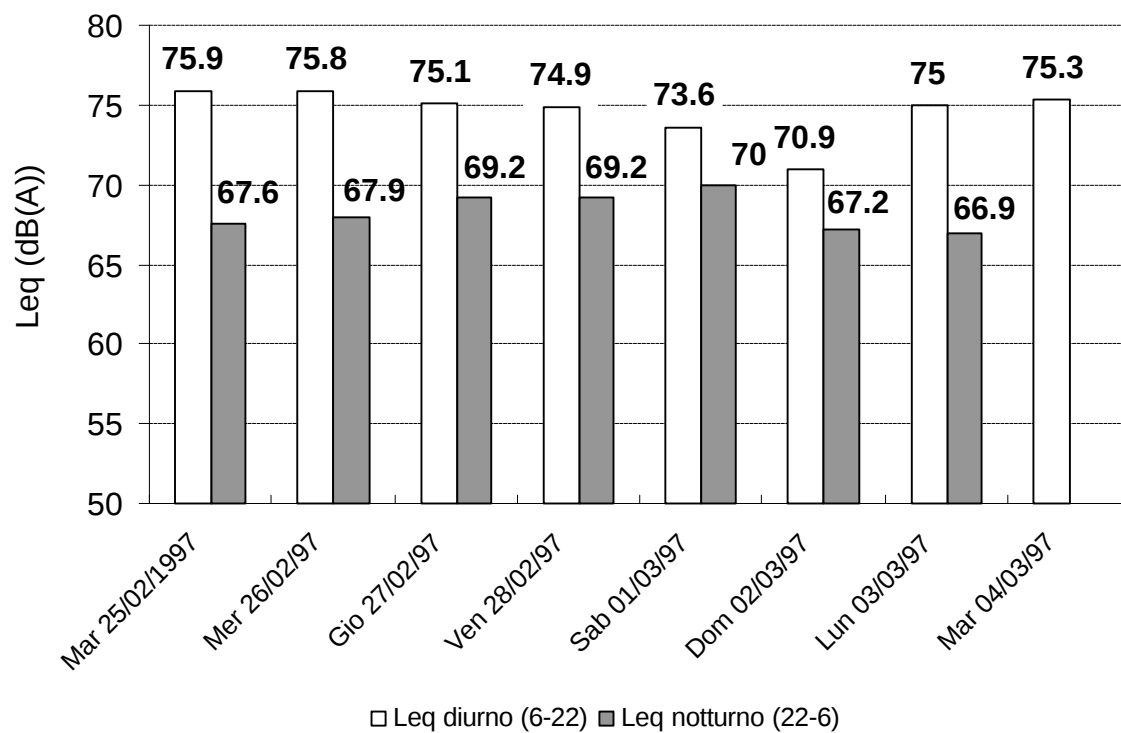
Figura C4: Individuazione dei punti in cui sono state eseguite le misure di livello equivalente di pressione sonora.

Asfalto preesistente
Liceo scientifico Castelnuevo (punto 1)



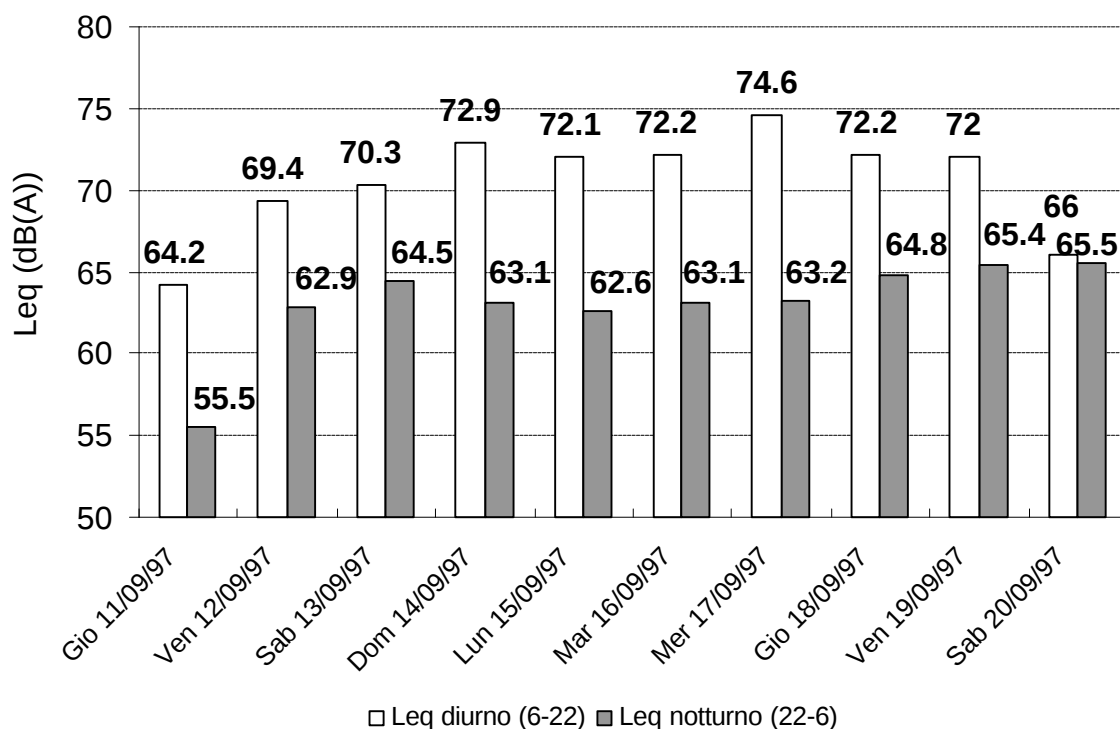
Orto botanico (punto 2)



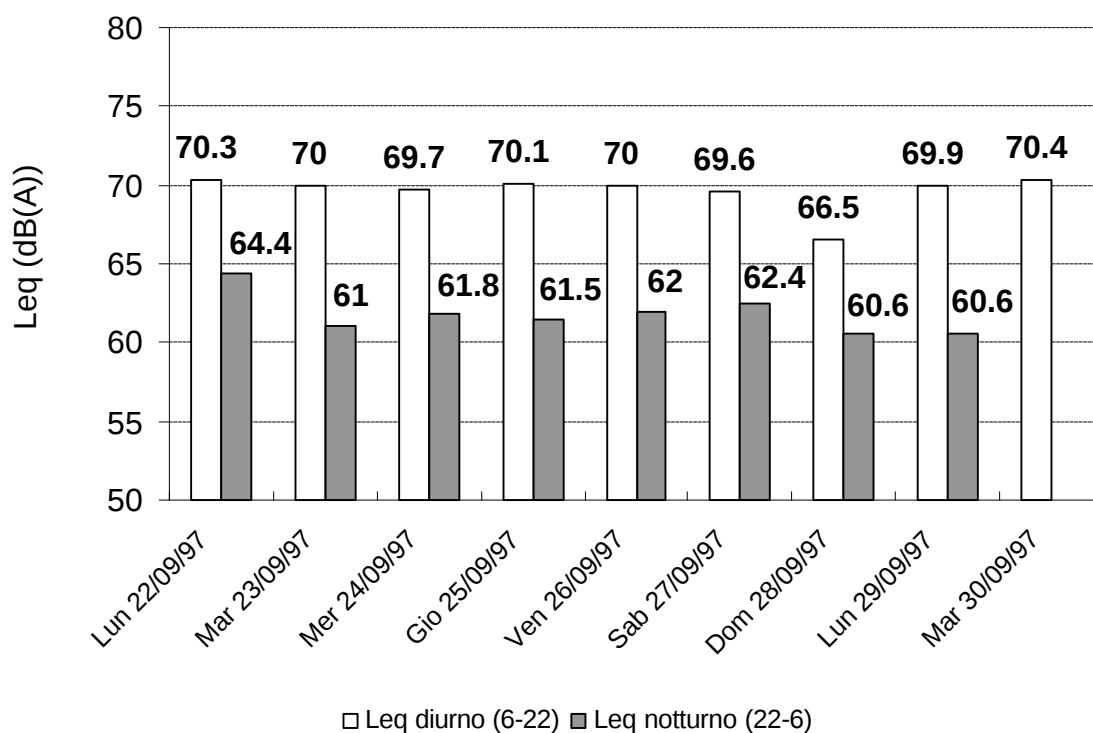
Via Lamarmora angolo via Venezia (punto 3)

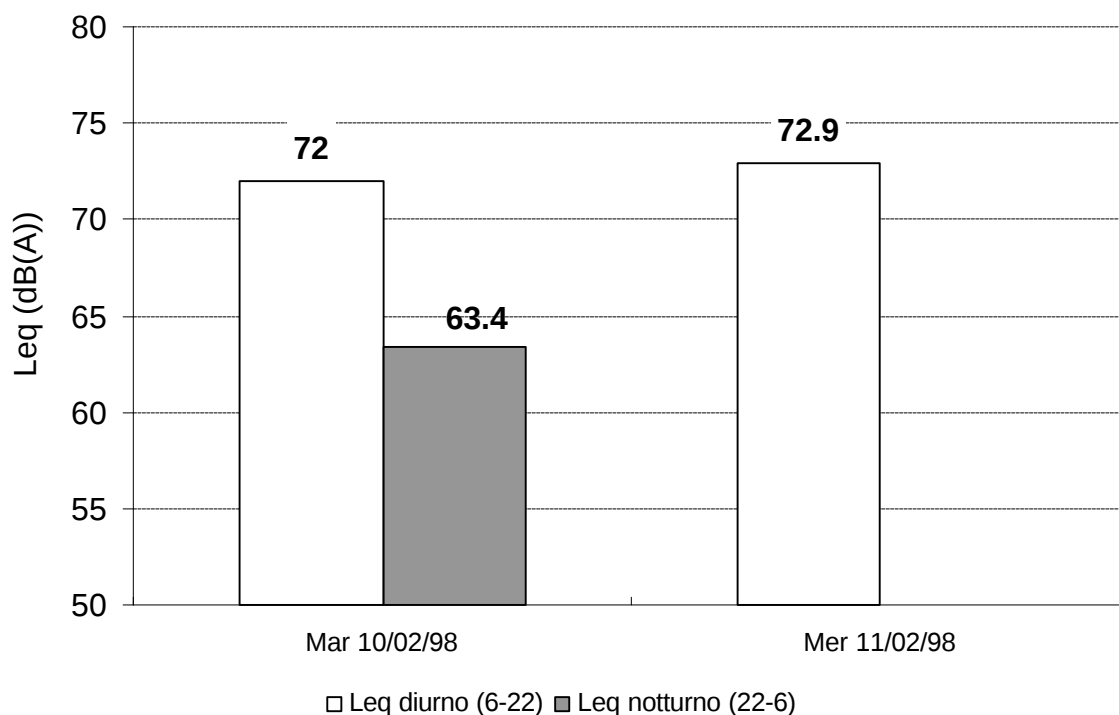
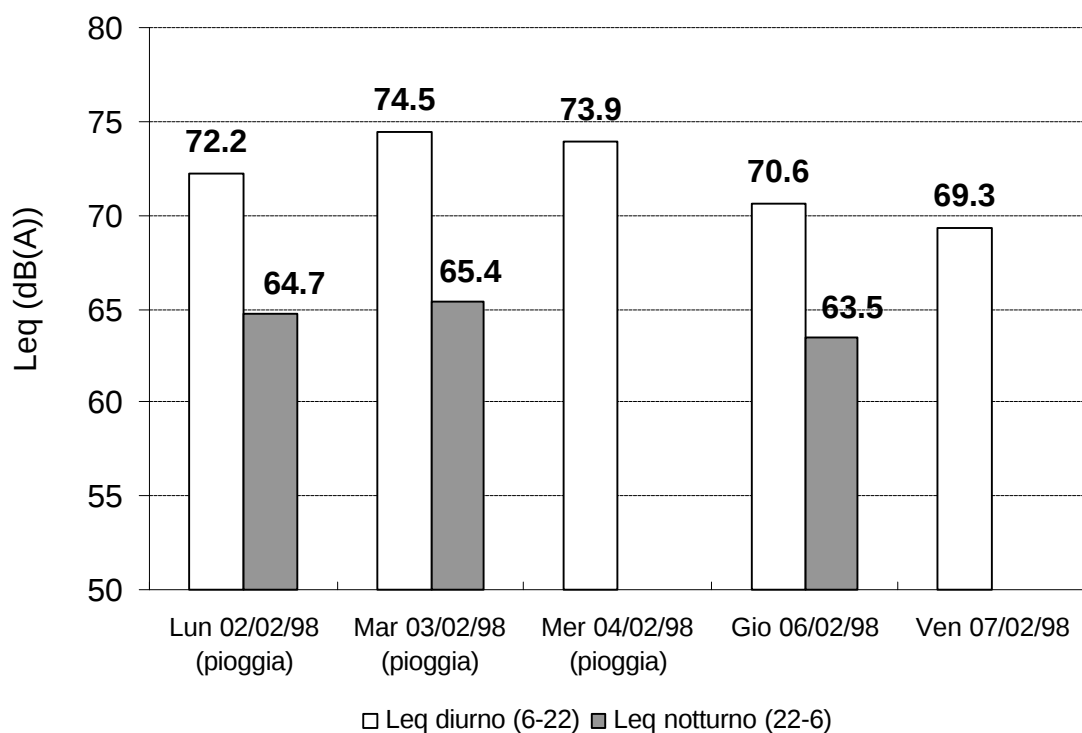
Asfalto fonoassorbente nuovo (settembre 1997)

Liceo scientifico Castelnuevo (punto 1)

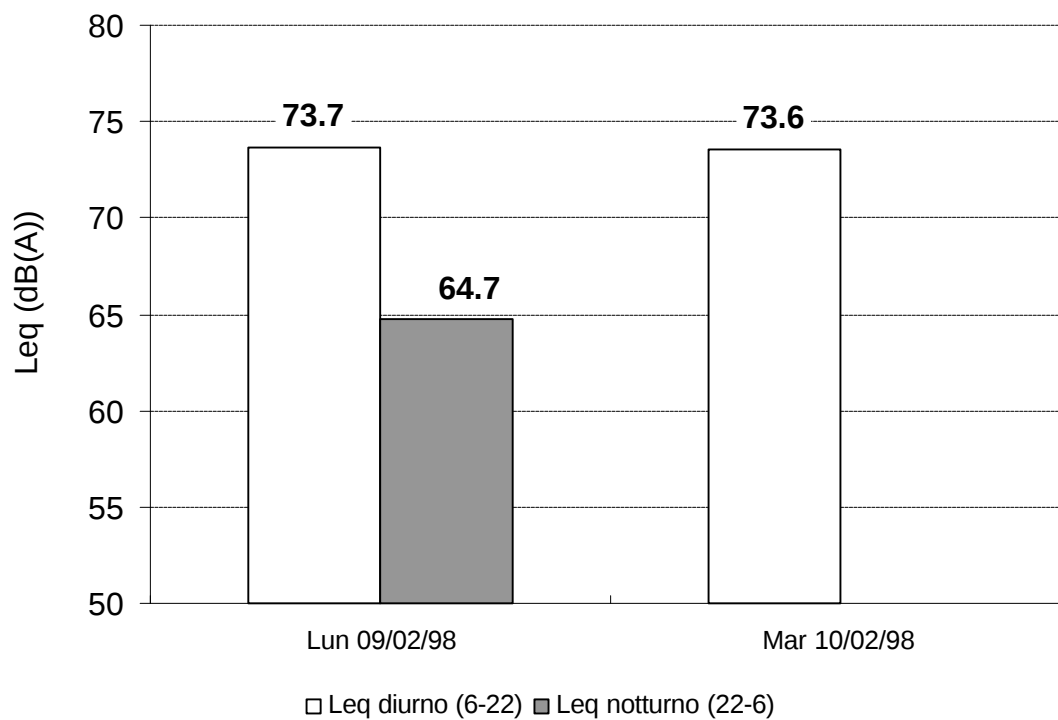


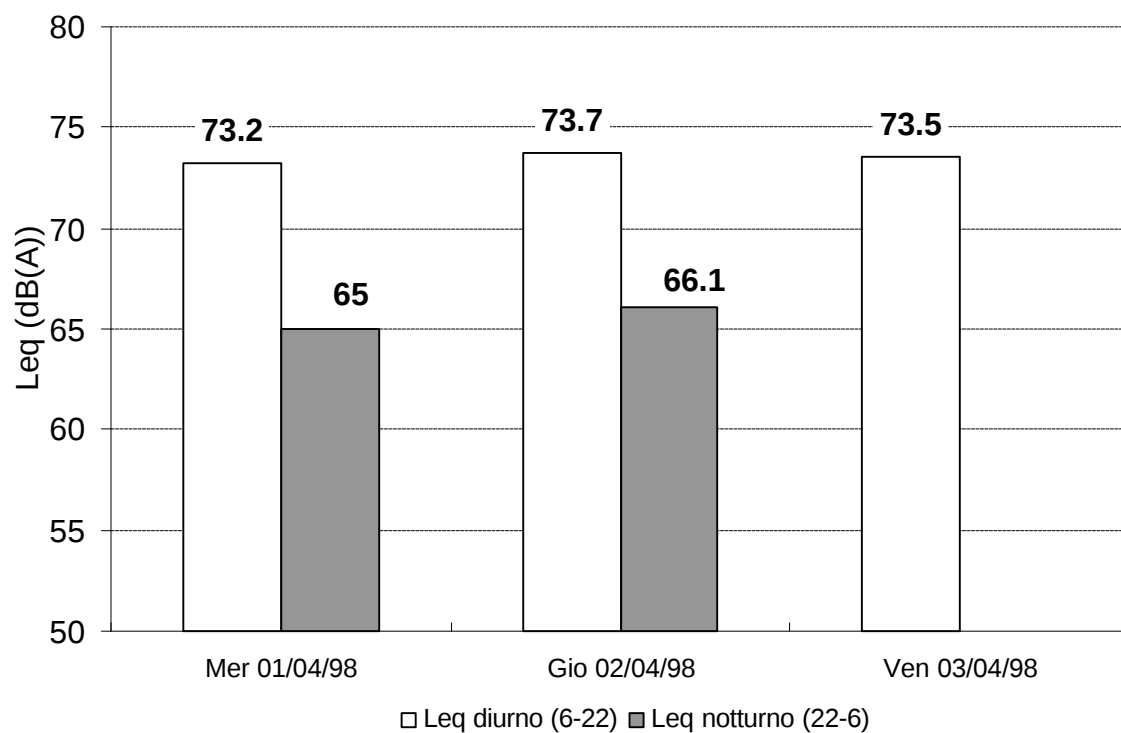
Orto botanico (punto 2)



Asfalto fonoassorbente invecchiato (febbraio 1998)**Liceo scientifico Castelnuovo (punto 1)****Orto botanico (punto 2)**

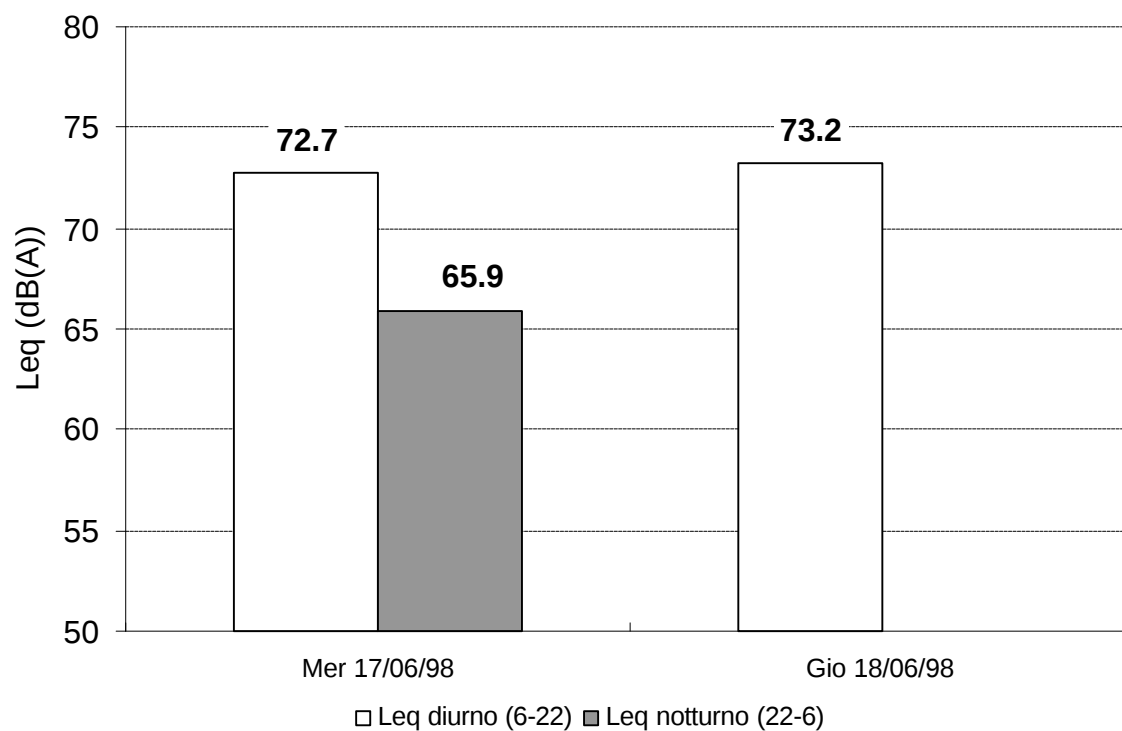
Via Lamarmora angolo via Venezia (punto 3)



Asfalto fonoassorbente invecchiato (aprile 1998)**Liceo scientifico Castelnuovo (punto 1)**

Asfalto fonoassorbente invecchiato (giugno 1998)

Liceo scientifico Castelnuevo (punto 1)



Riferimenti

- [1] AA.VV., *Linee guida per l'elaborazione di piani comunali di risanamento acustico*, Serie Linee guida ANPA 1, 1998.
- [2] P. Battini, D. Casini, C. Fagotti, A. Poggi, S. Secchi, "Contributo di un asfalto fonoassorbente a doppio strato nella riduzione di rumorosità da traffico: confronto tra dati teorici e sperimentali" in *Atti del XXVI Convegno AIA*, Torino, maggio 1998;
- [3] P. Battini, D. Casini, C. Fagotti, A. Poggi, S. Secchi, "Misure del coefficiente di assorbimento di un asfalto fonoassorbente a doppio strato" in *Atti del XXVI Convegno AIA*, Torino, maggio 1998;
- [4] AA.VV., *Bruit de contact pneumatiques/chaussées*, Déplacements CETUR n°11, 1992;
- [5] G. Camomilla, M. Malgarini, G. Dealessandri, S. Gervasio, "Ottimizzazioni delle pavimentazioni stradali fonoassorbenti", atti del seminario *Il rumore urbano un problema di salute pubblica*, Vol. II, Lucca 22/23, maggio 1992.
- [6] D. Bertoni, A. Franchini, M. Magnoni, *Studio sul comportamento acustico di asfalti particolari in ambiente urbano*, rapporto interno per il Comune di Modena;
- [7] S. Ravaioli, "Manti in doppio strato", *Le Strade*, ottobre 1996;
- [8] G. Battiato, M. Donada, P. Grandesso, M. Russiani, "Una Questione generazionale", *Le Strade*, ottobre 1996;
- [9] ISO 9053, *Acoustics – Materials for acoustical applications – Determination of airflow resistance*, 1991;
- [10] ISO/CD 14257, *Acoustics – measurement and modelling of spatial sound distribution curves in workrooms in view of the evaluation of acoustical performance of workrooms*, 1996;
- [11] ISO 9613-2, *Acoustics – attenuation of sound during propagation outdoors- part 2: general method of calculation*;
- [12] AA.VV., *Noise and vibration control engineering*, edited by L.L. Beranek and I.L. Vér, New York, John Wiley & Sons, inc., 1992;
- [13] N. Xiang, *Signal Process.*, Vol. 28, n°2, 139 (1992);
- [14] M. Garai, *Applied Acoustics* **39**, 119 (1993);
- [15] AFNOR S 31-089, *Code d'essai pour la détermination de caractéristiques acoustiques d'écrans installés en champ libre*, AFNOR, Paris, France (1990);

- [16] A. Farina, Torelli, Proceedings of the 102nd Convention AES, 22-25 march 97, Munich, Germany;
- [17] ASTM E1050 (1990) – *Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system* – ASTM, Philadelphia, USA;
- [18] ISO/DIS 10534, *Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance or admittance by the impedance tube method*, ISO, Geneva, Switzerland (1994);
- [19] A. Farina, L. Maffei, “Sound propagation outdoor: comparison between numerical predictions and experimental results”;
- [20] J.K. Chung, D.A. Blaser, *Journal of Acoustical Society of America* **68**(3), 907 (1980);
- [21] ISO 1996-2, *Acoustics – Description and measurements of environmental noise – part 2: acquisition of data pertinent to land use*;
- [22] M. Garai, O. Pinazza, “L’importanza della scelta del modello di impedenza nella valutazione dell’effetto suolo”, in *Atti del XXVI Convegno AIA*, Perugia, 1997.