

Modelli numerici per il rumore da traffico stradale e ferroviario in aree urbane

Angelo Farina,

Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Parma

viale delle Scienze - 43100 PARMA - tel. 0521 905701 fax 0521 905705

E-MAIL: farina@pcfarina.eng.unipr.it - HTTP://pcfarina.eng.unipr.it

Riassunto

Questo lavoro descrive due programmi per computer, sviluppati nell'ambito di una ricerca finanziata dal Ministero dell'Ambiente sulla bonifica acustica delle aree urbane: il primo è un modello di propagazione acustica semplificato, in grado di mappare il livello sonoro ($L_{A,eq,diurno}$ o $L_{A,eq,nott.}$) su larghe porzioni di territorio urbano. Il secondo è un codice numerico di dettaglio, basato sul nuovo algoritmo di *Pyramid Tracing*, più indicato per l'analisi particolareggiata di aree limitate, ove è necessario progettare interventi di bonifica acustica.

In questo articolo vengono descritti entrambi i programmi di calcolo, assieme con i rilievi sperimentali utilizzati per la caratterizzazione delle sorgenti di rumore urbano, e coordinati dalla società IPSE di Torino. Vengono spiegati succintamente gli algoritmi di calcolo, e vengono illustrate l'interfaccia utente e la sua interazione con altri programmi (CAD, GIS, programmi di mappatura). Vengono infine presentati alcuni dei risultati della procedura di validazione dei programmi.

1. Introduzione e scopo del lavoro

Sia nella fase di zonizzazione acustica del territorio urbano, che nella successiva fase di gestione del problema del rumore nelle aree urbane, si sente la necessità di disporre di un sistema informatico in grado di fornire la mappatura acustica del territorio. Questa può essere derivata integralmente da rilievi sperimentali, ma può essere ottenuta viceversa anche mediante l'impiego di modelli numerici, molti dei quali disponibili in Europa anche in forma di raccomandazioni ufficiali dei Ministeri competenti in vari Paesi. La superiorità della soluzione basata sul modello numerico consiste soprattutto nel fatto che essa consente il ricalcolo immediato della nuova situazione per effetto di modifiche al Piano Urbano del Traffico (P.U.T.), per effetto della edificazione di nuove costruzioni, o per la realizzazione di opere di contenimento delle emissioni sonore.

Tuttavia in passato è risultato evidente come l'impiego dei modelli di calcolo, anche i più raffinati, porti a stime della rumorosità estremamente disperse in assenza di qualsiasi forma di taratura del modello mediante rilievi sperimentali: in occasione di un *Round Robin* fra modelli di calcolo europei, alla cui organizzazione ha partecipato uno degli autori [1], è risultato che anche in casi geometricamente molto semplici si verificano differenze di 4-5 dB(A) fra i vari programmi di calcolo, e che nel caso la situazione geometrica si complichino anche di poco, queste variazioni arrivano fino a 12 dB(A). Si noti poi che le differenze riscontrate non riguardano solo la modellazione di fenomeni di propagazione a lunga distanza (che in ambito urbano sono comunque poco rilevanti), ma anche la vera e propria **emissione** da parte delle sorgenti sonore. Considerando che il *Round Robin* di cui sopra teneva in considerazione solo sorgenti di rumore legate al traffico stradale fluente (tipo autostrada), ci si aspetta una situazione ancora peggiore applicando simili modelli semplificati di emissione in campo urbano, in presenza di traffico non fluente, e magari anche in presenza di linee ferroviarie che attraversano la città.

Si è pertanto deciso di realizzare un sistema di calcolo che privilegiasse l'accuratezza nella stima delle emissioni sonore, descrivendo con grande dettaglio i tipi di sorgente e le loro modalità di emissione. È stata dunque realizzata una imponente campagna di rilievi sperimentali, onde disporre di un data-base di emissione, tarato sulla realtà italiana, e comunque sempre modificabile ed aggiornabile in funzione di ulteriori rilievi. In tal modo il modello di calcolo non contiene al suo interno le informazioni legate

all'emissione sonora, che sono viceversa disponibili come dati di ingresso, eventualmente modificabili onde adattare il funzionamento del modello a realtà urbane diverse da quelle in cui è stata condotta la sperimentazione.

Ai fini di realizzare con tempi di calcolo ragionevoli la mappatura di una intera città, si è scelto poi di impiegare i dati di emissione come *input* di un algoritmo di calcolo molto semplificato, tenuto conto del fatto che all'interno delle aree urbane non sono solitamente molto importanti i fenomeni di propagazione su lunga distanza. E' ovviamente possibile (e necessario) disporre di un modello molto più raffinato allorchè, anzichè mappare l'intera città, si decide di studiare in dettaglio un singolo gruppo di edifici, onde ad esempio verificare l'efficacia di diversi sistemi di contenimento del rumore: a questo scopo è stato realizzato un diverso programma di calcolo, di cui si relaziona nella seconda parte di questo articolo [2].

Affinchè l'operazione di mappatura dell'area urbana possa venire intrapresa in tempi ragionevoli ed a costi contenuti, è necessario che la base cartografica ed i dati di input del modello siano disponibili in forma informatizzata: pertanto il programma di mappatura del livello sonoro nelle aree urbane, che è stato battezzato CITYMAP, è stato dotato di idonea interfaccia software verso i sistemi CAD comunemente usati per applicazioni di G.I.S. (Geographical Information Services). Tramite questo collegamento, è possibile creare all'interno dei sistemi CAD l'insieme di dati geometrici (tracciato delle strade e dei binari, sorgenti di tipo industriale), agganciare alle entità geometriche i dati di emissione (traffico stradale e ferroviario, emissione delle sorgenti industriali) ed ottenere all'uscita del modello di calcolo una mappatura isolivello acustico perfettamente sovrapponibile alla cartografia digitale. Tutte queste operazioni sono possibili senza abbandonare l'ambiente *multitasking* di MS Windows, che funge da elemento di collegamento trasparente ai vari programmi.

E' ovvio come queste possibilità siano utili nella fase di classificazione del territorio di un comune in zone acustiche ai sensi del DPCM 1 marzo 1991 e della nuova Legge Quadro sull'Inquinamento Acustico (L. 26 ottobre 1995, n. 447): diviene infatti possibile porre a confronto diretto, all'interno del software di mappatura acustica, la cartografia che riporta i limiti di rumorosità con quella che riporta i livelli effettivamente esistenti sul territorio. E' possibile così ottenere automaticamente una **carta dei superamenti**, in cui vengono evidenziate con diversi colori le zone in cui la rumorosità è superiore al limite proposto. Sulla base di tale rappresentazione, sarà possibile adottare le opportune scelte tecniche, ma anche politiche: infatti l'adozione della zonizzazione acustica è un'operazione eminentemente politica (come la realizzazione di un P.R.G.), e di fronte alla possibilità di trovarsi con livelli molto più alti dei limiti su una vasta porzione del territorio, potrebbe risultare conveniente adottare classi con limiti di rumorosità più elevati, tranne che nelle zone in cui si prevede di poter effettivamente realizzare bonifiche tali da consentire il rientro nei limiti.

Per quanto riguarda invece la gestione del territorio, in seguito all'adozione della zonizzazione acustica, è evidente come sia di immediata applicazione la possibilità di ricalcolare rapidamente la nuova mappa del rumore in occasione di interventi sulle sorgenti sonore (modifica del P.U.T.), sull'edificato o in occasione della realizzazione di opere di bonifica. Queste ultime, comunque, andranno progettate facendo impiego del secondo programma di calcolo, che tiene conto di fenomeni acustici molto più complessi di quanto implementato nel programma CITYMAP.

Per tenere conto dei complessi fenomeni di riflessione e diffrazione multipla, e di attenuazione variabile con la frequenza, è stato realizzato un codice di calcolo di dettaglio per il rumore in aree urbane del tutto innovativo: esso si basa sull'algoritmo di *Pyramid Tracing*, recentemente sviluppato per applicazioni in ambienti chiusi [3,4,5,6], e che è stato verificato anche per la propagazione del rumore generato da sorgenti fisse all'aperto [7]. L'algoritmo è stato reimplementato in un nuovo programma di calcolo, che consente di gestire anche sorgenti sonore lineari dotate di direttività non uniforme, e che tiene conto anche di fenomeni di diffrazione del secondo ordine. Il nuovo programma di calcolo, denominato DISIAPYR, è stato interfacciato con il programma Citymap già descritto in [8]. In tal modo i due programmi condividono lo stesso data-base di emissione sonora, la stessa cartografia digitalizzata, e forniscono in uscita risultati del tutto compatibili sotto forma di mappature isolivello. Ovviamente Disiapyr consente di ottenere informazioni molto più dettagliate di Citymap, in particolare è disponibile in ogni punto non solo il valore in dB(A) ma anche lo spettro in ottave, ed è possibile mappare tali grandezze non solo in pianta, ma anche su piani verticali scelti dall'utente.

In questo modo Disiapyr risulta di grande utilità per la verifica dei benefici ottenibili da vari interventi di bonifica acustica ipotizzabili: pavimentazioni fonoassorbenti, rivestimenti fonoassorbenti di facciate o pareti di gallerie, barriere antirumore sottili, spesse, o di geometria complessa, sistemi di *baffles* sospesi sopra le sorgenti sonore. Inoltre le peculiari caratteristiche del modello di calcolo consentono anche di valutare la rumorosità che verrà a stabilirsi **entro locali chiusi** per effetto delle emissioni sonore all'esterno degli stessi, oppure la rumorosità **emessa verso l'esterno** da edifici al cui interno siano installate sorgenti sonore, tenendo conto sia del potere fonoisolante delle pareti, sia dei fenomeni di riverberazione all'interno dei locali.

Ovviamente a tale versatilità e completezza di risultati fa da contraltare la necessità di introdurre una notevole mole di dati, spesso di non facile reperibilità. Se per le sorgenti sonore lineari di rumore da traffico stradale e ferroviario questo problema non si pone, grazie al data-base di emissione, spettri e direttività che è stato realizzato, viceversa per le sorgenti sonore fisse è necessaria una caratterizzazione delle emissioni molto più dettagliata di quanto normalmente si trova già disponibile. Questo problema è già stato affrontato da uno degli autori [9], che ha sviluppato un sistema semplificato di misurazione delle caratteristiche di emissione delle sorgenti concentrate. Restano poi da introdurre, ad ogni frequenza, i dati relativi al coeff. di assorbimento acustico di **tutte** le superfici, nonché i valori del potere fonoisolante di quelle superfici che possono frapporsi fra una sorgente sonora ed un ascoltatore, e di cui in generale non sia trascurabile la quota di energia trasmessa per attraversamento.

Anche il dettaglio con cui si descrive la geometria del sito deve essere ben maggiore di quanto richiesto in fase di semplice mappatura acustica di una vasta area urbana: poichè il programma considera riflessioni e diffrazioni multiple, è opportuno che vengano rappresentati tutti i dettagli costruttivi: balconi, parapetti, recinzioni cieche, porte e finestre degli edifici, portici, vegetazione, etc. . Ciò indubbiamente richiede un notevole lavoro di raffinamento a partire dalla base cartografica tridimensionale comunemente disponibile, che riporta a malapena l'altezza dei fronti degli edifici, senza alcun altro dettaglio.

2. Rilievi sperimentali per la determinazione delle emissioni sonore

I modelli previsionali sviluppati si basano in primo luogo sull'esistenza di una banca dati input relativa ai livelli di emissione. Questa banca dati è infatti il frutto di regressioni effettuate su una ampia famiglia di dati di emissione rilevati al transito di veicoli isolati.

Parametrizzando le condizioni di transito è stato possibile quantificare gli effetti acustici associati ad alcune variabili: pendenza della strada, tipo di pavimentazione, velocità del flusso, tipo di veicolo. Dall'emissione dei singoli veicoli, e dal numero degli stessi che transita nel periodo di riferimento considerato (diurno o notturno), il modello calcola un valore di emissione da associare alla strada, tenendo anche conto delle caratteristiche di quest'ultima.

Per far ciò è necessario conoscere il SEL (livello di singolo evento) relativo al transito di un veicolo di ciascun tipo. Pertanto la banca dati di emissione altro non è che una raccolta di valori di SEL, relativi ai diversi tipi di veicolo, alle diverse fasce di velocità, ed agli effetti delle variabili di cui sopra.

Pertanto i rilievi sperimentali sono consistiti nella misurazione di un grande numero di passaggi singoli di veicoli (sia stradali che ferroviari), di ciascuno dei quali è stato misurato il profilo temporale, e dunque il SEL. Ovviamente ciò è possibile soltanto in presenza di transiti isolati in contesti ambientali standardizzati.

2.1 Rumore da traffico stradale

La distinzione tra rilievi urbani ed extraurbani è in questo caso finalizzata essenzialmente alla possibilità di individuare in questi diversi contesti transiti a velocità medio-basse (ambiente urbano, classi di velocità C1-C4) e transiti a velocità medio-alte (ambiente extra-urbano, classi C5-C8), anche se in realtà tutti questi dati servono poi per calcoli del rumore soltanto in ambito urbano.

In entrambi i casi viene caratterizzato l'effetto pendenza della sede stradale (+5% e -5%). Nel caso urbano viene inoltre caratterizzato l'effetto della superficie stradale in pavé; nel caso autostradale viene caratterizzata la superficie stradale con pavimentazione di tipo drenante-fonoassorbente.

Per la gestione del database di input del modello si è reso necessario uniformare la classificazione dei transiti rilevati. Ne risulta come riferimento lo schema che segue per il riconoscimento delle tipologie di superficie stradale, per la classificazione dei veicoli e per l'identificazione delle classi di velocità.

TIPO DI SEDE STRADALE

- A1 - condizione standard 1: pavimentazione bituminosa tradizionale, pendenza nulla;
- A2 - condizione parametrica 2- pavimentazione bituminosa tradizionale, pendenza +5%;
- A3 - condizione parametrica 3- pavimentazione bituminosa tradizionale, pendenza -5%;
- A4 - condizione parametrica 4- pavimentazione in pavé, pendenza nulla;
- A5 - condizione parametrica 5- pavimentazione bituminosa fonoassorbente, pendenza nulla.

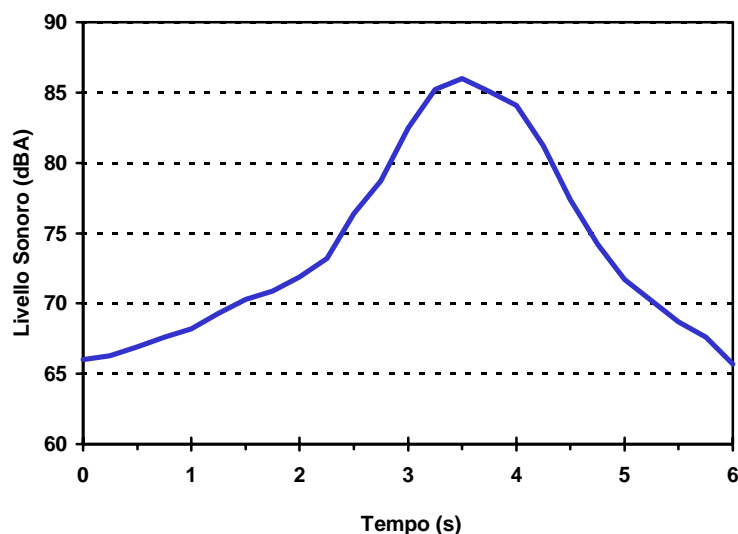
CATEGORIA DI VEICOLI

- V1 - autovetture e veicoli commerciali fino a 5 t;
- V2 - veicoli commerciali medi, con 2 assi più di 4 ruote, autobus extraurbani;
- V3 - veicoli commerciali medio-pesanti, con 3 o più assi e peso totale fino a 10 t;
- V4 - veicoli pesanti con più di 3 assi, con rimorchi o semirimorchi;
- V5 - motocicli.

FASCE DI VELOCITA'

- C1 - $0 < V \leq 25$ km/h in accelerazione;
- C2 - $25 < V \leq 50$ km/h in accelerazione;
- C3 - $0 < V \leq 25$ km/h in decelerazione;
- C4 - $25 < V \leq 50$ km/h in decelerazione;
- C5 - $50 < V \leq 70$ km/h;
- C6 - $70 < V \leq 90$ km/h;
- C7 - $90 < V \leq 110$ km/h;
- C8 - $V > 110$ km/h.

La metodologia di rilievo prevede l'utilizzo di un microfono posizionato a 7.5m dal centro della corsia di misura, ed 1.2 m al di sopra del piano stradale. Il sito presenta un tratto rettilineo, omogeneo, privo di ostacoli o superfici riflettenti lungo almeno 100m, al cui centro è collocata la postazione di rilievo. Ad essa è associato un sistema di cronometraggio a fotocellula per la determinazione della velocità di ciascun veicolo in transito. La seguente figura riporta un tracciato temporale relativo al passaggio di un veicolo, utilizzato per il calcolo del SEL.



Profilo temporale del passaggio di un autoveicolo - d=7.5 m

I dati di emissione acquisiti sono stati organizzati in forma parametrizzata estraendo per ogni tipo di veicolo ed ogni classe di velocità un valore medio di SEL ottenuto come media logaritmica dei valori cor-

rispondenti dei singoli transiti. In corrispondenza di ciascun SEL medio sono inoltre riportate le corrispondenti correzioni medie associate agli effetti considerati: correzione pavé, asfalto fonoassorbente, discesa e salita. In realtà oltre che misurare soltanto il SEL in dB(A), ciascun rilievo, effettuato tramite analizzatore di spettro in tempo reale, ha fornito un **spettro di SEL**, ed analogamente è stato ottenuto un spettro per ciascuna delle 4 correzioni di cui sopra. Ovviamente il programma Citymap utilizza soltanto il valore in dB(A) sia del SEL medio di emissione, sia delle 4 correzioni.

La seguente tabella riporta il numero di passaggi singoli di cui è stata prevista la misura per ciascuna categoria di veicoli e per ciascuna classe di velocità:

Condizione	Tipo veicolo	Cl.Vel. C1	Cl.Vel. C2	Cl.Vel. C3	Cl.Vel. C4	Cl.Vel. C5	Cl.Vel. C6	Cl.Vel. C7	Cl.Vel. C8	Totale
A1	V1	200	200	200	200	200	200	200	200	400
	V2	50	50	50	50	50	50	50	50	400
	V3	50	50	50	50	50	50	50	50	400
	V4	50	50	50	50	50	50	50	50	400
	V5	40	40	40	40	40	40	40	40	320
A2	V1	100		100		100		100		400
	V2	30		30		30		30		120
	V3	30		30		30		30		120
	V4	30		30		30		30		120
	V5	20		20		20		20		80
A3	V1	100		100		100		100		400
	V2	30		30		30		30		120
	V3	30		30		30		30		120
	V4	30		30		30		30		120
	V5	20		20		20		20		80
A4	V1	100		100		100		100		400
	V2	30		30		30		30		120
	V3	30		30		30		30		120
	V4	30		30		30		30		120
	V5	20		20		20		20		80
A5	V1	100		100		100		100		400
	V2	30		30		30		30		120
	V3	30		30		30		30		120
	V4	30		30		30		30		120
	V5	20		20		20		20		80
		1620		1620		1620		1620		6480

Rispetto al numero complessivo di rilievi previsti, alcune combinazioni parametriche meno usuali (transiti veloci di mezzi pesanti su strada con pavé o di veicoli in accelerazione su pavimentazione drenante) sono risultate prive di rilievi validi. In questi casi i dati mancanti per la costruzione del data-base sono stati ottenuti mediante tecniche numeriche di interpolazione e/o estrapolazione, sulla base dei dati validi ottenuti nelle classi di velocità contigue. Questo fatto sta peraltro a significare che c'è ancora spazio per un affinamento del data-base di emissione, non appena i risultati di nuove campagne di rilievo saranno disponibili.

Ciascun spettro di SEL con le relative 4 correzioni è organizzato in un file .TXT utilizzato come input da entrambi i modelli di calcolo. Il singolo file è denominato SELSCiVj.txt dove SEL indica la grandezza acustica, S sta per *strada*, C_i è la i-esima fascia di velocità, V_j è la j-esima categoria di veicoli. In totale sono stati ottenuti 40 di questi files (8 fasce di velocità x 5 classi di veicoli), ciascuno dei quali contiene 5 spettri in bande d'ottava + banda "A". La seguente tabella riporta a titolo di esempio i valori contenuti nel file SELSC8V1.TXT (autoveicoli alla massima velocità):

SC8V1									
Condizione	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	dB(A)
Asfalto Liscio	81.7	87.4	81.4	76.2	75.1	73.8	70.6	71.1	81.3
Corr. Pavé'	+1.1	+1.2	+2.1	+2.3	+1.5	+1.6	+1.8	+1.3	+1.9
Corr. Asf.Ass.	-0.1	-0.3	-1.1	-1.8	-2.4	-2.1	-1.2	-1.3	-1.4
Corr. Salita 5°	+2.2	+2.4	+3.1	+2.1	+2.0	+1.3	+1.6	+1.4	+2.2
Corr. Discesa 5°	-1.2	-1.3	-0.8	-1.1	+1.0	-0.2	+0.7	+0.8	+0.1

2.2 Rumore da traffico ferroviario

Anche in questo caso sono stati condotti rilievi su singoli passaggi, ma si è dovuto tenere conto della lunghezza variabile dei singoli convogli, normalizzando i valori di SEL rilevati ad una lunghezza standard del convoglio di 100m tramite la relazione:

$$SEL_{norm} = SEL_{sper} + 10 \cdot \lg \left[\frac{100}{L_{eff}} \right]$$

In questo modo è stato possibile mediare energeticamente i valori di SEL ottenuti da passaggi di convogli dello stesso tipo, nella stessa fascia di velocità ma di lunghezza diversa.

Per quanto riguarda il tipo di sede ferroviaria viene caratterizzato l'effetto dovuto a due distinte tipologie di armamento: rotaie lunghe saldate su traversine in c.l.s. + ballast, e rotaie corte con presenza di scambi/deviatoi/incroci. Ne risulta come riferimento lo schema che segue per il riconoscimento delle tipologie di armamento, per la classificazione dei convogli e per l'identificazione delle classi di velocità.

TIPOLOGIA DI ARMAMENTO

A1 - rotaie lunghe saldate su traversine in c.l.s. e ballast;

A2 - rotaie corte con presenza di scambi/deviatoi/incroci.

CATEGORIA DI VEICOLI

V1 - treni merci;

V2 - treni passeggeri a breve percorso (composizione bloccata);

V3 - treni passeggeri a lungo percorso (composizione variabile);

FASCE DI VELOCITÀ

C1 - $V \leq 60$ Km/h;

C2 - $60 < V \leq 90$ Km/h;

C3 - $90 < V \leq 120$ Km/h;

C4 - $V > 120$ Km/h.

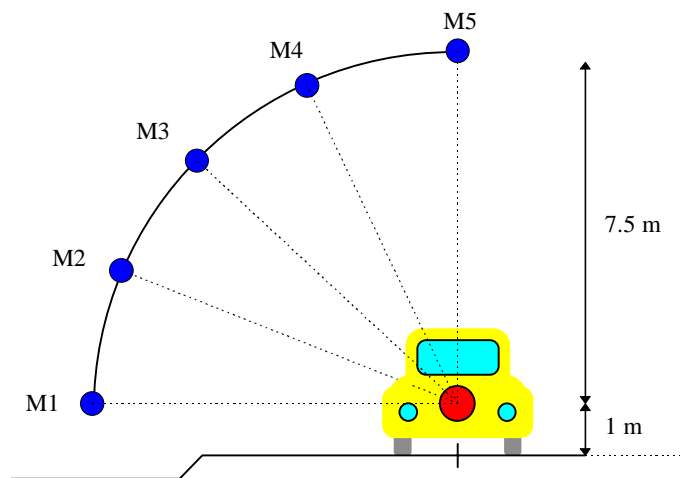
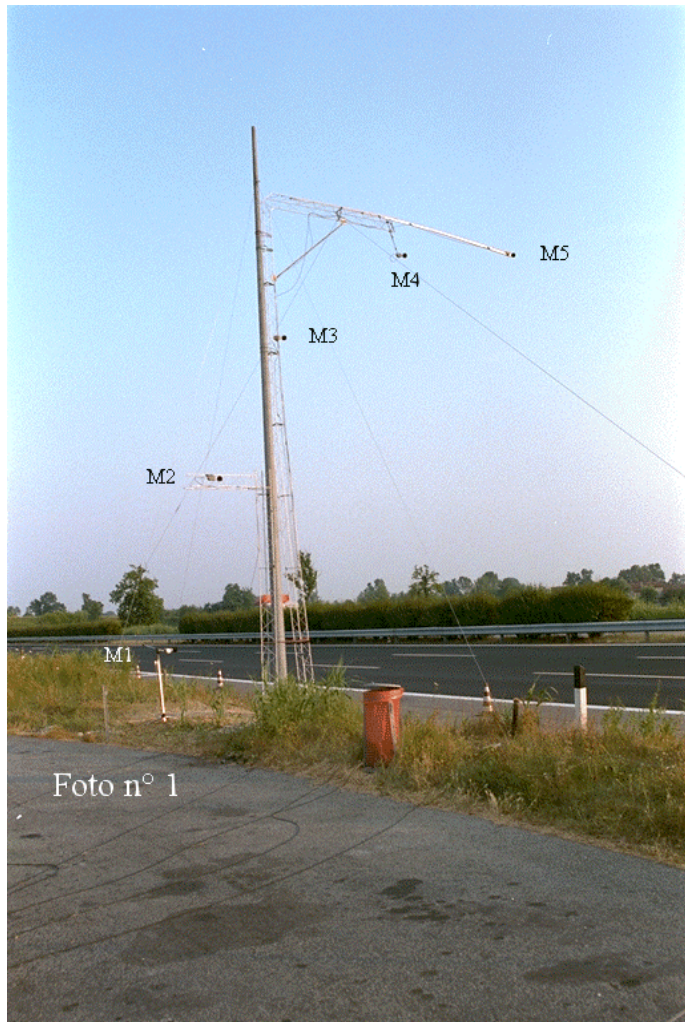
La seguente tabella riporta il numero di passaggi singoli elaborati per ciascuna categoria di veicoli e per ciascuna classe di velocità:

Condizione	Tipo Veicolo	Cl. vel. C1	Cl. vel. C2	Cl. vel. C3	Cl. vel. C4	Totale
A1 (binario continuo)	V1	60	60	40	40	200
	V2	60	60	60	40	220
	V3	40	60	60	60	220
A2 (scambi)	V1	40	40	30	30	140
	V2	40	40	40	30	150
	V3	30	40	40	40	150
Totale		270	300	270	240	1080

Ciascun spettro di SEL con le relative correzioni è organizzato in un file .TXT utilizzato come input da entrambi i modelli di calcolo (ovviamente Citymap impiega solo il valore complessivo in dBA di ciascuno spettro). Il singolo file è denominato SELTCiVj.txt dove SEL indica la grandezza acustica, T sta per treno, C_i è la i-esima fascia di velocità, V_j è la j-esima categoria di veicoli. In totale sono stati ottenuti 12 di questi files (4 fasce di velocità x 3 classi di veicoli), ciascuno dei quali contiene 3 spettri in bande d'ottava + banda "A". La seguente tabella riporta a titolo di esempio i valori contenuti nel file SELTC1V3.TXT (treni passeggeri lunga percorrenza alla velocità più bassa):

TC1V3									
Condizione	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	dB(A)
BASE	84.1	81.7	87.3	86.2	86.2	83.5	80.5	72.9	93.3
Corr. Scambio	+3.1	+4.7	+2.6	+1.7	+1	+0.8	+2.3	+3.6	+1.0

2.3 Direttività delle sorgenti di rumore stradale



co della sorgente sonora come centro geometrico.

La posizione di quest'ultimo è stata definita ad 1 m di altezza dal piano stradale ed al centro della corsia più prossima alla postazione microfonica.

Le posizioni microfoniche sono equidistanti lungo l'arco di circonferenza, in modo che le rispettive congiungenti con il centro geometrico formino tra loro angoli uguali, pari a 22.5°.

Allo scopo di caratterizzare acusticamente la direttività del traffico stradale, ed in particolare l'emissione sonora tipica delle 5 differenti categorie di veicoli, sono stati individuate due tipologie di sito adeguate per il rilevamento dei transiti alle diverse velocità (basse ed alte).

Per quanto riguarda le velocità elevate, i rilevamenti sono stati eseguiti in autostrada, in una tratta con geometria a raso, tale da non generare indesiderati effetti schermanti o di riflessione, basso rumore di fondo ed un modesto traffico giornaliero. Queste ultime due caratteristiche hanno una notevole importanza poiché consentono di isolare il singolo evento sonoro (il singolo transit) sia dagli altri eventi (basse probabilità di transiti contemporanei) sia dal rumore di fondo stesso.

In merito ai transiti a bassa velocità è stato invece scelto un tratto di strada provinciale, con caratteristiche geometriche e di traffico analoghe a quelle sopra descritte.

In ciascuno dei due siti è stata installata la strumentazione atta ad acquisire i dati relativi alla direttività dell'emissione sonora ed alla velocità dei veicoli in transit.

Tale strumentazione, appositamente studiata in funzione dell'obiettivo del presente studio, è sostanzialmente costituita da un "array" di 5 microfoni (ved. foto a lato) facenti capo ad un registratore multicanale ed un sistema di fotocellule disposte a monte ed a valle della postazione di misura, distanti fra di loro 80 m. Il registratore multicanale ed il terminale di decodifica dei segnali provenienti dalle fotocellule sono stati collocati, unitamente alla strumentazione accessoria, all'interno di un veicolo adibito a laboratorio mobile.

I 5 microfoni costituenti l'array sono stati disposti, come rappresentato nello schema qui sotto, secondo un arco di cerchio pari ad un quarto di circonferenza, avente raggio 7.5 m ed il centro acustico

Coerentemente con la geometria del sistema di misura così impostato, sono stati assunti come significativi i soli transiti avvenuti nella corsia di marcia più prossima alla postazione microfonica: ciò significa che per i rilevamenti autostradali è stata presa in considerazione solamente la corsia di marcia lenta.

A tale proposito è opportuno segnalare che, essendo detta corsia utilizzata prevalentemente da mezzi pesanti con velocità non molto elevate, per alcune ore della giornata, nei periodi di minore intensità del traffico, è stata disposta la chiusura di una o di entrambe le restanti corsie, in modo tale da obbligare anche i veicoli passeggeri a transitare sulla prima corsia.

I rilevamenti sono stati quindi eseguiti sull'arco delle 24 ore per una durata di 3 giorni per ciascuno dei due siti di misura.

Prima di iniziare i rilevamenti le cinque catene fonometriche sono state calibrate mediante un calibratore Brüel & Kjær tipo 4230. La calibrazione è stata ripetuta due volte al giorno, accedendo ai microfoni con l'ausilio di uno "Sky-Walker".

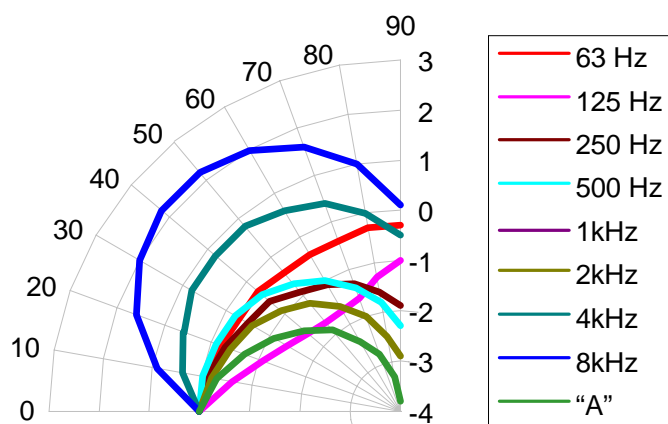
Successivamente alla calibrazione si è proceduto ai rilevamenti, attivando il registratore digitale in corrispondenza dei singoli transiti, per un tempo sufficiente ad acquisire l'intero evento sonoro.

Contemporaneamente veniva rilevata la velocità di transito a mezzo di un cronometro, attivato dal passaggio del veicolo davanti alla prima fotocellula, sita 40 m a monte della postazione microfonica, ed arrestato dal passaggio del veicolo davanti alla seconda fotocellula, posta 40 m a valle dell'array di microfoni.

I segnali registrati sui cinque canali, corrispondenti ai cinque microfoni, sono stati successivamente elaborati ricavando, per ciascun canale:

- la composizione spettrale per bande di terzi di ottava;
- l'andamento nel tempo del livello di pressione sonora ponderato "A" (time history);
- il massimo livello di pressione sonora ponderato "A" (Lmax);
- il SEL (Single Event Level), espresso in dB(A).

Le composizioni spettrali ricavate in fase di elaborazione sono state invece opportunamente mediate e ricondotte mediante interpolazione ad una curva rappresentativa delle caratteristiche di direttività di ciascun tipo di transito (categoria del veicolo + classe di velocità), in funzione di angolo e banda di frequenza. L'operazione consiste nel calcolare la differenza fra il livello misurato sui microfoni 2-5 e quello misurato sul microfono 1, assunto come riferimento. E' stato poi operato un raffittimento numerico dei dati, in modo che la direttività risulti espressa in funzione dell'angolo rispetto all'orizzontale, da 0° a 90° con passi di 10°.



I dati così ottenuti sono stati implementati nella banca dati di input costituente la base di riferimento per i modelli previsionali, in ulteriori 40 files denominati DIRSCiVj.TXT. Ciascuno di questi files contiene 10 spettri di direttività, per angoli variabili da 0° a 90°, anche se ovviamente il primo spettro è costituito solo da valori nulli, in quanto corrisponde alla direzione di riferimento.

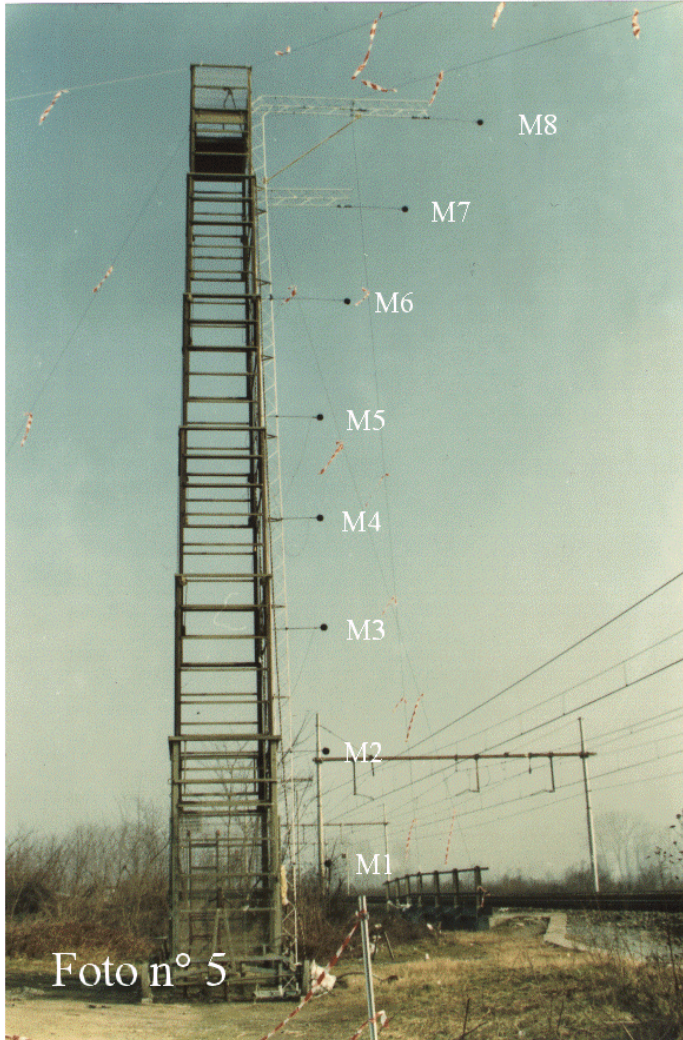
La figura a lato illustra i valori di direttività in dB ottenuti, alle varie frequenze, per i veicoli di tipo V1 (autovetture) nella fascia di velocità più elevata (C8): file DIRSC8V5.TXT.

Ovviamente oltre che per la determinazione delle direttività i rilievi eseguiti hanno contribuito anche alla definizione dei livelli di emissione, per i quali si sono utilizzati soltanto i dati rilevati dal microfono n. 1.

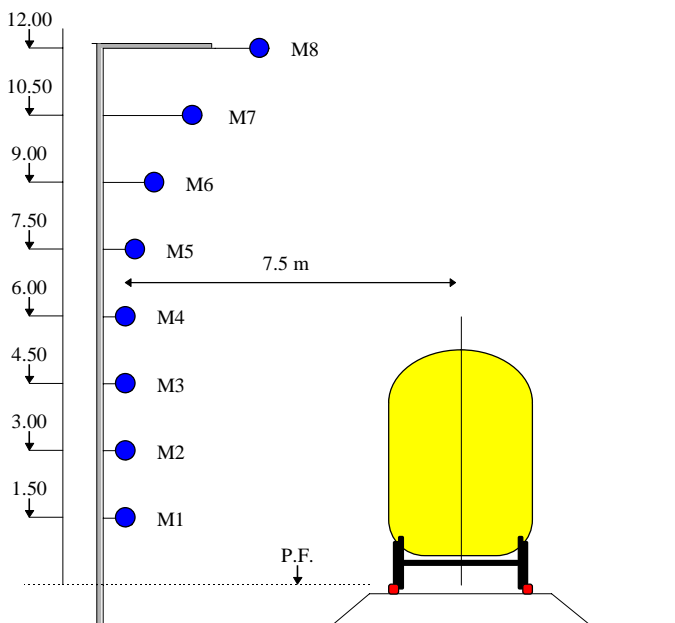
2.4 Direttività delle sorgenti di rumore ferroviario

I criteri utilizzati per la caratterizzazione acustica del traffico ferroviario sono sostanzialmente simili a quelli descritti al precedente paragrafo relativi al traffico stradale.

In particolare, in questo caso, tenendo conto del fatto che su una singola linea ferroviaria si verifica, nell'arco della giornata, un numero relativamente ridotto di transiti e con composizioni almeno in parte simili fra loro, si è ritenuto opportuno effettuare i rilevamenti su due differenti linee, in modo tale da acquisire dati acustici relativi al maggior numero di tipologie di treni, al fine di migliorare l'attendibilità, in termini statistici, dei risultati dello studio.



riportato, in modo tale da risultare quanto più possibile



Allo scopo sono stati individuati due siti con geometria a raso almeno entro un raggio di 25 m dai punti di misura, in modo tale da rispettare quanto più possibile le condizioni di propagazione acustica in campo libero ed evitare indesiderati effetti schermanti o di riflessione dovuti alla presenza di fabbricati e/o irregolarità del terreno. E' stato inoltre verificato che il livello del rumore di fondo fosse trascurabile rispetto al livello di pressione sonora immesso dal transito dei treni.

In ciascuno dei due siti è stata installata la strumentazione atta ad acquisire i dati relativi alla direttività dell'emissione sonora ed alla velocità dei convogli in transito.

Tale strumentazione, appositamente studiata in funzione dell'obiettivo del presente lavoro, è sostanzialmente costituita da un "array" di 8 microfoni (vedi foto a lato) facenti capo ad un registratore digitale multicanale ed un sistema di fotocellule disposte a monte ed a valle della postazione di misura, distanti fra di loro 100 m. Il registratore multicanale ed il terminale di decodifica dei segnali provenienti dalle fotocellule sono stati collocati, unitamente alla strumentazione accessoria, all'interno di un veicolo adibito a laboratorio mobile.

Gli 8 microfoni costituenti l'array sono stati disposti come rappresentato nello schema qui sotto equidistanti dalla sagoma limite dei convogli. Per motivi di sicurezza connessi con la presenza della linea aerea a 3000 V c.c. non è stato possibile estendere l'indagine a punti situati in corrispondenza dell'asse del binario.

Coerentemente con la geometria del sistema di misura così impostato, sono stati assunti come significativi i soli transiti avvenuti sul binario più prossimo alla postazione microfonica.

I rilevamenti sono stati quindi eseguiti sull'arco delle 24 ore per una durata di 3 giorni per ciascuno dei due siti di misura. In tale lasso di tempo sono compresi giorni festivi, per tener conto delle relative variazioni di traffico.

Prima di iniziare i rilevamenti le otto catene fonometriche sono state calibrate mediante un calibratore Brüel & Kjær tipo 4230. La calibrazione

è stata ripetuta più volte al giorno, accedendo ai microfoni con l'ausilio di un traliccio telescopico.

Successivamente alla calibrazione si è proceduto ai rilevamenti, attivando il registratore digitale in corrispondenza dei singoli transiti, per un tempo sufficiente ad acquisire l'intero evento sonoro.

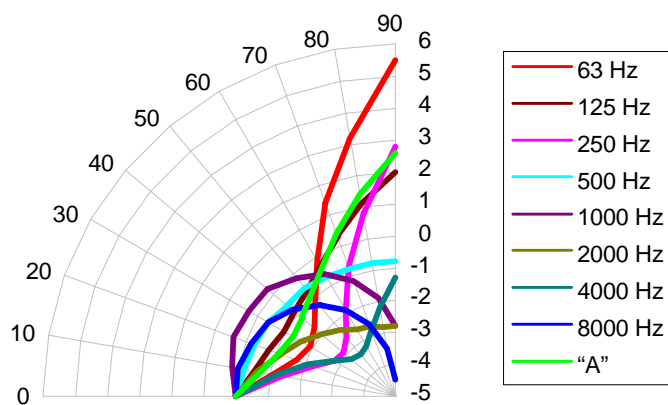
Contemporaneamente veniva rilevata la velocità di transito a mezzo di un cronometro, attivato dal passaggio del convoglio davanti alla prima fotocellula, sita 50 m a monte della postazione microfonica, ed arrestato dal passaggio del treno davanti alla seconda fotocellula, posta 50 m a valle dell'array di microfoni.

I segnali registrati sugli otto canali, corrispondenti agli otto microfoni, sono stati successivamente elaborati ricavando, per ciascun canale:

- la composizione spettrale per bande di terzi di ottava;
- l'andamento nel tempo del livello di pressione sonora ponderato "A" (time history);
- il massimo livello di pressione sonora ponderato "A" (L_{max});
- il SEL (Single Event Level), espresso in dB(A).

Le composizioni spettrali ricavate in fase di elaborazione sono state opportunamente mediate e ricondotte ad una curva rappresentativa delle caratteristiche di direttività di ciascun tipo di transito (categoria del veicolo + classe di velocità), in funzione di angolo (da -0° a 90° con passo di 10°) e banda di frequenza di ottava.

Poiché il modello previsionale richiede omogeneità nella banca dati di input, per coerenza con i dati di direttività relativi al traffico stradale ed ai riferimenti generali del programma, i valori di direttività rilevati secondo la geometria già descritta, sono stati normalizzati rispetto ad un sistema di riferimento la cui origine giace su un piano posto ad 1 m da terra, ad una distanza di 7.5 m dall'asse della via di corsa.



I dati così ottenuti sono stati implementati nella banca dati di input costituente la base di riferimento per i modelli previsionali, sotto forma di 12 files denominati DIRTCiVj.TXT. Ciascuno di questi files contiene 10 spettri di direttività, per angoli variabili da 0° a 90° , anche se ovviamente il primo spettro è costituito solo da valori nulli, in quanto corrisponde alla direzione di riferimento.

La figura a lato illustra i valori di direttività in dB ottenuti, alle varie frequenze, per i veicoli di tipo V3 (treni passeggeri lunga percor.) nella fascia di velocità più bassa (C1): file DIRTC1V3.TXT.

Ovviamente oltre che per la determinazione delle direttività i rilievi eseguiti hanno contribuito anche alla definizione dei livelli di emissione, per i quali si sono utilizzati soltanto i dati rilevati dal microfono n. 1.

3. Algoritmo di calcolo del programma Citymap

Ogni tratto stradale (o ferroviario) è costituito da una "polyline" piana (non 3DPOLY) sul piano $z=0$ e sul layer "STRADE" (o "BINARI") (il modello è bidimensionale, per cui anche se c'è una quota diversa da 0 essa viene ignorata), divisa in numerosi tratti. Dal punto di vista geometrico, ciascun tratto è caratterizzato dalle coordinate dei suoi due estremi, nonché dalla larghezza (se la larghezza iniziale è diversa da quella finale, viene assunto il valore medio). Le informazioni suddette sono desunte dal file .DXF.

All'interno di CityMap vengono poi aggiunte le informazioni di rilevanza acustica, che sono differenti per le strade e le ferrovie. In particolare, per ciascuna categoria di veicoli, viene assegnato il numero degli stessi che transita nel periodo diurno e notturno, la classe di velocità, nonché alcune informazioni morfologiche (pendenza, tipo di pavimentazione o di armamento, altezza degli edifici, etc.).

Il primo problema è dunque calcolare il livello equivalente medio a 7.5m dalla strada (o dalla ferrovia) a partire dai SEL unitari esistenti nel data-base di emissione. A tal proposito si ha questa relazione, valida per il periodo diurno:

$$L_{eq,7.5m} = 10 \cdot \lg \left[\sum_{i=1}^5 \left(10^{\frac{SEL_i + \Delta L_{asfalto,i} + \Delta L_{pendenza,i}}{10}} \cdot \frac{N_i}{16 \cdot 3600} \right) \right]$$

Chiaramente nel periodo notturno il numero di ore è pari ad 8 anzichè a 16. Si deve inoltre tenere conto che sia i valori di SEL per i 5 tipi di veicoli, sia i corrispondenti termini correttivi per tipo di asfalto e/o pendenza della strada, sono in generale dipendenti dalla classe di velocità assegnata al corrispondente tipo di veicoli. Pertanto essi andranno letti dal file relativo alla opportuna classe di velocità.

Per quanto riguarda il rumore ferroviario, va osservato che i valori di SEL sono normalizzati ad una lunghezza fissa dei convogli, pari a 100 m. Pertanto è necessario tenere conto della lunghezza effettiva dei convogli, in rapporto al valore fisso pari a 100:

$$L_{eq,7.5m} = 10 \cdot \lg \left[\sum_{i=1}^3 \left(10^{\frac{SEL_i + \Delta L_{binario,i} + \Delta L_{pendenza,i}}{10}} \cdot \frac{N_i}{16 \cdot 3600} \cdot \frac{L_i}{100} \right) \right]$$

Una volta ottenuto il Livello equivalente a 7.5 m, non viene considerata alcuna altra differenza fra strade e binari, e la trattazione del rumore emesso da entrambi è dunque unificata. CityMap non tiene conto nè della composizione in frequenza del rumore emesso, nè della direttività dei diversi tipi di sorgenti sonore.

Per operare il calcolo del livello sonoro in ciascun punto della griglia di calcolo, si considera il contributo di tutti i singoli tratti di tutte le strade e binari.

Si verifica anzitutto che la distanza dal centro del tratto al punto di calcolo considerato sia almeno doppia della lunghezza del tratto; se così non è, si procede suddividendo il tratto in due sottotratti uguali, per ciascuno dei quali viene ripetuto tale controllo, eventualmente suddividendo ulteriormente i sottotratti finchè essi non divengono abbastanza corti. In questo modo il raffittimento viene operato soltanto per i tratti più vicini al punto di calcolo.

Si considera un singolo contributo di energia sonora da ciascun sottotratto, come se ci fosse una sorgente concentrata nel suo centro. Il Livello di Potenza L_W di tale sorgente concentrata può essere ottenuta a partire dal Livello di Potenza per metro $L_{W,1m}$ del tratto considerato, a sua volta legato al Livello equivalente a 7.5m dalla relazione:

$$L_{W,1m} = L_{eq,7.5m} + 10 \cdot \lg(\pi \cdot 7.5)$$

Considerando poi la lunghezza l del tratto, si ottiene il livello di potenza complessivo del tratto:

$$L_W = L_{W,1m} + 10 \cdot \lg(l)$$

La propagazione è considerata di tipo sferico con però l'aggiunta di un termine esponenziale di estinzione con la distanza per modellare l'attenuazione in eccesso, e pertanto fornisce questo valore di Livello Equivalente nel punto di calcolo situato a distanza d dal centro del tratto:

$$L_{eq} = L_W + 10 \cdot \lg \left(\frac{e^{-\beta \cdot d}}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \right)$$

Un valore di prima stima per la costante b è pari a 0.007; tale valore è tratto dai risultati di ricerche condotte sulla propagazione del rumore nell'ambito di attività estranee al presente progetto di ricerca.

Passando dalla rappresentazione in dB a quella in pseudo-energia, si ricava globalmente questa espressione:

$$E_d = E_{7.5m} \cdot \frac{\pi \cdot 7.5 \cdot l}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot e^{\beta \cdot d}$$

Rimane da considerare l'eventuale effetto di schermatura causato dagli edifici situati lungo la strada, caratterizzati da una opportuna altezza media. Ciò viene fatto considerando valida una relazione derivata dalla nota formula di Maekawa, che fornisce l'attenuazione ΔL prodotta dalla schermatura:

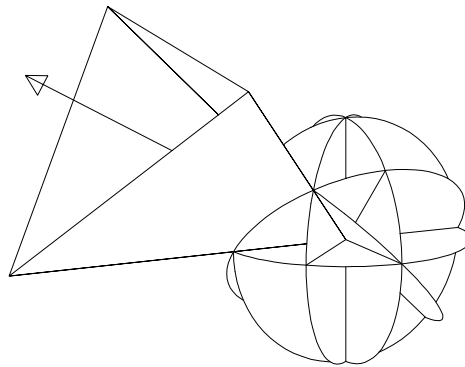
$$\Delta L = 10 \cdot \lg \left(1 + 40 \cdot \delta \cdot \frac{f}{c} \right)$$

La frequenza viene assunta pari a 340 Hz, e la differenza di cammino viene calcolata come somma dei due raggi diffratti meno il raggio diretto.

Vengono infine applicate correzioni per riflessioni multiple nel caso la sede stradale presenti una sezione ad L, ad U largo o ad U stretto pari rispettivamente a +1, +3 e +5 dB(A).

4. Algoritmo di calcolo del programma Disiapyr

Si tratta di un tracciatore di piramidi, concettualmente non molto diverso da altri programmi di "ray tracing" in cui vengono tracciati fasci sottili o fasci divergenti conici. A partire da ciascuna sorgente puntiforme, viene generato un certo numero di piramidi triangolari, ottenute dall'uniforme suddivisione della superficie di una sfera, come mostrato da questa figura:



Si segue poi sempre la storia del raggio centrale della piramide, ed i raggi corrispondenti agli spigoli vengono così riflessi sulle superfici colpite dal raggio centrale (anche se gli stessi impatterebbero su superfici diverse). Ad ogni impatto si calcola la quota di energia assorbita dalla superficie (ad ogni singola frequenza, in bande d'ottava), ed il raggio viene riflesso secondo la legge speculare.

Allorchè un ricevitore si viene a trovare all'interno del fascio piramidale, esso viene a ricevere un contributo di energia dato dalla potenza sonora iniziale, ridotta per la divergenza sferica, per le successive riflessioni sugli ostacoli e per l'assorbimento dell'aria.

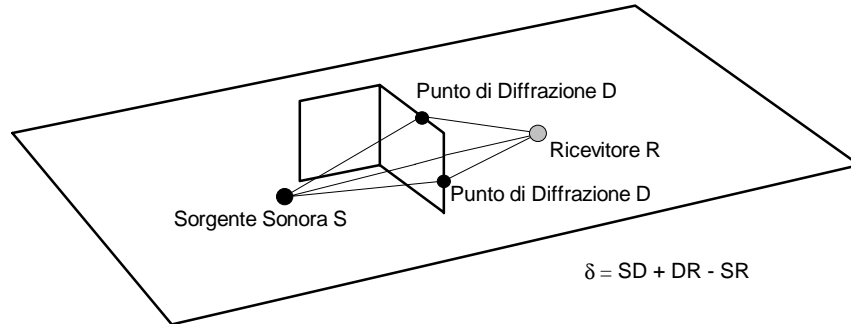
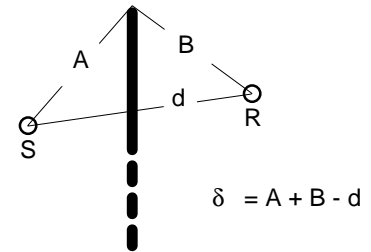
Uno dei principali aspetti che differenzia il tracciatore piramidale di Disiapyr dagli altri metodi di Beam Tracing è la possibilità di dichiarare "obstructing" alcune superfici (o tutte). Quando una piramide colpisce una di queste superfici, vengono attivati ulteriori controlli, onde verificare se dietro di essa si trova un ricevitore. In tale caso, si calcola il contributo sullo stesso fornito dall'onda sonora che ha attraversato la superficie (in base al potere fonoisolante della stessa). Si verifica poi se la superficie presenta bordi liberi, ed in caso affermativo viene portato un ulteriore contributo di energia al ricevitore a partire da ciascun bordo libero, calcolato con la nota relazione di Kurze-Anderson:

$$L_{\text{diff}} = L_{\text{dir}} - 5 - 10 \log \left(\frac{\sqrt{2\pi|N|}}{\tanh \sqrt{2\pi|N|}} \right)$$

in cui L_{dir} è il livello diretto, che giungerebbe al ricevitore se la parete "obstructing" non ci fosse, ed N è il n° di Fresnel, dato da:

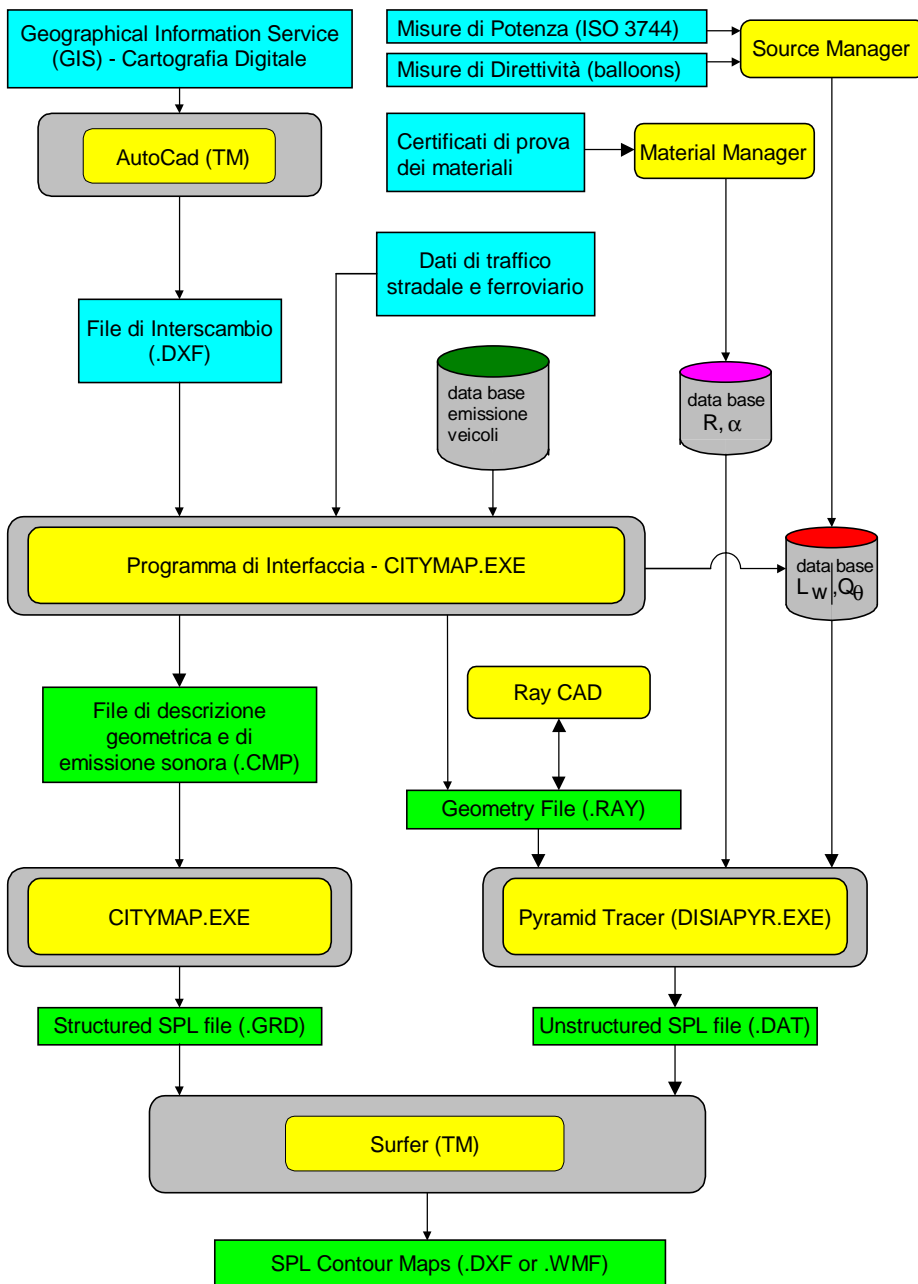
$$N = \frac{2}{\lambda} \cdot \delta = \frac{2 \cdot f}{c_0} \cdot \delta$$

La sottostante figura mostra le traiettorie dei raggi che vengono tracciati in questi casi (diffratti ed attraversante). L'algoritmo di ricerca dei bordi liberi è ricorsivo, pertanto viene considerata anche l'onda diffratta dal bordo sinistro del pannello laterale, che comunque non è disegnata nella figura.



5. Interfaccia con l'utente e con altri programmi

Il seguente diagramma di flusso illustra schematicamente le interazioni fra Citymap, Disiapyr e gli altri programmi di calcolo:



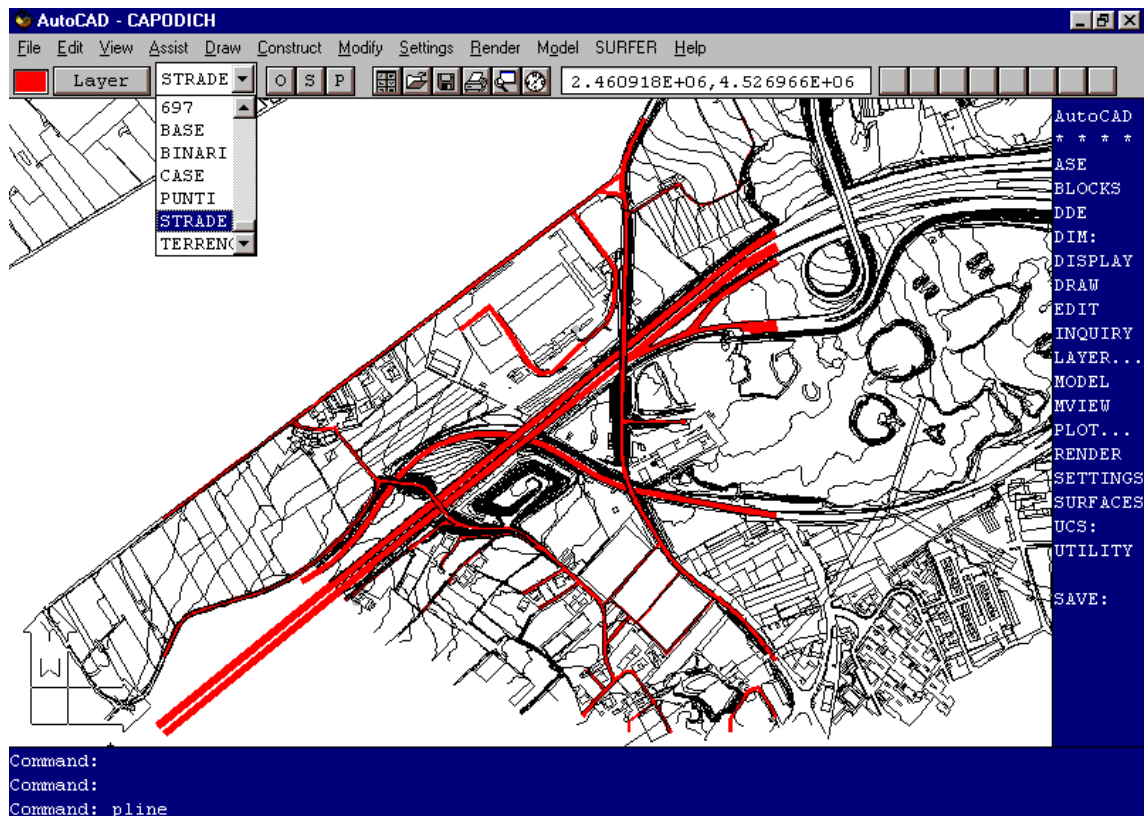
Come si nota numerosi programmi sono chiamati ad interagire: di essi due sono programmi commerciali (Autocad™ e Surfer™), mentre gli altri sono stati realizzati in proprio.

Si parte da Autocad, che serve per tradurre le informazioni cartografiche in un file DXF leggibile da Citymap. All'interno di Citymap, avviene l'introduzione dei dati di traffico stradale e ferroviario, che vengono "agganciati" alle entità geografiche (strade e binari). Si provvede poi al calcolo del Livello Equivalente di Emissione, sulla base dei dati di emissione unitari (SEL) dei veicoli. Si salva infine l'insieme delle informazioni geometriche ed acustiche in un file .CMP (ASCII ed autodocumentato), che può ovviamente venire riletto da Citymap.

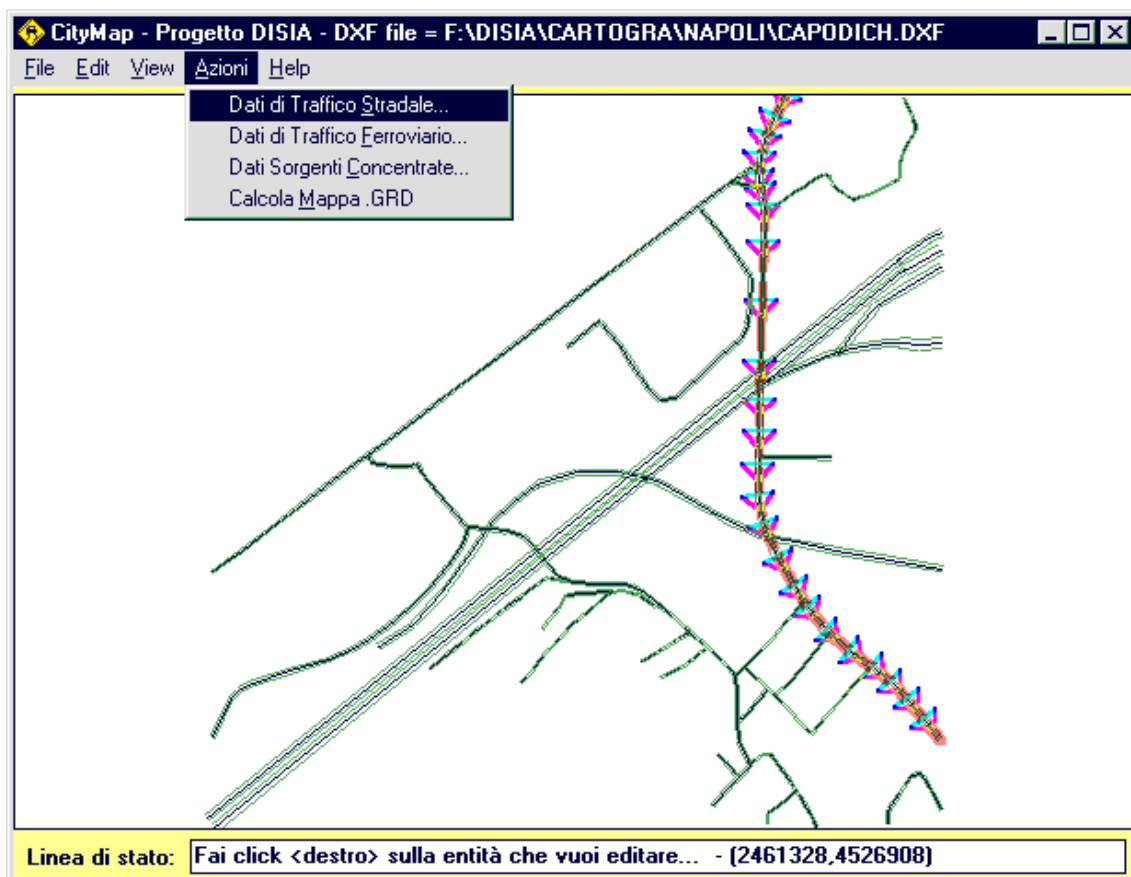
A questo punto, volendo operare un calcolo della mappa del rumore con l'algoritmo semplificato, si impiega ancora Citymap, che produce un file .GRD leggibile da Surfer, e contenente i valori del livello sonoro su una griglia rettangolare

equispaziata.

Viene qui di seguito brevemente presentata la sequenza delle operazioni suddette. Innanzitutto si parte dalla rappresentazione digitale della cartografia del sito, in questo caso utilizzando Autocad. All'interno di tale ambiente, occorre organizzare le informazioni contenute nella cartografia digitalizzata affinché esse risultino acusticamente congrue: in particolare le sorgenti sonore (strade e binari) vanno descritte mediante segmenti di polilinea omogenei, ovvero caratterizzati da traffico e caratteristiche morfologiche uniformi. La seguente figura mostra una cartografia digitalizzata con evidenziate le entità di rilevanza acustica, che andranno esportate nel file .DXF.



Una volta salvate le informazioni geometriche, si lancia il programma Citymap, che consente di rileggerle dal file .DXF. Dopo aver letto il file .DXF, è possibile effettuare l'aggancio dei dati di traffico alle sorgenti di rumore stradale e ferroviario. Per far ciò si può semplicemente "clickare" su ciascuna entità grafica, oppure si attiva una apposita tendina, che provvede ad evidenziare in sequenza i singoli tratti omogenei di strada o di binario, come mostrato dalla seguente figura:



Contemporaneamente appare sullo schermo una seconda finestra, all'interno della quale occorre specificare i dati di flusso relativi al tratto evidenziato. L'aspetto di questa seconda finestra è diverso a seconda che il tratto evidenziato sia una strada oppure un binario, come mostrato dalla figura:

Editazione dati traffico stradale

Selezione Tratto Stradale

Tratto n. 23 Nome: TANGENZIALE

Preced. Success. Fine

Leq,7.5m (G/N) 76,5 68,5 Fisso Calcola

Proprietà

Tipo di Pavimentazione	1-Asfalto Liscio
Pendenza [% + -]	0-5%
hmed edifici lato Sinistro	6
hmed edifici lato Destro	0

Traffico diurno complessivo

N. autovetture (V1)	12800	C7-(90-110 km/h)
N. camion 2 assi (V2)	1600	C6-(70-90 km/h)
N. camion 3 assi (V3)	640	C6-(70-90 km/h)
N. TIR (V4)	640	C6-(70-90 km/h)
N. motocicli (V5)	640	C7-(90-110 km/h)

Traffico notturno complessivo

N. autovetture (V1)	800	C7-(90-110 km/h)
N. camion 2 assi (V2)	240	C6-(70-90 km/h)
N. camion 3 assi (V3)	80	C6-(70-90 km/h)
N. TIR (V4)	80	C6-(70-90 km/h)
N. motocicli (V5)	40	C8-> 110 km/h

Cat.A - Autostrada	Cat.B - Extraurb. princ.
Cat.C - Extraurb. sec.	Cat.D - Urbana scorr.
Cat.E - Urbana quart.	Cat.F - Locale

Editazione dati traffico ferroviario

Selezione Tratto Ferroviario

Tratto n. 1 Nome: binario1

Preced. Success. Fine

Leq,7.5m (G/N) 74. 71.8 Fisso Calcola

Proprietà

Tipo di Armamento	1-Bin. cont. saldato
hmed edifici lato Sinistro	10
hmed edifici lato Destro	0

Traffico diurno complessivo

	Num.	Lungh.	Velocità
tr.merci (V1)	100	100	C1-(0-60 km/h)
tr.pass. locali (V2)	20	100	C2-(60-90 km/h)
tr.pass. l.perc. (V3)	0	0	C1-(0-60 km/h)

Traffico notturno complessivo

	Num.	Lungh.	Velocità
tr.merci (V1)	100	10	C3-(90-120 km/h)
tr.pass. locali (V2)	0	0	C1-(0-60 km/h)
tr.pass. l.perc. (V3)	0	0	C1-(0-60 km/h)

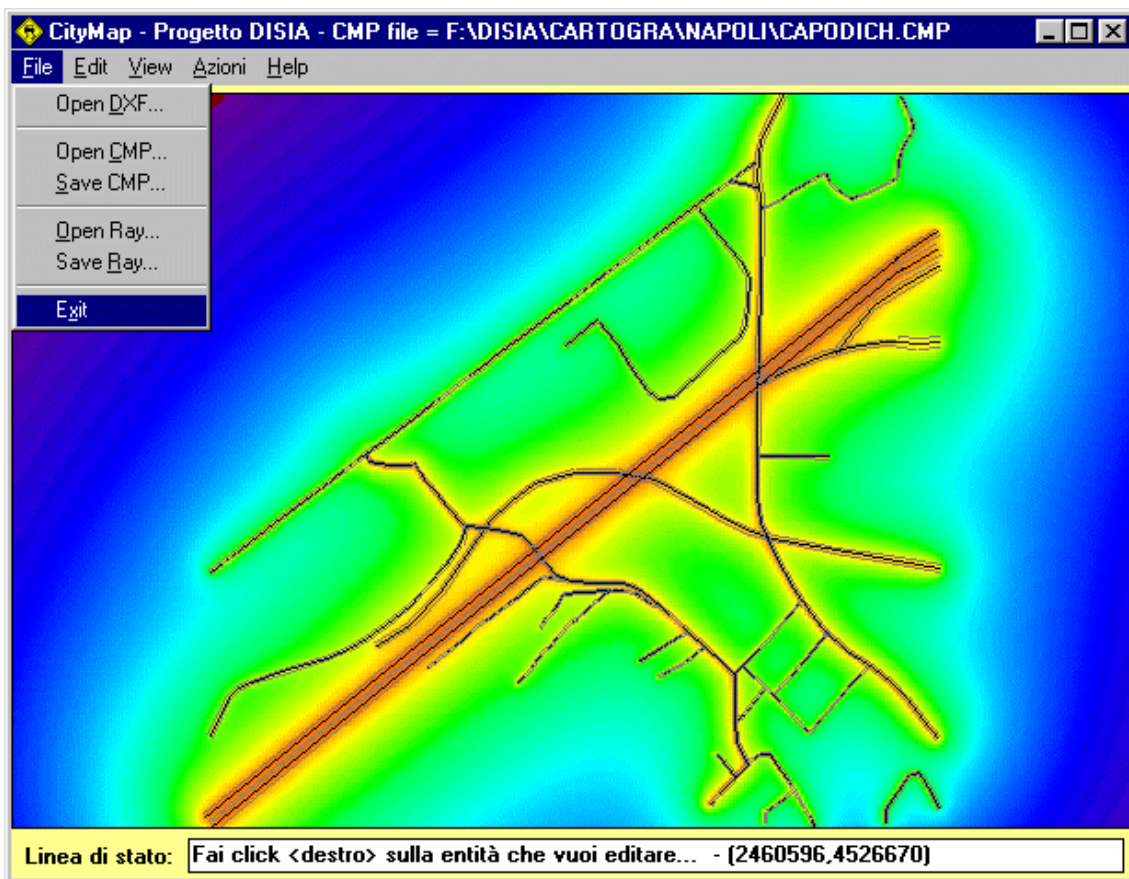
Come si nota, per le strade sono disponibili 6 “bottoni” che impostano automaticamente i dati di traffico “tipici” di 6 diversi tipi di strade. Per le sorgenti lineari di tipo industriale (caso tipico il perimetro di uno stabilimento), è necessario aver preventivamente disegnato un tratto “pseudo-stradale” o “pseudo-ferroviario” 7.5m all'interno del confine dell'area stessa. A tale tratto si assegnerà poi un livello di emissione fisso (non calcolato sulla base di dati traffico), pari al livello sonoro che è stato rilevato sperimentalmente al confine dello stabilimento.

Dopo aver introdotto i dati di traffico di tutte le sorgenti sonore, è possibile salvare l'insieme dei dati geometrici e di emissione in un unico file ASCII autodocumentato, con estensione .CMP, che può poi venire riletto da Citymap stesso.

A questo punto si può effettuare il calcolo della mappatura isolivello; si deve anzitutto visualizzare l'area che interessa mappare, mediante la usuale operazione di “zoom” di un'area rettangolare con il mouse. Poi si lancia il processo di calcolo, specificando il periodo di interesse (diurno o notturno), il nome del file che conterrà la mappatura (in formato .GRD) e la dimensioni della griglia di calcolo, come mostrato dalla seguente figura:

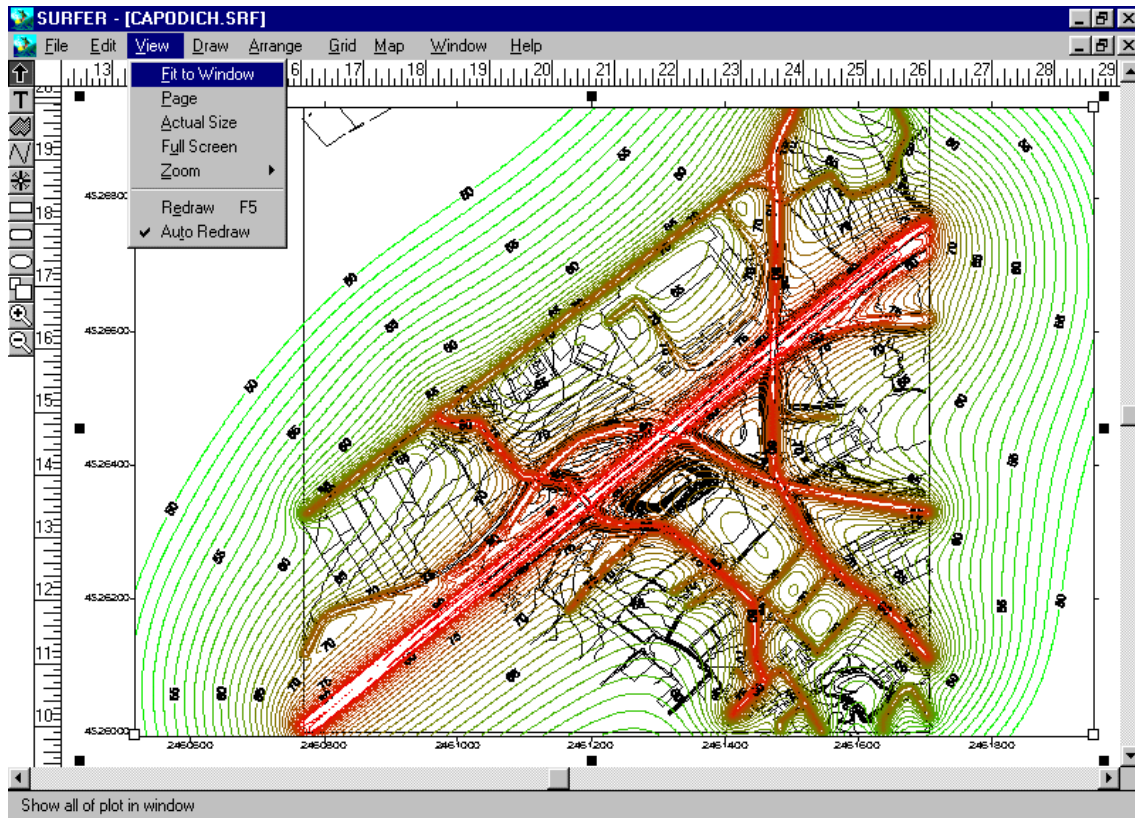


Nel corso del calcolo, il programma provvede a colorare progressivamente l'area mappata, in modo da fornire all'utente un'indicazione sulla frazione del lavoro totale già compiuta. Al termine lo schermo risulta completamente colorato, come mostra la seguente figura:



Questa rappresentazione non costituisce tuttavia il risultato finale del modello, che è invece costituito dal citato file .GRD, contenente in forma numerica il livello sonoro in tutti i punti della griglia di calcolo. Esso viene letto direttamente dal programma di mappatura vettoriale Surfer™, che fornisce la rappresentazione grafica mediante curve isolivello, ed all'interno del quale è estremamente agevole ottenere elaborazioni matematiche. In particolare, operando all'interno di Surfer si può realizzare il confronto fra mappatura acustica del livello sonoro e mappatura dei limiti di legge, oppure direttamente la mappatura dei superamenti dei limiti stessi.

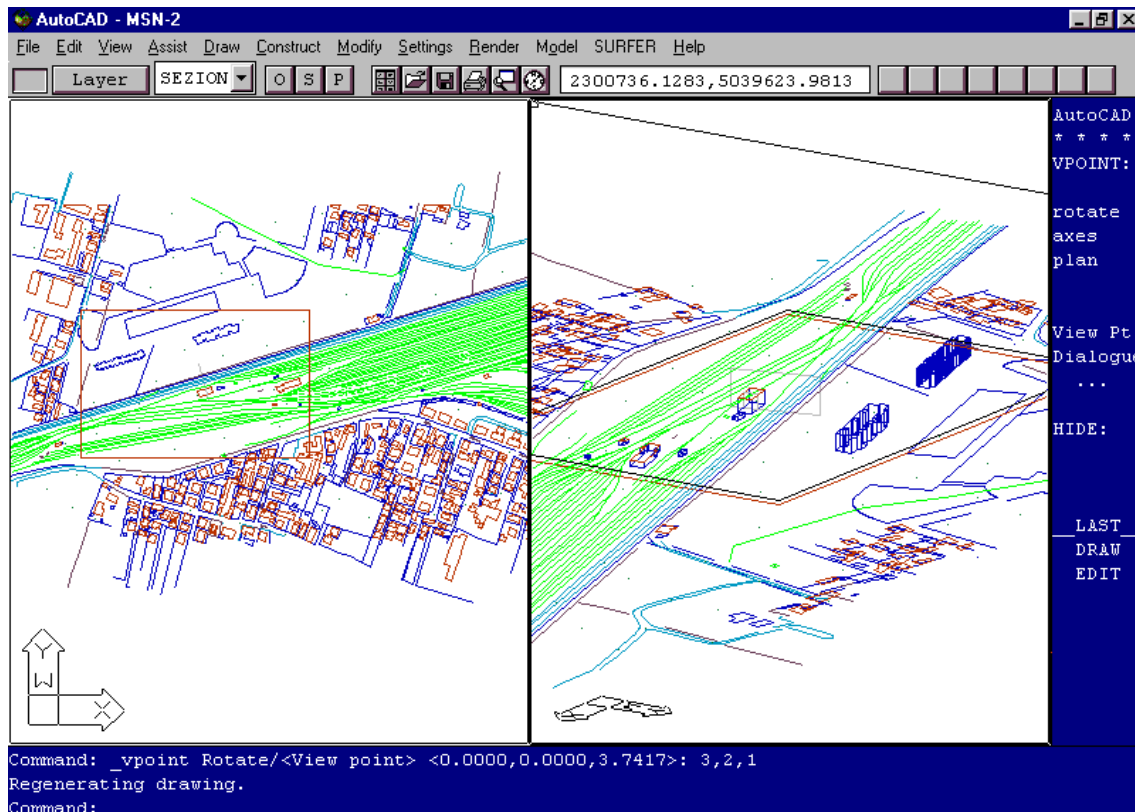
Surfer consente di realizzare mappature sia mediante colorazione dello sfondo, sia mediante tracciamento di curve isolivello: questa forma è quella preferita volendo sovrapporre la mappatura stessa alla cartografia digitalizzata di partenza, come mostrato dalla seguente figura:



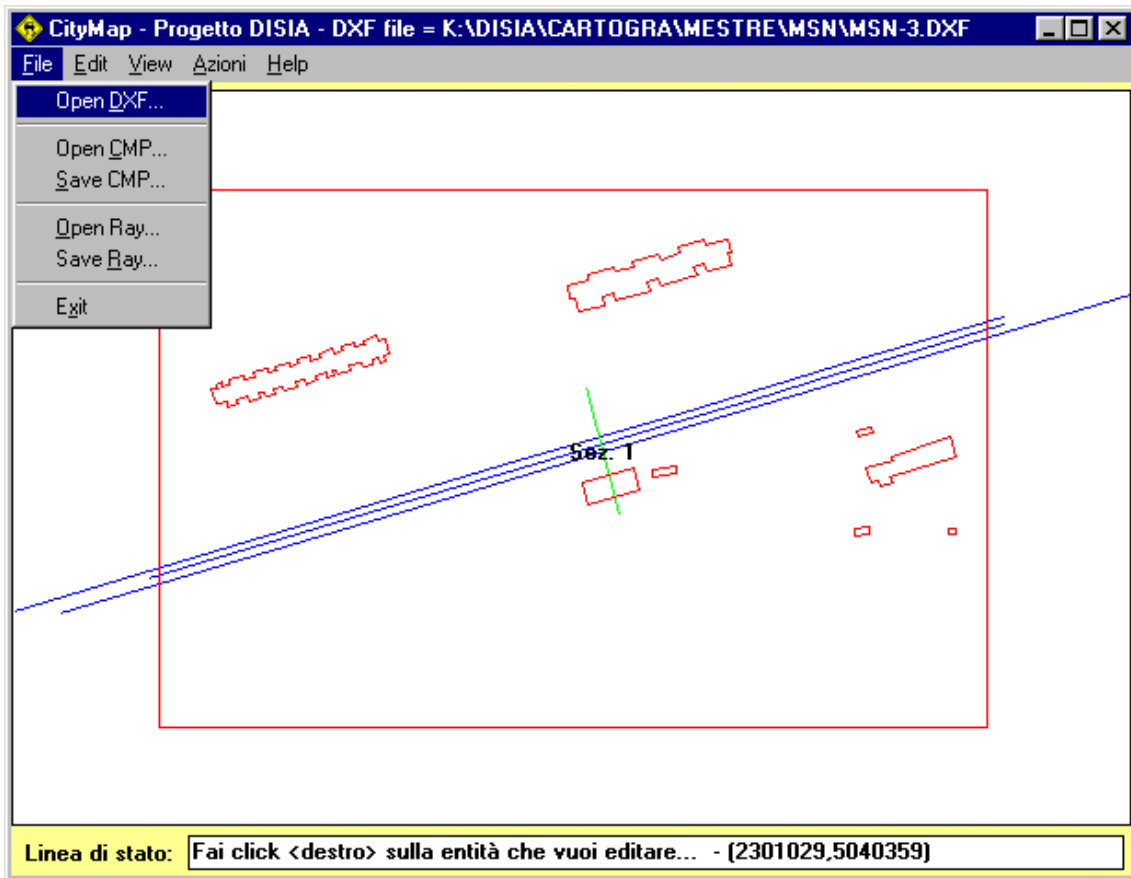
6. Modellazione di dettaglio con il programma Disiapyr

L'esecuzione di una modellizzazione acustica di dettaglio di una area circoscritta comporta la preparazione di una base cartografica molto più accurata che nel modello di pianificazione.

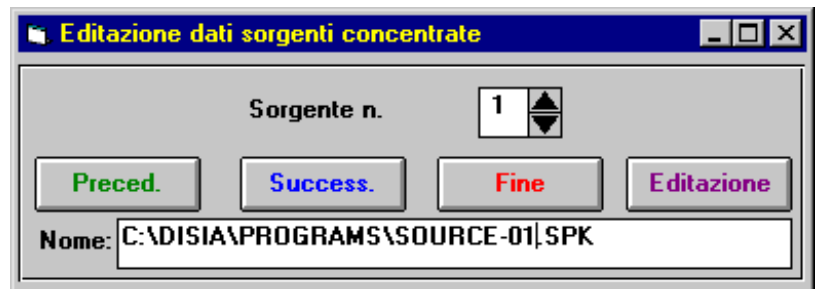
Supponendo di disporre di una cartografia vettorializzata della zona da modellizzare occorrerà pertanto aggiungere alla stessa una rilevante quantità di informazioni, sia geometriche che legate alla descrizione delle proprietà acustiche dei materiali, disegnando tali informazioni su opportuni "layers".



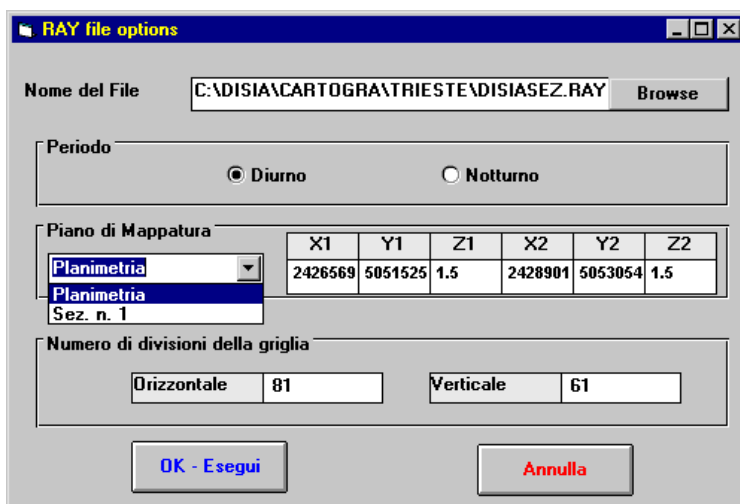
Dopo aver salvato la geometria in un file .DXF, si può lanciare il programma Citymap, che in questo caso viene usato semplicemente per preparare i dati di input per il programma Disiapyr. Dopo aver importato il file .DXF, comparirà in pianta la geometria importata, e si può quindi procedere all'assegnazione dei dati di traffico delle sorgenti lineari come già illustrato in [8].



In questo caso, tuttavia, si possono anche inserire i dati di sorgenti puntiformi, poichè Disiapyr le considera assieme alle sorgenti lineari. Per far ciò si impiega l'apposita tendina, che evidenzia sul disegno le entità di questo tipo, e fa comparire la mascherina qui a lato.

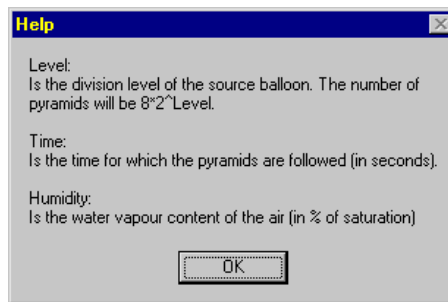
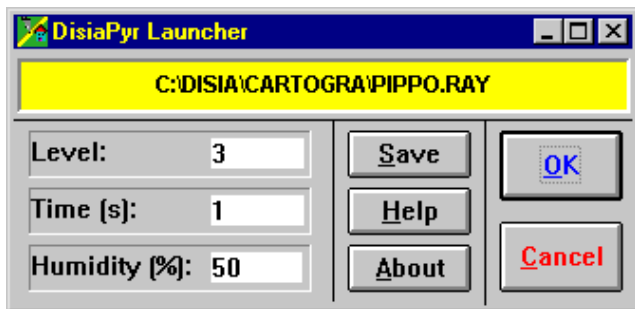


Dopo aver inserito i dati di tutte le sorgenti, si creano i files di input per Disiapyr, in formato .RAY (è un formato ASCII, utilizzato anche da altri programmi di calcolo). Per far ciò è necessario specificare il piano di mappatura e la risoluzione della griglia di ricevitori, nonchè ovviamente il nome del file:



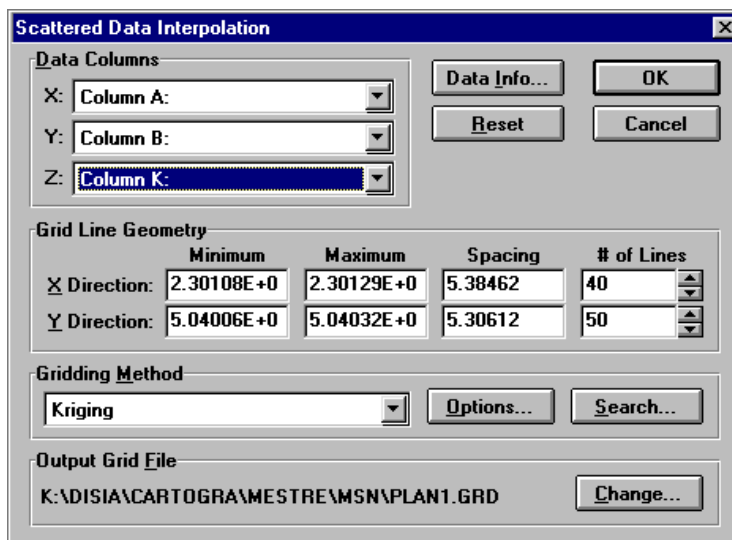
Nel salvare il file .RAY, Citymap provvede automaticamente a suddividere le sorgenti lineari in tante sorgenti puntiformi equispaziate, creando contemporaneamente i file di definizione delle stesse (in formato .SPK), contenenti le informazioni relative ai livelli di potenza in bande d'ottava ed ai corrispondenti *balloon* di direttività. Inoltre crea una griglia di ricevitori, collocati sul piano di mappatura secondo le indicazioni dell'utente; vengono comunque mantenuti nel file .RAY anche eventuali ricevitori supplementari, introdotti nel modello CAD.

A questo punto si può lanciare il programma Disiapyr vero e proprio, che richiede la specifica del file .RAY da elaborare e di alcuni parametri di calcolo: livello di suddivisione in piramidi di ciascuna sorgente e tempo limite di corsa dei raggi.



Nel corso dell'elaborazione un indicatore numerico di progresso segnala all'utente quale frazione del calcolo è stata compiuta. Al termine viene salvato un file ASCII (.DAT) contenente una riga per ciascun ricevitore, e complessivamente 12 colonne di numeri, così organizzate:

Colonna	Significato
A	coord. X
B	coord. Y
C	L_{eq} 63 Hz
D	L_{eq} 125 Hz
E	L_{eq} 250 Hz
F	L_{eq} 500 Hz
G	L_{eq} 1000 Hz
H	L_{eq} 2000 Hz
I	L_{eq} 4000 Hz
J	L_{eq} 8000 Hz
K	L_{eq} "A"
L	L_{eq} "Lin"



La conoscenza dell'organizzazione del file è estremamente importante nella successiva fase di importazione dello stesso con il modulo *gridding* di Surfer, mostrata nella figura sovrastante: infatti viene richiesto di specificare la colonna da cui estrarre le informazioni relative alla grandezza da mappare, e scegliendo la lettera corrispondente si può ottenere la mappatura nelle singole bande d'ottava, oltre che ovviamente in banda "A" o "Lin".

Una volta importati i dati in Surfer, è possibile ottenere la mappatura delle curve isolivello sonoro sul piano considerato per i calcoli (pianta o sezione verticale), e sovrapporre tale mappatura al disegno CAD di partenza. Anche in questo caso, come già evidenziato relativamente al calcolo semplificato con Citymap, la disponibilità dei risultati del calcolo in forma numerica consente ogni sorta di post-elaborazione e confronto.

7. Verifiche di taratura del modello Citymap

La verifica del corretto funzionamento del modello di calcolo Citymap è stata effettuata per confronto con rilievi sperimentali eseguiti in 4 diversi siti, caratterizzati da condizioni di emissione e propagazione molto diverse.

7.1 - Area urbana prospiciente la tangenziale (Napoli Est)

Il sito extraurbano di Napoli comprende la zona circostante l'aeroporto di Capodichino. In particolare è stata modellizzata un'area di lato 950 m circa, comprendente i 3 punti di taratura, dislocati presso lo stabilimento Alenia di Casoria (1) e presso la Massaria Ferrara in Via Selva Cafaro, fronte autostrada (2) e fronte traversa (3).

Punto n.	1	2	3
L _{eq} sperimentale	68.1	74.2	71.0
L _{eq} calcolato	73	77	74

7.2 Area urbana prospiciente via Foria (Napoli)

La modellizzazione dell'area urbana di Napoli interessa i quartieri che costeggiano Via Foria, nel tratto compreso fra il Museo Nazionale e l'Albergo dei Poveri.

La zona esaminata si estende all'interno di un perimetro di dimensioni 850 x 1150 m comprendendo le 3 posizioni di misura nelle quali sono stati effettuati i rilevamenti fonometrici finalizzati alla taratura del modello.

Sia alla Via Foria (punti 1 e 2) che alla Via Duomo (punto 3) sono stati attribuiti i dati di traffico stradale rilevati in loco, mentre per le restanti strade sono stati definiti flussi di traffico standardizzati.

Punto n.	1	2	3
L _{eq} sperimentale	64.3	68.1	71.3
L _{eq} calcolato	61	68	69

7.3 - Area urbana prospiciente Via F.lli Bandiera di Mestre

Il sito di Mestre - Via Fratelli Bandiera è stato modellizzato prendendo in considerazione un'area di forma quadrata avente il lato di circa 800 m, centrata sulla postazione di misura nella quale sono stati effettuati i rilevamenti fonometrici di taratura.

Punto n.	1	2	3
L _{eq} sperimentale	66.1	68.2	64.3
L _{eq} calcolato (config. 1)	67	70	66
L _{eq} calcolato (config. 2)	63	64	61

7.4 Sito di Mestre - Via Trieste

Il sito di Mestre - Via Trieste è stato modellizzato prendendo in considerazione non solo l'area circostante il punto di taratura di via Trieste interessato da traffico veicolare (punto1), ma anche i 3 punti di taratura in area ferroviaria (1° e 2° posto movimento e cabina B. rispettivamente punti 2,3,4)). L'area di modellizzazione è pertanto costituita da un rettangolo avente lati rispettivamente pari a 2500 m e 1100 m circa.

Punto n.	1	2	3	4
L _{eq} sperimentale	66.2	60.1	68.3	67.9
L _{eq} calcolato	68	62	67	67

Dall'esame dei risultati, è possibile osservare una sostanziale corrispondenza dei livelli di pressione sonora rilevati in situ e di quelli calcolati dal modello, con uno scarto inferiore ai 2 dB(A).

8. Verifiche di taratura del modello

Poichè l'algoritmo di Pyramid Tracing alla base del programma Disiapyr è già stato estesamente validato, è stato sufficiente effettuare soltanto due verifiche di funzionamento del modello, onde controllare che le sorgenti lineari di tipo stradale e ferroviario vengano correttamente scomposte in sorgenti puntiformi equivalenti.

8.1 - Area urbana prospiciente la tratta ferroviaria Venezia/Padova - Mestre (VE)

Il sito di Mestre - cabina B è stato modellizzato prendendo in considerazione l'area circostante il punto di taratura presso la cabina B dello scalo F.S. di Mestre. L'area di modellizzazione è pertanto costituita da un rettangolo avente lati rispettivamente pari a 350 m e 250 m circa.

Oltre ai binari di corsa sono stati presi in considerazione i fabbricati più vicini alla tratta ferroviaria al fine di evidenziarne l'effetto sulla propagazione acustica, come mostrato dalla rappresentazione tridimensionale ottenuta con Autocad e già illustrata all'inizio del paragrafo 5.

Alle 3 vie di corsa della ferrovia sono stati attribuiti dati di traffico mediati sui rilevamenti eseguiti. Non sono stati presi in considerazione i binari costituenti il fascio di smistamento, né quelli relativi al deposito locomotive.

Il modello è stato quindi lanciato, solamente con riferimento alla fascia oraria diurna, adottando un reticolo di 81 x 61 punti per la sezione verticale.

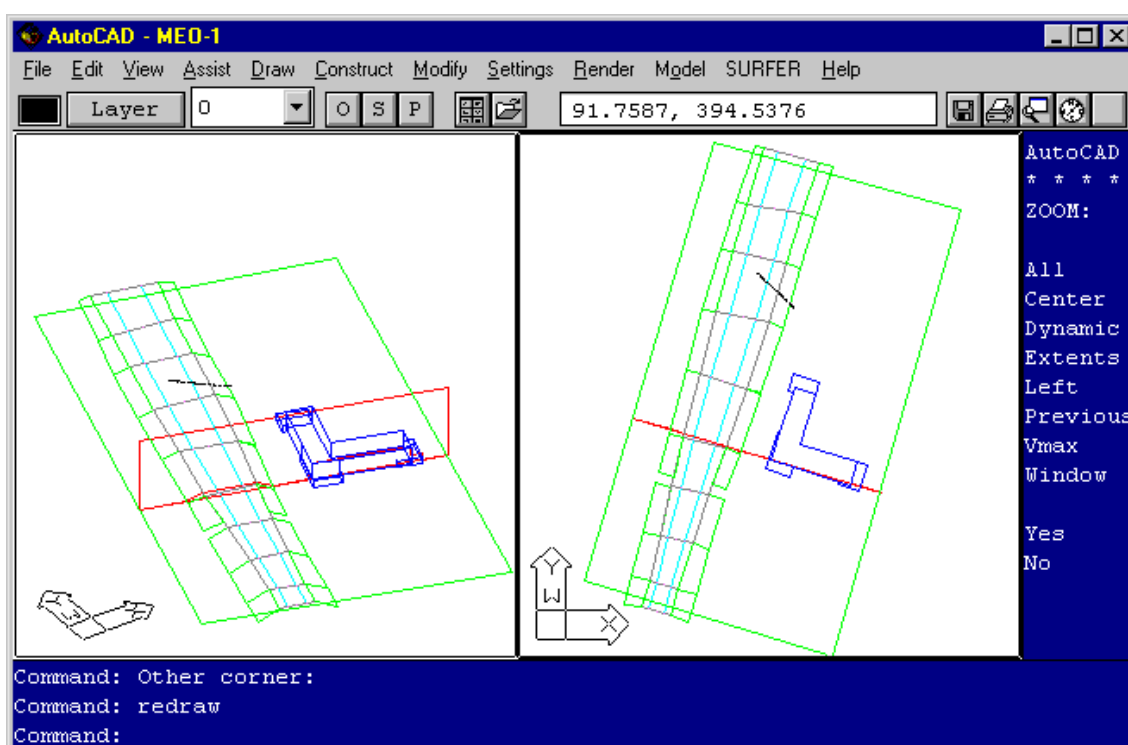
Punto Cabina B.	dB(A)	63 Hz	1000 Hz	8000 Hz
L _{eq} sperimentale	72.1	60.6	69.8	67.2
L _{eq} calcolato	73	62	70	69

8.2 - Area urbana prospiciente l'autostrada A4 in Mestre

Il sito di Mestre - Istituto Farina è un sito prospiciente l'autostrada A4 ed è stato modellizzato prendendo in considerazione l'area circostante il punto di taratura.

L'area di modellizzazione è pertanto costituita da un rettangolo avente lati rispettivamente pari a 350 m e 250 m circa.

Oltre all'autostrada suddivisa in 4 corsie è stato preso in considerazione il fabbricato dell'Istituto Farina presso il quale è collocato il punto di taratura.



Alle 4 corsie autostradali sono stati attribuiti dati di traffico mediati sui rilevamenti eseguiti. Non sono stati prese in considerazione le strade limitrofe al fabbricato caratterizzato da traffico di accesso ai pochi fabbricati presenti.

Il modello è stato quindi lanciato, solamente con riferimento alla fascia oraria diurna, adottando un reticolo di 81 x 61 punti per il calcolo della sezione verticale. I risultati del calcolo effettuato dal modello sono quindi stati elaborati mediante il programma "SURFER", ricavando così la distribuzione delle curve isolivello.

In questo caso viene presentato semplicemente il confronto fra lo spettro del livello sonoro misurato nel punto di collaudo e quello calcolato da Disiapyr:

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	"A"	"Lin"
Leq sperim.	70.1	66.2	58.1	59.9	62.3	60.6	49.0	40.1	70.1	77.1
Leq calcolato	74	68	61	60	63	62	51	43	71	80

9. Conclusioni

Nella memoria sono stati presentati due nuovi programmi di calcolo, funzionanti in ambiente MS Windows, in grado di effettuare la costruzione della mappa del livello sonoro in una area molto vasta di territorio urbano ed il calcolo di dettaglio di aree limitate al fine di dimensionare eventuali opere di bonifica acustica.

La principale peculiarità dei modelli numerici implementati è quella di essere basati su dettagliati rilievi delle emissioni sonore delle sorgenti, che hanno consentito la creazione di un data-base di emissione separato dal programma e continuamente aggiornabile. In questo modo i livelli di emissione, qui intesi come livelli equivalenti a 7.5m dalla sorgente, possono venire tarati sulla base di ulteriori campagne di rilievo sperimentale. Lo stesso può dirsi per i termini di correzione che tengono conto della pendenza della strada e del tipo di pavimentazione stradale, oppure del tipo di armamento ferroviario, nonché dei diagrammi polari di direttività, in bande d'ottava.

Un altro notevole pregio dei programmi è il fatto di integrare in unico sistema di calcolo la gestione del rumore prodotto dal traffico stradale, da quello ferroviario e dalle sorgenti fisse di tipo industriale.

I programmi interagiscono utilmente con altri software sotto Windows: in particolare viene importata la geometria del sito da studiare da una cartografia digitalizzata in formato .DXF, ed i risultati del calcolo sono resi disponibili per ulteriori elaborazioni grafiche nei formati .DXF e .WMF. Inoltre i valori dei livelli sonori sono salvati in un file ASCII (.GRD), che consente di operare facilmente post-elaborazioni e confronti sui dati stessi.

E' convinzione degli autori che la disponibilità di programmi per la mappatura acustica del territorio sia di grande utilità sia per gli studi relativi alle procedure di zonizzazione acustica, sia per l'individuazione delle aree in cui realizzare piani di bonifica acustica. L'impiego del modello di calcolo numerico consente infatti di ridurre di almeno un ordine di grandezza il numero dei rilievi sperimentali della rumorosità ambientale, con conseguente drastica riduzione dei tempi e dei costi dell'indagine. Inoltre consente di valutare rapidamente gli effetti di proposte modifiche ai flussi di traffico stradale o ferroviario, oppure di interventi edilizi o di inserimento di ostacoli alla propagazione del rumore.

Ovviamente per la progettazione dettagliata delle opere di bonifica risulta più idoneo l'impiego di un modello di calcolo più sofisticato [2], tuttavia è evidente come sia improponibile l'impiego di un modello di dettaglio per l'esecuzione della mappatura acustica di una intera città, e questo non solo per i tempi di calcolo proibitivi, ma soprattutto per la mole considerevolmente superiore di dati in ingresso richiesti dai modelli più raffinati.

Pertanto la metodica proposta, basata su due diversi programmi con diverso grado di accuratezza, consente di risolvere in maniera congrua e combinata la problematica della mappatura di aree molto vaste, comprendenti centinaia di migliaia di punti di calcolo del livello sonoro, senza richiedere né lunghi tempi di calcolo, né il reperimento di molte informazioni.

Nello stesso tempo il programma Disiapyr consente di effettuare il calcolo previsionale di dettaglio della propagazione del rumore e dell'attenuazione ottenibile con svariate tecniche di bonifica, e si propone dunque come strumento ideale di progettazione dei piani di bonifica acustica in porzioni limitate del territorio. Pertanto esso costituisce il naturale complemento del sistema di mappatura Citymap.

10. Riconoscimenti

Lavoro svolto grazie a finanziamento del Ministero dell'Ambiente – Servizio I.A.R. – progetto DISIA “Individuazione degli obiettivi di risanamento acustico nelle aree urbane”, su contratto con la ditta IPSE di Torino. Si ringrazia lo staff tecnico della IPSE per la collaborazione nella messa a punto dei programmi.

11. Bibliografia

- [1] Pompoli R., Farina A., Fausti P., Bassanino M., Invernizzi S., Menini L., "Intercomparison of traffic noise computer simulations", in: atti del XXIII Convegno Nazionale AIA - 18th International Congress for Noise Abatement AICB, Bologna, 12-14 settembre 1995, supplemento, p.523-559.
- [2] Farina A., Brero G. - "Modello numerico basato su rilievi sperimentali per la progettazione di dettaglio delle opere di bonifica acustica in area urbana" - Atti del Convegno NOISE & PLANNING '96 - Pisa, 29-31 maggio 1996.
- [3] A. Farina , P. Galaverna, G. Truffelli - ""RAMSETE" - un nuovo software per la previsione del campo sonoro in teatri, ambienti industriali ed ambiente esterno" - Atti del XXII Congresso Nazionale AIA, Lecce, 13-15 aprile 1994.
- [4] A. Farina - "RAMSETE - a new Pyramid Tracer for medium and large scale acoustic problems" - Proc. of EURO-NOISE 95 Conference, Lyon 21-23 march 1995.
- [5] A. Farina - "Pyramid Tracing vs. Ray Tracing for the simulation of sound propagation in large rooms" - In the volume "Computational Acoustics and its Environmental Applications", pp. 109-116, Editor C.A. Brebbia, Computational Mechanics Publications, Southampton (GB) 1995.
- [6] A. Farina - "Verification of the accuracy of the Pyramid Tracing algorithm by comparison with experimental measurements by objective parameters" - ICA95 (International Conference on Acoustics), Trondheim (Norway) 26-30 June 1995.
- [7] A. Farina , L. Maffei - "Sound Propagation Outdoor: comparison between numerical previsions and experimental results" - In the volume "Computational Acoustics and its Environmental Applications" pp. 57-64, Editor C.A. Brebbia, Computational Mechanics Publications, Southampton (GB) 1995.
- [8] A. Farina, G. Brero, G. Pollone - "Modello numerico basato su rilievi sperimentali per la mappatura acustica delle aree urbane" - Atti del Convegno NOISE & PLANNING '96 - Pisa, 29-31 maggio 1996.
- [9] A. Farina - "Previsione del rumore in ambiente di lavoro a partire dai dati di potenza sonora" - Atti del seminario "Rumore e Vibrazioni: Certificazione delle Macchine" - Modena, dicembre 1993.