

Manuale di Utilizzo dei Programmi CITYMAP e DISIAPYR Versione 1.0 (1995)

Indice analitico

<u>1 INTRODUZIONE</u>	<u>2</u>
1.1 GENERALITÀ	3
1.2 COLLEGAMENTO FRA I VARI MODULI	4
1.3 REQUISITI DEL SISTEMA DI CALCOLO	6
1.4 I DATI DI INPUT	7
<u>2 IL PROGRAMMA CITYMAP</u>	<u>9</u>
2.1 PREMESSA	9
2.2 TEORIA DI CALCOLO DEL PROGRAMMA CITYMAP	10
2.3 INTERFACCIA UTENTE DI CITYMAP	13
2.4 IL FILE CITYMAP.INI	24
<u>3 IL PROGRAMMA DISIAPYR</u>	<u>26</u>
3.1 PREMESSA	26
3.2 RASSEGNA DELLE ALTRE METODICHE PREVISIONALI	28
3.3 TEORIA DI CALCOLO DEL PROGRAMMA DISIAPYR - PYRAMID TRACING	35
3.4 INTERFACCIA UTENTE DI DISIAPYR	56
3.5 IL FILE DISIAPYR.INI	69
<u>4 PROGRAMMI ACCESSORI</u>	<u>71</u>
4.1 RAY CAD	71
4.2 MATERIAL MANAGER	75
4.3 SOURCE MANAGER	77
<u>5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</u>	<u>83</u>

Manuale di Utilizzo dei Programmi CITYMAP e DISIAPYR

1 Introduzione

I programmi CITYMAP e DISIAPYR sono stati sviluppati nell'ambito di un progetto DISIA nazionale, finanziato dalla CEE tramite il Ministero dell'Ambiente, denominato **“Individuazione degli obiettivi di risanamento acustico nelle aree urbane”** [1,2].

Autore è l'ing. Angelo Farina, Ricercatore presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Parma.

Nel caso estremo in cui nonostante le indicazioni riportate nel presente manuale non sia possibile far funzionare correttamente i programmi, è possibile contattare l'autore ai seguenti recapiti:

tel. 0521-905701

fax. 0521-905705

E-MAIL farina@pcfarina.eng.unipr.it

FTP://[pcfarina.eng.unipr.it](ftp://pcfarina.eng.unipr.it)

HTTP://pcfarina.eng.unipr.it

Al modulo software che contiene l'algoritmo del modello di pianificazione è stato attribuito il nome CITYMAP ricordando l'obiettivo per il quale è stato sviluppato: la pianificazione acustica in contesto urbano.

Al modulo software che contiene l'algoritmo del modello di dettaglio è stato attribuito il nome DISIAPYR ricordando il nome del progetto all'interno del quale è stato sviluppato (Disia) e la tecnica di calcolo della propagazione acustica basata sul tracciamento di fasci a forma piramidale.

I due moduli software suddetti costituiscono il risultato finale del progetto DISIA citato, in quanto l'estesa campagna di rilievi sperimentali, l'acquisizione dei sistemi di cartografia digitalizzata, l'elaborazione statistica effettuata su di essi avevano il precipuo scopo di consentire la realizzazione dei files di data-base su cui è basato il funzionamento dei programmi Citymap e Disiapyr. Inoltre nell'ambito dello stesso progetto Disia sono state effettuate anche le verifiche di taratura dei programmi, ed alcune applicazioni pilota nelle città di Trieste, Mestre e Napoli. Il sistema software qui presentato consente dunque agli enti locali di disporre di strumenti di calcolo di facile impiego e di provata accuratezza, con i quali soddisfare le esigenze legate agli adempimenti previsti dalla Legge Quadro sull'Inquinamento Acustico.

I programmi di calcolo Citymap e Disiapyr, sviluppati su specifiche richieste del Ministero dell'Ambiente, Servizio Inquinamento Aria e Rumore, costituiscono pertanto l'equivalente per l'Italia dei modelli di calcolo ufficiali della Repubblica Federale Tedesca (RLS-90 e SCHALL-03), o di altri modelli di calcolo ufficiali in vigore in altri paesi (ad es. ENPA e SEMIBEL per la Svizzera).

1.1 Generalità

I programmi CITYMAP e DISIAPYR sono codici di calcolo per la propagazione del rumore nell'ambiente urbano: CITYMAP consente la mappatura acustica di vaste porzioni di territorio, facendo impiego di un algoritmo molto semplice per il calcolo dei livelli sonori, mentre DISIAPYR consente lo studio dettagliato di porzioni di territorio più contenute grazie all'impiego di un innovativo algoritmo di pyramid tracing. Di conseguenza, CITYMAP fornisce il supporto previsionale alla realizzazione della mappatura acustica di un intero centro abitato, ed il suo impiego è prevedibile a supporto delle attività di zonizzazione acustica del territorio onde disporre in tempi ragionevoli di una "mappa del rumore" da porre a confronto con la "mappa dei limiti", e poter così individuare rapidamente le aree in cui si ha eccedenza rispetto ai limiti stessi.

Gli interventi di bonifica possono poi venir studiati con il programma DISIAPYR, che consente di ottenere anche mappature acustiche su sezioni verticali, e che tiene conto dei complessi fenomeni di riflessione multipla sul terreno e sulle facciate degli edifici, nonché della diffrazione di primo e secondo ordine prodotta da ostacoli schermanti (edifici, barriere antirumore, terrapieni, etc.). Va inoltre sottolineato che DISIAPYR esegue i calcoli in bande d'ottava, mentre CITYMAP fornisce soltanto i valori di livello sonoro in dB(A).

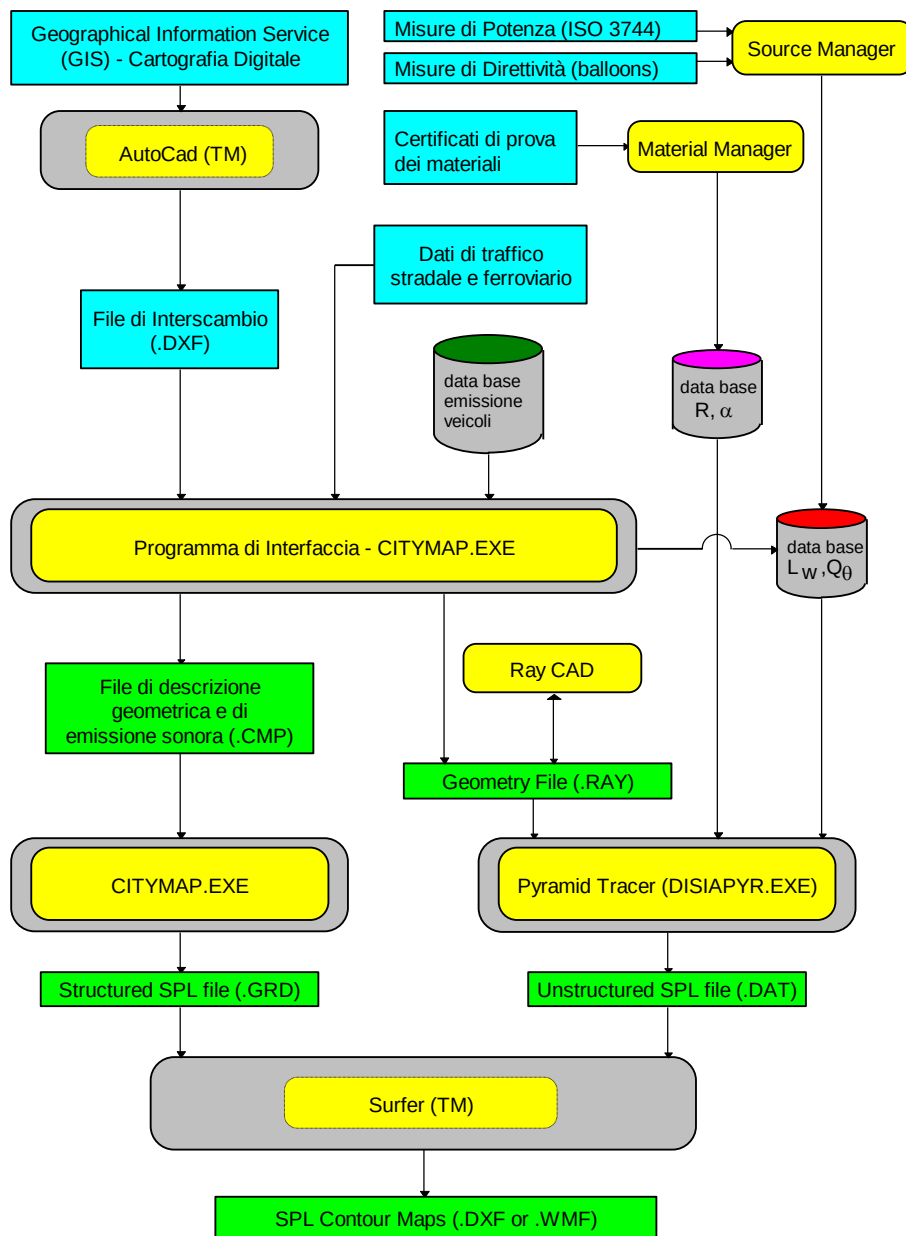
Inevitabilmente però l'utilizzo di DISIAPYR richiede l'introduzione di una quantità di dati di input molto più vasta e dettagliata di CITYMAP: in particolare diviene necessario conoscere la natura delle superfici in gioco, onde scegliere dal data-base incorporato (ed estendibile) i coefficienti fonoassorbimento e fonoisolamento idonei; è poi necessario disegnare in 3 dimensioni la geometria da studiare, utilizzando o un programma CAD "general purpose" quale Autocad TM, oppure l'apposito CAD tridimensionale RayCAD che viene fornito contestualmente a DISIAPYR. Con DISIAPYR è infine possibile prendere in considerazione anche sorgenti sonore concentrate ("puntiformi"), caratterizzate da un opportuno spettro di emissione (livelli di potenza in bande d'ottava) e da un "balloon" di direttività. Tali sorgenti concentrate vengono definite tramite l'impiego di un ulteriore programma accessorio (Source Manager), che consente di editare i dati di emissione e di generare automaticamente i balloon di direttività a partire da misure di livello sonoro di pressione eseguite secondo le metodologie delle norme ISO 3744 o 3746.

Onde facilitare la gestione del data-base dei dati di assorbimento ed isolamento acustico, viene poi fornito un semplice editor tabellare denominato Material Manager.

Esiste infine un data-base delle emissioni sonore unitarie dei veicoli stradali e ferroviari, ricavato dalla banca dati descritta nel capitolo precedente, costituito da dati memorizzati in files ASCII editabili e sostituibili; quando ulteriori campagne sperimentali consentiranno di raffinare le stime delle emissioni unitarie dei vari tipi di veicoli, sarà possibile aggiornare tali files senza dover ricompilare i programmi di calcolo. Va notato che i dati di emissione comprendono anche l'effetto della velocità dei veicoli, del tipo di pavimentazione e della pendenza della strada o ferrovia.

1.2 Collegamento fra i vari moduli

Il seguente diagramma di flusso illustra l'interazione fra i vari programmi del pacchetto, ed i files che consentono lo scambio di informazioni fra gli stessi:



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.

Volendo viceversa operare un calcolo di mappature o sezioni impiegando il Pyramid Tracing, si salva la geometria in formato .RAY. Il file .RAY può eventualmente venire editato e modificato impiegando RayCAD, tramite il quale è molto agevole associare gli opportuni dati acustici alle superfici. Inoltre in RayCAD il posizionamento e la scelta delle sorgenti concentrate (descritte da files con estensione .SPK) è molto più agevole che in Autocad.

Ovviamente sia i dati di assorbimento ed isolamento delle superfici, sia quelli di potenza e direttività delle sorgenti debbono essere preventivamente resi disponibili: a questo scopo possono venire impiegati Material Manager e Source Manager, anche se sia il file contenente l'elenco dei materiali, sia i files .SPK che descrivono le sorgenti concentrate sono files ASCII autodocumentati, che possono venire editati manualmente.

Il file .RAY costituisce l'input del tracciatore di piramidi vero e proprio (DISIAPYR), che restituisce in uscita un file ASCII con estensione .DAT contenente, in ciascun punto della griglia di calcolo, oltre che le coordinate del punto stesso, lo spettro in ottave ed il livello sonoro complessivo in dB(A) ed in dB(LIN). Questo file .DAT può essere letto direttamente da Surfer, onde realizzare la mappatura con curve isolivello.

Infine, le mappature isolivello prodotte da Surfer possono venire esportate sia in formato .DXF che .WMF, onde sovrapporle al disegno CAD originale per la restituzione grafica finale.

Tutti i programmi di cui sopra sono resi interoperabili simultaneamente grazie all'ambiente multitasking di Windows: si è preferito lasciare separati i singoli moduli, onde consentire, ad esempio, di elaborare i risultati di un calcolo mentre ne è in esecuzione un secondo.



Nei seguenti capitoli verranno illustrati in dettaglio, sia i principi di funzionamento, sia l'interfaccia utente dei programmi realizzati nell'ambito

del progetto DISIA, ed in particolare CITYMAP, DISIAPYR, RAYCAD, Material Manager, Source Manager. Non viene invece illustrato il funzionamento di Autocad e Surfer, se non limitatamente alle peculiarità richieste per l'interfacciamento con gli altri programmi, poichè essi sono programmi commerciali, già dotati di idonea manualistica: si presume che l'utilizzatore dei programmi DISIA sia già in possesso di adeguata familiarità con l'utilizzo di Autocad e Surfer.

1.3 Requisiti del sistema di calcolo

Il pacchetto DISIA si basa sull'interazione di software di varia provenienza. Poichè i files di interscambio dati sono tutti semplici file di testo editabili, e' necessario che il formato numerico sia standardizzato. Siccome Surfer e' un programma inglese, e' necessario impiegare il formato inglese di formattazione di numeri, date, ed orario. Si consiglia di impostare i Parametri Internazionali di Windows su Inglese – Gran Bretagna. Con settaggi diversi, il programma dà errori di vario genere, anche molto subdoli.

Stante il livello estremamente basso di interazione fra i programmi del progetto DISIA e quelli commerciali (Autocad e Surfer), si presume che il funzionamento sia garantito indipendentemente dalla versione impiegata di questi ultimi. Si precisa comunque che lo sviluppo e la messa a punto del sistema è stata effettuata utilizzando Autocad rel. 12 per Windows e Surfer rel. 5.00 per Windows, anche se è stato verificato il corretto funzionamento anche con i file .DXF prodotti dalle successive release di Autocad, che non sono compatibili con i precedenti.

Per quanto riguarda le risorse hardware necessarie all'impiego di questi programmi, i requisiti **minimi** sono:

CPU i486 DX2-66
8 Mbytes RAM
340 Mbytes Hard Disk
Scheda video Local Bus SVGA in modalità 800x600x256 colori
Monitor SVGA colori 14" standard VESA
Sist. Operativo Windows per Workgroup 3.11

Comunque la configurazione **raccomandata** prevede:

CPU Pentium 90
16 Mbytes RAM
1 Gbyte Hard Disk
Scheda Video PCI 64 bits 2 Mbytes RAM (1280x1024x256 colori non interlacciata, almeno 70 Hz di freq. di refresh)
Monitor colori 17" in grado di operare a 1280x1024 in modalità non interlacciata con frequenza di refresh di almeno 70 Hz
Sistema operativo Windows95 o Windows NT 3.51

Si sottolinea come le prestazioni di velocità di calcolo dei programmi dipendano in misura decisiva dal tipo di CPU e dalla quantità di memoria

RAM disponibile: più complessa ed estesa è la geometria da studiare, maggior tempo sarà necessario per l'elaborazione; questo vale sia per Citymap che per Disiapyr.

1.4 I dati di input

L'utilizzo su vaste porzioni di territorio del modello di pianificazione acustica richiede il raggiungimento di un massimo grado di automazione nella definizione dei dati di input necessari; essenzialmente la base cartografica ed le informazioni relative ai flussi di traffico veicolare.

Relativamente alla base cartografica si è detto che la possibilità di importazione di files formato dxf, consente il massimo grado di interfacciabilità con i softwares più diffusi nel settore della cartografia numerica del territorio (Archinfo, Microstation, Autocad). Il fatto che nella fase di sviluppo si sia lavorato in ambiente Autocad non pregiudica infatti in alcun modo l'applicabilità del modello di calcolo acustico in ambienti diversi.

Occorre invece un maggiore approfondimento del problema relativo al dato di input rappresentato dai flussi di traffico. Nel contesto urbano il traffico veicolare e ferroviario rappresentano le sorgenti maggiormente responsabili dei livelli di immissione acustica calcolati. Mentre il traffico ferroviario è noto in modo deterministico sulle singole tratte, il traffico veicolare è valutabile statisticamente o mediante modelli di calcolo.

Per ogni via di traffico occorre definire il flusso per ciascuna delle categorie di veicoli sopra definite. La digitazione manuale dei dati di input risulta quindi essere in questi casi eccessivamente onerosa e comporta comunque una conoscenza dettagliata di dati difficilmente disponibili. Per l'utilizzo di questo modello si prospettano due diverse situazioni in base alla disponibilità o meno dei dati di flusso veicolare stimati o misurati nella predisposizione del Piano urbano del Traffico. Con riferimento al documento *Direttive per la redazione, adozione ed attuazione dei piani urbani del traffico* (Art.36 del decreto legislativo 30 aprile 1992, n.285. Nuovo codice della strada) il Piano Urbano del traffico (PUT) è costituito da un insieme coordinato di interventi per migliorare le condizioni della circolazione stradale nell'area urbana. E' inoltre espressamente finalizzato alla riduzione dell'inquinamento acustico ed atmosferico e pertanto è previsto il suo coordinamento con i Piani di risanamento e tutela ambientale. Tra le indagini e le rilevazioni necessarie alla stesura del PUT è previsto la rilevazione dei flussi in corrispondenza di sezioni significative. La tecnica più diffusa per questo tipo di analisi è quella delle spire induttive fresate nel manto d'usura della pavimentazione. Si tratta di fili di rame isolati in gomma o PVC ed alimentati da una debole corrente ad alta frequenza: essi funzionano come antenne trasmettenti e creano sopra la superficie stradale un campo elettromagnetico. La massa metallica del veicolo in transito produce una variazione della frequenza trasmessa, che viene sentita dai circuiti dell'apparecchio. Il filo rilevatore deve formare un anello chiuso di forma quadrata, rettangolare o triangolare (a seconda che si tratti di rilevamenti per conteggi o per classificazioni); i due estremi del filo sono collegati ad un apparecchio rilevatore. Per proteggere i fili da

eventuali strappi causati dai veicoli in transito è previsto l'impiego di una guaina bituminosa di copertura o l'incasso nella pavimentazione.

Con le spire induttive è possibile effettuare un conteggio separato dei veicoli lunghi e corti distinti per singole; si intende per veicolo lungo quello che durante il transito viene rilevato dalle due spire contemporaneamente; ciò perché la sua lunghezza è maggiore della distanza tra le due spire, misurata fra i due lati più vicini. Può verificarsi l'eventualità, nel caso di veicoli accodati, di un veicolo che transita sulla prima spira mentre la successiva è ancora interessata dal veicolo che precede, realizzando la condizione di segnalazione simultanea di presenza e contando quindi come veicolo lungo il primo dei due. Per minimizzare questa possibilità di errore, l'apparecchio è predisposto in modo da considerare il veicolo come "lungo" solo se il segnale del primo rilevatore è ancora presente mentre il veicolo giunge sul secondo senza avere subito interruzioni.

Le tecniche di conteggio del traffico sopra descritte possono essere utilizzate per la taratura di modelli di simulazione delle reti di traffico urbano. questi modelli ormai di uso corrente, considerano i flussi veicolari in modo analogo ai flussi idraulici e studiano le reti di traffico sulla base di relazioni di bilancio tra le portate entranti ed uscenti ai vari archi costituenti la rete. Nella messa appunto del modello CityMap si è tenuto conto della possibilità di interfacciamento con i modelli di traffico attraverso un database comune che associ il flusso veicolare ai singoli tronchi. A questo scopo nel menu che consente la digitazione dei dati di flusso veicolare sono stati predisposti dei bottoni corrispondenti alle categorie di strade previste all'Art. 8, comma B Legge .447 del 26.10.95:

- categoria A (autostrade)
- categoria B (strade extraurbane principali)
- categoria C (strade extraurbane secondarie)
- categoria D (strade urbane di scorrimento)
- categoria E (strade urbane di quartiere)
- categoria F (strade urbane locali)

Considerato l'obiettivo con il quale il modello di pianificazione acustica è stato sviluppato, la sua interfacciabilità con i modelli di traffico ne rappresenta un requisito indispensabile per una sua applicazione efficiente nella predisposizione dei piani di risanamento acustici delle città.

2 Il programma CITYMAP

2.1 Premessa

Il programma CityMap consente di effettuare la mappatura del livello sonoro ponderato “A” sul territorio di un centro abitato, a partire dai dati di traffico stradale e ferroviario e dell’emissione sonora di sorgenti concentrate. Esso costituisce inoltre il “motore di avvio” per il programma DisiaPyr: quest’ultimo è una particolare implementazione del codice di calcolo “Pyramid Tracing” adattato per l’ambiente esterno.

Il software CityMap considera in maniera approssimata l’effetto di schermatura da parte degli edifici, le riflessioni multiple fra le facciate contrapposte ed in generale gli effetti legati alle ipotesi dell’acustica geometrica; viceversa DisiaPyr tiene conto in dettaglio di tutti questi fenomeni, a patto che vengano forniti gli opportuni valori, alle varie frequenze, del potere fonoisolante e del coefficiente di assorbimento acustico dei materiali.

In pratica CityMap consente lo studio planimetrico della propagazione del rumore su vasta scala, mentre DisiaPyr consente un calcolo più dettagliato nelle zone ove si decide di installare sistemi di protezione antirumore.

In ogni caso si parte da un disegno AutoCad, che viene esportato in un file .DXF. Nel disegno Autocad si definisce la geometria delle sorgenti sonore (strade, ferrovie) e, per quanto riguarda DisiaPyr, anche delle singole superfici schermanti o riflettenti (facciate degli edifici, barriere antirumore, etc.). Affinchè il disegno Autocad risulti leggibile da CityMap, è necessario che siano state rispettate alcune semplici regole sulla scelta delle entità e dei layer.

Citymap consente poi di associare a ciascuna sorgente sonora (strada, ferrovia o sorgente concentrata) gli opportuni dati necessari a descriverne l’emissione sonora (dati di traffico, potenza sonora). L’emissione dei singoli tipi di veicoli viene assegnata grazie ad un data-base di SEL (single Event Level) ottenuti da misure di singoli passaggi di veicoli, eseguite nell’ambito del progetto DISIA. Per quanto riguarda DisiaPyr, si tiene anche conto dello spettro in ottave del SEL, e della direttività delle sorgenti sonore stradali e ferroviarie, sempre sulla base di opportuni rilievi sperimentali.

Una volta terminata l’assegnazione dei dati di input, si può eseguire il calcolo semplificato grazie all’opportuna opzione di CityMap, oppure si può esportare l’insieme della geometria e dei dati di emissione nel formato .RAY, e quindi lanciare il programma DisiaPyr.

Al termine del calcolo semplificato viene visualizzata una mappatura a colori a bassa risoluzione, ma contemporaneamente è stato creato un file .GRD contenente le stesse informazioni. Da tale file è agevole ottenere rappresentazioni grafiche di alta qualità, quali mappature isolivello a colori, grazie al software dedicato SURFER. Tramite esso è infine possibile

risovrapporre la mappatura acustica al disegno AutoCad originale, ed esportare il tutto verso qualsiasi altro programma Windows (ad es. Word).

2.2 Teoria di calcolo del programma CityMap

In CityMap le sorgenti stradali o ferroviarie sono trattate in modo molto diverso dalle sorgenti concentrate, che verranno descritte in seguito con riferimento a Disiapyr.

Ogni tratto stradale (o ferroviario) è costituito da una 3DPOLY sul layer “STRADE” (o “BINARI”), 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 7.5 dalla strada (o dalla ferrovia) a partire dai SEL unitari esistenti nel database 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 anziché 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.

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 DL 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.

Il problema per operare questo calcolo è duplice: innanzitutto occorre trovare la distanza w_{eff} del punto di intersezione con il fronte degli edifici lungo la congiungente fra centro del tratto e punto di calcolo. Essa è in generale sempre maggiore della semilarghezza della strada, e può essere ottenuta dividendo quest'ultima per il seno dell'angolo fra il tratto stradale e la congiungente sorgente e ricevitore. Chiaramente se la distanza d fra sorgente e ricevitore è inferiore a questa, non si ha alcun effetto di schermatura in quanto il punto considerato è dentro la sede stradale. Il coseno dell'angolo fra tratto stradale e congiungente sorgente-ricevitore viene facilmente ottenuto come prodotto scalare fra i versori:

$$\cos(\alpha) = \frac{(X_2 - X_1) \cdot (X_c - X_p) + (Y_2 - Y_1) \cdot (Y_c - Y_p)}{d \cdot l}$$

il seno dell'angolo viene poi ottenuto dal coseno mediante la relazione a tutti nota.

Il secondo problema consiste nello stabilire se il punto di calcolo considerato si trova "a sinistra" o "a destra" del tratto stradale considerato, e dunque se va considerata la altezza media degli edifici sul lato sinistro h_l o quella sul lato destro h_r . Per far ciò si opera il prodotto vettoriale fra i coseni direttori del tratto considerato e della congiunte fra punto di calcolo e primo punto del segmento:

$$\text{Sig} = \frac{(X_p - X_1)}{(X_2 - X_1)} - \frac{(Y_p - Y_1)}{(Y_2 - Y_1)}$$

Se tale valore è positivo significa che il punto di calcolo è a destra del segmento orientato 1->2, e pertanto il calcolo della differenza di cammino d andrà fatto considerando l'altezza degli edifici h_r :

$$\delta = \sqrt{w_{eff}^2 + (h_r - .5)^2} + \sqrt{(d - w_{eff})^2 + (h_r - 1.5)^2} - d$$

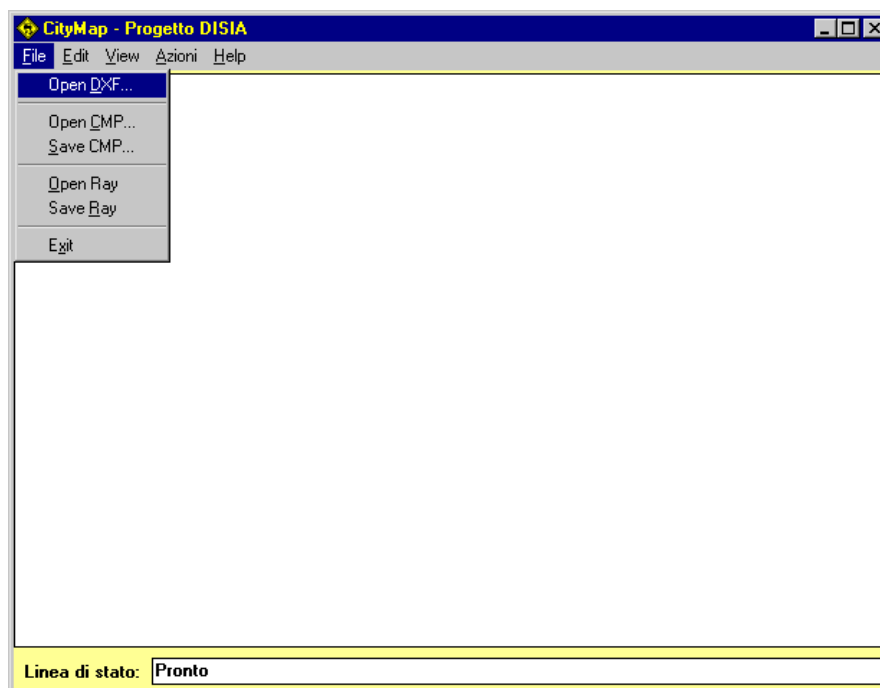
Si noti come l'altezza della sorgente è stata prudenzialmente assunta a 0.5m dal terreno, e quella del ricevitore ad 1.5m dal suolo.

Se viceversa il punto di calcolo fosse risultato a sinistra del tratto considerato, lo stesso calcolo sarebbe stato operato utilizzando h_l . Si è infine assunto di considerare nullo l'effetto di schermatura se l'altezza media degli edifici è inferiore ad 1m.

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).

2.3 Interfaccia utente di Citymap

Il programma Citymap si presenta come un programma sotto Windows, dotato di un menu a tendina, di una finestra grafica e di una linea di stato.

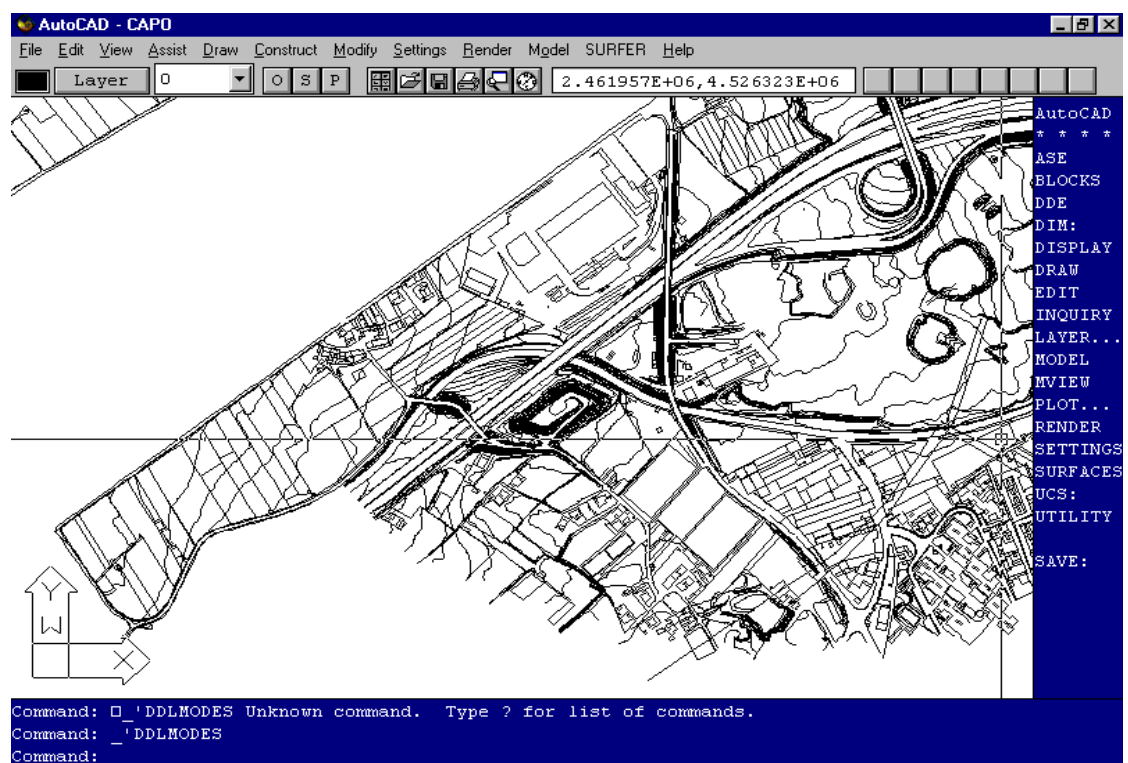


Come detto in premessa i softwares di acustica sviluppati presuppongono l'utilizzo di Autocad versione 12 per Windows nella fase preliminare in cui si definiscono le entità grafiche a cui sono associati livelli di emissione sonora. Si parte quindi dalla cartografia urbana che può essere memorizzata in formato vettoriale o raster; nel primo caso il file proviene dalla digitalizzazione manuale di mappe trasferite secondo lo standard DXF o IGES. La cartografia raster è invece tipicamente il risultato di una scannerizzazione o di un programma di interpretazione di immagini; in questo caso gli standard più comuni sono TIFF, RLC, LAN. Per il calcolo acustico la base cartografica costituisce uno sfondo per l'individuazione delle sorgenti (vie di traffico e sorgenti fisse) e come tale è sufficiente l'immagine rasterizzata. Emergono tuttavia problemi quando la mappa allo studio è particolarmente complessa, in questi casi la dimensione del file utilizzato rappresenta un ostacolo anche con processori veloci.

Quando il supporto cartografico è disponibile in questi formati frutto di raster si suggerisce comunque di predisporre una base cartografica vettorializzata formato dxf. Il primo passo consiste nell'avviare AutoCad dal menu di avvio (figura seguente).



Nella figura in basso viene evidenziata la mappa di una porzione di territorio disponibile in formato dxf ed ottenuta a video con il comando **import/export DXFin nomefile**; questo comando è disponibile sotto la tendina File.

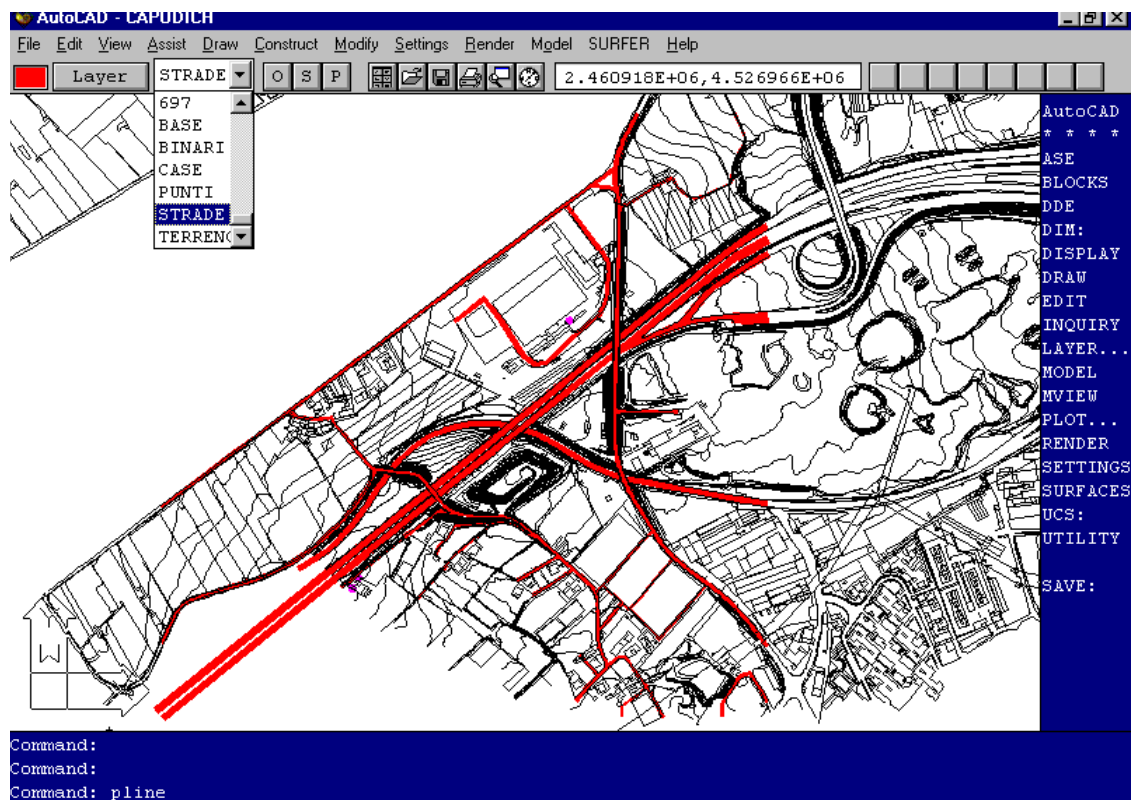


E' indispensabile a questo punto verificare che le dimensioni del disegno siano in scala 1:1; con il comando **Inquiry/Distance** sotto la tendina **Assist** è possibile verificare la lunghezza di un elemento noto. Qualora si riscontrasse una discrepanza tra valore reale e valore indicato, è necessario correggere le dimensioni del disegno introducendo il fattore di scala digitando il comando **Scale**.

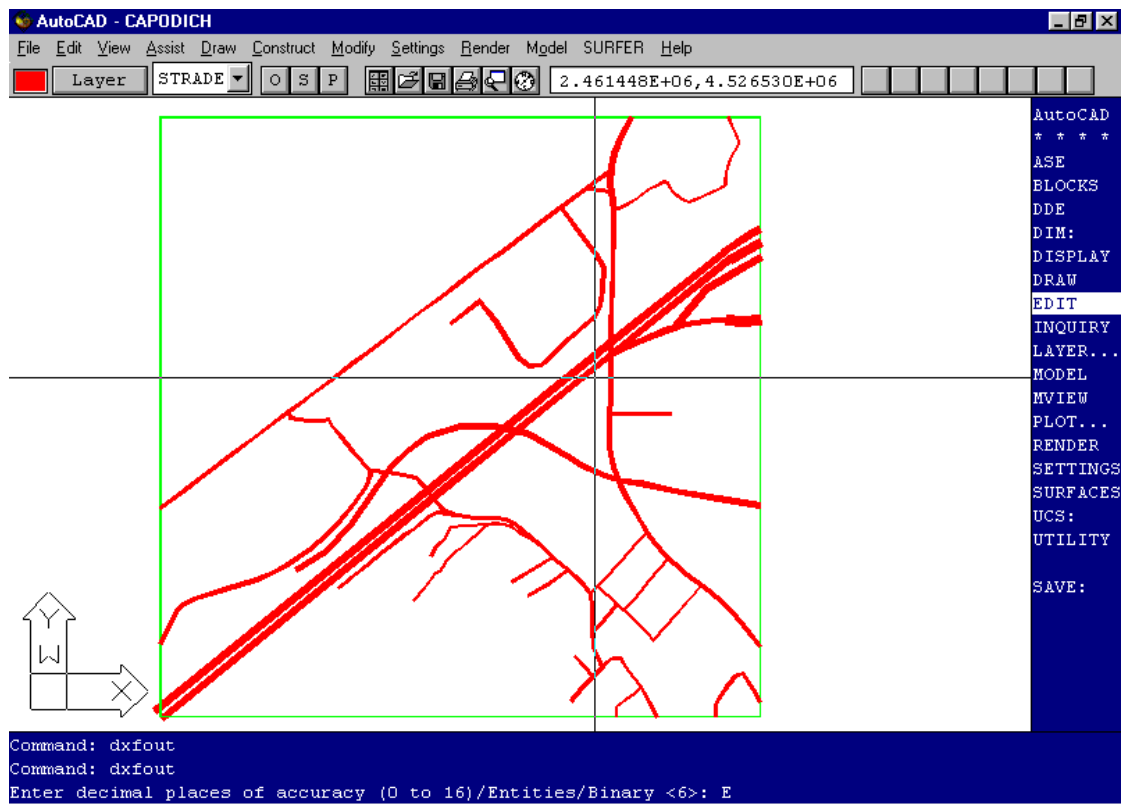
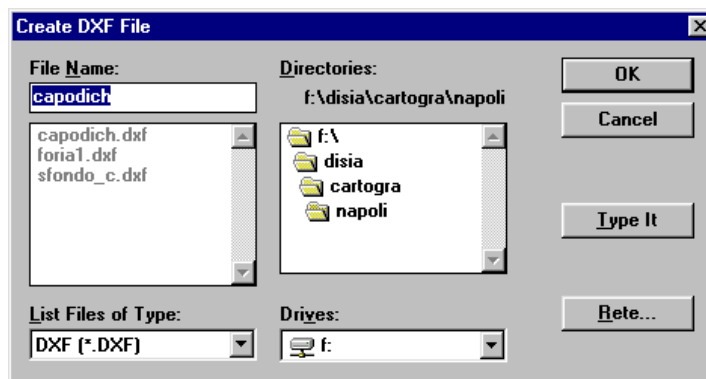
Occorre a questo punto creare i layers relativi alle entità grafiche alle quali saranno associati i dati di emissione acustica (essenzialmente STRADE, BINARI, SOURCES) distinguendoli con una opportuna coloritura. Questa operazione è fattibile richiamando la tendina **Layer control** dal menu principale.

Sul layer STRADE occorre quindi costruire il reticolo relativo a questa sorgente. A questo scopo si procede costruendo una polilinea con il comando **pline** associando a ciascun tronco di carreggiata un tratto di polilinea di ampiezza pari alla larghezza della carreggiata stessa. Ai fini della correttezza del successivo calcolo acustico occorre osservare l'accorgimento di interrompere la polilinea in corrispondenza di ogni variazione delle caratteristiche geometriche o di traffico che comportano un cambiamento del valore di emissione acustica associato: tipo di sezione stradale, tipo di pavimentazione, pendenza della strada, composizione e entità del flusso di traffico; ad esempio, passando da una sezione a raso, ad una sezione ad U (case sui due lati della strada) occorre chiudere la polilinea e crearne una successiva.

Sul layer BINARI si deve costruire il reticolo relativo alle linee ferroviarie, utilizzando accorgimenti analoghi a quelli adottati nella costruzione del reticolo delle strade.



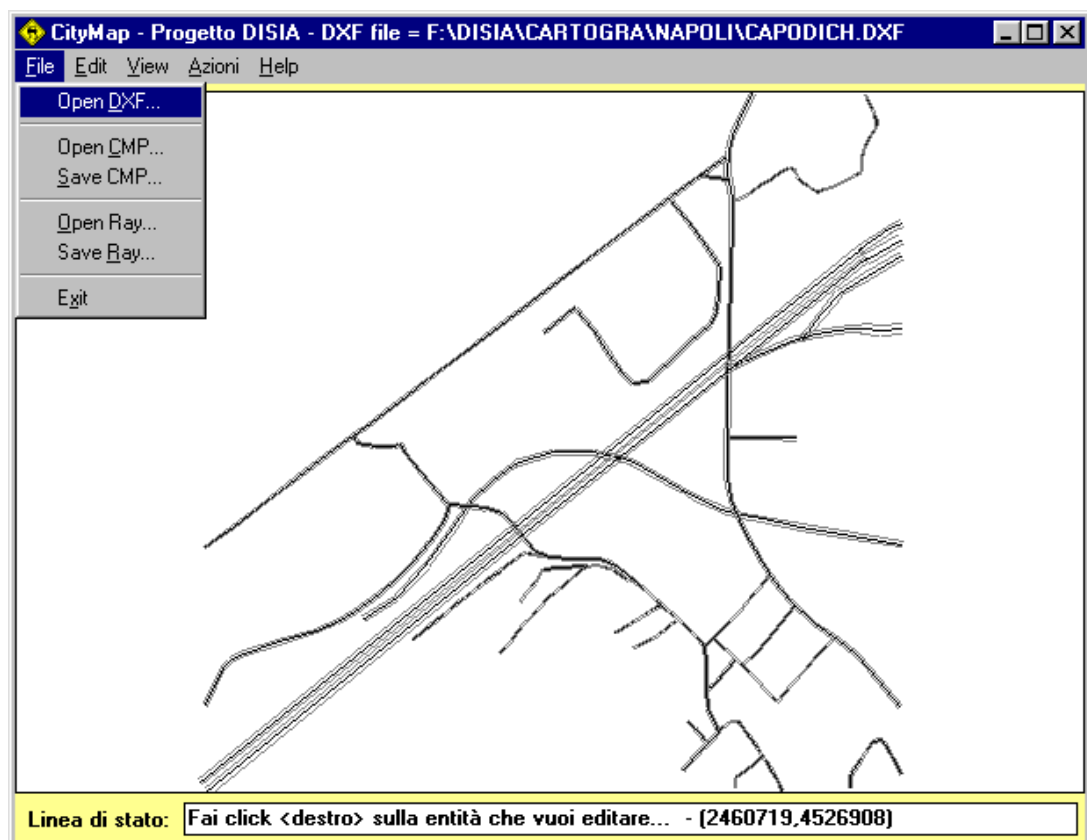
I layers strade e binari sono gli unici layers utilizzati dal successivo modulo di calcolo acustico. Occorre pertanto spegnere tutti gli altri layers e salvare un file **.dxf** contenente solo queste informazioni.



A questo punto è possibile uscire da AutoCad ed avviare il modulo CityMap dal menu principale.



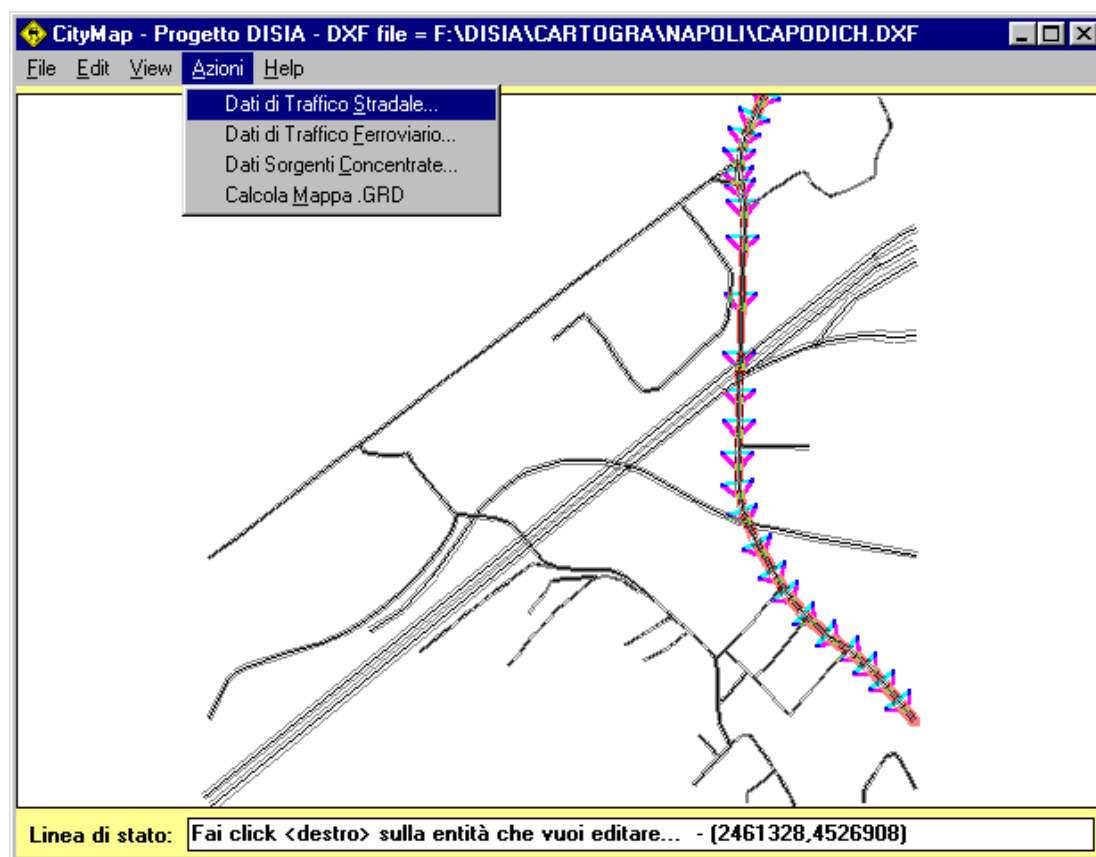
Il modulo CityMap è stato sviluppato integralmente nel presente progetto e consente l'attribuzione dei dati di emissione acustica alle entità grafiche costruite e l'esecuzione del calcolo acustico del modello di pianificazione. Occorre in primo luogo aprire il file .dxf precedentemente creato in AutoCad per fare apparire sullo schermo la rappresentazione planimetrica delle entità riconosciute.



La linea di stato invita a “clickare” con il tasto destro del mouse onde introdurre i dati di emissione acustica di strade o binari, mentre il tasto sinistro del mouse serve a “zoomare” una area definita dell’intera

planimetria. I comandi del menu a tendina **View** consentono di ritornare alla visualizzazione dell'intera geometria.

La modalità di introduzione dei dati acustici si attiva, oltre che “clickando <destro>” su una strada (grigia) o ferrovia (blu), anche con l'opportuna voce del menu **Azioni**. Cliccando il comando **Dati di traffico stradale** vengono evidenziate in successione tutte le polilinee contenute sul layer strade (figura seguente).



e compare una tendina che consente di associare alla singola entità grafica evidenziata il dato di traffico o il valore di emissione e la caratteristica geometrica della sezione stradale (figura seguente)

Si fa presente come la presenza simultanea delle due finestre sullo schermo sia già problematica con una risoluzione video di 800x600 pixels: il funzionamento del programma non è possibile in modalità VGA standard (640x480), e si consiglia di adottare sempre una risoluzione di almeno 1024x768 pixels. Il dato di emissione acustica può essere attribuito direttamente nel caso siano disponibili rilievi acustici diretti (si clicca **fisso** e si introduce il livello relativo ai due periodi diurno e notturno). Alternativamente si clicca **calcolo** attivando la sottostante tendina relativa ai dati di traffico ed alle proprietà della sede stradale.

Nella finestra grafica il tratto stradale considerato viene evidenziato con colore e con frecce che indicano il “verso” del tratto considerato (questo è importante affinché sia chiaro quale è il lato “sinistro” e quello “destro” della strada. Le variabili da introdurre corrispondono alle modalità di

rilevamento della banca dati di emissione del progetto Disia: pertanto i veicoli sono divisi in 5 categorie,

Editazione dati traffico ferroviario

Selezione Tratto Ferroviario

Tratto n. Nome:

Leq,7.5m (G/N) ☐ Fisso ☒ Calcola

Proprietà

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

Traffico diurno complessivo

	Num.	Lungh.	Velocità
tr.merci (V1)	34	450	C1-{0-60 km/h}
tr.pass. locali (V2)	44	300	C1-{0-60 km/h}
tr.pass. l.perc. (V3)	45	160	C1-{0-60 km/h}

Traffico notturno complessivo

	Num.	Lungh.	Velocità
tr.merci (V1)	68	600	C1-{0-60 km/h}
tr.pass. locali (V2)	6	300	C1-{0-60 km/h}
tr.pass. l.perc. (V3)	10	160	C1-{0-60 km/h}

Editazione dati traffico stradale

Selezione Tratto Stradale

Tratto n. Nome:

Leq,7.5m (G/N) ☐ 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

esistono 8 diverse classi di velocità (4 relative al flusso urbano, 4 a quello extraurbano), la pavimentazione può essere normale, in pavè o in asfalto fonoassorbente, ed infine la pendenza della strada può essere “nulla” (<5%), in salita o in discesa (>5%). Per semplificare questa operazione sono disponibili anche 6 bottoni, che impostano tutte le variabili su valori predefiniti per 6 tipi “standard” di tipologie stradali secondo la classificazione raccomandata per la stesura dei piani urbani del traffico. Al termine della editazione del dato di traffico in base ai dati di emissione contenuti nella banca dati relativa, il modello calcola il valore di emissione associato al tratto di strada e lo riporta nelle caselle **Leq,7.5m(G/N)**. L’operazione eseguita per i dati di traffico veicolare deve ripetuta per gli altri tipi di sorgente attivando rispettivamente i comandi **Dati di traffico ferroviario** e **Dati sorgenti concentrate** sotto la tendina **Azioni**. Nel primo caso vengono introdotti i dati di traffico di ciascun tratto di linea ferroviaria

con le stesse modalità previste per il traffico stradale. Si hanno solo 3 tipi di convogli e 4 classi di velocità, ma è necessario specificare anche la lunghezza di ciascun tipo di treno. Il tipo di armamento può essere binario continuo saldato o binario con scambi (o interruzioni). Nel secondo caso a ciascuna polilinea costituente il perimetro di uno stabilimento vengono associati i livelli in dB(A) rilevati al suo perimetro secondo le indicazioni previste dalla legge vigente.

Si ricorda che l'editazione dei dati di traffico o di emissione dei tre tipi di sorgenti è possibile solo se nel file dxf richiamato all'avvio di CityMap sono attivi i relativi layers (STRADE E BINARI). Le altre entità di disegno (3DFACES, SOURCES, SEZIONI) saranno illustrate nel capitolo relativo a Disiapyr, in quanto sono riconosciute solo da tale programma, anche se ovviamente "transitano" in Citymap nel corso della creazione di un file .RAY.

Una volta terminata l'introduzione dei dati di emissione sonora, conviene salvare tutti i dati in un file .CMP, che contiene le entità geometriche (anche quelle per Disiapyr), i dati di traffico ed i dati di emissione corrispondenti.

A questo punto si può operare il calcolo della mappatura isolivello, scegliendo l'opportuna opzione dal menu Azioni. Compare a questo punto una mascherina, che consente di introdurre il nome del file .GRD da produrre, di selezionare fra calcolo dei livelli diurni e notturni, e di specificare le dimensioni della griglia di calcolo.

Esecuzione Mappatura .GRD

Nome del File: C:\DISIA\CARTOGRA\TRIESTE\DISIASEZ.GR Browse

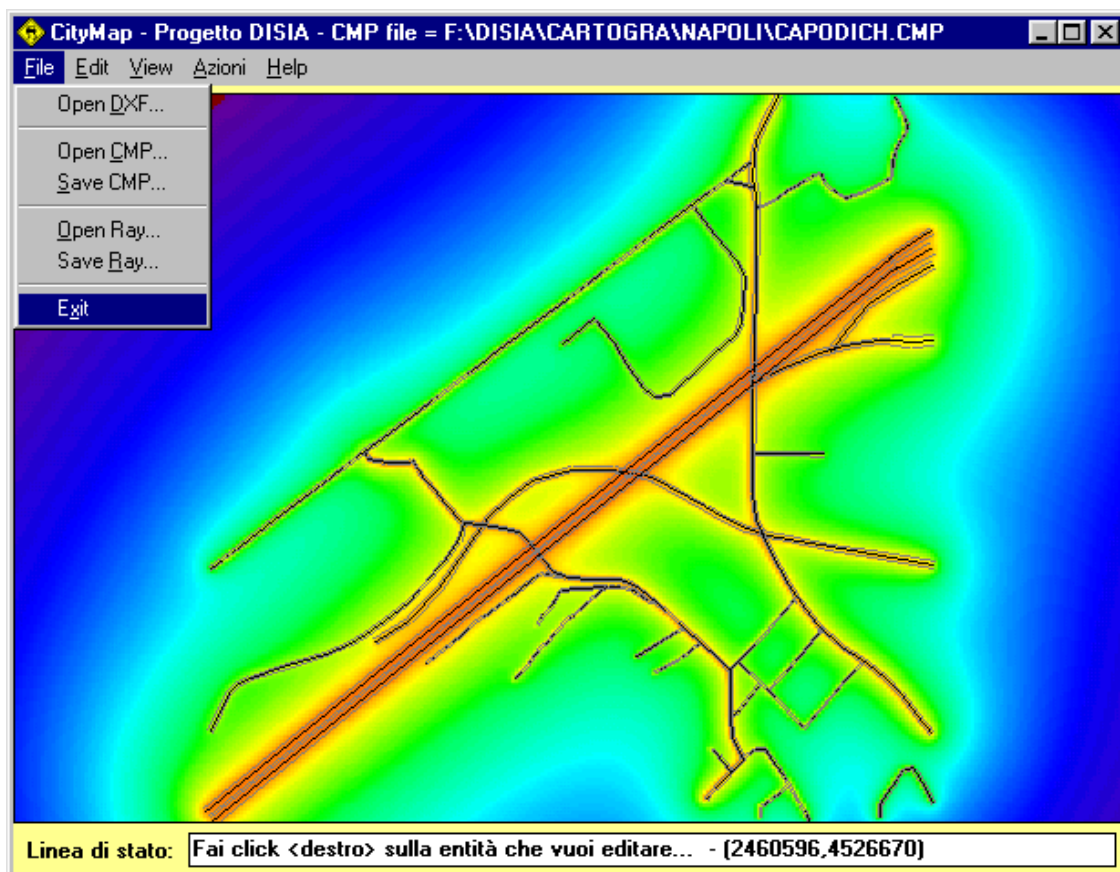
Periodo: ☒ Diurno ☐ Notturno

Numero di divisioni della griglia:

Orizzontale	81	Verticale	61
-------------	----	-----------	----

OK - Esegui Annulla

Nel corso del calcolo successivo, la finestra grafica viene via via colorata, in modo da fornire all'utente un "feedback" sul corretto funzionamento del programma. Comunque la mappatura a colori prodotta in questa fase deve essere intesa in termini puramente qualitativi, essendo poi compito del programma Surfer la produzione dell'elaborato grafico di qualità tipografica.



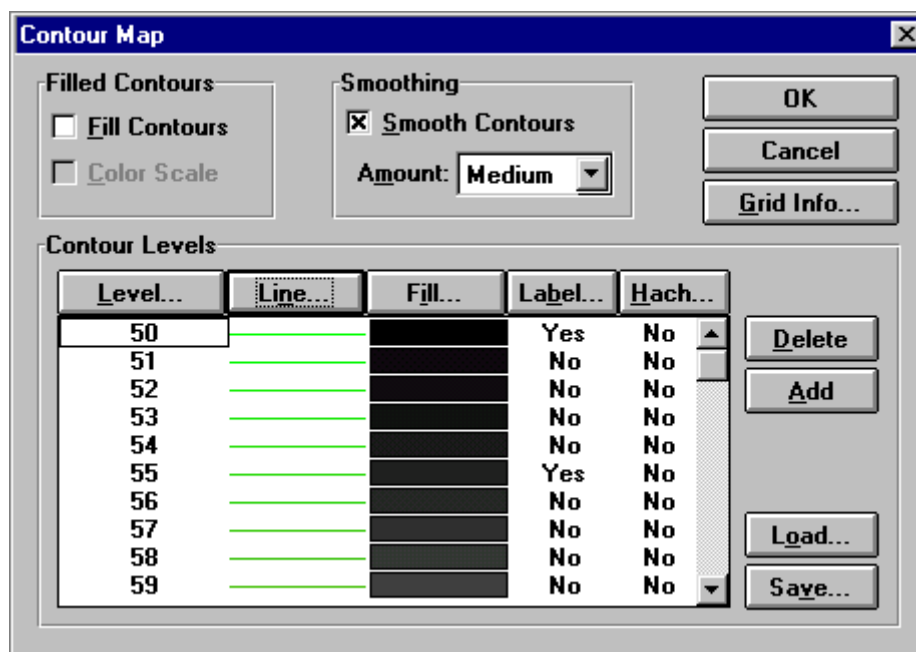
Nel corso della mappatura la linea di stato mostra i valori del livello sonoro calcolati nei successivi nodi della griglia. Sebbene il programma sia “multitasking”, non conviene appesantire il lavoro del computer lanciando altri processi simultaneamente, anche perchè essi verrebbero eseguiti con una lentezza esasperante.

A questo punto è possibile chiudere l'applicazione CityMap ed avviare Surfer dal menu principale.

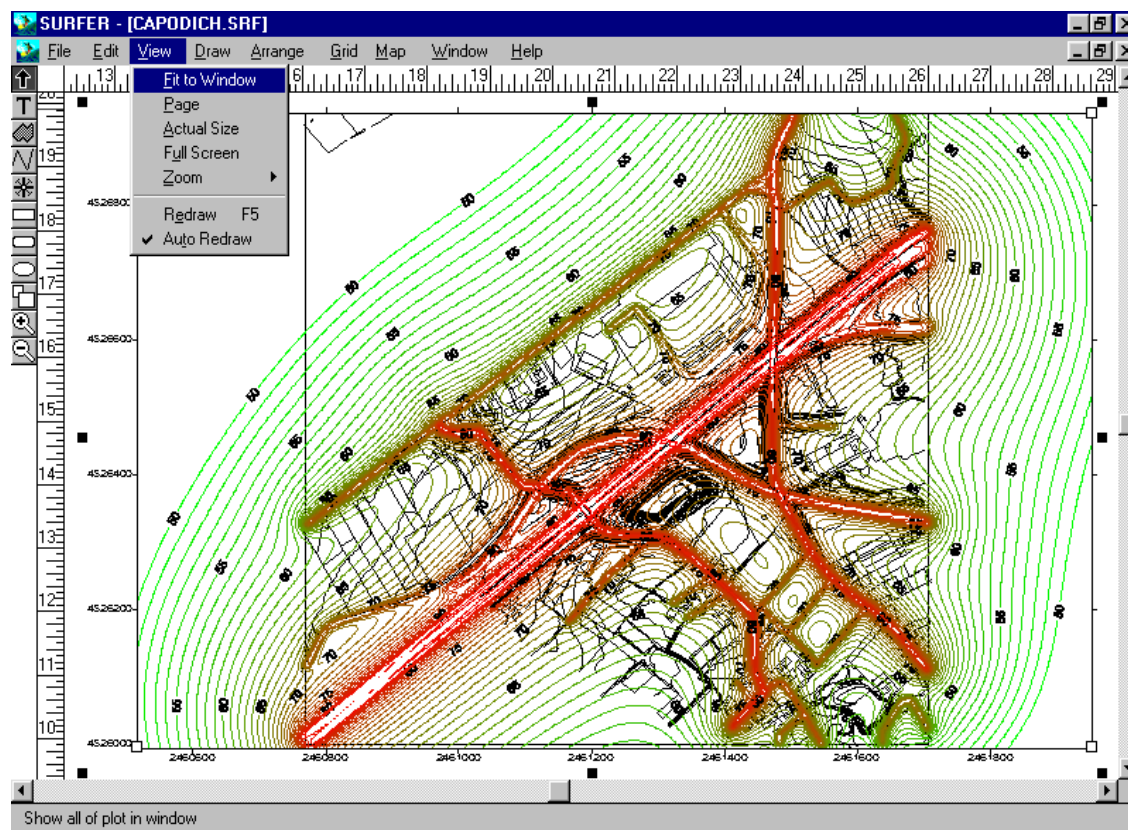


Occorre a questo punto richiamare il file di sfondo con il comando **Load Base Map** sotto la tendina **Map**. Si richiama la mappa iniziale servita come base per la costruzione dei layers strade e binari sulla quale verranno tracciate le curve isolivello ottenute per interpolazione dei valori frutto del calcolo fatto da CityMap.

Attivando il comando **Contour** nella tendina **Map** viene richiesto all'utente di indicare il file **.grd** da processare. La finestra **Contour Map** rappresentata in figura consente di scegliere le impostazioni della mappa acustica finale.

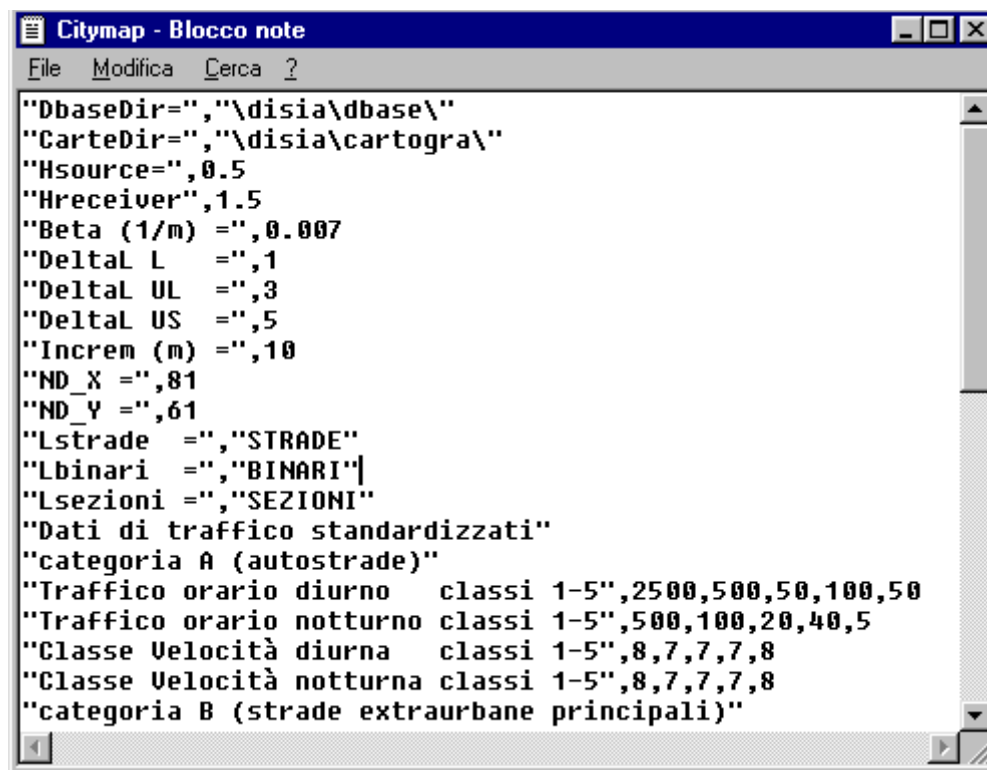


E' possibile memorizzare una impostazione personalizzata con un file **.jvl** richiamabile ogni volta che si avvia il calcolo di una mappa. Per avere una perfetta sovrapposizione tra il file di sfondo e la mappa acustica occorre selezionare entrambe le figure con il comando **Select All** sotto la tendina **Edit** successivamente attivare il comando **Overly Maps** sotto la tendina **Map**.



Il risultato del calcolo acustico può così essere stampato complessivamente o evidenziando con il comando ZOOM le zone che interessano

2.4 Il file CITYMAP.INI



```
Citymap - Blocco note
File Modifica Cerca ?
"DbaseDir=","\\disia\\dbase\\"
"CarteDir=","\\disia\\cartogra\\"
"Hsource=","0.5
"Hreceiver","1.5
"Beta (1/m) =","0.007
"DeltaL L ="",1
"DeltaL UL ="",3
"DeltaL US ="",5
"Increm (m) ="",10
"ND_X ="",81
"ND_Y ="",61
"Lstrade ="", "STRADE"
"Lbinari ="", "BINARI"
"Lsezioni ="", "SEZIONI"
"Dati di traffico standardizzati"
"categoria A (autostrade)"
"Traffico orario diurno classi 1-5",2500,500,50,100,50
"Traffico orario notturno classi 1-5",500,100,20,40,5
"Classe Velocità diurna classi 1-5",8,7,7,7,8
"Classe Velocità notturna classi 1-5",8,7,7,7,8
"categoria B (strade extraurbane principali)"
```

Il file Citymap.ini, avviabile dal menu principale come gli altri moduli software, consente la modifica di numerosi parametri operativi senza la necessità di dover ricompilare il programma, semplicemente editando i valori contenuti nel file CITYMAP.INI. Segue il listato di tale file, nel quale è stata aggiunta la numerazione delle linee onde facilitarne il commento:

1. "DbaseDir=","\\disia\\dbase\\"
2. "CarteDir=","\\disia\\cartogra\\"
3. "Hsource=","0.5
4. "Hreceiver","1.5
5. "Beta (1/m) =","0.007
6. "DeltaL L ="",1
7. "DeltaL UL ="",3
8. "DeltaL US ="",5
9. "Increm (m) ="",10
10. "ND_X ="",81
11. "ND_Y ="",61
12. "Lstrade ="", "STRADE"
13. "Lbinari ="", "BINARI"
14. "Lsezioni ="", "SEZIONI"
15. "Dati di traffico standardizzati"

16. "categoria A (autostrade)"
17. "Traffico orario diurno classi 1-5",2500,500,50,100,50
18. "Traffico orario notturno classi 1-5",500,100,20,40,5
19. "Classe Velocità diurna classi 1-5",8,7,7,7,8
20. "Classe Velocità notturna classi 1-5",8,7,7,7,8
21. "categoria B (strade extraurbane principali)"
22. "Traffico orario diurno classi 1-5",800,100,40,40,40
23. "Traffico orario notturno classi 1-5",100,30,10,10,5
24. "Classe Velocità diurna classi 1-5",7,6,6,6,7
25. "Classe Velocità notturna classi 1-5",7,6,6,6,8
26. "categoria C (strade extraurbane secondarie)"
27. "Traffico orario diurno classi 1-5",150,70,10,10,10
28. "Traffico orario diurno classi 1-5",80,30,5,5,10
29. "Classe Velocità diurna classi 1-5",6,6,6,5,6
30. "Classe Velocità notturna classi 1-5",6,6,6,5,6
31. "categoria D (strade urbane di scorrimento)"
32. "Traffico orario diurno classi 1-5",1000,150,50,50,150
33. "Traffico orario diurno classi 1-5",200,50,20,20,40
34. "Classe Velocità diurna classi 1-5",7,6,6,6,7
35. "Classe Velocità notturna classi 1-5",7,6,6,6,8
36. "categoria E (strade urbane di quartiere)"
37. "Traffico orario diurno classi 1-5",300,100,0,0,100
38. "Traffico orario diurno classi 1-5",100,20,0,0,20
39. "Classe Velocità diurna classi 1-5",5,2,2,2,5
40. "Classe Velocità notturna classi 1-5",5,2,2,2,5
41. "categoria F (strade urbane locali)"
42. "Traffico orario diurno classi 1-5",100,20,0,0,20
43. "Traffico orario diurno classi 1-5",20,5,0,0,5
44. "Classe Velocità diurna classi 1-5",1,1,1,1,2
45. "Classe Velocità notturna classi 1-5",1,1,1,1,2

Le linee 1 e 2 definiscono le directory di lavoro; le linee 3 e 4 definiscono rispettivamente l'altezza della sorgente e del ricevitore sul terreno; la linea 5 contiene il calore del coefficiente di attenuazione in eccesso b; le linee 6, 7 e 8 contengono gli incrementi di livello per sezioni stradali ad L, ad U largo ed a U stretto.

La linea 9 contiene il valore in m della spaziatura fra le sorgenti concentrate equivalenti che vengono definite per rappresentare le sorgenti lineari nei files .RAY, e quindi nel calcolo con Disiapyr.

Le linee 10 ed 11 definiscono le dimensioni di default della griglia di calcolo; le linee 12, 13 e 14 specificano il nome dei LAYER di Autocad che definiscono le strade, i binari e le sezioni verticali; dalla linea 15 fino alla fine del file vengono infine riportati i dati di traffico standard associati ai 6 bottoni per strade tipizzate.

E' possibile modificare tutti i valori contenuti nel file CITYMAP.INI con un editor di testi (ad es. Notepad), facendo però attenzione a non variare il numero di linee o la posizione di ciascun parametro, ma solo il suo valore.

3 Il programma DISIAPYR

3.1 Premessa

La scelta di implementare questi tipi di algoritmi è strettamente connessa alle esigenze di applicazione in un contesto urbano. Si tratta di un ambiente di propagazione complesso dal punto di vista acustico e in molti casi assimilabile all'ambiente interno per la presenza di numerose superfici che devono essere caratterizzate dal punto di vista dell'assorbimento acustico e la necessità di una buona definizione della geometria per caratterizzare bene la propagazione del suono. In un simile contesto l'effettuazione di una modellizzazione acustica su una vasta scala (si pensi ad una intera città) prendendo in considerazione tutti gli effetti che governano la propagazione del suono comporterebbe tempi inaccettabili per la preparazione della cartografia, per la definizione dell'input e per lo stesso tempo macchina. Per questo motivo si è optato per un modello di pianificazione che consenta di avere una visione del clima acustico di una intera città grazie all'essenzialità dell'algoritmo di base e ad un massimo grado di interfacciabilità con i software ormai diffusamente utilizzati per la cartografia urbana e per i piani urbani del traffico. D'altra parte la simulazione acustica dei punti critici per la messa a punto di interventi di insonorizzazione richiede l'utilizzo di modelli di massimo dettaglio in grado di gestire una propagazione acustica in ambienti molto complessi anche se esterni (si pensi al dimensionamento acustico di sistemi silenziatori per gallerie o coperture stradali con baffles). Per questo motivo è stata implementata una tecnica di tracciamento di fasci che rispetto al tracciamento di raggi consente un notevole risparmio di tempo di calcolo. L'applicazione in un contesto urbano esclude infine la necessità di proiettare i raggi (o fasci) a lunghe distanze, essendo questo uno dei principali problemi ancora in fase di studio per questo tipo di algoritmo.

Il programma Disiapyr deriva dal primo software di Pyramid Tracing acustico rilasciato nel gennaio 1994, denominato RAMSETE. Esso costituisce un valido strumento per la previsione del campo sonoro in ambienti chiusi, ed ha applicazioni soprattutto per lo studio di teatri ed auditorium, per la progettazione di impianti di amplificazione sonora, per il calcolo del livello sonoro in ambienti industriali.

Per l'utilizzo in ambiente esterno, il tracciatore di piramidi di Ramsete è stato interamente riscritto, in modo da implementare correttamente la diffrazione multipla su ostacoli non sottili o su schermature composite. Inoltre la routine di salvataggio dei risultati è stata modificata in modo da fornire direttamente i livelli sonori complessivi in un formato idoneo alla lettura da parte di Surfer, anziché salvare separatamente la risposta all'impulso per ciascun ricevitore e ciascuna sorgente considerata,

Va infine osservato come, nei casi usuali di impiego di Disiapyr, non ci sia alcun fenomeno di riverberazione o coda sonora, poichè la propagazione avviene all'aperto. Pertanto tutta la problematica relativa alla "correzione" della coda sonora ed al carattere più o meno Sabiniano del campo sonoro perde significato.

Nel successivo paragrafo, tuttavia, la teoria del Pyramid Tracing viene sviluppata integralmente, poichè non è escluso che Disiapyr possa venire impiegato anche per lo studio di fenomeni di propagazione accoppiata esterno-interno: disegnando correttamente la facciata di un edificio, con porte e finestre, ed assegnando a parete e serramenti gli opportuni valori di potere fonoisolante, è infatti possibile giungere ad una stima del livello sonoro dentro un edificio per effetto del traffico stradale o ferroviario al suo esterno, e dell'effettiva riduzione in dB(A) conseguibile mediante interventi di bonifica (ad es. schermature). E' infatti noto che, per effetto della notevole variazione con la frequenza del potere fonoisolante delle strutture edilizie, l'attenuazione in dB(A) ottenuta da una schermatura sul rumore esterno in facciata è sempre una sovrastima dell'attenuazione in dB(A) riscontrabile entro i locali chiusi.

Pertanto Disiapyr costituisce a tutt'oggi l'unico programma di calcolo in grado di fornire stime corrette dell'effettivo beneficio conseguibile mediante interventi di protezione passiva dal rumore da traffico stradale o ferroviario all'interno dei locali abitati.

Poichè comunque Disiapyr mantiene completa compatibilità con i files di input di Ramsete, sia per quanto riguarda la geometria (files .RAY) sia per quanto riguarda le sorgenti sonore (files .SPK), nulla vieta che esso venga eccezionalmente impiegato anche per l'esecuzione di mappature isolivello entro ambienti confinati, pur non essendo dotato delle raffinate possibilità di post processing grafico di Ramsete, nè della capacità di produrre simulazioni acustiche del campo sonoro, come vicerersa Ramsete può fare in abbinamento ad un software di auralizzazione quale AURORA.

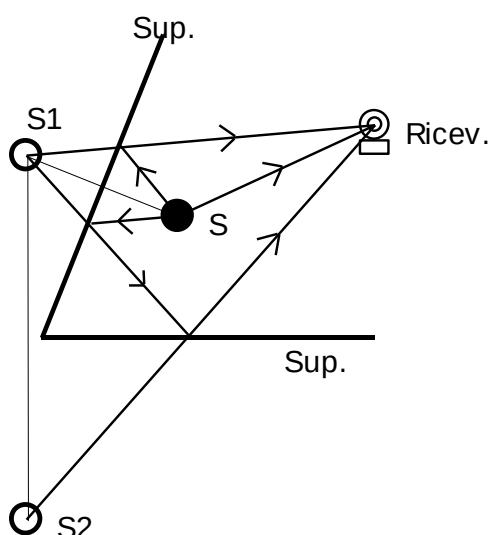
3.2 Rassegna delle altre metodiche previsionali

Viene qui di seguito presentata una rassegna delle tecniche di modellizzazione comunemente adottate per l'implementazione di algoritmi finalizzati al calcolo acustico di dettaglio. Si tratta di modelli proposti sia per l'ambiente esterno che interno.

Modelli alle Sorgenti Immagine

E' una tecnica di modellizzazione largamente in uso anche nelle implementazioni puramente grafiche.

La seguente figura illustra la costruzione di una sorgente del primo ordine, ed a partire da questa di una sorgente del 2° ordine (riflessione doppia):



Una volta individuata la posizione di una sorgente immagine, si calcola il contributo al campo sonoro nel punto ricevente considerando la stessa come sorgente in campo libero alla distanza effettiva fra sorgente immagine e ricevitore, con potenza sonora ridotta per effetto dell'assorbimento di energia da parte delle pareti su cui l'onda ha impattato, ed impiegando dunque la relazione:

$$L_p = L_w + 10 \cdot \lg \left(\frac{Q_s \cdot \prod_i (1 - \alpha_i)}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \right)$$

Poichè in base alla distanza percorsa è noto il tempo impiegato dall'onda a raggiungere il ricevitore, è possibile costruire a partire dai singoli arrivi d'energia sonora la risposta all'impulso energetica in ciascun ricevitore. Essa può poi venire integrata all'indietro, onde ottenere il decadimento sonoro di una sorgente stazionaria interrotta, e valutare dunque sia il livello sonoro a regime, sia il tempo di riverberazione.

La costruzione può essere via via iterata fino ad ordini molto elevati, ma procedendo in tal modo il numero di sorgenti immagine create cresce a dismisura. Se si considera ad esempio una semplice stanza parallelepipedica, si osserva come il numero di sorgenti immagine del primo ordine sia pari a 6, quelle del 2° ordine sono 30, quelle del 3° ordine 150, quelle del 4° ordine 450, e via così in progressione geometrica.

In un ambiente chiuso di forma parallelepipedica la generazione delle coordinate delle sorgenti immagine è pressochè automatica, e si è sicuri che esse sono sempre sicuramente "viste" da tutti i ricevitori. Pertanto in questa geometria particolarmente semplice il metodo è molto efficace, ed è possibile generare iterativamente sorgenti di ordine molto elevato, arrivando a descrivere correttamente buona parte della coda riverberante costituita dall'arrivo di tutte le onde riflesse.

Quando viceversa la geometria è più complicata, è necessario operare un test di visibilità fra ciascuna sorgente immagine e ciascun ricevitore, per essere sicuri che il raggio riflesso colpisca il piano di ciascuna parete interessata dalle riflessioni in un punto interno all'elemento di superficie stesso. Si scopre che in tal caso, pur venendo generate centinaia di migliaia di sorgenti immagine (il numero è impressionante in ambienti di forma molto irregolare), solo una piccolissima percentuale delle stesse supera i test di visibilità e tutte le altre non contribuiscono al campo sonoro nel ricevitore considerato. Poichè il calcolo comprende ora numerosi, complicati controlli, e gli stessi vanno ripetuti per ciascun ricevitore, l'elaborazione diviene molto lenta, ed è solitamente impossibile generare sorgenti immagine di ordine superiore al 4° o 5°: ciò chiaramente è del tutto insufficiente alla previsione dell'intera coda sonora, e pertanto la parte mancante di essa deve venire in qualche modo ricostruita, ad esempio ricorrendo ancora una volta alla teoria statistica del campo diffuso. Alcuni modelli in commercio sono in grado di operare con questa tecnica ibrida, effettuando però il calcolo per un singolo punto ricevente con riflessioni fino al 3° ordine, e dunque senza la possibilità di effettuare mappature del livello sonoro. Già con sorgenti immagine limitate al 3° ordine, il calcolo richiede alcuni minuti in ambienti molto complessi e con numerose sorgenti. Per le modellizzazioni in ambienti esterni aperti finalizzate alla progettazione di schermi tale tecnica risulta efficiente ed affidabile. I problemi sorgono nei tentativi di applicazione in tessuti urbani particolarmente complessi, per la valutazione dell'effetto di rivestimenti terminali di gallerie o coperture di strade con setti fonoassorbenti tipo baffles.

Tecnica Ray Tracing

Questa tecnica è stata sviluppata da Krokstadt ormai da 30 anni, e nella sua formulazione originale può essere considerata fra i Metodi di Montecarlo. A partire dalla sorgente sonora (puntiforme) si lancia un gran numero di "raggi sonori" in direzioni scelte a caso, con una certa energia iniziale dipendente dalla direttività della sorgente nella particolare direzione considerata. E' pertanto necessario disporre di un algoritmo di generazione

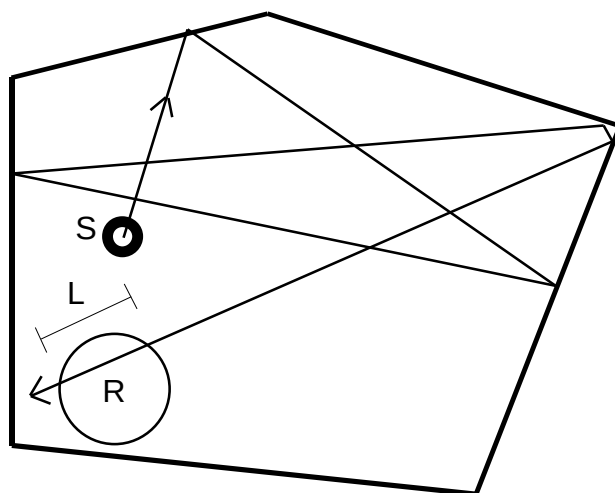
dei raggi che produca, mediamente, una uniforme distribuzione degli stessi su una sfera, e ciò costituisce di per sè un problema non banale.

I raggi vengono poi seguiti nei loro rimbalzi sulle superfici di contorno, che possono avvenire sia con legge speculare che diffusa; in quest'ultimo caso, viene nuovamente impiegato un generatore di numeri casuali per reindirizzare il raggio in una direzione arbitraria, eventualmente tenendo conto di una legge probabilistica di diffusione, quale ad esempio quella di Lambert. Ad ogni rimbalzo, l'energia posseduta dal raggio viene ridotta della quota assorbita dal materiale, che può essere resa variabile in funzione dell'angolo di incidenza (ad esempio con le note relazioni di Davis o London [3]). Si può anche tenere conto dell' attenuazione dovuta alla dissipazione nel mezzo (aria), mentre **non deve essere presa in considerazione la divergenza sferica**, cioè l'attenuazione di livello sonoro causata dall'allontanamento progressivo dalla sorgente: a ciò provvede già la divergenza fra i raggi, e la conseguente riduzione del numero di essi che va ad impattare su un ricevitore, al crescere della distanza dello stesso dalla sorgente.

I ricevitori sono costituiti da corpi di dimensione finita, solitamente sfere (onde risultare omnidirezionali). Anche il meccanismo di verifica di impatto con un ricevitore è molto delicato, poichè da esso dipende la congruenza fisica del modello e la sua stabilità statistica. Sono stati in passato proposti ricevitori ad intensità, nei quali si calcola il contributo del raggio che colpisce la sfera come rapporto fra l'energia emessa (in questo caso sarebbe meglio parlare di potenza) e la superficie del ricevitore stesso.

Tuttavia, in campo diffuso è meglio parlare di densità dell'energia sonora, calcolando l'energia per unità di volume che si viene a stabilire nella sfera ricevente. Solo tale tipo di ricevitore è infatti in grado di fornire il valore corretto del livello sonoro sia in campo libero, sia in campo diffuso.

La seguente figura illustra lo schema di generazione dei raggi, di tracciamento degli stessi, e di impatto su un ricevitore sferico a densità:



La quota di Densità di Energia Sonora (in J/m^3) che arriva sulla sfera ricevente è proporzionale alla lunghezza L del segmento di raggio che la interseca. In particolare, se la sorgente sonora ha una potenza W (in Watt) ed una direttività Q_q , e la stessa emette N raggi, che si propagano alla velocità del suono c_0 , il raggio "trasporta" una energia per metro di lunghezza E' (in J/m) pari a:

$$E' = \frac{W \cdot Q_q}{N \cdot c_0}$$

E dunque il ricevitore ottiene un contributo alla propria Densità di Energia sonora che è pari a:

$$D' = \frac{E' \cdot L}{V} \cdot \prod_i (1 - \alpha_i) \cdot e^{-\beta \cdot x}$$

in cui il termine b entro l'esponenziale rappresenta il coefficiente di dissipazione del mezzo (aria), dipendente dalla frequenza, dalla temperatura e dall'umidità relativa (x è ovviamente il percorso complessivo del raggio, da cui dipende anche il tempo di arrivo del contributo suddetto).

Affinchè si abbia sufficiente stabilità statistica, è necessario sparare un numero di raggi così elevato che almeno un certo numero di essi colpisca il ricevitore al termine della loro corsa. Se ad esempio si utilizza un ricevitore con raggio di 1m, e si vuole inseguire i raggi per 2s di storia, la probabilità che un raggio colpisca il ricevitore (concettualmente situato a $2 \cdot c_0 = 680$ m dalla sorgente) è pari al rapporto fra l'area del cerchio massimo della sfera (p) e l'area su cui i raggi si sono dispersi ($4 \cdot p \cdot 680^2$), che è pari a $1/1849600$. Volendo dunque che 3-4 raggi almeno arrivino, occorrerebbe lanciaarne parecchi milioni!

Ovviamente, in campo più o meno diffuso si può anche ammettere che arrivino al ricevitore molti meno raggi, poichè finchè valgono le ipotesi dell'acustica statistica essi mediamente si equivalgono (a parità di tempo di corsa) in termini di contributo energetico.

Infatti, nel campo riverberante si ha una frequenza n di arrivo dei raggi sul ricevitore pressochè costante:

$$n = N \cdot \frac{c_0 \cdot \pi \cdot R^2}{V}$$

Pertanto è sufficiente che sia adeguatamente alto il numero di impatti che si verificano entro ciascun segmento temporale in cui la risposta all'impulso è suddivisa. Se ad esempio si utilizza una divisione in classi di 1 ms, in un ambiente Sabiniano avente volume $V = 10000 \text{ m}^3$ si ha che un ricevitore di 1m di raggio richiede 1000 raggi per dar luogo a 100 impatti ogni ms.

In ogni caso, in presenza di superfici diffondenti la stabilità statistica del metodo è ottenuta solo con il crescere del numero di raggi, che raramente può essere ridotto a qualche decina di migliaia. Pertanto i tempi di

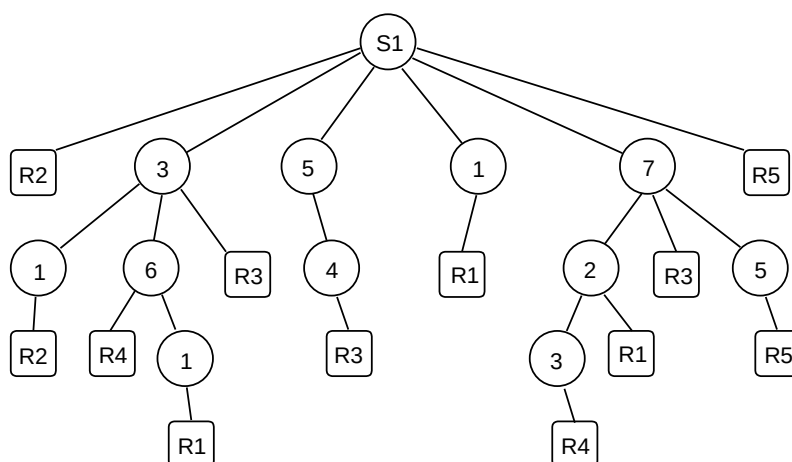
elaborazione restano piuttosto elevati: tipicamente alcune ore per studiare casi di media complessità, fino a 2-3 giorni nel caso di ambienti molto riverberanti e marcatamente non sabiniani [4,5].

Un altro difetto del metodo è che, anche se è abbastanza facile considerare superfici diffondenti, risulta viceversa problematico tenere conto in modo semplice della diffrazione da parte di ostacoli (schermi). Risulta invece possibile considerare **volumi diffondenti**, ovvero regioni dello spazio in cui i raggi subiscono una redirectione casuale: ciò può servire a tenere conto della presenza di ostacoli semitrasparenti, quali scaffalature aperte, regioni intricate di tubazioni o cavi, macchinari complicati, etc. .

Modelli Ibridi (Ray Tracing + Image Source)

Alla base di questo tipo di modelli sta l'originale intuizione di Vorlander [6], che ha proposto di impiegare il Ray Tracing come pre-processore di un tradizionale codice alle sorgenti immagine: il tracciamento dei raggi serve dunque in questo caso soltanto ad identificare quelle successioni di superfici capaci di generare una sorgente immagine valida (che viene comunque assoggettata ai tradizionali test di visibilità), generando in tal modo un numero di possibili sorgenti immagine di parecchi ordini di grandezza inferiore rispetto a quello prodotto dall'arbitraria combinazione di tutte le superfici.

Il problema di questo metodo è costituito dal fatto che il Ray Tracing tende a generare più di una volta la stessa sorgente immagine: occorre dunque verificare che la stessa non sia già stata presa in considerazione, onde non contare due volte il suo contributo. La tecnica più efficiente per effettuare questo controllo è la costruzione di una struttura dati ad albero, in cui la radice è la sorgente sonora, e le ramificazioni rappresentano impatti sulle singole superfici. La seguente figura rappresenta un albero di questo tipo, limitato al 3° ordine di riflessioni:



Sebbene il metodo ibrido abbia considerevoli vantaggi rispetto all' originale metodo delle Sorgenti Immagine, tuttavia esso è comunque troppo lento per poter affrontare lo studio di sorgenti immagine di ordine molto elevato, anche se consente abbastanza agevolmente di arrivare a studiare fino al 10° ordine anche in ambienti di forma complessa. Infatti, se si vuole essere sicuri di trovare **tutte** le sorgenti immagine, occorre che il Ray Tracing preliminare impieghi un numero di raggi pari almeno al minimo teorico affinché almeno uno descriva l'intera traiettoria, in base alla relazione citata. Pertanto, anche se la fase di verifica delle sorgenti è divenuta molto rapida, la ricerca delle stesse richiede comunque un tempo di calcolo molto elevato onde tracciare centinaia di migliaia di raggi.

Inoltre in questo caso non si può fare affidamento sulle leggi dell'acustica statistica onde ridurre il numero di raggi da tracciare. In questo caso, infatti, se una sorgente immagine non viene riconosciuta si ha una riduzione del livello sonoro al ricevitore, mentre con il Ray Tracing, riducendo il numero di raggi lanciati, cala sì il numero di impatti sul ricevitore, ma ciascun raggio che impatta porta una maggior energia, e pertanto in termini di livello sonoro non si hanno grossi problemi.

Pertanto il metodo ibrido non pare adatto alle applicazioni in ambiente industriale, ove non è molto importante avere una grande precisione sulla determinazione del tempo di arrivo delle riflessioni, e viceversa è importante essere sicuri di non sottostimare il livello sonoro al ricevitore. Il metodo ibrido è invece adatto allo studio degli echi in teatri o auditori, poichè consente facilmente di identificare i cammini dei raggi sonori che danno luogo ad echi fastidiosi.

Beam Tracing

Il Beam Tracing è risultato da una naturale evoluzione del Ray Tracing, avvenuta progressivamente nel tempo, in parte in modo non voluto (in seguito cioè ad implementazioni errate dell'algoritmo originale, nel quale si metteva in conto anche l'attenuazione per divergenza sferica, come invece non si dovrebbe fare).

Concettualmente il modo più semplice di realizzare un Beam Tracing è quello di implementare un Ray Tracing nel quale il raggio del ricevitore non è costante, ma cresce man mano che il raggio si allontana dalla sorgente. In questo modo il numero di raggi da tracciare non cresce più con il quadrato della lunghezza della risposta all'impulso da studiare, poichè il rapporto fra area del cerchio massimo della sfera ricevente ed area su cui si disperdono i raggi diviene costante. Il problema di questa implementazione è dato dal fatto che, al crescere del raggio del ricevitore, esso tende a fuoriuscire dalle superfici di confine dell'ambiente, e pertanto tende a ricevere energia anche quando il suo centro è nascosto dietro superfici solide. Alla fine, il ricevitore diviene più grande dell'ambiente stesso, e riceve energia sempre, qualunque sia la traiettoria del raggio.

Un diverso modo di ottenere lo stesso effetto è quello di tracciare dalla sorgente raggi divergenti, o coni. In questo caso il ricevitore torna ad essere puntiforme, e quando lo stesso è interno al cono esso gli comunica

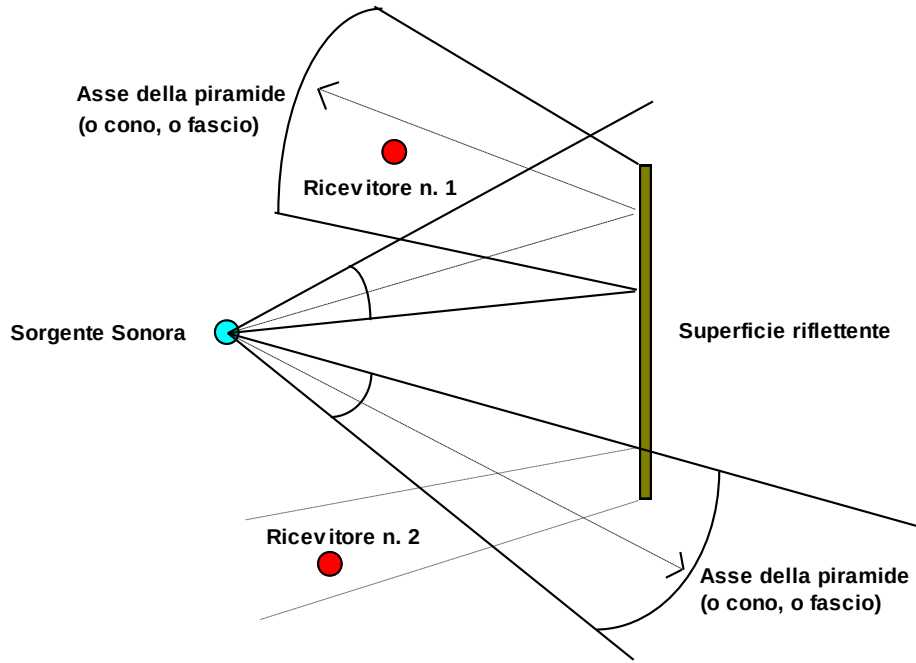
una certa intensità di energia sonora, calcolata con la relazione analoga a quella utilizzata per la tecnica delle sorgenti immagine. Ovviamente i coni non coprono bene la superficie di una sfera: se essi sono adiacenti, restano degli sguinci non illuminati, mentre se essi sono sovrapposti, in modo da coprire l'intera superficie sferica, si creano delle lunette illuminate due volte. Il Cone Tracing è stato pertanto abbandonato, ed al suo posto si preferisce impiegare dei fasci di apertura non ben delimitata, in cui l'energia sonora viene fatta decrescere con legge gaussiana allontanandosi dall'asse del fascio. Tale implementazione è dovuta a Vian, Martin e Maercke [7], e costituisce la base del pacchetto software Epidaure.

Esiste anche una variante, dovuta a Naylor [8], che nel pacchetto Odeon impiega il cone tracing come preprocessore di un metodo alle sorgenti immagine, utilizzando coni sovrapposti ed eliminando le sorgenti doppie mediante la tecnica già vista di memorizzazione dell'albero delle riflessioni. I risultati ottenuti in tal modo sono leggermente più precisi di quelli ottenibili con Epidaure, poichè non esiste in questo caso una convergenza statistica al risultato, che è perfettamente deterministico.

Un'altro tracciante di fasci divergenti, che evita il problema della sovrapposizione fra i fasci, è costituito dal Pyramid Tracing: esso verrà dettagliatamente descritto nel paragrafo successivo. Qui va comunque citato il significativo contributo di Lewers [9], che pur avendo implementato correttamente la generazione di fasci a base triangolare (che coprono perfettamente la superficie sferica), non ha tuttavia compreso la causa della perdita di immagini di ordine elevato, addebitandola a scarsità di diffusione, e l'ha corretta dunque impropriamente sovrapponendo un modello diffusivo al tracciamento deterministico di piramidi.

Purtroppo anche il Beam Tracing non è in grado di prevedere correttamente l'intera coda riverberante, poichè quando la base dei coni (o fasci) diviene grande rispetto alle dimensioni delle superfici di confine si ha la perdita di un numero progressivamente crescente di sorgenti immagine, giacchè l'intero cono viene redirezionato seguendo la sorte del raggio centrale allo stesso, come mostrato dalla figura riportata nella pagina seguente.

E' pertanto necessario correggere la risposta all'impulso ottenuta, ed a questo scopo sono state proposte varie tecniche, di tipo sia additivo che moltiplicativo, nessuna delle quali è però applicabile con sicurezza in condizioni di campo sonoro non diffuso, quando le ipotesi dell'acustica statistica non sono rispettate.



3.3 Teoria di calcolo del programma DisiaPyr - Pyramid Tracing

Inizialmente, dopo la fase di caricamento dati e di memorizzazione delle coordinate dei vertici di ciascuna superficie, il programma provvede a calcolare i parametri che permetteranno la rapida identificazione dei rispettivi piani di appartenenza in ragione dell'equazione:

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (1)$$

dove a , b , c e d sono i parametri cercati.

I coefficienti a , b e c , che per definizione individuano una direzione normale alla superficie, si ottengono facilmente con il prodotto di due qualsiasi vettori ad essa paralleli; grazie allora alle coordinate di tre vertici della superficie si ricava:

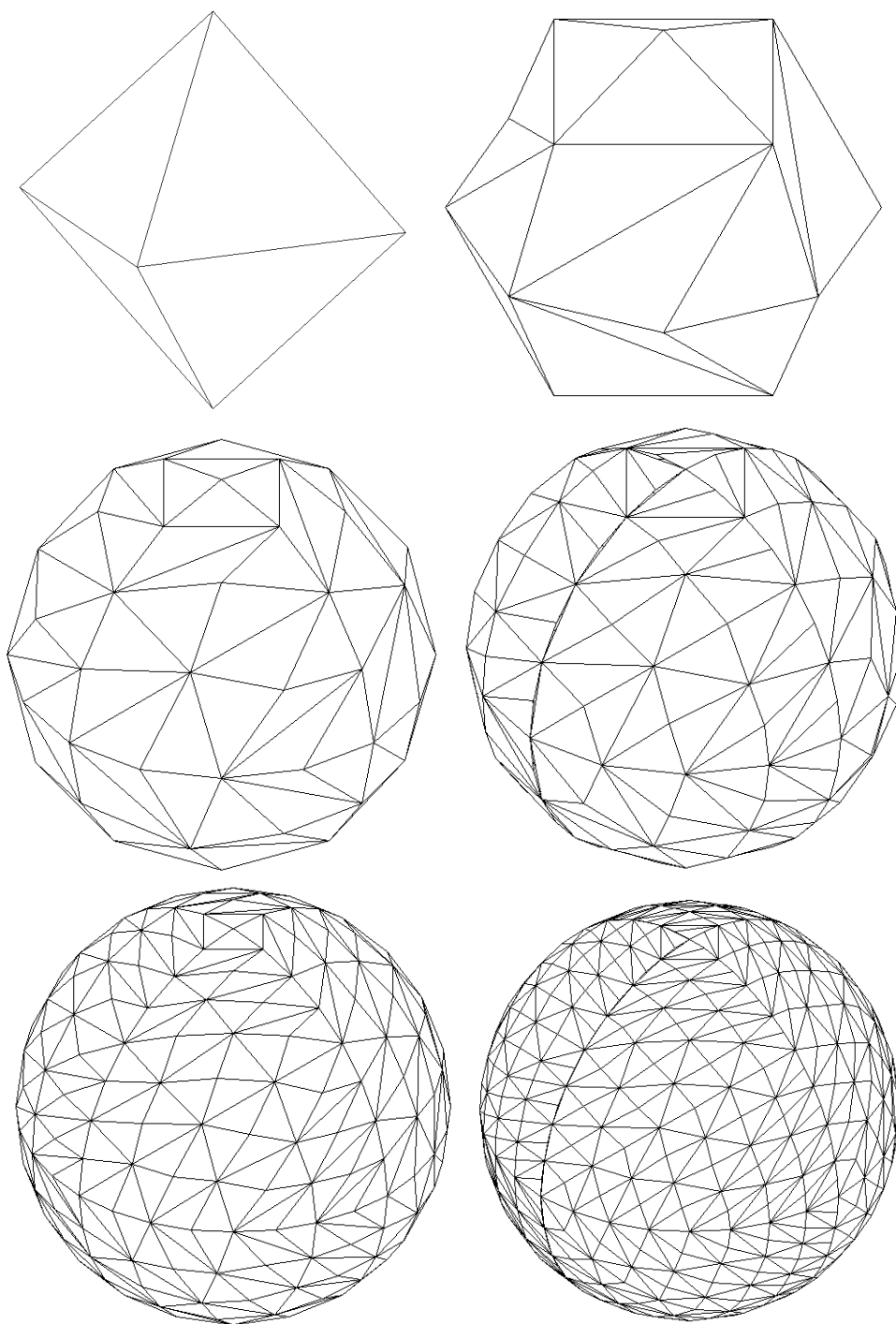
$$\begin{aligned} a &= (y_3 - y_1)(z_2 - z_1) - (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) \\ b &= (x_2 - x_1)(z_3 - z_1) - (x_3 - x_1)(z_2 - z_1) \\ c &= (x_3 - x_1)(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) \end{aligned} \quad (2)$$

Il coefficiente d noti a , b e c si ottiene imponendo la condizione:

$$ax_p + by_p + cz_p + d = 0 \quad (3)$$

dove x_p , y_p e z_p sono le coordinate di un qualsiasi punto appartenente alla superficie (è preso uno dei tre punti già richiamati).

Bisogna anche ricordarsi di dichiarare quali sono le superfici obstructing, quelle cioè che possono infraporsi fra una sorgente ed un ascoltatore nel cammino di un raggio fra altre due pareti, altrimenti si causano errori di calcolo.

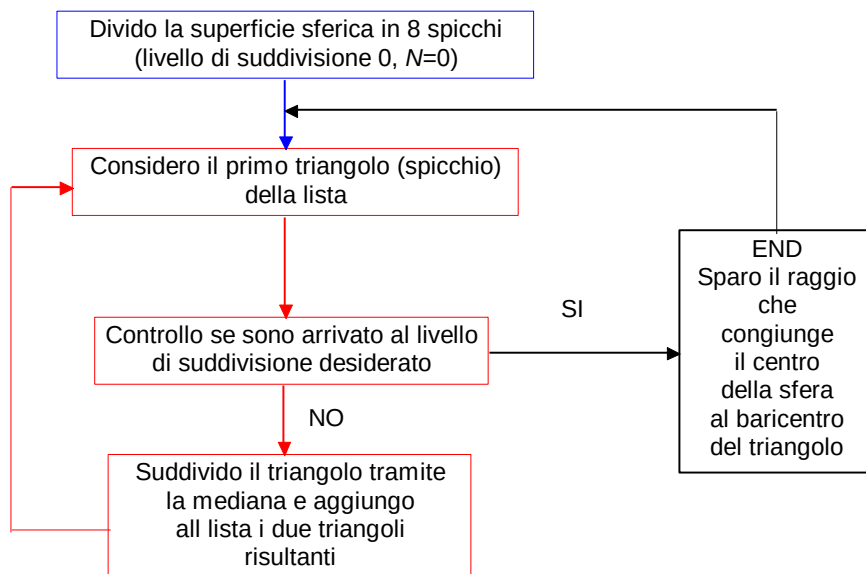


Emissione della piramide e suddivisione della sfera in 8, 32, 128, 256, 512 e 1024 triangoli.

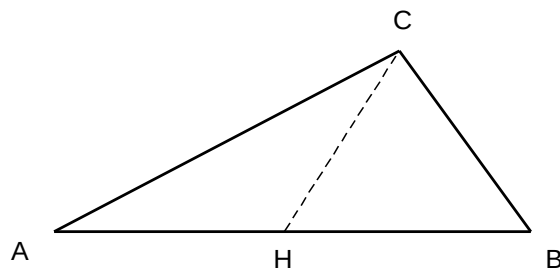
Generazione delle piramidi

Al primo passo (a livello 0), la sfera verrà suddivisa in otto parti, al secondo in sedici e così via secondo la serie 8×2^N . Questo calcolo viene fatto una volta per tutte all'inizio dell'elaborazione e quindi non incide in modo pesante sui tempi di calcolo.

La generazione delle piramidi è perfettamente isotropa, grazie all'algoritmo di Tenenbaum et al. [10], costituito da una progressiva bisezione degli 8 spicchi di partenza, come mostra la figura seguente.



Flow Chart dell'algoritmo.



Suddivisione di ogni singolo triangolo.

Divido in 8 spicchi di ugual area la superficie sferica di partenza; dopodichè eseguo il controllo sul livello di suddivisione raggiunto. Se ho ottenuto il numero di suddivisioni che volevo mi fermo e sparo il fascio piramidale il cui asse congiunge l'origine della sfera con il baricentro del triangolo; in caso contrario calcolo il lato maggiore (AB) di uno degli 8

triangoli e traccio la sua mediana (CH) ottenendo ancora due triangoli di area uguale.

A questo punto rieffettuo il controllo sul raggiungimento del livello di suddivisione desiderato e mi comporto di conseguenza. Ripeto poi il ciclo fino a quando non avrò raggiunto il livello di suddivisione impostato.

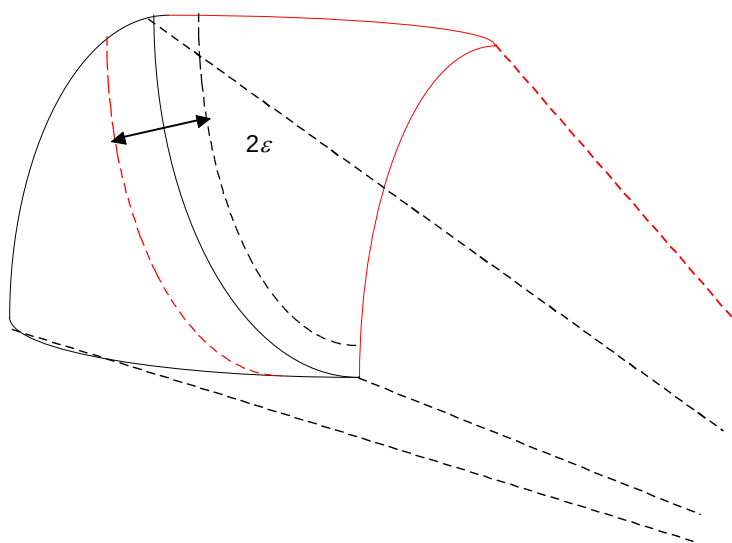
Il numero di piramidi sparate P dipende quindi dal livello di suddivisione N secondo la seguente relazione:

$$P = 8 \cdot 2^N \quad (4)$$

Ottengo quindi un Pyramid Tracing perché la sfera di partenza è esattamente divisibile in un qualsiasi numero, appartenente alla serie 8×2^N , di triangoli (curvi) di ugual area, mentre ciò non è esattamente vero nel caso del Cone Tracing. Si otterrebbero infatti delle sovrapposizioni fra i cerchi intersezione fra il cono con centro di generazione il centro della sfera e la sfera stessa. Poiché ogni sezione del cono (o della piramide) identifica una certa quantità di energia, le eventuali sovrapposizioni comporterebbero la creazione di zone in cui la quota di energia iniziale ha molteplicità due.

Questo non accade con la suddivisione della superficie sferica per triangoli che risolve anche il problema della scelta fra l'approccio pseudocasuale e quello deterministico a favore di quest'ultimo. Nel caso della sorgente omnidirezionale, per esempio, cioè con il rapporto energia emessa/superficie costante su tutta la superficie sferica, si ha la certezza di avere sparato omogeneamente sulla completezza della superficie sferica anche con un numero relativamente basso di raggi. E tanti più raggi si spareranno, in tanti più triangolini di ugual area, e quindi ugual contributo energetico sarà suddivisa la sfera, ottenendo una reale miglior accuratezza nei risultati, piuttosto che una maggior convergenza statistica degli stessi.

In realtà è stata prevista una leggera sovrapposizione fra piramidi adiacenti, quantificabile in strisce di larghezza pari a 2ε (vedi figura seguente):



Sovrapposizione fra piramidi adiacenti.

questo per evitare eventuali buchi causati da errori numerici. In tal modo, però, se un ricevitore si trova proprio nell'ombra della proiezione di tale sovrapposizione, può capitare che riceva due contributi invece di uno. Ciò può accadere abbastanza spesso sull'onda diretta, ove l'errore è più grave. Per correggere tale errore si è ricorsi al seguente controllo: quando un'onda diretta arriva in uno slice temporale con un contenuto energetico già diverso da zero, viene ignorata.

Come unico inconveniente di tale controllo si è verificato che, nel caso di mappature molto fitte ed utilizzando slice temporali di grandezza notevole (0.1 s), può capitare che un ricevitore non riceva neppure il contributo che gli è dovuto. D'altronde tale errore è facilmente identificabile da una mappatura dell'*SPL* (ove si verificherà un minimo inspiegabile) e correggibile (basterà spostare anche di poco il ricevitore in questione).

In più, per evitare dannose situazioni di eccessiva simmetria è previsto un piccolissimo spostamento automatico della posizione della sorgente ottenuto incrementando o decrementando di qualche millimetro le sue coordinate.

Ricerca degli impatti con pareti e ricevitori

Per ogni triangolo in cui è stata suddivisa la sfera, dalla sorgente viene sparata una piramide con vertice coincidente col centro della sorgente e con asse passante per il baricentro di ciascun triangolo, i vertici dei quali sono tutti punti appartenenti alla superficie sferica.

Il vettore che rappresenta l'asse della piramide viene fatto viaggiare alla velocità del suono nella direzione iniziale, quindi, al primo impatto con un ostacolo, verrà riflesso secondo le leggi dell'ottica geometrica (ipotesi di lavoro verificata nel campo delle frequenze audio) e viaggerà per tutto l'intervallo di tempo che l'utente vuole studiare.

La ricerca dell'impatto dei raggi sonori, fra tutte le routine che intervengono nel Pyramid Tracing, è indubbiamente quella più complessa e onerosa in termini di tempo.

Onerosa in termini di tempo nel senso che viene "eseguita" un gran numero di volte: si tratta infatti di quella routine, già richiamata in precedenza, che nella fase di ricerca di un impatto viene percorsa tante volte quante sono le superfici in gioco.

Complessa, invece, non tanto per il tipo di determinazione matematica che viene richiesta, (si tratta infatti di trovare l'intersezione di una retta con un piano), quanto per il sistema di controlli "logici" che devono segnalare al calcolatore se l'intersezione del raggio con il piano di una generica superficie può corrispondere all'impatto cercato oppure no.

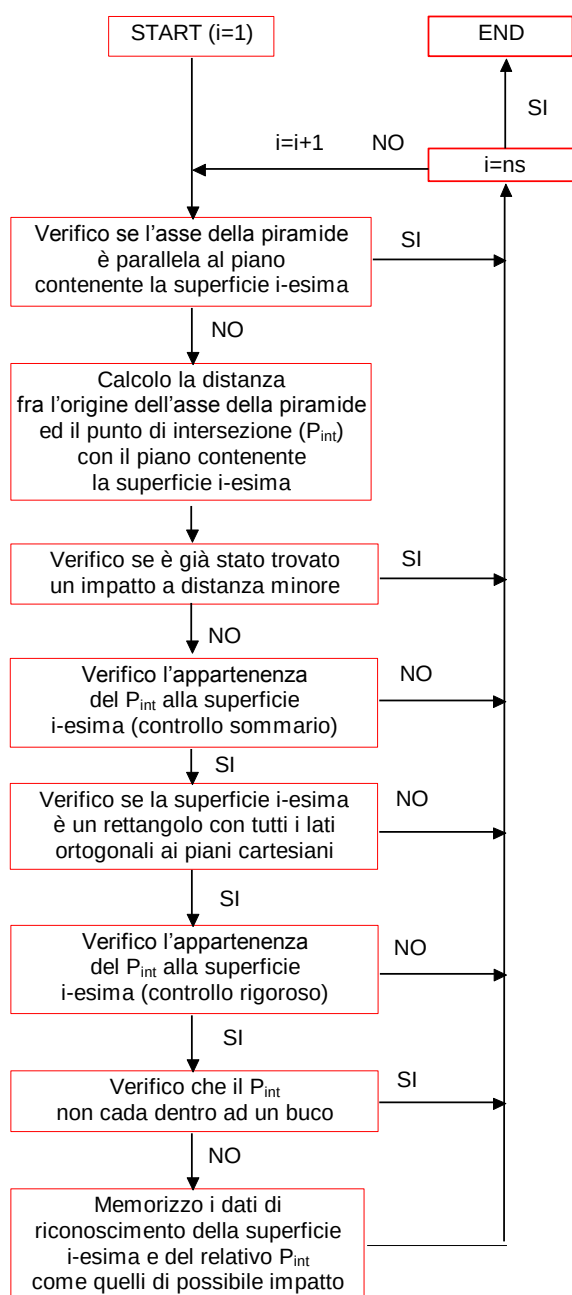
Al termine, ripetuta questa serie di controlli per ogni superficie in gioco, la routine restituisce la superficie cercata e le coordinate del punto di impatto. Nel momento in cui si entra nella routine, del raggio si conoscono l'origine (x_0, y_0, z_0) che può essere l'ultimo impatto subito, o la sorgente, la direzione e il verso, attraverso i coseni direttori α, β , e γ .

L'intersezione del raggio con il piano di una generica superficie si ottiene sfruttando l'equazione di una retta in forma parametrica:

$$x = x_0 + \rho\alpha \quad y = y_0 + \rho\beta \quad z = z_0 + \rho\gamma \quad (5)$$

dove x_0, y_0, z_0 , e α, β, γ verrebbero ad assumere i valori già noti, mentre il parametro ρ , da calcolare, si deduce dall'equazione:

$$a(x_0 + \rho\alpha) + b(y_0 + \rho\beta) + c(z_0 + \rho\gamma) + d = 0 \quad (6)$$



Flow chart della routine di ricerca degli impatti ($ns = n^{\circ}$ superfici in gioco).

che si ottiene andando a sostituire le (5) nell'equazione del piano in forma cartesiana (1) di cui si conoscono tutti i parametri.

Se la retta che rappresenta il raggio non è parallela al piano cui appartiene la superficie, ovvero se:

$$a\alpha + b\beta + c\gamma \neq 0 \quad (7)$$

il valore di ρ è dato dall'espressione:

$$\rho = \frac{(ax_0 + by_0 + cz_0)}{(a\alpha + b\beta + c\gamma)} \quad (8)$$

La (7) rappresenta il primo controllo previsto dalla routine per accertare se la superficie data può essere effettivamente quella su cui impatta il raggio oppure no; in caso negativo la superficie è scartata e il calcolatore riparte dall'inizio della routine con una nuova superficie, in caso affermativo si prosegue con le successive determinazioni e verifiche.

Questo meccanismo si ritrova al termine di ogni controllo; se una superficie riesce a soddisfare anche l'ultimo di questi controlli, viene memorizzata come la possibile superficie di impatto del raggio, il ciclo interno della routine si chiude, ed il calcolatore passa a considerare un'altra superficie.

Riprendendo l'analisi dettagliata della routine, si osserva che il parametro ρ corrisponde alla distanza percorsa dal raggio per giungere ad intersecare il piano della superficie data dal momento che α , β , e γ individuano un vettore unitario (per definizione infatti $\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1$).

Scatta allora un secondo controllo: se questa distanza risulta negativa (per cui il raggio si allontana dalla superficie) o se è già stato memorizzato un possibile impatto ad una distanza inferiore, la superficie in questione viene scartata.

Proseguendo ancora, si incontrano uno dopo l'altro tre controlli aventi la funzione di verificare se l'intersezione trovata è esterna o interna al contorno della superficie. Il primo, sommario ma molto più veloce del terzo ed ultimo, permette di scartare quasi sempre la superficie se non viene soddisfatta questa condizione di appartenenza; in particolare si verifica se le coordinate x , y e z del punto di intersezione rimangono comprese entro i valori minimo e massimo che rispettivamente caratterizzano le coordinate dei vertici della superficie.

Viene quindi verificato il soddisfacimento delle seguenti condizioni:

$$\begin{aligned} x_{\min} &\leq x \leq x_{\max} \\ y_{\min} &\leq y \leq y_{\max} \\ z_{\min} &\leq z \leq z_{\max} \end{aligned} \quad (9)$$

con:

$$\begin{aligned}
x_{\max} &= \max(x_1, x_2, x_3, x_4) + \varepsilon & x_{\min} &= \min(x_1, x_2, x_3, x_4) - \varepsilon \\
y_{\max} &= \max(y_1, y_2, y_3, y_4) + \varepsilon & y_{\min} &= \max(y_1, y_2, y_3, y_4) - \varepsilon \\
z_{\max} &= \max(z_1, z_2, z_3, z_4) + \varepsilon & z_{\min} &= \max(z_1, z_2, z_3, z_4) - \varepsilon
\end{aligned} \quad (10)$$

Il termine ε è una costante, posta pari a 10^{-9} m, che deve coprire gli inevitabili errori di troncamento sui numeri con molti decimali; si tratta di un accorgimento indispensabile tenendo conto che quasi sempre una delle coordinate rimane costante per tutta la superficie. Proprio per questo sono sempre poche le superfici che pur non soddisfacendo la condizione di appartenenza, riescono ad evadere questo controllo.

La definizione delle coordinate max e min per ogni superficie in gioco, avviene ovviamente prima di entrare nella routine di tracciamento dei raggi sonori, in modo da non pesare sui tempi di calcolo.

A questo punto verifico se la superficie trovata è un rettangolo con tutti i lati paralleli o perpendicolari ai piani ortogonali: se sì passo al test delle finestre, se no passo al test di controllo delle aree che, solo se soddisfatto, invierà la superficie al test delle finestre.

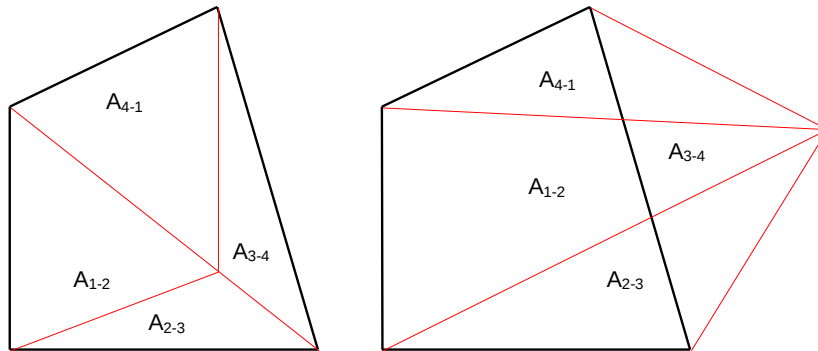
Se il punto non appartiene alla bounding box certamente non può appartenere neppure alla superficie che in essa è completamente contenuta e il test termina con esito negativo (non c'è impatto, e quindi riflessione, con questa superficie).

Se la bounding box degenera nella superficie stessa, so già che il punto di impatto appartiene alla superficie, altrimenti devo effettuare un ulteriore controllo che comunque vale solo per superfici definite da poligoni convessi.

Il terzo controllo di appartenenza, rigoroso ma decisamente più lento del precedente, per arrivare ad esprimere un giudizio definitivo, si basa su di un confronto di aree. Vengono infatti calcolate le aree dei triangoli A_{1-2} , A_{2-3} , A_{3-4} e A_{4-1} che il punto di intersezione individua rispetto ai lati della superficie, ed è ammessa l'appartenenza se si verifica che:

$$A_{1-2} + A_{2-3} + A_{3-4} + A_{4-1} \leq A_{\text{sup}} + \varepsilon \quad (11)$$

dove A_{sup} è l'area della superficie e ε , posto pari a 10^{-6} m², assume lo stesso significato visto in precedenza.



Controllo di appartenenza alla superficie.

Se (x, y, z) è il punto di impatto del raggio sul piano della superficie, e se (x_m, y_m, z_m) e (x_n, y_n, z_n) sono due vertici generici di quest'ultima, l'area A_{m-n} del triangolo individuato è calcolata con l'espressione:

$$A_{m-n} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (12)$$

dove v_x , v_y e v_z rappresentano le componenti del prodotto vettoriale dei vettori che collegano il punto di intersezione con i due vertici considerati, per cui risulta:

$$\begin{aligned} v_x &= (y_m - y)(z_n - z) - (y_n - y)(z_m - z) \\ v_y &= (x_n - x)(z_m - z) - (x_m - x)(z_n - z) \\ v_z &= (x_m - x)(y_n - y) - (x_n - x)(y_m - y) \end{aligned} \quad (13)$$

L'area delle superfici è ovviamente calcolata una volta per tutte all'inizio del programma, procedendo sempre con lo stesso metodo, dopo aver scomposto la superficie in due triangoli.

Constatata l'appartenenza alla superficie della intersezione data, interviene un ultimo controllo con il compito di verificare se l'impatto avviene in corrispondenza di eventuali buchi, porte o finestre; nel caso venga incontrato un buco la superficie viene immediatamente scartata.

La presenza di eventuali buchi (quanti e quali) è rapidamente verificata "interpellando" un indice predisposto in fase di caricamento dei dati; il controllo di appartenenza (poiché di questo si tratta) avviene esattamente nello stesso modo visto nel caso di superfici senza buchi.

Se è stata incontrata una porta o una finestra viene memorizzata con le sue caratteristiche di assorbimento.

La superficie che giunge a questo punto, viene memorizzata dal calcolatore, con tutte le informazioni del caso, come possibile superficie di impatto del raggio (sono quindi scartati i dati di qualsiasi altra superficie precedentemente memorizzata).

La ricerca dell'impatto si conclude dopo aver preso in considerazione anche l'ultima superficie in gioco; quella che, a questo punto, è "ricordata" dal calcolatore come possibile elemento di impatto per il raggio, rappresenta la superficie effettivamente cercata.

Si possono manifestare due situazioni anomale:

- non si è trovato nessun impatto valido;
- l'impatto trovato è condiviso da più superfici.

Il primo caso si verifica, ovviamente, se lo spazio descritto presenta delle aperture anche di piccola entità che vengono mantenute tali nel modello numerico sottoposto ad elaborazione.

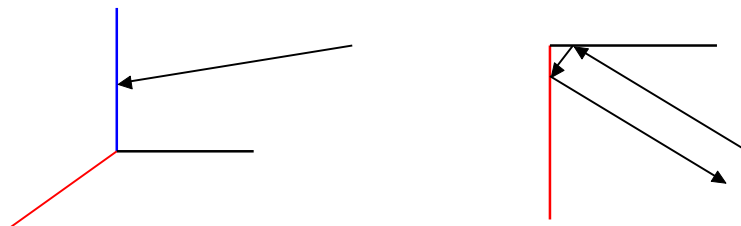
In particolare, il valore della costante ε che corregge l'area delle superfici nel controllo rigoroso di appartenenza, è definito per tentativi in modo da rendere minimo il numero dei non impatti. Nel caso di sale disegnate correttamente con Modello di dettaglio CAD non si hanno errori di questo tipo.

La seconda delle anomalie contemplate si verifica con una certa frequenza solo se ci sono delle superfici anche solo parzialmente sovrapposte, altrimenti diventa estremamente improbabile, perché in tal caso il raggio dovrebbe centrare esattamente uno spigolo (si parla infatti di “errori di spigolo”).

In realtà questi errori di spigolo si manifestano con una certa facilità nel caso di impatti molto prossimi allo spigolo in comune a due superfici adiacenti in quanto il test di appartenenza è approssimato a meno di ε .

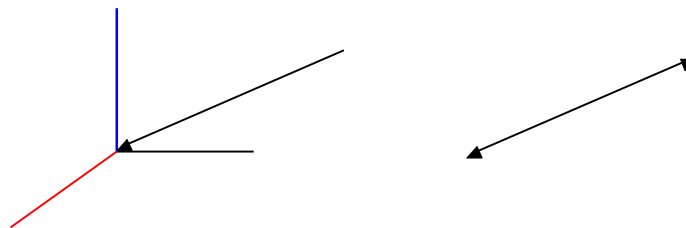
Ci possono essere due tipi di errori di spigolo: quando il raggio impatta il punto intersezione di due oppure di tre superfici.

Nel primo caso lo si fa riflettere specularmente su entrambe le pareti.



Errore di spigolo (1° tipo: intersezione fra due piani).

Nel secondo caso è sensato riflettere il raggio cambiando semplicemente il verso e non la direzione del vettore che lo rappresenta.



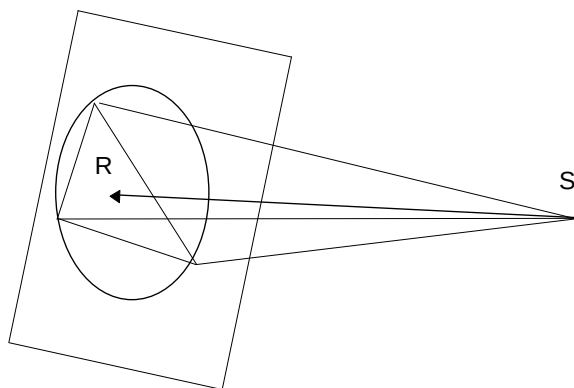
Errore di spigolo (2° tipo: intersezione fra tre piani).

Il comportamento del programma dal punto di vista dell'assorbimento energetico in questi casi particolari verrà trattato più avanti.

Durante il suo percorso, oltre ad ostacoli, la piramide di cui il vettore è l'altezza, potrà incontrare anche ricevitori, che sono schematizzati come dei punti nello spazio predisposti dall'utente. Per sapere quali ricevitori ogni piramide abbia impattato e per ciascuno di essi quante volte, occorre operare ad ogni rimbalzo un test di impatto sui ricevitori.

Si congiunge il ricevitore alla sorgente immagine corrispondente all'ultima parete impattata, si calcola il piano perpendicolare a tale retta e passante per il ricevitore e si costruisce il cerchio circoscritto al triangolo avente come vertici i punti appartenenti a tale piano e alla piramide. Se il punto intersezione fra la retta ed il piano è esterno al cerchio allora l'impatto non

è avvenuto, se invece è interno per determinare se l'impatto è avvenuto o no si ricorre al test delle aree dei triangoli come prima.



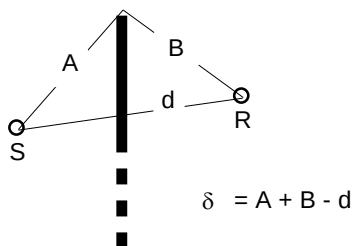
Costruzione del cerchio circoscritto.

L'altro aspetto che differenzia il tracciatore piramidale di Modello di dettaglio 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:

$$L_{diff} = L_{dir} - 5 - 10 \log \left(\frac{\sqrt{2\pi|N|}}{\tanh \sqrt{2\pi|N|}} \right) \quad (14)$$

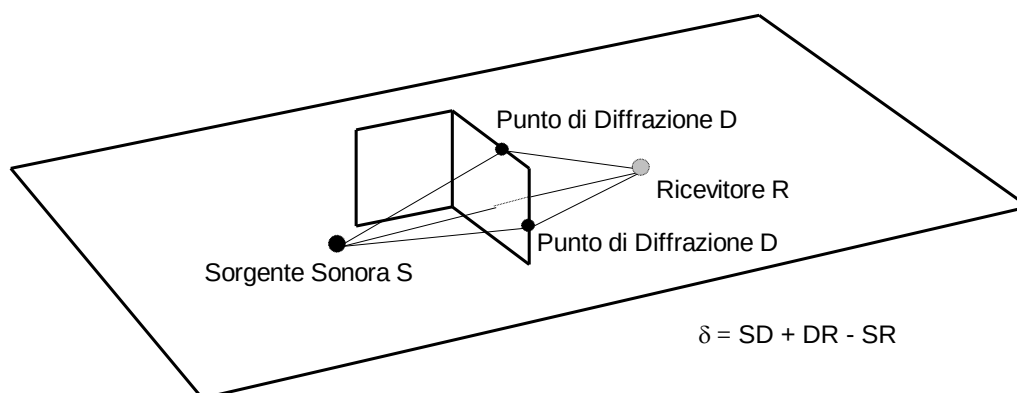
in cui L_{dir} è il livello diretto, che giungerebbe al ricevitore se la parete “obstructing” non ci fosse, ed N è il n° di Fresnel, dato da:

$$N = \frac{2}{\lambda} \cdot \delta = \frac{2 \cdot f}{c_0} \cdot \delta \quad (15)$$



Traiettoria dell'onda diretta e del raggio diffratto.

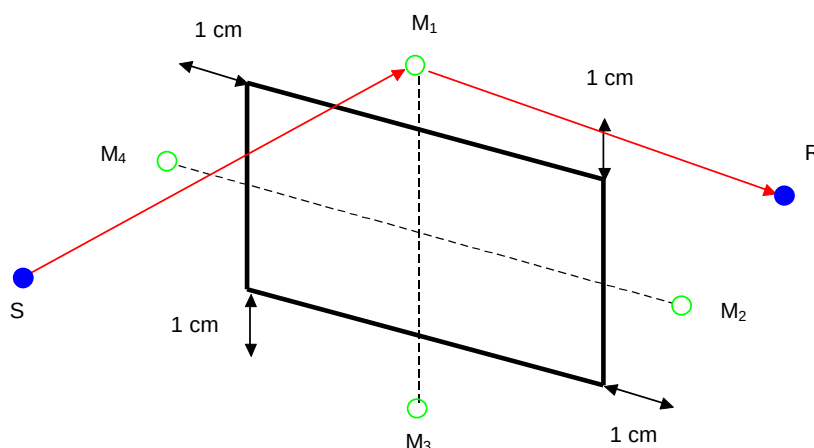
La seguente figura mostra le traiettorie dei raggi che vengono tracciati in questi casi (diffratti ed attraversante). L'algoritmo di ricerca dei bordi liberi non è ricorsivo, pertanto non viene considerata l'onda diffratta dal bordo sinistro del pannello laterale.



Diffrazione dei bordi liberi più energia passante attraverso la barriera.

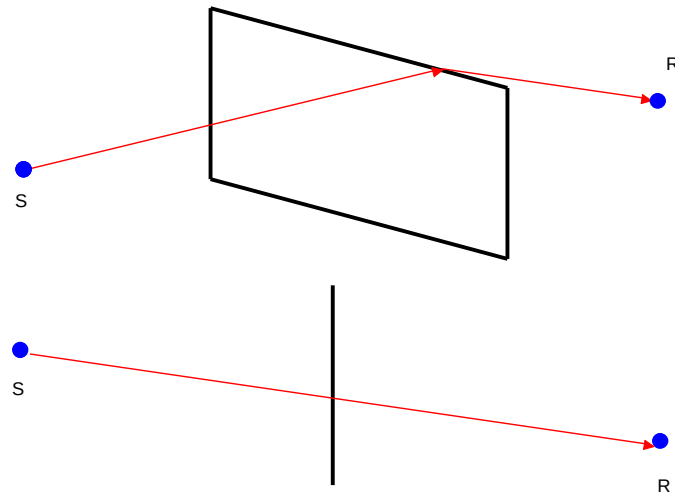
Per verificare automaticamente che un lato di una parete obstructing sia diffrangente si procede così:

- si piazzano, sul prolungamento delle mediane, quattro sensori M_1 , M_2 , M_3 ed M_4 ad 1 cm di distanza dai lati della superficie dichiarata obstructing;
- si traccia la congiungente fra la sorgente S ed il primo sensore (SM_1) e quella fra il sensore stesso ed il ricevitore R (M_1R) e si verifica, con i controlli già visti, che non ci siano ostacoli;
- se la risposta è no, allora quel lato viene considerato diffrangente e viene applicata la relazione (14) di Kurze-Anderson;
- nel caso opposto tale contributo non viene computato;
- si ripete lo stesso ciclo anche per gli altri tre sensori.



Localizzazione dei sensori per la ricerca del bordo libero nel calcolo della diffrazione.

La distanza $A+B$ (vedi figura) viene calcolata proiettando sul bordo libero (diffrangente) il punto intersezione della congiungente la sorgente ed il ricevitore con lo schermo. Dopodichè viene calcolato il cammino effettivamente percorso in due tratti: il primo che va dalla sorgente al bordo dello schermo più il secondo che parte da quest'ultimo ed arriva al ricevitore.



Calcolo del minimo cammino del raggio diffratto.

Così facendo si calcola veramente il cammino percorso dall'onda, che risulta essere anche il minimo possibile (vedi figura sopra).

Grazie a queste possibilità, l'algoritmo di tracciamento è in grado di affrontare lo studio della propagazione sonora anche in spazi geometricamente complessi, in presenza di schermature parziali o totali. E' pure possibile valutare l'efficacia di cabine per la sosta degli operai, oppure prevedere l'emissione di rumore verso ricevitori esterni all'edificio.

Inoltre il modello è impiegabile anche nell'ambiente esterno, ad esempio per la verifica di schermature attorno a sorgenti fisse, purchè la distanza dei ricevitori non sia così grande da dover considerare, oltre all'attenuazione dell'aria, anche effetti atmosferici che portino alla curvatura dei raggi sonori.

Estinzione delle piramidi

Sono due i modi per decidere quando un raggio debba essere considerato "estinto", ovvero non si dovesse più seguire la sua storia. Si può decidere di seguirlo per tutto il tempo dell'intervallo impostato dall'utente, oppure fino a quando la sua energia fosse nulla. Dal punto di vista computazionale c'è qualche differenza di costo che rende favorevole un approccio o l'altro a seconda dei casi. Se si imposta un intervallo di tempo molto lungo (4-5 s), usando il primo approccio, può verificarsi il caso che si debba continuare a seguire, e quindi a tracciare, un raggio con energia nulla, spendendo quindi inutilmente tempo di calcolo. Viceversa se si vogliono

studiare tempi relativamente brevi (1-2 s), seguendo il secondo metodo, ci si potrà trovare a dover continuare inutilmente il tracciamento di raggi anche oltre l'intervallo di tempo di interesse, poiché capiterà che la maggior parte dei raggi non si sarà estinta entro l'intervallo da considerare. Si è preferito, come sempre in tutto il programma, scegliere l'approccio più trasparente per l'utente, che si è ritenuto debba poter scegliere l'intervallo di tempo da studiare e pagare in termini di tempo di calcolo solo in relazione ad esso; si evita così di dover studiare sempre ed in ogni situazione il caso peggiore, seguire il raggio fino alla sua estinzione, anche quando, fin dall'inizio, si sa che l'interesse sarà concentrato sui primi istanti di tempo dall'emissione dello stesso.

Il controllo in realtà viene fatto sullo spazio s percorso dal raggio dal momento della sua emissione. Conoscendo infatti il tempo a sua disposizione t e la velocità del suono c_0 , considerata costante ed uguale a 340 m/s alla temperatura di riferimento di 20° C, è immediato calcolare quanto potrà essere il cammino complessivo del raggio tramite la semplice formula:

$$s = c_0 t \quad (16)$$

Esiste anche un altro modo per estinguere un raggio; infatti è possibile scegliere, mediante il valore assegnato al parametro "history", per quante riflessioni il programma dovrà seguire il percorso di un raggio. Il valore "0" consentirà di calcolare solo l'onda diretta, mentre "-1" permetterà di seguire il raggio fino a quando gli altri controlli non ne decreteranno la fine.

Attenuazione dell'energia

Una sorgente sonora irradia una certa potenza P che si propaga nel mezzo con l'avanzare delle onde sonore. In un campo sonoro se $P[W]$ è la potenza trasportata da un'onda con fronte di superficie $S[m^2]$, la quantità di energia che fluisce nell'unità di tempo attraverso l'unità di area del fronte d'onda si definisce intensità I ed è data dall'espressione:

$$I = \frac{P}{S} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (17)$$

Per un'onda piana o per un fronte di un'onda sferica sufficientemente lontano dalla sorgente da poter essere considerato piano si dimostra che l'intensità è proporzionale al quadrato della pressione sonora.

Per una sorgente sonora che irradia uniformemente in tutte le direzioni l'energia viene diffusa su superfici sferiche il cui centro è la sorgente sonora ed il cui raggio cresce con il propagarsi del suono; se la sorgente ha una potenza sonora P e il mezzo non è dissipativo, l'intensità ad una distanza di r metri dalla sorgente è data dalla:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (18)$$

In un'onda sferica pertanto l'intensità diminuisce con il quadrato della distanza.

Dalla precedente relazione fra potenza ed intensità, dividendo entrambi i membri per l'intensità di riferimento I_0 e ricordando che $I_0 = P_0/1 \text{ m}^2$ si ha:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{1 \text{ m}^2}{4\pi \cdot r^2} \quad (19)$$

e passando ai livelli in dB:

$$10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{P}{P_0} - 10 \log 4\pi \cdot r^2 \quad (20)$$

per cui si ha:

$$L_I = L_w - 10 \log 4\pi \cdot r^2 \quad (21)$$

Si è così tenuto conto della divergenza sferica.

Il livello di intensità sonora è anche influenzato dalle condizioni ambientali e dalla direttività della sorgente, per cui l'equazione precedente assume la seguente forma:

$$L_I = L_w + DI_\Theta - A_e - 10 \log 4\pi \cdot r^2 \quad (22)$$

dove DI_Θ è l'Indice di direttività nella direzione Θ espresso da $10 \log Q_\Theta$ essendo Q_Θ il Fattore di direttività rapporto fra l'intensità sonora alla distanza r nella direzione Θ e l'intensità sonora media, alla medesima distanza, su tutte le direzioni.

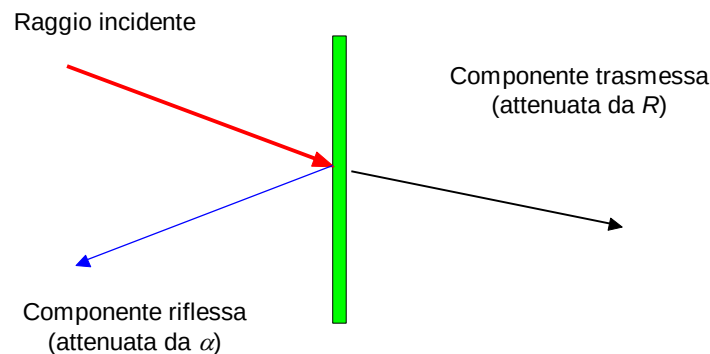
A_e tiene invece conto: dell'assorbimento di tutte le pareti (A_p) su cui impatta ogni singolo raggio, dell'eventuale potere fonoisolante di qualche schermo A_o , che va dichiarato obstructing, e dell'assorbimento dell'aria A_β :

$$A_e = A_p + A_o + A_\beta \quad (23)$$

A_p viene calcolato sottraendo, ad ogni rimbalzo, dall'energia attuale di ciascun raggio una quota di energia proporzionale al coefficiente di fonoassorbimento del materiale α di cui è costituita la parete su cui è avvenuto il rimbalzo stesso. Sarà quindi:

$$A_p = 10 \log \prod_i (1 - \alpha_i) \quad (24)$$

Tutte le volte che il percorso del raggio sarà ostacolato da uno schermo dichiarato obstructing costituito da un materiale di cui nel Material Manager siano inseriti anche i coefficienti di fonoisolamento, che altrimenti vengono considerati infiniti, non tutta l'energia rimasta al raggio dopo l'attenuazione subita a causa del potere fonoassorbente dello schermo (α) viene riflessa; una parte di essa, infatti, diminuita del potere di fonoisolamento dello schermo stesso (R), viene associata ad un nuovo raggio che continua oltre lo schermo la traiettoria del raggio incidente, come in figura:



Attenuazione subita da un raggio nell'impatto con una parete di materiale fonoassorbente e fonoisolante.

L'assorbimento dell'aria, viene calcolato alla temperatura di riferimento, considerata costante, di 20 °C. Esso varia con l'umidità e con la frequenza secondo la seguente relazione:

$$A_\beta = 1.7 \cdot \frac{f^2 r}{\Phi} \cdot 10^{-8} \quad (25)$$

dove:

f = frequenza centrale di banda [Hz]

Φ = umidità relativa %

r = distanza in m.

I gradienti di temperatura e di velocità del vento, nonché l'effetto radente, nel caso di problemi in campo aperto possono dar luogo a variazioni anche notevoli sui risultati; questo programma non ne tiene conto proprio perché è stato progettato principalmente per prevedere il campo sonoro in ambienti chiusi o in spazi aperti di dimensioni non troppo elevate (intorno al centinaio di metri, dove appunto, tali fenomeni si possono trascurare).

Correzione della coda sonora

La correzione della coda sonora, è di tipo moltiplicativo. La trattazione che segue si basa dapprima sull'ipotesi di campo strettamente Sabiniano, per poi essere estesa anche a campi non Sabiniani.

Il numero di impatti su un ricevitore nell'unità di tempo $n(t)$ può essere descritto matematicamente dalla seguente espressione:

$$n(t) = \frac{4\pi \cdot c_0^3 t^2}{V} \quad (26)$$

dove:

$n(t)$ = numero di impatti per unità di tempo

c_0 = velocità del suono

V = volume.

Nel caso di un tracciante di fasci divergenti, il numero di impatti su di un ricevitore nell'unità di tempo segue la (26), solo quando l'apertura del fascio è ancora minore delle dimensioni delle superfici della sala; quando la base del fascio diventa, per effetto della divergenza, più grande della sala, tutti i ricevitori vengono impattati dopo ogni riflessione del fronte d'onda, in modo che il numero di impatti per unità di tempo tende ad un valore costante:

$$n(t \rightarrow \infty) = \frac{c_0 N}{l_{cm}} \quad (27)$$

dove:

c_0 = velocità del suono

N = numero totale di piramidi tracciate

l_{cm} = libero cammino medio.

A questo punto possiamo introdurre il concetto di Tempo Critico t_c : il tempo al quale la parabola teorica descritta dall'equazione (26) interseca il valore costante dell'equazione (27). In altre parole, il tempo critico t_c rappresenta il punto di ideale separazione fra la prima parte della coda sonora, in cui vengono rilevate correttamente tutte le sorgenti immagine, e la parte tardiva, in cui il numero di arrivi di energia nell'unità di tempo è costante. Svolgendo i calcoli e ricordando che, per un ambiente perfettamente Sabiniano, vale la relazione:

$$l_{cm} = \frac{4V}{S_{tot}} \quad (28)$$

dove:

V = volume

S_{tot} = superficie totale

si ottiene:

$$t_c^2 = \frac{NS_{tot}}{16\pi \cdot c_0^2} \quad (29)$$

introducendo, infine, il parametro adimensionale β :

$$\beta = \frac{4\pi \cdot l_{cm}^2}{S_{tot}} \quad (30)$$

ottengo:

$$t_c^2 = \frac{Nl_{cm}^2}{4\beta \cdot c_0} \quad (31)$$

L'utilizzo dell'espressione (31) al posto della (29) implica l'utilizzo di due parametri ignoti invece di uno (l_{cm} e β , al posto della S_{tot}) ma entrambi più facilmente calcolabili della superficie totale "visibile" all'interno di una sala. Infatti il libero cammino medio l_{cm} viene calcolato da Modello di dettaglio in base ad una statistica sull'effettiva percorrenza dei raggi sparati in asse alle piramidi, ed il coefficiente adimensionale β , dopo la taratura dell'algoritmo, è stato fissato ad un valore medio pari a 0. Tale valore varia con la forma della geometria della sala, e non con le sue dimensioni (nel caso di una stessa sala disegnata in due differenti scale, il valore ideale di β rimane invariato).

Il numero effettivo di impatti su un ricevitore nell'unità di tempo $n(t)$, ottenuto da un tracciante di fasci divergenti, può essere descritto matematicamente, secondo Maercke-Martin [7], dalla relazione:

$$n(t) = \frac{4\pi \cdot c_0^3 t^2}{V} \cdot \left(1 - e^{-\frac{l_{cm}^2 N}{4\beta \cdot c_0^2 t^2}} \right) = \frac{4\pi \cdot c_0^3 t^2}{V} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_c^2}{t^2}} \right) \quad (32)$$

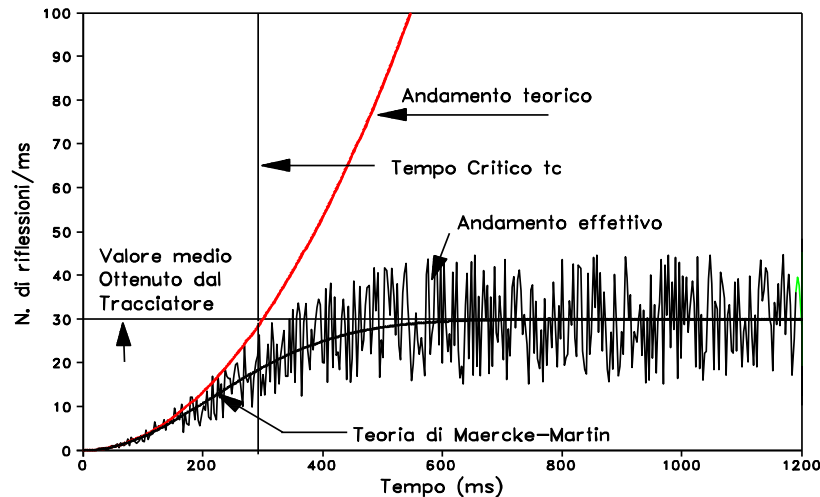
la correzione della coda riverberante viene dunque eseguita semplicemente dividendo l'energia sonora per il termine fra parentesi della relazione (32), che è sempre minore di 1 e va diminuendo progressivamente al crescere di t . Quindi, per ottenere la (26), dovrò correggere la coda moltiplicando la (32) per il reciproco del termine fra parentesi, e cioè:

$$\left(1 - e^{-\frac{l_{cm}^2 N}{4\beta \cdot c_0^2 t^2}} \right)^{-1} = \left(1 - e^{-\frac{t_c^2}{t^2}} \right)^{-1} \quad (33)$$

La figura seguente illustra una situazione reale, a confronto con le stime teoriche di cui sopra.

Vari autori hanno tentato di correggere i loro tracciatori di fasci basati sulle precedenti formule: Maercke e Martin usando una correzione additiva, sovrapponendo una coda statistica addizionale alla risposta all'impulso calcolata con il tracciante di coni,

mentre Naylor ha proposto di moltiplicare la coda sottostimata per un fattore di correzione tempo-variante, ottenuto come il rapporto fra le equazioni (26) e (27). Nell'algoritmo di DisiaPyr la teoria è stata ulteriormente perfezionata, e viene utilizzata una correzione di tipo moltiplicativo ricavato dal rapporto fra le equazioni (26) e (32), in tal modo si evitano occasionali discontinuità nella densità di impatti rilevati.



Andamento teorico ed andamento reale di $n(t)$.

In più, Modello di dettaglio, seppur nello stesso modo, corregge separatamente ciascun ricevitore; in altre parole la coda riverberante (diversa da ricevitore a ricevitore) viene corretta dello stesso valore, ma mantiene la propria unicità, mentre Naylor adotta un'unica coda uguale per tutti i ricevitori. In questo modo, si possono analizzare situazioni aventi ricevitori in condizioni acustiche diverse (camere accoppiate, all'esterno, etc...) senza incorrere in errori gravi.

Per tali ragioni Modello di dettaglio non può considerarsi un modello di calcolo "ibrido"; infatti non viene effettuata alcuna distinzione fra la parte "primaria" deterministica della Risposta all'Impulso e quella "tardiva" statistica, sebbene per tempi maggiori del Tempo Critico l'andamento del campo acustico solo in parte dal numero totale "reale" di arrivi.

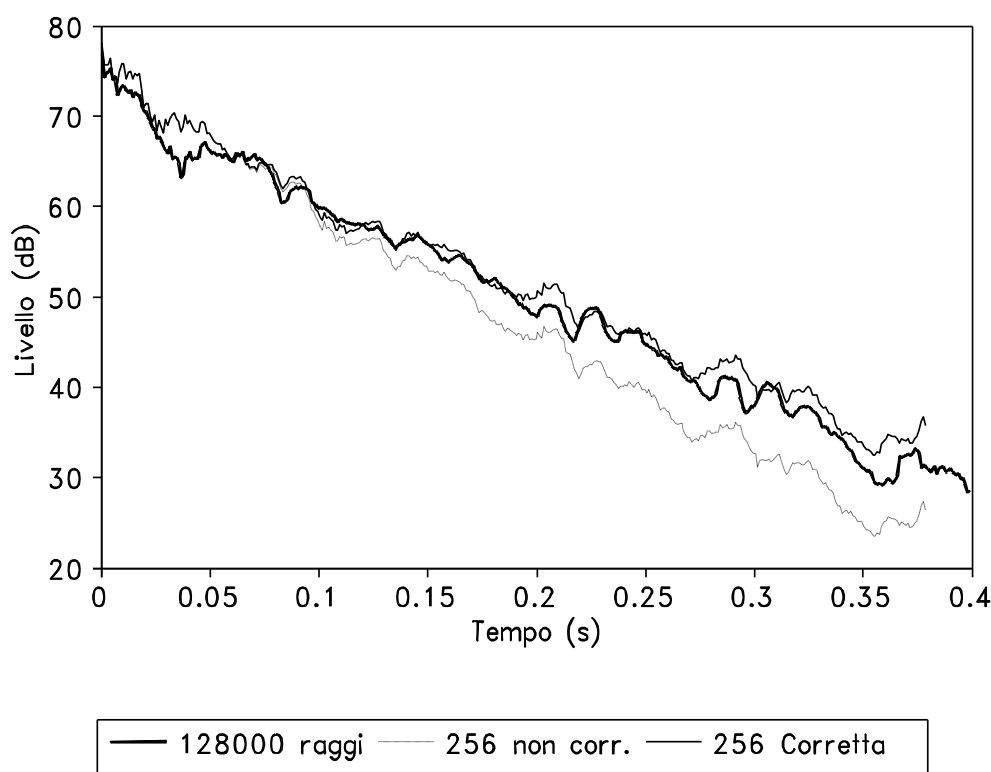
In altre parole, Modello di dettaglio può lavorare anche come modello puramente deterministico: se il numero di piramidi è abbastanza elevato da far diventare maggiore il valore del Tempo Critico rispetto alla lunghezza dell'Impulso, in pratica non viene effettuata alcuna correzione ed è così possibile ottenere "esattamente" i valori dei parametri acustici più sensibili. Comunque, nei casi pratici, è sufficiente un numero molto piccolo di piramidi per ottenere una stima ragionevolmente precisa del Livello di Pressione Sonora e del Tempo di Riverbero (che è ciò che si richiede per gli studi di bonifica del rumore), avendo cura che la risoluzione temporale scelta per la Risposta all'Impulso non sia troppo bassa.

Per queste ragioni Modello di dettaglio è incredibilmente veloce nel calcolo delle mappe dell'*SPL* anche per geometrie complesse: solo in rari casi sono

richiesti una quindicina di minuti, e normalmente sono sufficienti due minuti per ciascuna sorgente (su un Pentium 90 MHz).

La figura seguente mostra, ad esempio, il confronto fra le risposte all'impulso energetiche ottenute con un numero di piramidi molto elevato (128000) e quelle stimate con sole 256 piramidi sia in presenza di correzione della coda ($\beta = 0.3$), sia in assenza della stessa ($\beta = 0$).

Si nota come, pur trattandosi in questo caso di un ambiente fortemente non Sabiniano, e poco riverberante, la correzione della coda sia in grado di riprodurre con sole 256 piramidi la situazione che, con altre tecniche previsionali, avrebbe richiesto un numero enormemente superiore di raggi tracciati.



Confronto dell'andamento della coda sonora con e senza correzione.

Fino ad ora abbiamo lavorato sotto le ipotesi di Sabinianità del campo sonoro e, nonostante ciò, si è dimostrato come il modello possa funzionare correttamente anche in casi in cui questa ipotesi non sia verificata anche se, non essendo valida la teoria precedentemente illustrata, si deve usare un numero di piramidi più alto di quello che ci eravamo proposti.

Vediamo, ora, come si può, in presenza di campi non Sabiniani, migliorare ulteriormente l'accuratezza e l'affidabilità del modello.

Volendo utilizzare lo stesso tipo di correzione della coda anche in questo caso, si possono notare principalmente due effetti:

- il “vero” numero di riflessioni per unità di tempo non aumenta con t_c elevato al quadrato, ma ad un esponente minore di 2: α ;

- il Tempo Critico è normalmente più basso di quello calcolato con l'equazione (29) o (31).

Comunque se dimensionando opportunamente il fattore di forma β si riesce ad ottenere un corretto valore di t_c e si corregge con α il grado di non Sabinianità della sala, si riescono ad ottenere risultati accurati anche con un numero di piramidi molto piccolo.

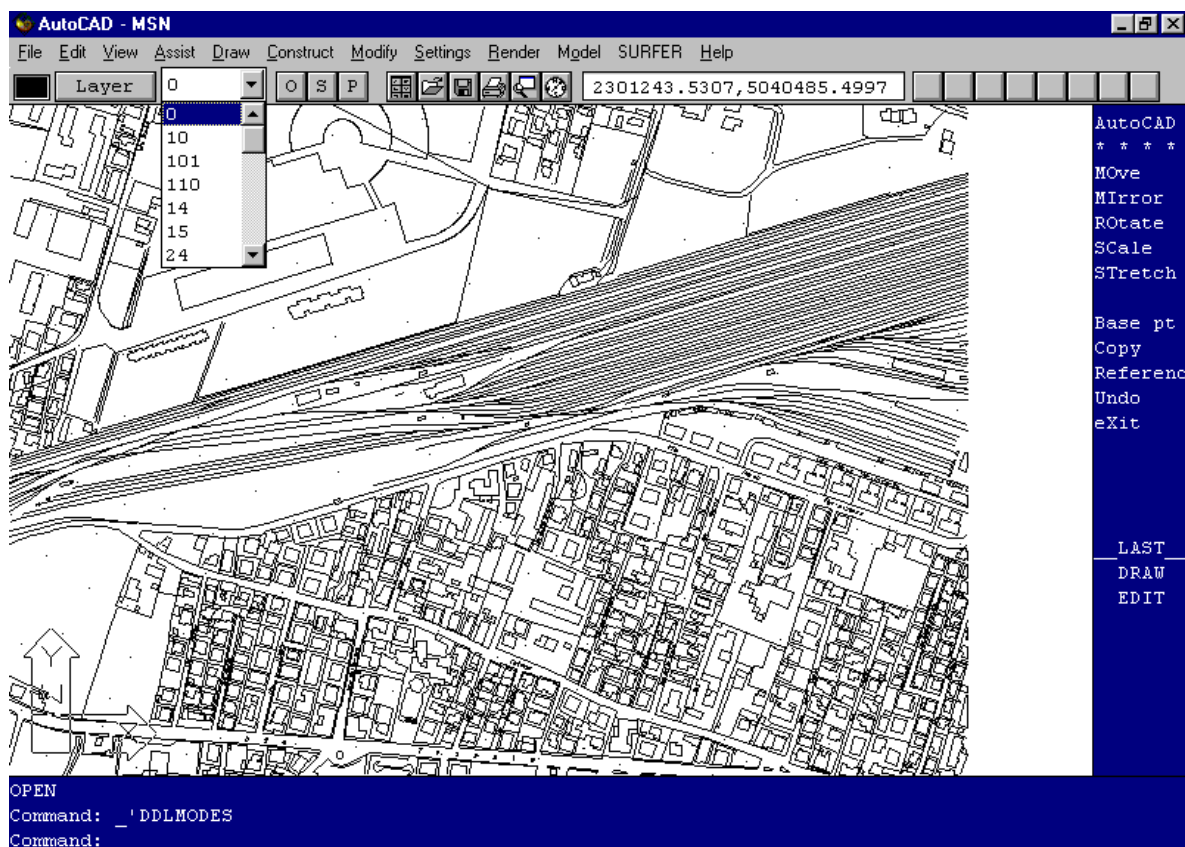
Il fattore di correzione (33) nella sua forma più generale sarà quindi:

$$\left(1 - e^{-\frac{t_c^\alpha}{t^\alpha}}\right)^{-1} \quad (34)$$

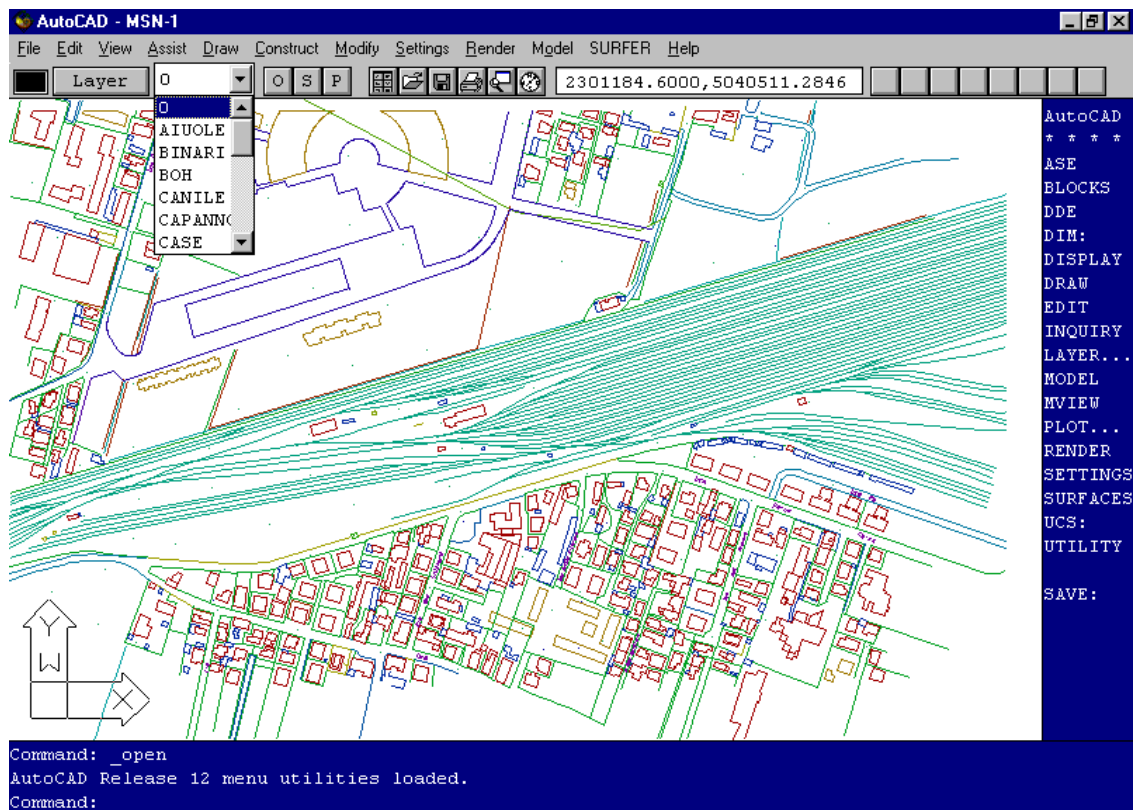
3.4 Interfaccia utente di Disiapyr

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 si parte dal menu principale avviando AutoCad e richiamando il file .dxf relativo.



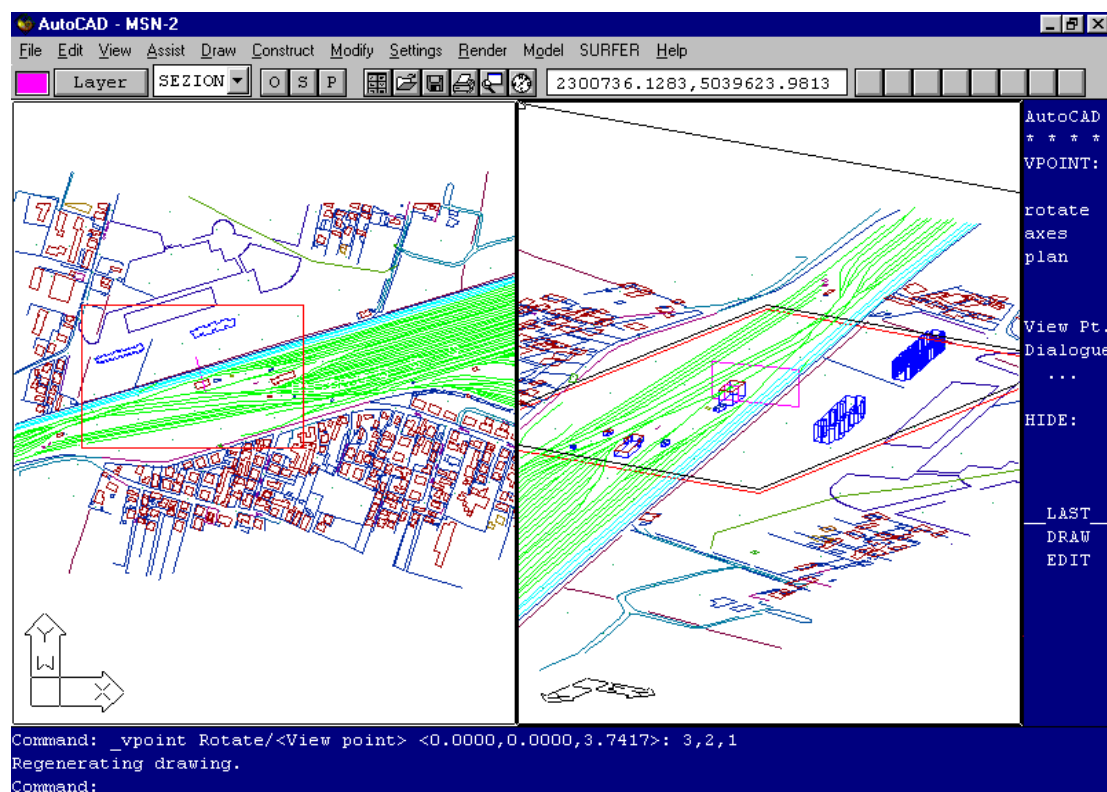
Occorre in primo luogo riconoscere i layers esistenti in genere identificati con un numero attribuendogli un nome dopo averne riconosciuto il contenuto con il comando **list**. Oltre al nome è bene associare a ciascun layer un colore che faciliti il riconoscimento degli oggetti sullo schermo.



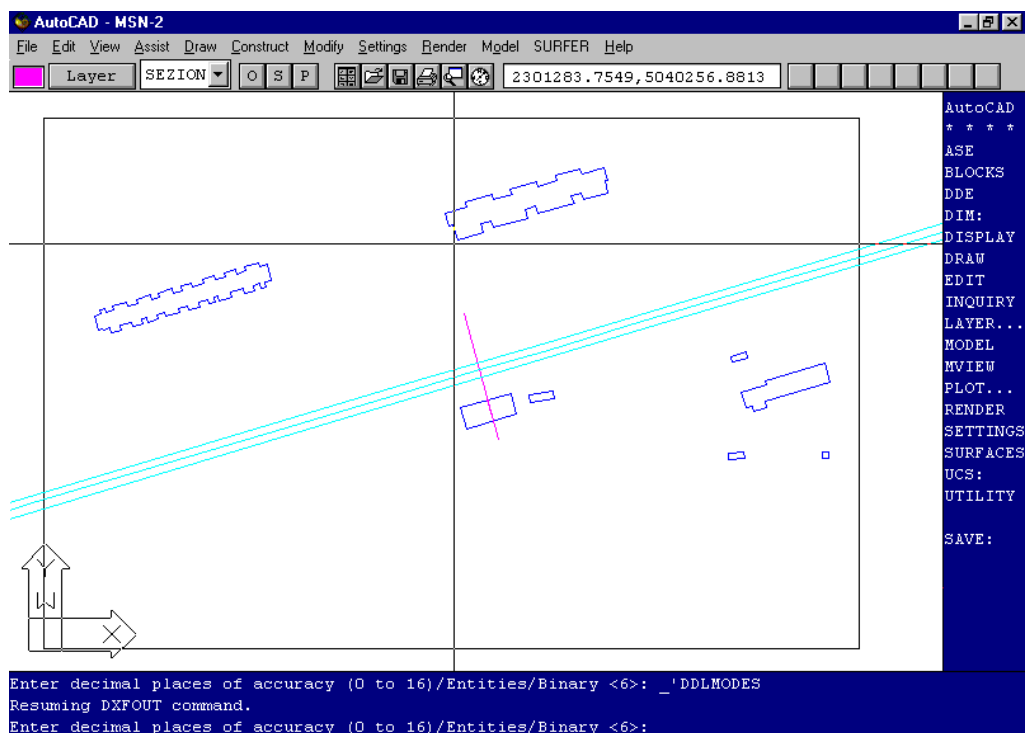
Per essere importato da DisiaPyr, il disegno AutoCad deve essere preparato rispettando le seguenti regole:

- superfici - utilizzare l'entità 3DFACE, con un layer pari al numero del materiale di cui la superficie è costituita ; ad esempio 87 indica "pavimentazione fonoassorbente". Se la superficie è obstructing, aggiungere 1000 al numero del materiale (ad esempio 1087 è lo stesso materiale di prima ma obstructing)
- porte e finestre - utilizzare l'entità 3DPOLY impiegando come sempre un layer di nome uguale al numero del materiale : anche per esse può essere settato il carattere obstructing aggiungendo 1000 al numero del materiale.
- buchi (holes) - si utilizza anche per essi l'entità tipo 3DPOLY, ma adottando uno speciale layer di nome HOLES.
- sorgenti - si utilizza l'entità ATTDEF con uno speciale layer di nome SOURCES dando come TAG il path completo che identifica il file della sorgente sonora. Impiegare l'opzione di fitting tra due punti dando come insertion point la posizione della sorgente e come secondo punto il target point. Il roll angle può infine venire impostato come inclinazione delle scritte (non come rotazione) Ciò deforma in modo considerevole i caratteri in caso di roll angle elevati
- ricevitori - si utilizza la comune entità LINE, avendo cura di impostare un layer denominato RECEIVERS. Il primo punto della linea rappresenta la posizione del ricevitore il secondo punto il target point.

Occorre a questo punto creare i layers strade, binari, sources, relativi alle sorgenti acustiche ed il layer **sezioni** sul quale devono essere definiti i piani di calcolo del modello, in genere si tratta di una planimetria ed una sezione.



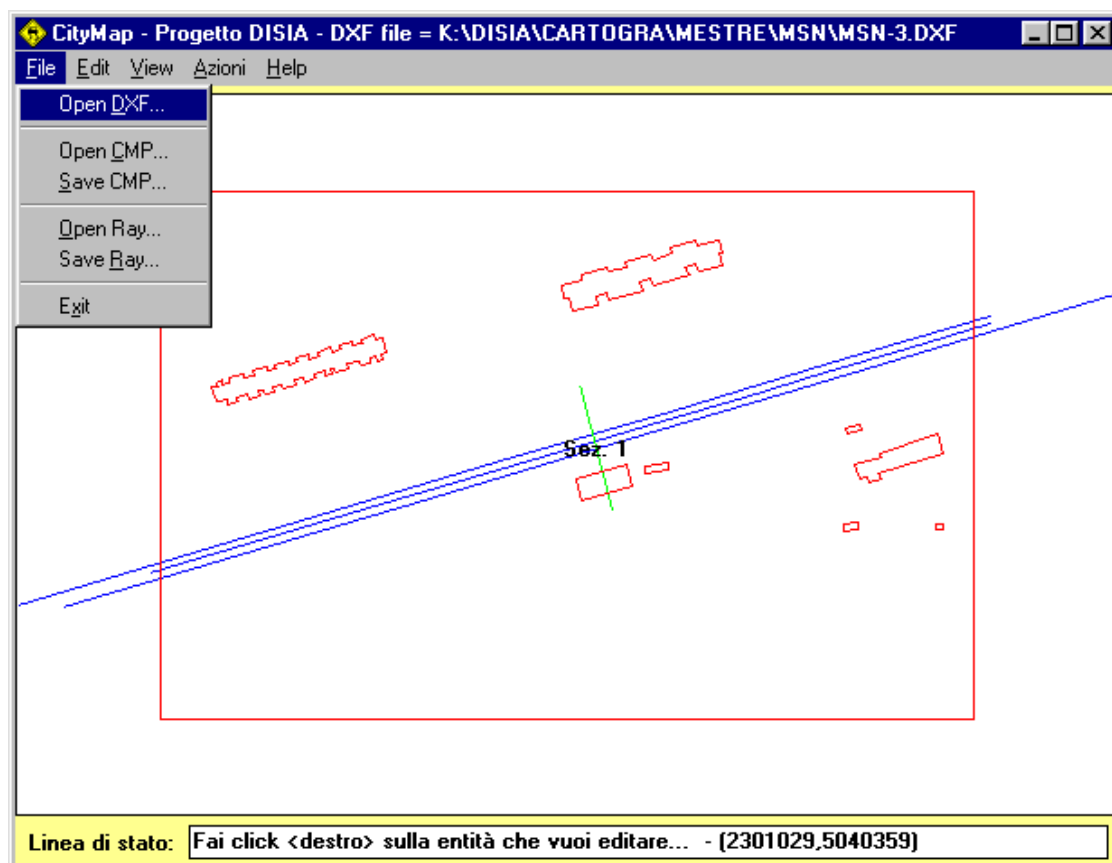
Ultimata la fase di costruzione delle case, dei binari, delle strade, delle sezioni, ecc, occorre esportare un file in formato dxf delle sole entità acustiche, attraverso il comando dxfout di AutoCad, proprio come la schermata seguente.



A questo punto è possibile uscire da AutoCad ed avviare il modulo CityMap dal menu principale.

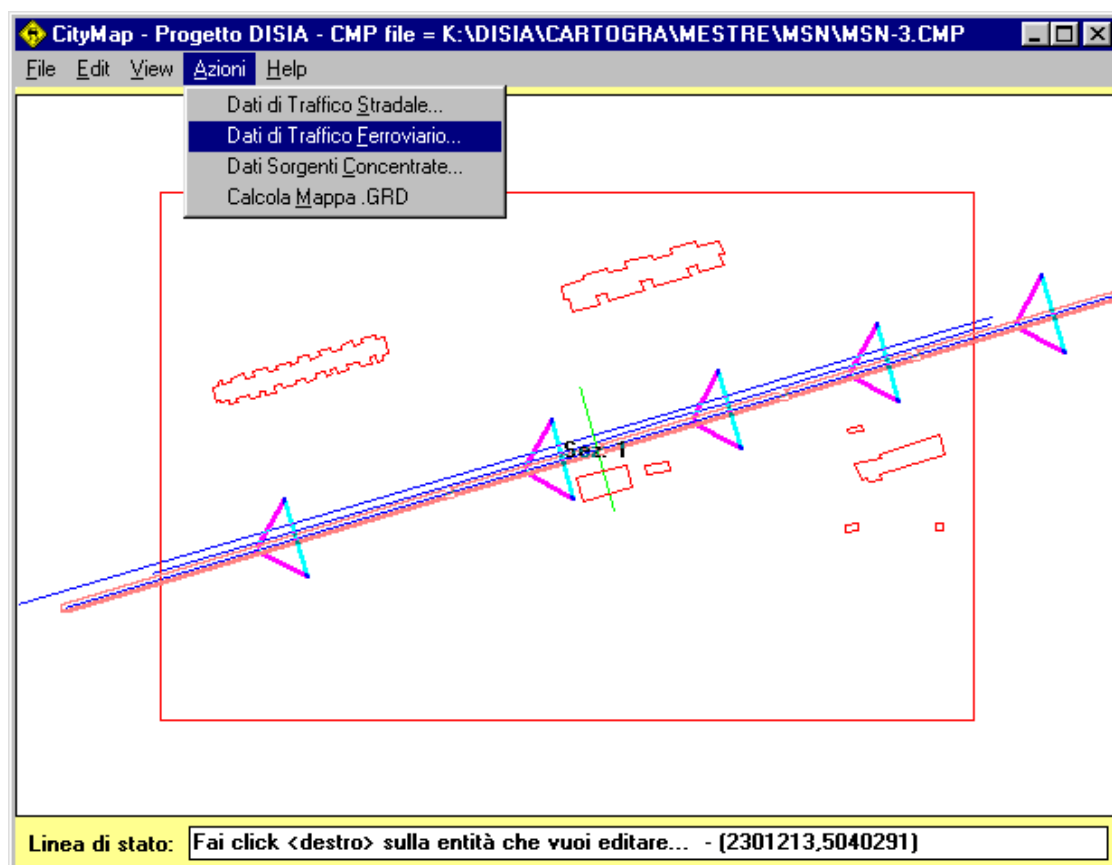


Il modulo CityMap è stato sviluppato integralmente nel presente progetto e consente l'attribuzione dei dati di emissione acustica alle entità grafiche costruite e l'esecuzione del calcolo acustico del modello di pianificazione. Occorre in primo luogo aprire il file .dxf precedentemente creato in AutoCad per fare apparire sullo schermo la rappresentazione planimetrica delle entità riconosciute.



La linea di stato invita a “clickare” con il tasto destro del mouse onde introdurre i dati di emissione acustica di strade o binari, mentre il tasto sinistro del mouse serve a “zoomare” una area definita dell’intera planimetria. I comandi del menu a tendina **View** consentono di ritornare alla visualizzazione dell’intera geometria.

La modalità di introduzione dei dati acustici si attiva, oltre che “clickando <destra>” su una strada (grigia) o ferrovia (blu), anche con l’opportuna voce del menu **Azioni**. Clickando il comando **Dati di traffico stradale** vengono evidenziate in successione tutte le polilinee contenute sul layer strade (figura seguente).



e compare una tendina che consente di associare alla singola entità grafica evidenziata il dato di traffico o il valore di emissione e la caratteristica geometrica della sezione stradale (figura seguente)

Si fa presente come la presenza simultanea delle due finestre sullo schermo sia già problematica con una risoluzione video di 800x600 pixels: il funzionamento del programma non è possibile in modalità VGA standard (640x480), e si consiglia di adottare sempre una risoluzione di almeno 1024x768 pixels. Il dato di emissione acustica può essere attribuito direttamente nel caso siano disponibili rilievi acustici diretti (si clicca **fisso** e si introduce il livello relativo ai due periodi diurno e notturno). Alternativamente si clicca **calcolo** attivando la sottostante tendina relativa ai dati di traffico ed alle proprietà della sede stradale.

Nella finestra grafica il tratto stradale considerato viene evidenziato con colore e con frecce che indicano il “verso” del tratto considerato (questo è importante affinché sia chiaro quale è il lato “sinistro” e quello “destro” della strada. Le variabili da introdurre corrispondono alle modalità di rilevamento della banca dati di emissione del progetto Disia: pertanto i veicoli sono divisi in 5 categorie,

Editazione dati traffico ferroviario

Selezione Tratto Ferroviario

Tratto n. Nome:

Leq,7.5m (G/N) ☐ Fisso ☒ Calcola

Proprietà

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

Traffico diurno complessivo

	Num.	Lungh.	Velocità
tr.merci (V1)	34	450	C1-(0-60 km/h)
tr.pass. locali (V2)	44	300	C1-(0-60 km/h)
tr.pass. l.perc. (V3)	45	160	C1-(0-60 km/h)

Traffico notturno complessivo

	Num.	Lungh.	Velocità
tr.merci (V1)	68	600	C1-(0-60 km/h)
tr.pass. locali (V2)	6	300	C1-(0-60 km/h)
tr.pass. l.perc. (V3)	10	160	C1-(0-60 km/h)

Editazione dati traffico stradale

Selezione Tratto Stradale

Tratto n. Nome:

Leq,7.5m (G/N) ☐ 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

esistono 8 diverse classi di velocità (4 relative al flusso urbano, 4 a quello extraurbano), la pavimentazione può essere normale, in pavé o in asfalto fonoassorbente, ed infine la pendenza della strada può essere “nulla” (<5%), in salita o in discesa (>5%). Per semplificare questa operazione sono disponibili anche 6 bottoni, che impostano tutte le variabili su valori predefiniti per 6 tipi “standard” di tipologie stradali secondo la classificazione raccomandata per la stesura dei piani urbani del traffico. Al termine della editazione del dato di traffico in base ai dati di emissione contenuti nella banca dati relativa, il modello calcola il valore di emissione associato al tratto di strada e lo riporta nelle caselle **Leq,7.5m(G/N)**. L’operazione eseguita per i dati di traffico veicolare deve essere ripetuta per gli altri tipi di sorgente attivando rispettivamente i comandi **Dati di traffico ferroviario** e **Dati sorgenti concentrate** sotto la tendina **Azioni**. Nel primo caso vengono introdotti i dati di traffico di ciascun tratto di linea ferroviaria con le stesse modalità previste per il traffico stradale. Si hanno solo 3 tipi di convogli e 4 classi di velocità, ma è necessario specificare

anche la lunghezza di ciascun tipo di treno. Il tipo di armamento può essere binario continuo saldato o binario con scambi (o interruzioni). Nel secondo caso a ciascuna polilinea costituente il perimetro di uno stabilimento vengono associati i livelli in dB(A) rilevati al suo perimetro secondo le indicazioni previste dalla legge vigente.

Resta infine da illustrare il procedimento per la creazione dei files .RAY per Disiapyr: si attiva questa opzione selezionando la voce Save Ray del menu File. Compare questa maschera:

RAY file options

Nome del File:

Periodo: ☒ Diurno ☐ Notturmo

Piano di Mappatura:

X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2
2426569	5051525	1.5	2428901	5053054	1.5

Numero di divisioni della griglia:

Orizzontale: Verticale:

Che consente di introdurre il nome del file .RAY da creare, di specificare se si vuole eseguire una mappatura in pianta o su una sezione verticale, di introdurre le coordinate che definiscono l'area da mappare (se quelle proposte automaticamente non vanno bene) ed infine le dimensioni della griglia di calcolo.

Va notato che compaiono automaticamente nell'apposita tendina le sezioni verticali solo se le stesse erano preventivamente state definite dentro Autocad, tramite entità 3DFACE disegnate sul layer SEZIONI. E' comunque sempre possibile forzare il programma ad eseguire il calcolo su una sezione verticale, anche se non predefinita, mediante l'introduzione manuale delle coordinate del piano di mappatura.

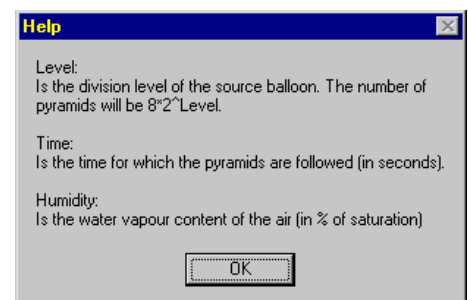
A questo punto è possibile lanciare il modulo di calcolo DisiaPyr.



Va anzitutto precisato che il tracciatore DISIAPYR.EXE è un programma “batch”, cioè completamente privo di interfaccia utente: esso va lanciato direttamente dal prompt dei comandi, dando sulla linea di comando gli opportuni codici di controllo che specificano il file da elaborare ed i relativi parametri operativi.

Onde evitare all’utente tale approccio poco agevole, è stato realizzato “sopra” a Disiapyr un opportuno programma di “launch”, DPLAUNCH.EXE. E’ a quest’ultimo che ci si riferisce in questo paragrafo. Il launcher provvede alla creazione di un file .BAT, contenenti i comandi necessari al lancio di Disiapyr. Il file .BAT, denominato DPBAT.BAT, viene poi automaticamente mandato in esecuzione. L’utente esperto può realizzare in proprio files .BAT basati su DPBAT.BAT, ad esempio per effettuare il lancio automatico di elaborazioni multiple in successione.

Al lancio dell’icona di Disiapyr compare anzitutto il “Common Dialog” per la scelta del file .RAY da elaborare. Una volta operata la scelta, appare questa maschera:



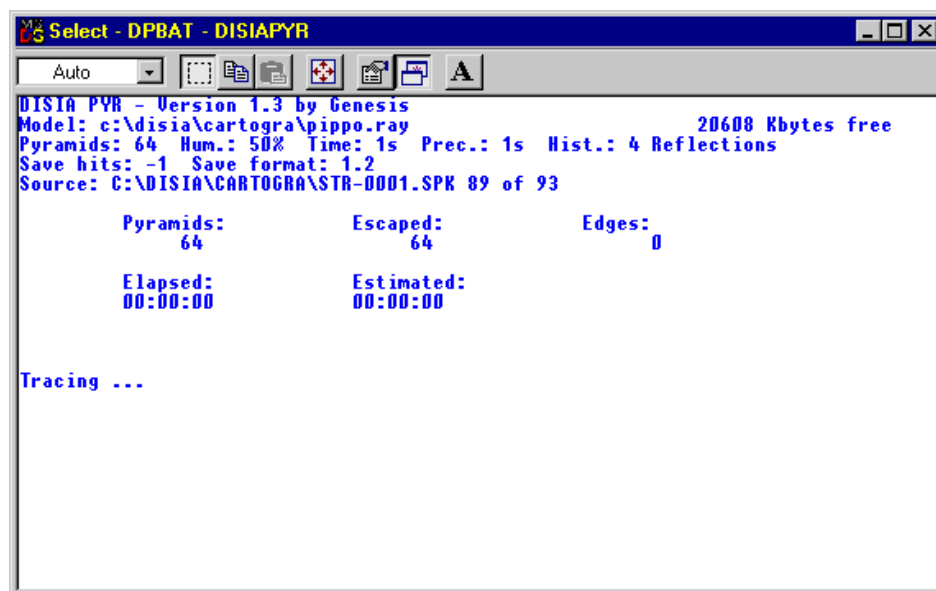
Come indicato dalla maschera di Help visualizzata a fianco, Level indica il livello di suddivisione in piramidi di ciascuna sorgente: 3 indica 64 piramidi, che è un valore ragionevole per gli studi in ambiente esterno.

Time indica il tempo di corsa massima di ciascuna piramide, che definisce dunque anche la distanza massima percorsa: 1 s significa che al massimo ogni piramide coprirà una distanza di 340 m, e pertanto le sorgenti più lontane di tale distanza non verranno considerate.

Humidity è infine, ovviamente, la percentuale di umidità relativa dell'aria atmosferica.

L'opzione Save consente di salvare in modo permanente i tre parametri suddetti, che vengono registrati nel file DISIAPYR.INI.

Premendo OK viene attivato il programma DISIAPYR.EXE. Nel corso della sua esecuzione compare questa schermata:



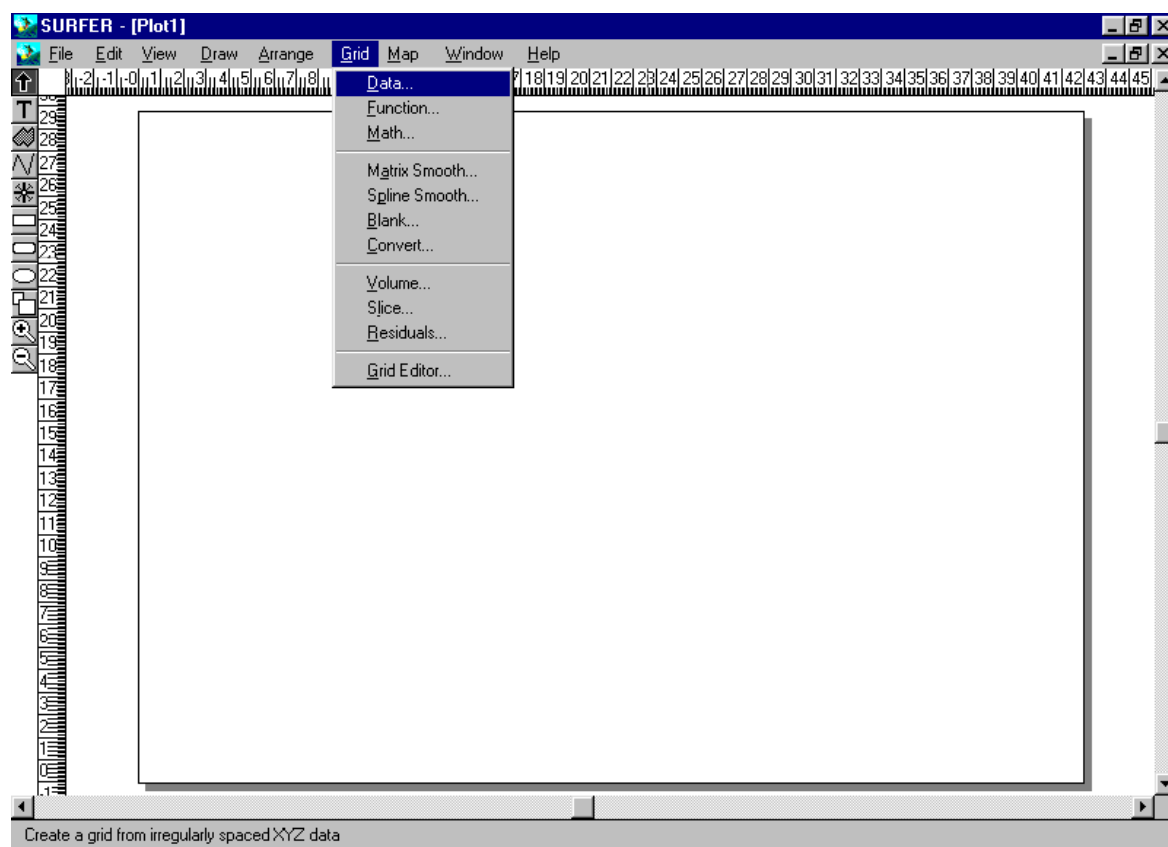
Essa tiene informato l'utente dello stato di avanzamento del calcolo: l'indicazione del tempo di calcolo trascorso e stimato viene riazzerata per ciascuna sorgente, quindi è di scarsa utilità per stimare il tempo di calcolo complessivo da attendere. Se il calcolo è lungo, si può tranquillamente iconizzare la finestra ed effettuare altre operazioni: Disiapyr continuerà a lavorare in *background* fino al termine, quindi un *Beep* avviserà che l'elaborazione è terminata.

Al termine del calcolo viene lanciato il piccolo programma di post elaborazione DP2DAT.EXE, che converte i risultati dal file nel formato proprietario di Ramsete (____) in un normale file .DAT, nel quale le prime due colonne contengono le coordinate sul piano di mappatura del punto considerato, e le altre colonne contengono i dati di livello sonoro nelle 8 bande d'ottava, nonché nelle bande "A" e "LIN".

Una scritta sullo schermo avvisa che l'elaborazione è terminata, e che può essere usato Surfer per visualizzare i risultati.



Prima di poter visualizzare i risultati è necessario importare i dati elaborati da Disiapyr, agendo sul menù di Surfer come indicato nella figura seguente



Dopo aver selezionato il file con l'estensione *.dat di cui interessa visualizzare i risultati dell'elaborazione, il programma carica in memoria i dati e propone una schermata del tipo:

Scattered Data Interpolation

Data Columns

X: Column A:
Y: Column B:
Z: Column K:

Data Info... OK
Reset Cancel

Grid Line Geometry

	Minimum	Maximum	Spacing	# of Lines
X Direction:	2.30108E+0	2.30129E+0	5.38462	40
Y Direction:	5.04006E+0	5.04032E+0	5.30612	50

Gridding Method

Kriging Options... Search...

Output Grid File

K:\DISIA\CARTOGRA\MESTRE\MSN\PLAN1.GRD Change...

In questa finestra devono essere effettuate alcune selezioni, in modo da permettere una corretta conversione di ciò che si vuole avere come output; infatti questo programma consente di tradurre i dati contenuti nel file *.dat in un file *.grd che sarà leggibile e graficabile con Surfer con la stessa procedura adottata per CityMap. Nella finestra soprastante viene proposto il nome di un file nella casella "Output Grid File"; se si volesse cambiare questo nome basta "clickare" Change e procedere.

Per quanto concerne gli altri parametri da settare occorre selezionare il "Gridding Method". Di default viene proposto il Kriging, ma si può scegliere anche uno degli altri (ad esempio il Minimum Curvature). Questi metodi di interpolazione si rifanno a degli algoritmi matematici e per gli utenti esperti è anche possibile perfezionare delle scelte avanzate attraverso il bottone Options...

La scelta più importante è però quella che riguarda la finestra denominata Z. Vengono proposte delle scelte tra Column C e Column L. Il significato di dette colonne è il seguente:

Column	Significato
C	63 Hz
D	125 Hz
E	250 Hz
F	500 Hz
G	1000 Hz
H	2000 Hz
I	4000 Hz
J	8000 Hz
K	“A”
L	“Lin”

Attraverso questa scelta si può decidere che cosa visualizzare nell’output acustico attraverso le curve di isolivello sonoro calcolate a tutte le frequenze dal DisiaPyr.

Effettuare tutte le scelte, clickando su OK, il programma converte il file *.dat in *.grd con le specifiche dinanzi spostate. A questo punto, seguendo la spetta procedura del CityMap, sarà possibile restituire in forma grafica i risultati della modellizzazione eseguita.

3.5 Il file DISIAPYR.INI



Questo file contiene i parametri di inizializzazione di Disiapyr. Si tratta di un file ASCII autodocumentato, che viene qui riportato:

[License]

User = Guy

[Parameters]

Level = 3
Time = 1 s
Precision = 1 s
History = 4
Humidity = 50 %
Alfa = 2
Beta = 0
Format = 1.2
ErrorLog = Off
HitLevel = -1
OutdoorEx = On

[Memory]

Minmem = 2048
Maxmem = 16384
Virtsize = 16384

Il file è diviso in tre sezioni: la prima contiene l'identificazione dell'utente (senza alcun effetto sul programma).

La seconda sezione contiene i parametri di calcolo per il tracciatore: Level e Time sono già stati definiti, Precision indica la risoluzione temporale con cui memorizzare la risposta all'impulso nel file .____, ma nel nostro caso deve sempre assumere un valore uguale a Time onde risparmiare memoria, History rappresenta il numero massimo di riflessioni su ostacoli riflettenti da considerare, Humidity è l'umidità dell'aria, Alfa e Beta sono i parametri di correzione della coda sonora (ininfluenti all'aperto), Format identifica il formato del file ASCII in uscita (non modificare!), ErrorLog abilita il salvataggio di un file contenenti le tracce delle piramidi "perse" (da non abilitare mai all'aperto, poiché qui vengono "perse" tutte!), Hitlevel indica il massimo numero di riflessioni per cui deve venire salvata la traiettoria del raggio (-1 indica di non salvarla, all'aperto non serve a niente), OutdoorEx indica la possibilità di abilitare il calcolo delle diffrazioni del secondo ordine (lasciarlo sempre On per calcoli all'aperto con schermature o edifici).

Infine la terza sezione contiene i parametri per l'ottimizzazione della memoria con il DOS extender a 32 bit: Minmem è la minima memoria estesa che viene allocata per il programma, Maxmem è quella massima, Virtsiz indica la dimensione complessiva della memoria indirizzabile (fisica + swap file). Specificando come nell'esempio su riportato una Virtsiz uguale alla Maxmem, si costringe il computer ad usare solo la RAM fisica, evitando accessi al disco sullo swap file, che rallentano l'esecuzione. Ovviamente questo è possibile solo se c'è abbastanza RAM nel computer.... per questo si raccomanda l'impiego di 16 Mbytes di RAM. La scelta del DOS extender a 32 bit è stata fatta onde massimizzare le prestazioni anche su macchine non ancora dotate di sistema operativo nativo a 32 bit (Windows 95 o Windows NT), anche se dà come contropartita l'utilizzo di una interfaccia utente in modo carattere, che comunque è ininfluenza poiché il programma DISIAPYR non deve interagire in alcun modo con l'utente.

4 Programmi accessori

4.1 Ray CAD

La fase di stesura del programma è stata preceduta da una lunga analisi dei vari prodotti già esistenti sul mercato. Sono stati presi in esame modellatori solidi e di superficie, analizzate le loro peculiarità, scoperti i rispettivi pregi e difetti.

Si è optato per un generatore di superfici, ritenuto più adatto al nostro scopo; infatti serve definire con precisione la superficie interna di un ambiente, mentre è del tutto influente che compaiano anche gli spessori, nel qual caso sarebbe stato più conveniente un modellatore solido.

Per l'interfaccia utente si è cercato di progettare quanto di più avanzato si è potuto. Dopo un lungo utilizzo di tutti i programmi di disegno, non esclusivamente CAD, si è deciso di utilizzare l'ambiente Windows, ormai molto diffuso e ritenuto molto più immediato nella fase di apprendimento e comodo in quella d'uso.

L'interfaccia grafica tipica dell'ambiente Windows, di per sé già molto avanzata, è stata ulteriormente perfezionata e specializzata all'uso. Il risultato è stato un drastico abbattimento del tempo occorrente per disegnare lo stesso ambiente, con lo stesso grado di precisione e dettaglio, rispetto agli altri programmi utilizzati, e un tempo di apprendimento praticamente nullo.

Il primo obiettivo è stato raggiunto grazie alla razionalizzazione dell'ordine dei comandi da dare durante il disegno, automatizzando le sequenze ripetitive ed ottimizzando l'efficacia degli strumenti e del loro uso nelle varie fasi del disegno.

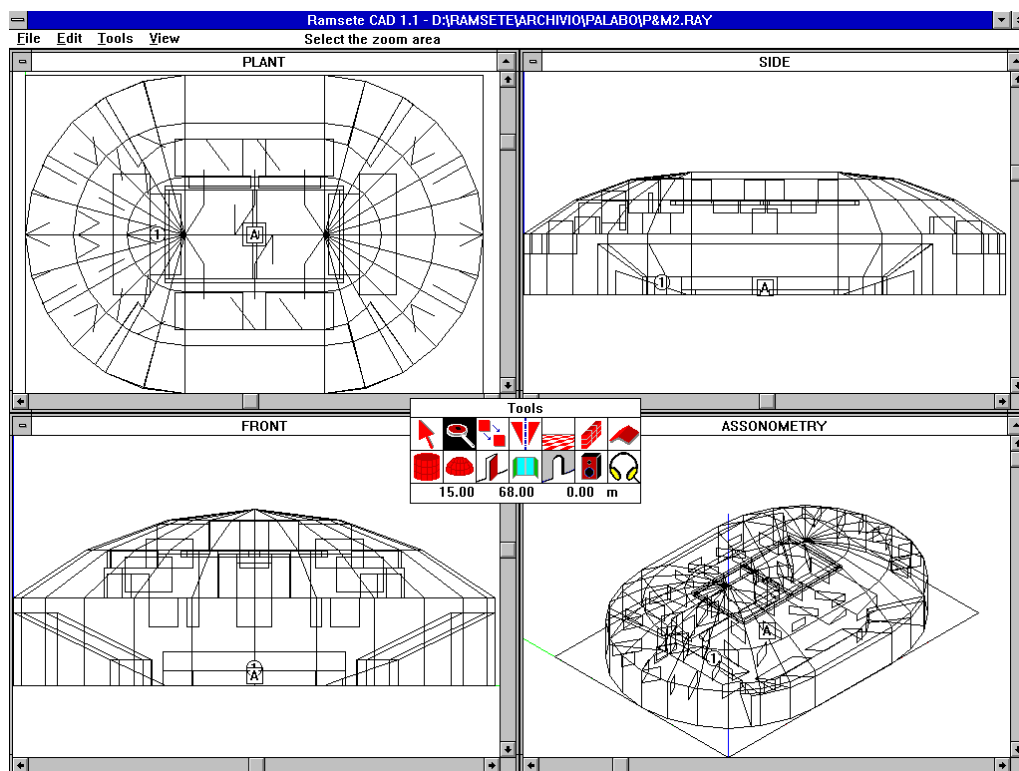
Il programma è un generatore di superfici piane, cilindriche e sferiche; considerando quindi un cono come un cilindro con una delle due facce degenerare in un punto è possibile disegnare una qualsiasi superficie geometrica riscontrabile nelle strutture soprattutto di interni.

Per aumentare la versatilità del programma è stato previsto il salvataggio dei file in tre formati diversi: il .RAY che è quello più avanzato e proprio del programma, il .DAT che è quello accettato un vecchio programma di Ray Tracing e il .DXF proprio di AutoCAD.

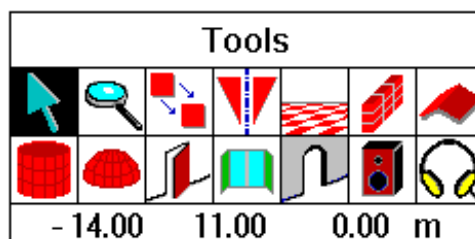
I file con estensione .RAY sono file ASCII perfettamente leggibili ed editabili.

Dopo aver disegnato l'ambiente da studiare ed avere assegnato a ciascuna superficie il corrispondente coefficiente di assorbimento acustico, non rimane altro che fissare la sorgente e il ricevitore. Sia le sorgenti, sia i ricevitori possono essere più di uno.

Si può lavorare contemporaneamente su più finestre, con vista in pianta, sezione ed assonometria. Ecco un esempio di una schermata di Ray CAD:



Una finestrella di Tools permette di introdurre i principali elementi geometrici: pavimento, pareti, tetti, porte, finestre. Il tracciamento è fatto col mouse, ma nella finestrella Tools compaiono sempre le coordinate aggiornate.



Si entra ora nel merito del sistema e dei criteri adottati per descrivere le superfici costituenti i confini dell'ambiente e le superfici in esso contenute (in seguito, se non specificato diversamente, con il termine di superficie si intenderanno sia le une, sia le altre).

Si considerano innanzitutto solo superfici piane; in questo senso le superfici che nella realtà non sono tali devono essere approssimate con un numero adeguato di elementi piani opportunamente dimensionati. Sotto questa condizione, sia la ricerca dell'impatto di un raggio, sia il suo successivo ridirezionamento risultano notevolmente semplificati a tutto vantaggio (ed è quello che conta) dei tempi di calcolo.

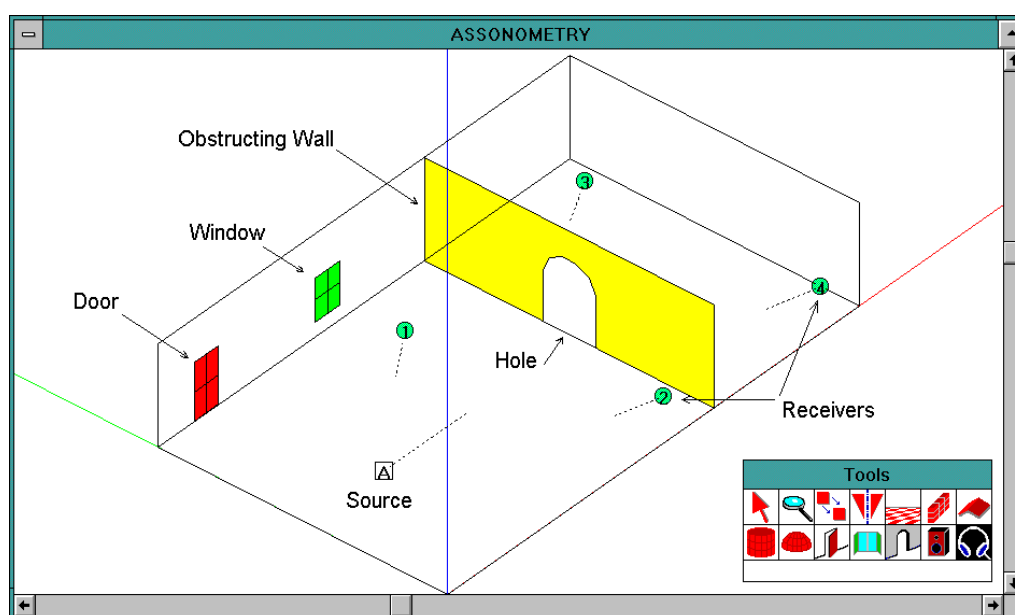
Se così non fosse, dovendo ad esempio ridirezionare un raggio che colpisce una superficie cilindrica o sferica, si dovrebbe sempre, prima, individuare il piano tangente alla superficie nel punto di impatto.

Ciascuna superficie viene perciò descritta fornendo le coordinate dei suoi vertici in un sistema di assi cartesiani fissato arbitrariamente; questo sistema di riferimento è quello che viene poi utilizzato dal programma in tutte le fasi del Pyramid Tracing.

Si trascurano allora le superfici più piccole che pesano quanto quelle grandi in termini di tempo di calcolo, essendo molto meno probabili gli impatti su di esse a causa delle loro ridotte dimensioni e per lo stesso motivo relativamente poco influenti sul comportamento del campo sonoro.

D'altra parte, superfici anche molto sviluppate lungo una direzione, ma ridotte a qualche decina di centimetri nell'altra, non ammetterebbero a rigore, la semplice riflessione speculare dei raggi sonori, che invece rappresenta una delle due ipotesi su cui si basa la metodologia del Pyramid Tracing.

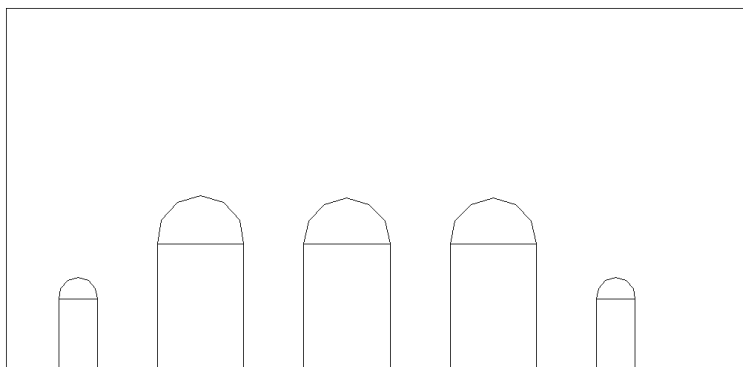
A parte una prima forte riduzione del numero di superfici ottenuta applicando il criterio già esposto (si eliminano tutti quegli elementi di piccole dimensioni la cui influenza sui risultati non sia ritenuta apprezzabile), con alcune modifiche ed integrazioni alla procedura originale si è ridimensionato ulteriormente il problema dell'eccessivo numero di superfici mantenendo nello stesso tempo inalterato il livello descritto dell'ambiente, grazie all'introduzione dei "buchi".



I "buchi" non sono altro che delle superfici fittizie opportunamente sagomate (il numero dei vertici è per questo arbitrario), che, appoggiate ad altre superfici, ne delimitano una parte che risulterà trasparente ai raggi sonori durante la fase di ricerca degli impatti.

E' così possibile descrivere una grande parete su cui insistono diverse aperture con un'unica superficie e tanti "buchi" quante sono le aperture. In figura 3.34 sono rappresentate le configurazioni di superfici adottate per

descrivere le pareti laterali di una chiesa: con l'ausilio dei "buchi" il numero di superfici da utilizzare si è ridotto a uno, più cinque "buchi".



4.2 Material Manager



Aperto il programma ci si ritrova in un ambiente di tipo Excel che contiene i dati di assorbimento ed isolamento acustico dei materiali. L'utente potrà quindi facilmente creare nuovi materiali editandone il nome e le corrispondenti caratteristiche acustiche nelle relative celle. Si possono visualizzare, banda per banda, i coefficienti di assorbimento α , oppure i poteri fonoisolanti in dB R , sempre nelle 10 bande di frequenza considerate (da 31.5 a 16000 Hz).

Material Manager 1.4 - Ramsete.mat

0.0

α

R

Update File

Quit

N.	Frequency (Hz)	Color	31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
0	Nessuno	800000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	intonaco calce (s.r.)	008000	0.03	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.09	0.14	0.23	0.28
2	intonaco ruvido	808000	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02
3	intonaco liscio	000080	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02
4	int. calce fresco (T.R.)	800080	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.1
5	int. calce maturo (T.R.)	008080	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.11
6	int. calce degrad.(T.R.)	C0C0C0	0.03	0.05	0.06	0.07	0.07	0.07	0.09	0.11	0.21	0.25
7	int. gesso liscio legno (P)	808080	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07
8	int. gesso liscio ferro	FF0000	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	0.04
9	piastrelle stuccate (g)	00FF00	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05
10	legno di pino (C)	FFFF00	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.09	0.1	0.12	0.3	0.36
11	legno verniciato (g)	0000FF	0.06	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.1	0.1	0.1	0.12
12	legno compensato (C)	FF00FF	0.06	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.1	0.1	0.1	0.12
13	pavimento legno poroso	400040	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.12	0.1	0.17	0.23	0.28
14	pavimento legno duro	800000	0.05	0.09	0.09	0.1	0.08	0.08	0.1	0.1	0.1	0.12
15	pavimento marmo (B)	008000	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06
16	pavimento moquette (B)	808000	0.03	0.05	0.05	0.05	0.1	0.2	0.3	0.59	0.5	0.6
17	pavimento moquette (C)	000080	0.03	0.07	0.08	0.1	0.2	0.25	0.3	0.35	0.36	0.43
18	pavimento gomma (B)	800080	0.0	0.01	0.02	0.04	0.05	0.05	0.1	0.05	0.05	0.06
19	pavimento linoleum (m)	008080	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
20	pavimento in cemento (g)	C0C0C0	0.01	0.01	0.01	0.03	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
21	pavimento sughero cerato (C)	808080	0.02	0.03	0.04	0.03	0.05	0.11	0.07	0.02	0.01	0.01
22	tende velluto a 20 cm (C/B)	FF0000	0.01	0.03	0.08	0.29	0.44	0.5	0.4	0.35	0.28	0.34
23	tende velluto tese (C)	00FF00	0.01	0.02	0.05	0.12	0.35	0.45	0.38	0.36	0.36	0.43
24	Unita' ass. ti poltrona in cuoio (P)	FFFF00	0.08	0.16	0.2	0.25	0.29	0.31	0.29	0.25	0.22	0.26
25	tappezz. stoffa (B)	0000FF	0.01	0.02	0.03	0.04	0.11	0.17	0.24	0.35	0.42	0.5

La gran parte dei materiali predefiniti contiene solo i dati di assorbimento. Tuttavia è possibile aggiungere nuovi materiali, completi anche dei dati di potere fonoisolante.

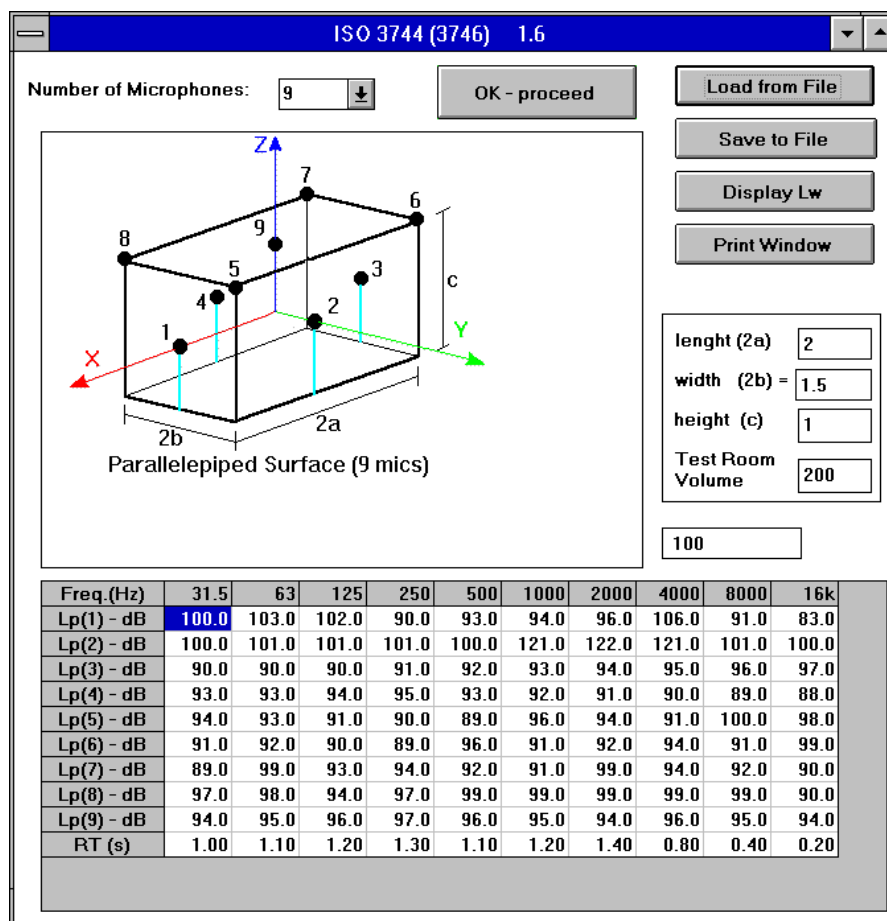
Si fa notare che per la maggior parte delle superfici tali dati di potere fonoisolante sono superflui: soltanto le superfici marcate “obstructing” in Ray CAD possono essere attraversate da energia sonora (barriere antirumore, schermi, etc.). In questi casi, oltre che tener conto dell’energia che attraversa tali schermi, DisiaPyr considera anche la quota di energia diffratta dai bordi liberi (se ce ne sono), utilizzando le note relazioni di Maekawa.

4.3 Source Manager



Questo programma serve per generare e visualizzare i file che contengono i dati sulle sorgenti sonore (.SPK). Esso comprende anche un modulo, chiamato ISO 3744 (3746) per l'utilizzo diretto di dati di livello sonoro rilevati attorno ad una sorgente sonora

Nell'ambito delle finalità del presente progetto questo software è utilizzabile per la modellizzazione di sorgenti fisse per le quali siano disponibili livelli di pressione sonora rilevati al contorno o livelli di potenza.

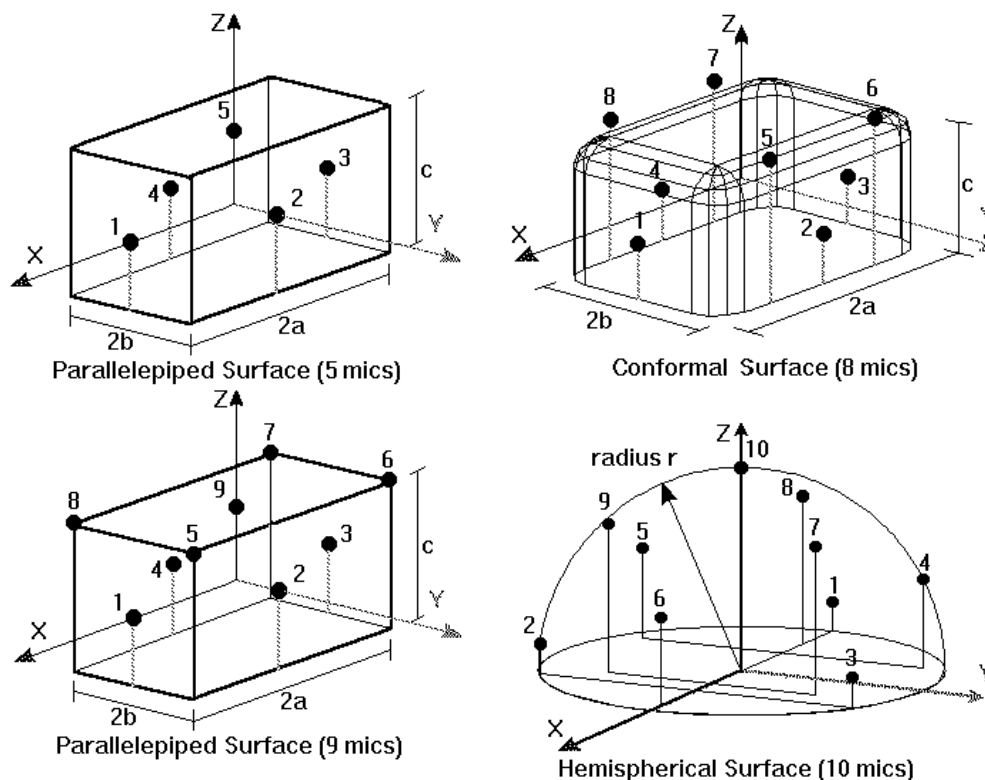


E' possibile anche impiegare superfici conformi ad 8 microfoni, superfici parallelepipedo a 5 o a 9 microfoni od emisferiche a 10 microfoni.

Bisognava che il programma riuscisse a stimare i "balloon" di direttività delle sorgenti a partire da un ristretto numero di punti di rilievo, eseguiti per di più non in camera anecoica ma nelle condizioni su piano riflettente in cui solitamente la macchina opera.

Per fare ciò il programma impiega molto semplicemente i rilievi di pressione sonora eseguiti secondo la norma ISO 3744, per la determinazione dei Livelli di Potenza Sonora su piano riflettente in campo libero: si ricorda che tale norma prevede in realtà la possibilità di effettuare i rilievi anche in spazi chiusi, apportando ai dati rilevati una opportuna correzione onde tenere conto della riverberazione dell'ambiente.

Per sorgenti sonore di dimensioni medio-piccole, la norma prevede la possibilità di impiegare diverse superfici per involupparla: parallelepipedo con 5 o 9 microfoni, semisfera con 10 microfoni e superficie conforme ad 8 microfoni, come mostrato dalle figure seguenti:



In più è possibile definire una superficie di inviluppo personalizzata con forma e numero di microfoni a piacere.

La costruzione del “balloon”, a partire dai livelli di pressione sonora misurati in banda d’ottava nei punti indicati, viene effettuata secondo questi criteri:

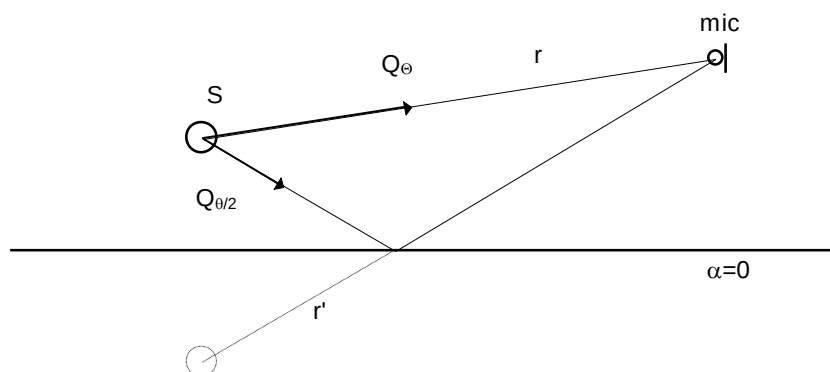
nelle direzioni definite dalla congiungente centro della sorgente-microfono si suppone che il livello sonoro rilevato sia costituito dalla somma energetica di due contributi: il primo è l’onda diretta, pari a:

$$L_{dir} = L_w + 10 \log \left(\frac{Q_g}{4\pi r^2} \right)$$

il secondo è invece il contributo riflesso dal pavimento, e si suppone che in tale direzione si sviluppi un fattore di direttività pari alla metà di quello in direzione diretta. Pertanto il livello complessivo è dato dalla seguente espressione:

$$L_{tot} = L_w + 10 \log \left(\frac{Q_g}{4\pi r^2} + \frac{Q_g/2}{4\pi r'^2} + \frac{4T_{60}}{0.161V} \right)$$

ed, essendo note tutte le altre grandezze, si può ricavare il valore di Q_g . La seguente figura illustra uno schema di questa costruzione:



Nelle altre direzioni si procede per interpolazione, assegnando la direttività come media pesata fra la direttività nella direzione del microfono più vicino e la direttività media (1 per definizione), impiegando come fattore di peso il coseno dell'angolo fra la direzione considerata e quella del microfono.

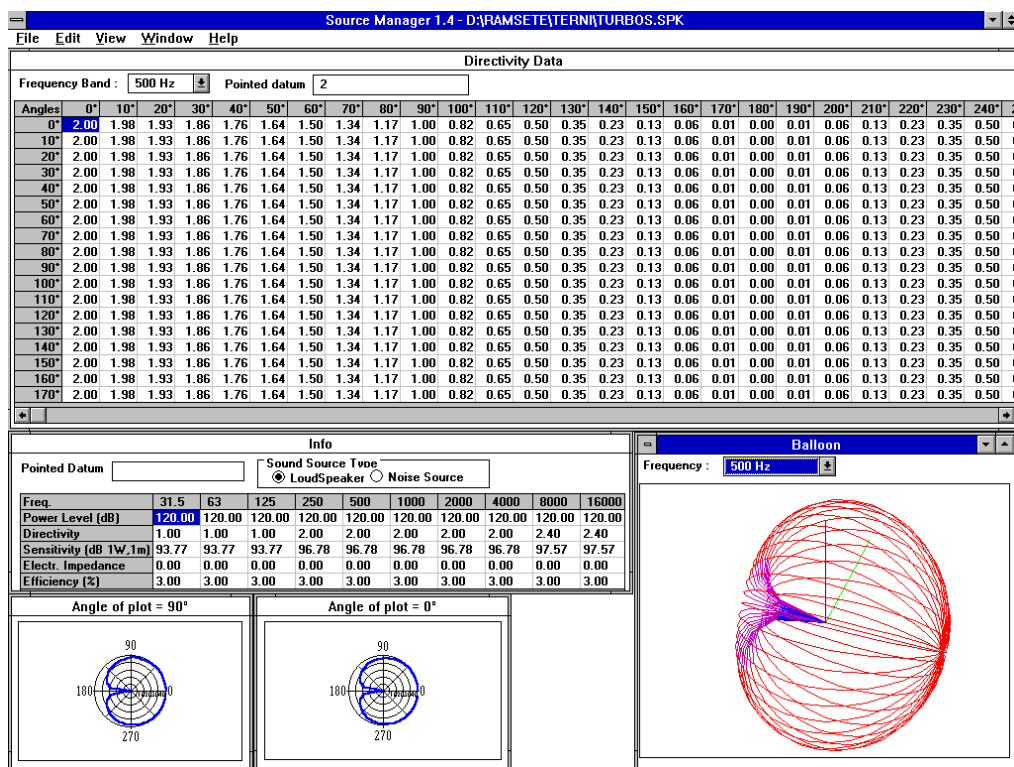
Al termine della costruzione del balloon, si è sicuri che esso è tale da riprodurre i livelli sonori nei punti di rilievo. Sorge tuttavia un problema: ricalcolando la potenza sonora come integrale sulla superficie del balloon dell'intensità emessa, esce in generale un risultato diverso dai valori di L_w ottenuti dalla applicazione diretta della ISO 3744.

Tale scostamento è generalmente piccolo, e tende a scomparire al crescere del numero di punti di rilievo; tuttavia, nel caso di rilievi con 5 microfoni e sorgente molto direttiva (utensili a disco), si sono trovati anche 4 dB di differenza! In queste condizioni, tuttavia, non è affatto chiaro se sia più corretto il valore indicato dalla ISO 3744 (che assegna implicitamente una uguale apertura angolare a ciascuna postazione microfonica) oppure quello ottenuto con la metodologia proposta (che viceversa assegna ad ogni microfono un'apertura angolare dipendente dalla sua posizione, in relazione agli altri).

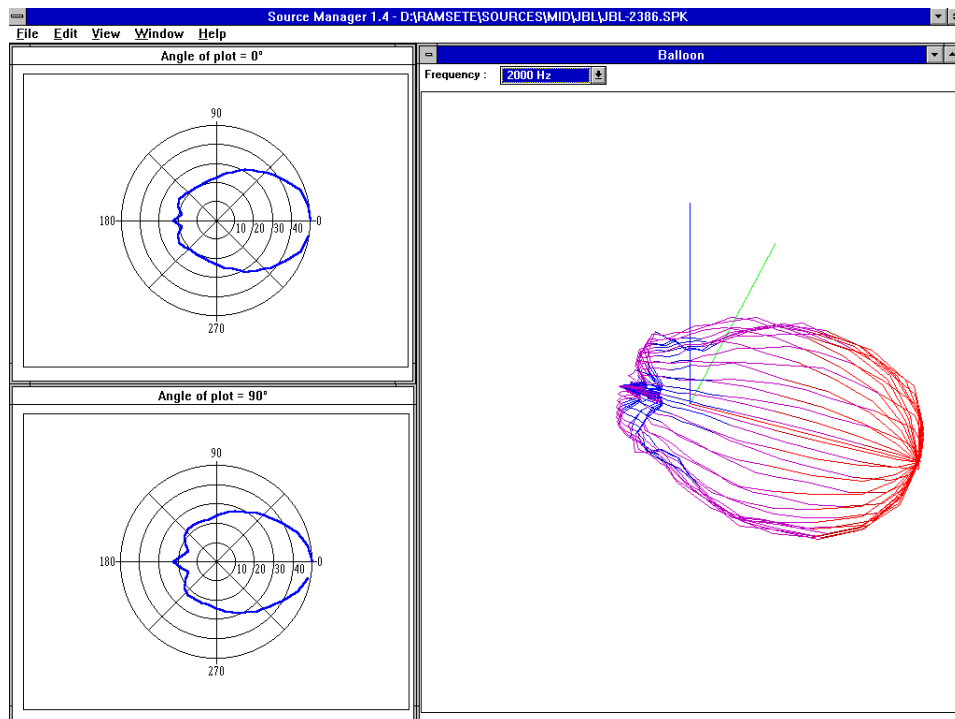
In ogni modo, impiegando poi i dati in un programma di tracciamento di fasci divergenti (piramidi), si ottengono risultati corretti accoppiando i livelli di potenza definiti dalla ISO 3744 ai dati di direttività ottenuti con il metodo proposto. Infatti in tal modo, collocando dei ricevitori nei punti di rilievo, si ritrovano con buona approssimazione i livelli sperimentali.

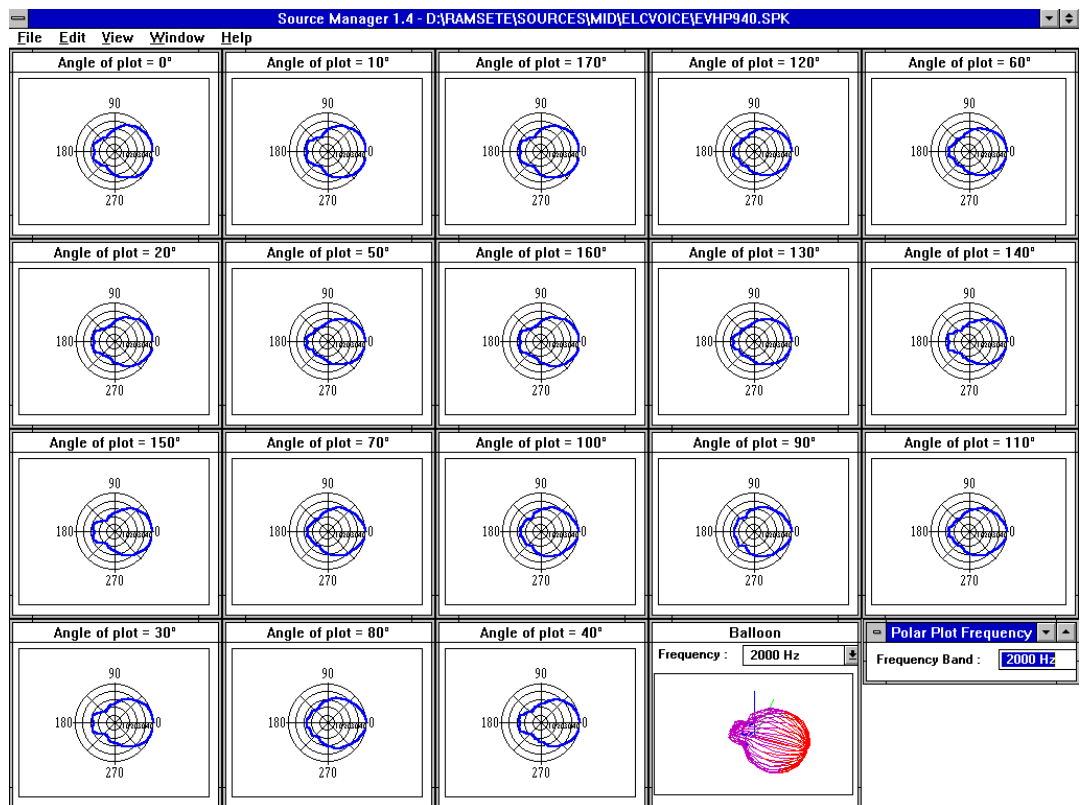
Si verifica inoltre che, anche in punti situati più lontano dalla sorgente, la stima ottenuta con la tecnica proposta è sempre più accurata di quella ottenibile con l'ipotesi di sorgente omnidirezionale.

I dati della sorgente possono poi venire editati in forma tabellare, o visualizzati in forma grafica:



Source Manager è infine in grado di importare file che contengono dati su altoparlanti provenienti dal programma Modeler della Bose Corporation (estensione . MDL o .).





5 Riferimenti bibliografici

- [1] Farina A., Brero G., Pollone G. - "Computer code based on experimental results for acoustical mapping of urban areas" - Proc. of NOISE & PLANNING 96, Pisa (28-31 May 1996).
- [2] Farina A., Brero G. - "Computer code based on experimental results for designing sound reduction devices" - Proc. of NOISE & PLANNING 96, Pisa (28-31 May 1996).
- [3] London A. - "The determination of Reverberant Sound Absorption Coefficients from Acoustic Impedance Measurements" - J.A.S.A., vol. 22, no. 2, pagg. 263-269, march 1950.
- [4] Farina A., Cocchi A. - "Utilizzo di ex-chiese come sale polifunzionali: la chiesa di S.Lucia a Bologna" - Atti del XVIII Convegno Nazionale AIA, L'Aquila, 18-20 aprile 1990.
- [5] Farina A., Cocchi A., Garai M., Semprini G. - "Old Churches as concert halls: a non-sabinian approach to optimum design of acoustic correction" - Proc. of 14th. ICA, F5-7, Beijing 3-10 september 1992.
- [6] Vorlander M. - "Simulation of the transient and steady state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm" - J.A.S.A. 86 (1), pagg. 172-178, july 1989.
- [7] D. van Maercke, J. Martin - "The prediction of echograms and impulse responses within the Epidaure software" - Applied Acoustics Vol. 38 no.s 2-4, pag. 93 (1993).
- [8] Naylor G.M. - "ODEON - Another Hybrid Room Acoustical Model" - Applied Acoustics Vol. 38 no.s 2-4, pag. 131 (1993).
- [9] Lewers T. - "A combined Beam Tracing and Radiant Exchange Computer Model of Room Acoustics" - Applied Acoustics Vol. 38 no.s 2-4, pag. 161 (1993).
- [10] Tenenbaum R., Slama J., Ballesteros M. - "Numerical simulation of room acoustics: a new approach for source modelling" - Proc. of 14th. ICA, F6-11, Beijing 3-10 september 1992.