



IL RUMORE PRODOTTO DALLE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO

19-20 novembre 2004

PARMA

La modellistica previsionale applicata al risanamento ed alla prevenzione: teoria ed esempi

Angelo Farina

Dip. Ing. Industriale, Università di Parma, Via delle Scienze – 43100 PARMA

Tel. 0521 905854 – fax 0521 905705 – E-MAIL: farina@unipr.it – HTTP://www.angelofarina.it

1 Introduzione

L'utilizzo della modellistica previsionale trova nella valutazione di impatto ambientale acustico (VIAA) la sua più naturale collocazione. Nel presente documento viene descritto un moderno sistema modellistico previsionale, sviluppato dal ministero dell'Ambiente e finalizzato all'utilizzo da parte delle pubbliche amministrazioni italiane (Comuni, Provincie, Regioni, ARPA, USL, Università, Scuole), e viene presentato un esempio di VIAA condotta facendo impiego di tale sistema.

La V.I.A.A si articola nelle seguenti fasi

- Indagine sullo stato di fatto dell'area territoriale oggetto di intervento, e sua completa definizione dal punto di vista acustico.
- Previsione dell'inquinamento acustico indotto dal nuovo intervento.
- Individuazione di opere di bonifica e previsione degli scenari acustici generati dalla loro realizzazione.
- Scelta della soluzione ritenuta più idonea.

Ai fini dell'esecuzione di una corretta valutazione, occorre non trascurare alcuno dei punti sopra descritti, tranne i casi in cui lo studio evidenzi l'assenza di degrado del territorio dal punto di vista del rumore, nel qual caso ovviamente non si procede alla definizione di opere di mitigazione.

2 Contenuti della valutazione di impatto acustico ambientale

La valutazione di impatto acustico di una nuova opera può essere effettuata mediante modelli numerici di calcolo, cosa che presenta numerosi vantaggi rispetto ad altre metodiche previsionali (modelli in scala, metodi empirici).

Lo scrivente ha nel recente passato sviluppato numerose metodiche di calcolo numerico per lo studio della propagazione del suono ai fini dell'esecuzione di valutazioni di impatto ambientale [1], facendo impiego sia di algoritmi di calcolo ufficiali vigenti in altre nazioni quali SCHALL 03 [2] per il rumore ferroviario ed RLS 81 [3,4] per il rumore stradale. Tali sigle identificano procedure di calcolo standardizzate, sviluppate dal Ministero Federale Dei Trasporti della Germania; in tale paese queste procedure di calcolo sono obbligatorie, mentre attualmente in Italia non esiste alcun modello di calcolo "ufficiale" per il rumore stradale o ferroviario.

Va tuttavia segnalato che il Ministero dell'Ambiente della Repubblica Italiana ha ultimato negli anni '90 un programma sperimentale, finanziato dalla CEE come Progetto DISIA, all'interno del quale è stata effettuata anche la messa a punto di due nuovi modelli numerici per la valutazione della rumorosità ambientale su vaste aree e per la progettazione di opere di bonifica acustica in aree più dettagliate, denominati rispettivamente Citymap [5] e Disiapyr [6]

Ovviamente tutti i modelli numerici richiedono una adeguata taratura prima di poter venire impiegati con ragionevole accuratezza, anzi tipicamente l'accuratezza complessiva da essi ottenibile è generalmente definita in maggior misura dall'accuratezza dei dati di input e dei rilievi sperimentali di taratura, piuttosto che dagli intrinseci limiti di precisione connessi con la modellizzazione matematica semplificata del campo sonoro [7].

Deve venire pertanto innanzitutto implementata una adeguata campagna di rilievi strumentali, con lo scopo di disporre da un lato di accurati dati geometrici per la definizione delle porzioni di territorio da studiare, dall'altro di rilievi acustici da impiegare per la validazione dei risultati del modello di calcolo. Esigenze di economicità e ristrettezza dei tempi disponibili portano comunque all'esecuzione di una mole di rilievi sperimentali relativamente ridotta rispetto all'estensione dell'area da studiare, visto che il loro scopo primario è quello di fornire dati per la taratura dei modelli, e non consentire direttamente il tracciamento della mappa del rumore sulla base dei soli rilievi sperimentali.

I valori di rumorosità ottenuti dai modelli matematici vanno poi confrontati con i limiti di legge.

2.1 Analisi della rumorosità esistente

La prima fase del procedimento di verifica della compatibilità acustica dell'opera progettata con i limiti di legge consiste nella determinazione dello stato di fatto acustico, senza tenere conto di eventuali situazioni anomale in essere causa la presenza di attività di cantiere nell'area, ma considerando semplicemente la stessa priva sia di edifici, sia di alcuna attività umana.

Da tali dati è poi possibile estrapolare la nuova situazione acustica connessa alla realizzazione dell'opera, supponendo inalterato il rumore residuo e viceversa andando a stimare l'incremento di emissione sonora causato dal traffico stradale aggiuntivo e dalle sorgenti fisse.

La definizione dello stato di fatto è possibile con tre diverse metodiche: modellazione numerica, rilievo sperimentale e tecnica combinata.

L'impiego di una pura modellazione matematica è in grado di definire con un certo grado di incertezza il rumore emesso dal transito dei treni e dei veicoli stradali, ma non può fornire alcuna indicazione sulla rumorosità residua di tipo "naturale", e pertanto non consente una verifica del rispetto dei limiti differenziali. Inoltre, in assenza di taratura, l'errore che si può commettere sul rumore emesso è di tale entità da rendere problematica anche la valutazione del rispetto dei limiti assoluti.

Viceversa l'impiego esclusivo di tecniche di rilievo sperimentale è in grado di fornire l'accurata identificazione dei vari contributi alla rumorosità ambientale (ad es. ferroviario e stradale), tramite moderne tecniche di analisi statistica del tracciato temporale della rumorosità. Ciononostante la tecnica è estremamente dispendiosa, in quanto richiede in ciascun punto un rilievo in continua di almeno 24 ore (ed in alcuni punti addirittura di una settimana). Tenendo conto della estensione dell'area da studiare, della variabilità spaziale della rumorosità residua e della eventuale presenza di una altimetria molto movimentata, si può ritenere che sarebbero necessari decine di rilevamenti di 24 ore ed alcuni di una settimana anche per aree non troppo vaste. Procedere dunque solo sulla base di rilievi sperimentali è sconsigliabile in quanto produrrebbe tempi e costi troppo elevati in rapporto all'intero budget dell'opera.

E' pertanto preferibile che la diagnostica della rumorosità venga attuata con un sistema ibrido, costituito da un lato da una modellazione numerica della propagazione del rumore, dall'altro da una verifica e taratura dei modelli di calcolo mediante un congruo numero di rilievi strumentali "intelligenti", eseguiti cioè esplicitamente con lo scopo di raccogliere dati per la modellazione, e dunque corredati della raccolta di dati sulle sorgenti del rumore rilevato (ad es. dati di traffico).

L'impiego di moderne tecniche di campionamento digitale ed analisi statistica del segnale acustico consentono poi di effettuare i rilevamenti per lunghi periodi ed in automatico, aumentando la validità statistica degli stessi e riducendo grandemente i costi e l'impiego di personale. Inoltre i moderni programmi di calcolo della propagazione si interfacciano direttamente alla strumentazione digitale di misura, consentendo l'eliminazione di ogni errore umano legato alla trascrizione dei dati ed addirittura implementando procedure "intelligenti" di auto-taratura del modello stesso.

L'approccio ibrido comporta da un lato una notevole riduzione del numero di rilievi strumentali atti a caratterizzare un vasto territorio, dall'altro fornisce alla fine uno strumento predittivo accurato e sensibile, grazie al quale si possono effettuare facilmente analisi previsionali atte a valutare gli effetti acustici di interventi sul territorio stesso.

2.2 Simulazione dello stato di progetto

Solitamente vengono analizzate matematicamente 4 diverse ipotesi, corrispondenti ai 2 periodi (diurno e notturno) ed alla presenza o meno di interventi di mitigazione della rumorosità. Con riferimento al quadro legislativo vigente in Italia, la situazione più problematica è usualmente quella notturna, in quanto nonostante la riduzione di rumorosità rispetto al periodo diurno, ci si deve confrontare con limiti di legge più bassi di ben 10 dB. Anche i limiti differenziali dentro gli edifici si riducono da 5 a 3 dB nel periodo notturno, e dunque per le sorgenti fisse diventa assai più problematico rientrare nei limiti, tenuto conto che il rumore residuo è più basso.

In molti casi, dunque, viene eseguita solo la simulazione relativa al periodo notturno, che per l'edilizia abitativa costituisce la situazione critica. In altri casi (scuole, asili) in cui non è previsto l'utilizzo notturno, si esegue invece ovviamente solo la simulazione diurna.

2.3 Definizione dei limiti di legge

Nel caso che l'area in cui la nuova opera va inserita non sia già dotata di classificazione acustica, sovente l'organo di controllo richiede che venga realizzata, congiuntamente alla valutazione di impatto, anche una bozza di classificazione acustica dell'area, sulla quale definire i limiti di legge. In altri casi, invece, ci si accontenta dell'applicazione dei limiti provvisori previsti dal DPCM 1 marzo 1991.

Nel caso sia da realizzare la bozza di zonizzazione, la stessa può venire ipotizzata partendo dall'analisi comparata delle mappature isolivello nello stato di fatto (senza edifici) ed in quello di progetto, e tenendo conto della tipologia edilizia ed urbanistica dei singoli complessi da edificare, nonché sulla base delle indicazioni contenute nel DPCM 1 marzo 1991 e nella Legge Quadro sul

Rumore, o delle circolari esplicative emanate da alcune Regioni (es. Delibera Giunta. Reg. Emilia Romagna).

Fortunatamente i comuni seri, come quello di Parma nel quale è ambientato l'esempio qui riportato, hanno da tempo provveduto ad adottare ed approvare la Zonizzazione Acustica del proprio territorio Comunale. Ad esempio, Parma ha adottato la sua prima zonizzazione acustica nel 1996, l'ha approvata definitivamente nel marzo 1998 (ed è quindi in vigore da allora). A seguito della nuova normativa regionale emessa negli anni 2001/2002, ha poi provveduto al riadeguamento della propria zonizzazione acustica, culminata con l'adozione della nuova versione nel luglio 2003. A seguito delle osservazioni pervenute, sono poi state fatte una ventina di piccole modifiche, che verranno recepite in sede di approvazione definitiva, prevista entro la fine del 2004.

Parma è dunque in possesso di una zonizzazione acustica vigente. Tuttavia, un progetto di notevole importanza, quale quello qui utilizzato ad esempio, comporta una significativa rideterminazione degli assetti urbanistici del territorio, con variante agli strumenti territoriali (POC, PSC), e conseguentemente porta con se anche una variante alla preesistente zonizzazione acustica (nel caso in esame, con generalizzata riduzione dei limiti di rumorosità, in quanto le aree oggetto dell'intervento passano da zone produttive a zone di terziario/residenziali).

Cio' significa che la definizione dei limiti di rumorosità è diversa nello scenario di stato di fatto e di stato di progetto, e comporta pertanto la necessità di portare ad un maggior contenimento della rumorosità di quanto sarebbe stato necessario mantenendo invariati i limiti stessi.

2.4 Verifica dell'efficacia degli interventi di mitigazione acustica

Sperabilmente la valutazione di impatto acustico dovrebbe consentire di affermare che la situazione acustica conseguente alla realizzazione dell'opera è soddisfacente, e rientra nei limiti di legge. Quando ciò non accade, alla relazione di impatto deve essere agganciata la valutazione, sempre a mezzo della stessa metodica di calcolo, della attenuazione ottenibile con ipotetici interventi di mitigazione acustica.

Ciò non costituisce ancora l'effettiva progettazione degli stessi, ma semplicemente una verifica della possibilità di sanare la situazione con opere di contenimento, quali barriere antirumore, terrapieni, asfalti fonoassorbenti, etc. E' opportuno, per congruità di metodo di calcolo e dei risultati, che tale valutazione previsionale venga eseguita a partire dallo stesso modello di calcolo impiegato per valutare lo stato di progetto.

Dall'analisi dei risultati di tale simulazione, si valuterà se gli interventi di mitigazione proposti sono efficaci, e se la loro realizzazione è concretamente prevedibile.

Nel caso l'esito di questa verifica sia negativo, e pertanto non sia possibile, nonostante gli interventi di mitigazione attuabili, rientrare nei limiti di legge, si deve concludere che la realizzazione dell'opera porterà ad un impatto acustico negativo. Spetta a questo punto all'autorità pubblica prendere una decisione nel merito, ed in particolare concedere o meno la licenza di edificazione, eventualmente subordinandola all'esecuzione di opere accessorie ovvero alla introduzione di specifici accorgimenti costruttivi.

Nel caso invece si verifichi che le opere di bonifica sono potenzialmente in grado di sanare la situazione, è necessario eseguire la progettazione di dettaglio delle opere stesse, cosa che solitamente richiede da un lato un stretta interazione con la progettazione di dettaglio dell'intera opera, dall'altro l'impiego di modelli numerici di calcolo più raffinati di quelli usati per la valutazione di impatto. Nei casi più critici si ricorre a prove sperimentali, sia su modelli in scala sia su "tratti di prova" in scala reale dei manufatti da impiegare. La presente relazione non approfondisce ulteriormente la questione della progettazione delle opere di bonifica.

3 Modelli matematici per la propagazione del rumore

Sono stati sviluppati negli ultimi anni numerosi modelli computerizzati atti alla previsione della propagazione del rumore in ambito urbano ed extraurbano. Alcuni di questi codici di calcolo sono stati sviluppati da enti pubblici, e vengono attualmente venduti ad un prezzo irrisorio (quali l'EMPA ed il SEMIBEL svizzeri, destinati il primo alla modellazione del rumore stradale ed il secondo al rumore ferroviario); essi però dispongono di limitate capacità di interfacciamento con l'esterno (sistemi cartografici digitalizzati tridimensionali, strumentazione di rilievo acustico, sistemi computerizzati di gestione del traffico, etc.).

Viceversa altri programmi sono stati raffinati ed evoluti con marcati scopi commerciali, e vengono oggi venduti a parecchie decine di milioni di lire (SoundPlan, Mithra): sebbene dotati di evolute interfacce utente, restano comunque "sistemi chiusi", funzionanti secondo algoritmi non noti (onde evitarne la duplicazione), e privi di possibilità di adattamento a casi particolari.

In alternativa a ciò, l'Università di Parma ha sviluppato negli ultimi 5 anni numerosi codici di calcolo "dedicati" a particolari problemi o realtà territoriali, includendo la modellizzazione del rumore alla fonte (programmi agli elementi finiti per impiego nell'industria automobilistica e ferroviaria), la propagazione al chiuso ed all'aperto, l'emissione sonora da parte di strade urbane, extraurbane ed autostrade, il rumore generato dal passaggio di convogli ferroviari tradizionali ed ad alta velocità, il rumore degli aerei, la schermatura da parte di manufatti antirumore, le prestazioni acustiche di interi edifici.

Tutti i programmi sono stati sviluppati in modo da renderli inter-operativi, grazie all'ambiente multitasking di Microsoft Windows: essi sono dotati di interfaccia utente amichevole (Visual Basic), gestiscono i dati in ingresso ed uscita tramite semplici files ASCII perfettamente documentati, si appoggiano a software di impiego universale come AutoCAD per la rappresentazione geometrica o Surfer per le funzioni di mappatura.

Gli ultimi nati, in ordine cronologico, sono i già citati programmi Citymap e Disiapyr, la cui descrizione dettagliata è reperibile in [5,6]. E' anche possibile ottenere il testo di tali articoli in forma elettronica, scaricandoli dal sito Internet dell'autore: [HTTP://pcfarina.eng.unipr.it](http://pcfarina.eng.unipr.it). Questi programmi consentono di valutare la rumorosità prodotta in ambito urbano da sorgenti sonore di tipo veicolare (stradale o ferroviario) e da sorgenti sonore fisse, sia di tipo lineare ("contorni" di aree produttive), sia "puntiformi" (con opportuna emissione direttiva, se necessario).

Un pregio non trascurabile dell'impiego di modelli matematici sviluppati in proprio consiste nella possibilità modificare all'occorrenza i programmi stessi, per adattarli alle particolari esigenze del caso da studiare.

La versatilità di impiego e potenza ottenibile da modelli di calcolo sviluppati in proprio, ed adattati alle esigenze di impiego, non è riscontrabile (ovviamente) in nessun modello di calcolo "commerciale". Viene nel seguito presentata una breve illustrazione di tali codici di calcolo.

Il programma Citymap è stato sviluppato dallo scrivente, nell'ambito di un progetto di ricerca DISIA denominato "Inquinamento acustico nelle aree urbane", organizzato dal Ministero dell'Ambiente nel 1995. Esso contiene l'intero data-base dei valori di emissione sonora derivanti dalle campagne di rilevamento fonometrico previste nell'ambito del suddetto progetto DISIA, ed è basato su algoritmi di calcolo semplici e comunemente accettati, coerenti con i modelli di calcolo della propagazione sonora in vigore in altri paesi (quali RLS-90 e Schall-03 della Germania, oppure Empa e Semibel della Svizzera).

Il programma è attualmente a disposizione gratuitamente per le strutture pubbliche (Comuni, Provincie, Regioni, ARPA, ANPA, USL, Università, etc.), e non è in vendita per i privati.

In questo capitolo viene descritto il programma di calcolo, assieme con i rilievi sperimentali utilizzati per la caratterizzazione delle sorgenti di rumore urbano. Viene poi spiegato in dettaglio

l'algoritmo di calcolo, e vengono illustrate l'interfaccia utente del programma e la sua interazione con altri programmi (CAD, GIS, programmi di mappatura).

3.1 Introduzione e scopi dell'algoritmo di simulazione

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

Tuttavia in passato è risultato evidente come l'impiego dei modelli di calcolo, anche i più raffinati, porti a stime della rumorosità estremamente disperse in assenza di qualsiasi forma di taratura del modello mediante rilievi sperimentali: in occasione di un *Round Robin* fra modelli di calcolo europei, alla cui organizzazione ha partecipato anche l'autore del presente studio¹, è risultato che anche in casi geometricamente molto semplici si verificano differenze di 4-5 dB(A) fra i vari programmi di calcolo, e che nel caso la situazione geometrica si complichino anche di poco, queste variazioni arrivano fino a 12 dB(A). Si noti poi che le differenze riscontrate non riguardano solo la modellazione di fenomeni di propagazione a lunga distanza (che in ambito urbano sono comunque poco rilevanti), ma anche la vera e propria **emissione** da parte delle sorgenti sonore. Considerando che il *Round Robin* di cui sopra teneva in considerazione solo sorgenti di rumore legate al traffico stradale fluente (tipo autostrada), ci si aspetta una situazione ancora peggiore applicando simili modelli semplificati di emissione in campo urbano, in presenza di traffico non fluente, e magari anche in presenza di linee ferroviarie che attraversano la città.

Si è pertanto deciso di realizzare un sistema di calcolo che privilegiasse l'accuratezza nella stima delle emissioni sonore, descrivendo con grande dettaglio i tipi di sorgente e le loro modalità di emissione. E' stata dunque realizzata una imponente campagna di rilievi sperimentali, onde disporre di un data-base di emissione, tarato sulla realtà italiana, e comunque sempre modificabile ed aggiornabile in funzione di ulteriori rilievi. In tal modo il modello di calcolo non contiene al suo interno le informazioni legate all'emissione sonora, che sono viceversa disponibili come dati di ingresso, eventualmente modificabili onde adattare il funzionamento del modello a realtà urbane diverse da quelle in cui è stata condotta la sperimentazione.

Ai fini di realizzare con tempi di calcolo ragionevoli la mappatura di una intera città, si è scelto poi di impiegare i dati di emissione come *input* di un algoritmo di calcolo molto semplificato, tenuto conto del fatto che all'interno delle aree urbane non sono solitamente molto importanti i fenomeni di propagazione su lunga distanza². E' ovviamente possibile (e necessario) disporre di un modello molto più raffinato allorchè, anzichè mappare l'intera città, si decide di studiare in dettaglio un singolo gruppo di edifici, onde ad esempio verificare l'efficacia di diversi sistemi di contenimento del rumore: a questo scopo è stato realizzato un diverso programma di calcolo, di cui si relaziona a parte³, e che non è stato impiegato in questo lavoro.

¹ Pompoli R., Farina A., Fausti P., Bassanino M., Invernizzi S., Menini L., "Intercomparison of traffic noise computer simulations", in: atti del XXIII Convegno Nazionale AIA - 18th AICB, Bologna, 12-14 settembre 1995, supplemento, p.523-559

² A. Farina, G. Brero, G. Pollone - "Modello numerico basato su rilievi sperimentali per la mappatura acustica delle aree urbane" - Atti del Convegno NOISE & PLANNING '96 - Pisa, 29-31 maggio 1996.

³ Farina A., Brero G. - "Modello numerico basato su rilievi sperimentali per la progettazione di dettaglio delle opere di bonifica acustica in area urbana" - Atti del Convegno NOISE & PLANNING '96 - Pisa, 29-31 maggio 1996.

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

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

Per quanto riguarda invece la gestione del territorio, è evidente come sia di immediata applicazione la possibilità di ricalcolare rapidamente la nuova mappa del rumore in occasione di interventi sulle sorgenti sonore (modifica del P.U.T.), sull'edificato o in occasione della realizzazione di opere di bonifica. Queste ultime, comunque, andranno progettate facendo impiego del secondo programma di calcolo, che tiene conto di fenomeni acustici molto più complessi di quanto implementato nel programma CITYMAP⁴.

Va anche osservato che è in atto una tendenza, resa possibile dalla velocità sempre crescente degli elaboratori elettronici, ad impiegare algoritmi e modelli computazionalmente molto esigenti, inizialmente concepiti per analisi su piccola scala, per lo studio di porzioni di territorio molto più vaste⁵.

Il pacchetto DISIA comprende anche un software per la simulazione di dettaglio, basato sull'algoritmo di Pyramid Tracing, e denominato DISIAPYR. Esso lavora per bande d'ottava, considera fenomeni di riflessione e diffrazione multipla, tiene conto del coeff. di assorbimento acustico e del potere fonoisolante delle superfici, e della direttività delle sorgenti sonore di rumore stradale, ferroviario e delle eventuali sorgenti concentrate.

Nel seguito vengono descritte le campagne di rilievo fonometrico utilizzate per la creazione del data-base di emissione dei due programmi facenti parte del pacchetto, nonché l'algoritmo di calcolo degli stessi, ed infine il complesso sistema informatizzato di trasferimento delle informazioni, partendo dal software utilizzato per gestire la cartografia digitalizzata del sito, e sino ad arrivare al "rendering" delle mappe isolivello sonoro sul territorio.

⁴ A. Farina – "Modelli numerici per il rumore da traffico stradale e ferroviario in aree urbane" – Atti del Convegno "Rumore? Ci stiamo muovendo" - Secondo seminario sull'Inquinamento Acustico" - Roma, 26-27 ottobre 1998.

⁵ Farina A., Tonella I. – "Impiego di modelli previsionali innovativi per la valutazione del rumore stradale e ferroviario in aree urbane" – Atti del Convegno Nazionale AIA 1999, Genova, 2-4 giugno 1999.

3.2 Rilievi sperimentali per la determinazione delle emissioni sonore

Il modello previsionale sviluppato si basa in primo luogo sull'esistenza di una banca dati di input relativa ai livelli di emissione. Questa banca dati è infatti il frutto di regressioni effettuate su una ampia famiglia di dati di emissione rilevati al transito di veicoli isolati.

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

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

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

Rumore da traffico stradale

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

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

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

TIPO DI SEDE STRADALE

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

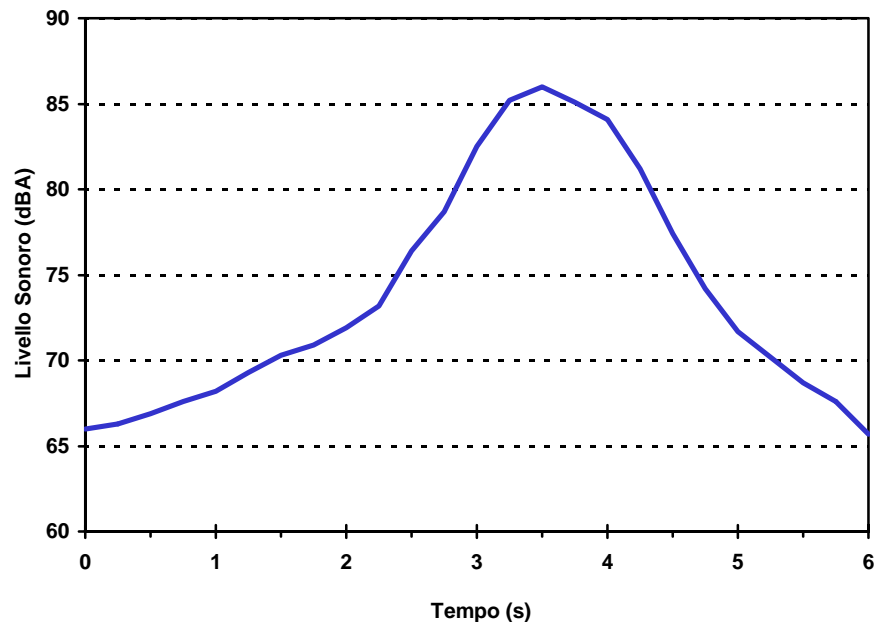
CATEGORIA DI VEICOLI

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

FASCE DI VELOCITA'

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

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



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

I dati di emissione acquisiti sono stati organizzati in forma parametrizzata estraendo per ogni tipo di veicolo ed ogni classe di velocità un valore medio di SEL ottenuto come media logaritmica dei valori corrispondenti dei singoli transiti. In corrispondenza di ciascun SEL medio sono inoltre riportate le corrispondenti correzioni medie associate agli effetti considerati: correzione pavé, asfalto fonoassorbente, discesa e salita. In realtà oltre che misurare soltanto il SEL in dB(A), ciascun rilievo, effettuato tramite analizzatore di spettro in tempo reale, ha fornito un **spettro di SEL**, ed analogamente è stato ottenuto un spettro per ciascuna delle 4 correzioni di cui sopra. Ovviamente il programma Citymap utilizza soltanto il valore in dB(A) sia del SEL medio di emissione, sia delle 4 correzioni.

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

Numero di rilevamenti rum. stradale

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

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

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

File SELSC8V1.TXT

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

Rumore da traffico ferroviario

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

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

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

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

TIPOLOGIA DI ARMAMENTO

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

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

CATEGORIA DI VEICOLI

V1 - treni merci;

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

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

FASCE DI VELOCITA'

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

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

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

C4 - $V > 120$ Km/h.

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

Numero di rilevamenti rum. ferroviario

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

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

File SELTC1V3.TXT

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

3.3 Algoritmo di calcolo del programma CITYMAP

Ogni tratto stradale (o ferroviario) è costituito da una "polyline" (o 3DPOLY) tracciata 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 7.5m dalla strada (o dalla ferrovia) a partire dai SEL unitari esistenti nel data-base di emissione. A tal proposito si ha questa relazione, valida per il periodo diurno:

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

Chiaramente nel periodo notturno il numero di ore è pari ad 8 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 m:

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

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 d dal centro del tratto al punto di calcolo considerato sia almeno doppia della lunghezza L 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 del campo cilindrico:

$$L_{W,1m} = L_{eq,7.5m} + 10 \cdot \lg(2 \cdot \pi \cdot 7.5)$$

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

$$L_W = L_{W,1m} + 10 \cdot \lg(L) = L_{eq,7.5m} + 10 \cdot \lg(2 \cdot \pi \cdot 7.5 \cdot L)$$

La propagazione del rumore dalla sorgente concentrata equivalente sino al recettore è considerata di tipo sferico su piano riflettente (quindi ancora con fattore di direttività uguale a 2), 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:

$$L_{eq,d} = L_W + 10 \cdot \lg \left(\frac{e^{-\beta \cdot d}}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \right) = L_{eq,7.5m} + 10 \cdot \lg \left(\frac{\pi \cdot 7.5 \cdot L}{2 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot e^{-\beta \cdot d} \right)$$

Un valore di prima stima per la costante b è pari a 0.0023; tale valore è tratto dai risultati di ricerche condotte sulla propagazione del rumore nell'ambito di attività estranee al presente studio. Passando dalla rappresentazione in dB a quella in pseudo-energia, si ricava globalmente questa espressione:

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

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

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

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

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 congiungente 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).

Per quanto riguarda le tranvie, esse vengono trattate dal programma Citymap come le ferrovie. E' però necessario regolare manualmente i livelli di emissione, a 7.5m dal binario, anzichè affidarsi al calcolo basato sul data-base di valori di SEL a corredo del programma. Nel caso in esame, sono stati pertanto forzati manualmente i livelli di emissione diurno e notturno già determinati al cap.

4.2.3.4.3. In particolare essi sono:

Velocità	40 km/h
Leq,Diurno	51.1 dB(A)
Leq,Notturmo	43.9 dB(A)

3.4 Direttività delle sorgenti di rumore stradale

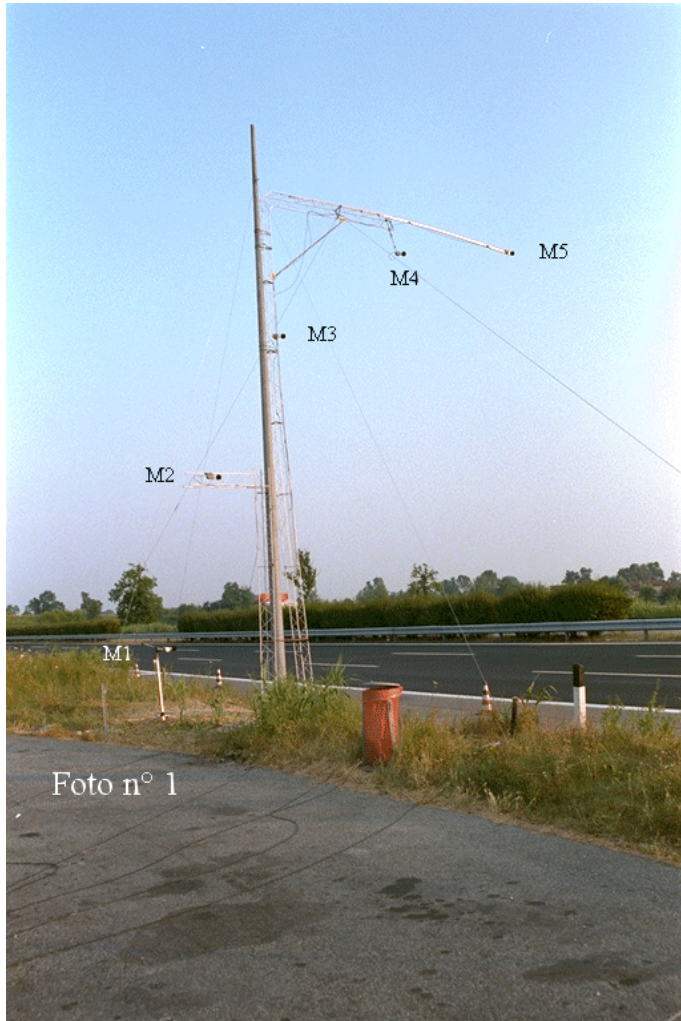
Allo scopo di caratterizzare acusticamente la direttività del traffico stradale, ed in particolare l'emissione sonora tipica delle 5 differenti categorie di veicoli, sono stati individuate due tipologie di sito adeguate per il rilevamento dei transiti alle diverse velocità (basse ed alte).

Per quanto riguarda le velocità elevate, i rilevamenti sono stati eseguiti in autostrada, in una tratta con geometria a raso, tale da non generare indesiderati effetti schermanti o di riflessione, basso rumore di fondo ed un modesto traffico giornaliero. Queste ultime due caratteristiche hanno

una notevole importanza poiché consentono di isolare il singolo evento sonoro (il singolo transito) sia dagli altri eventi (basse probabilità di transiti contemporanei) sia dal rumore di fondo stesso.

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

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

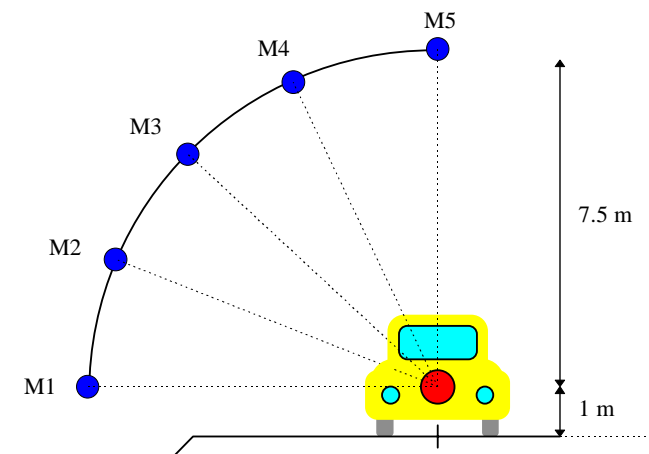


Tale strumentazione, appositamente studiata in funzione dell'obiettivo del presente studio, è sostanzialmente costituita da un "array" di 5 microfoni (ved. foto a lato) facenti capo ad un registratore multicanale ed un sistema di fotocellule disposte a monte ed a valle della postazione di misura, distanti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

I 5 microfoni costituenti l'array sono stati disposti, come rappresentato nello schema qui sotto, secondo un arco di cerchio pari ad un quarto di circonferenza, avente raggio 7.5 m ed il centro acustico della sorgente sonora come centro geometrico. La posizione di quest'ultimo è stata definita ad 1 m di altezza dal piano stradale ed al centro della corsia più prossima alla postazione microfonica.

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

Nella tabella seguente si riportano le coordinate cartesiane delle posizioni microfoniche, avendo assunto come origine il centro acustico della sorgente sonora.



Microfono	Ascisse [m]	Ordinate [m]
M1	7.5	0
M2	6.93	2.87
M3	5.3	5.3
M4	2.87	6.93
M5	0	7.5

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

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

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

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

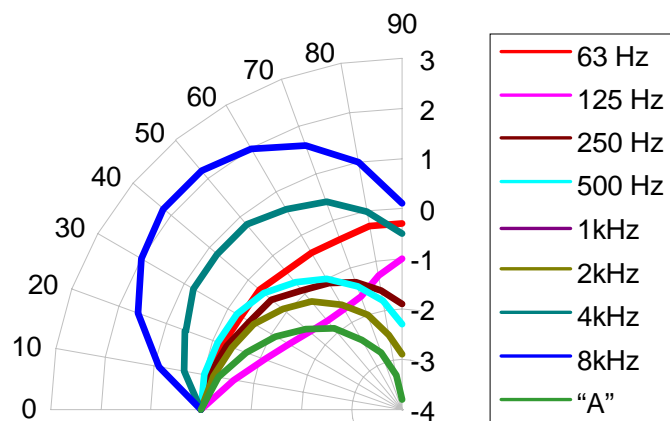
Successivamente alla calibrazione si è proceduto ai rilevamenti, attivando il registratore digitale in corrispondenza dei singoli transiti, per un tempo sufficiente ad acquisire l'intero evento sonoro.

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

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

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

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



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

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

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

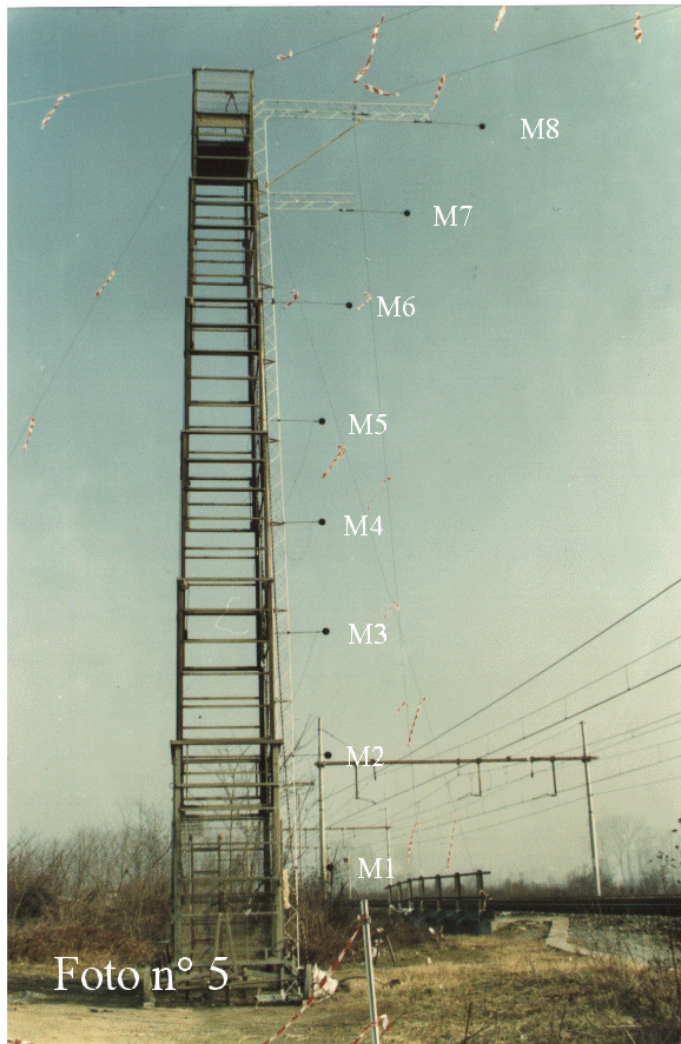
3.5 Direttività delle sorgenti di rumore ferroviario

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

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

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

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

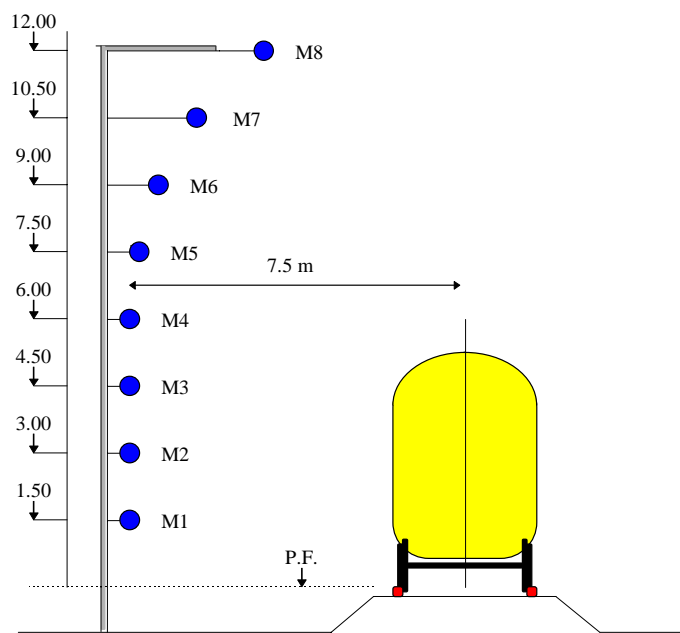


Tale strumentazione, appositamente studiata in funzione dell'obiettivo del presente lavoro, è sostanzialmente costituita da un "array" di 8 microfoni (vedi foto a lato) facenti capo ad un registratore digitale multicanale ed un sistema di fotocellule disposte a monte ed a valle della postazione di misura,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

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

Nella tabella seguente si riportano le coordinate cartesiane delle posizioni microfoniche, avendo assunto come origine l'intersezione fra l'asse di simmetria del binario ed il piano del ferro.

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



Microfono	Ascisse [m]	Ordinate [m]
M1	7.50	1.5
M2	7.50	3.0
M3	7.50	4.5
M4	7.50	6.0
M5	7.35	7.5
M6	6.87	9.0
M7	6.00	10.5
M8	4.50	12.0

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

Prima di iniziare i rilevamenti le otto catene fonometriche sono state calibrate mediante un calibratore Brüel & Kjær tipo 4230. La calibrazione è stata ripetuta più volte al giorno, accedendo ai microfoni con l'ausilio di un traliccio telescopico.

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

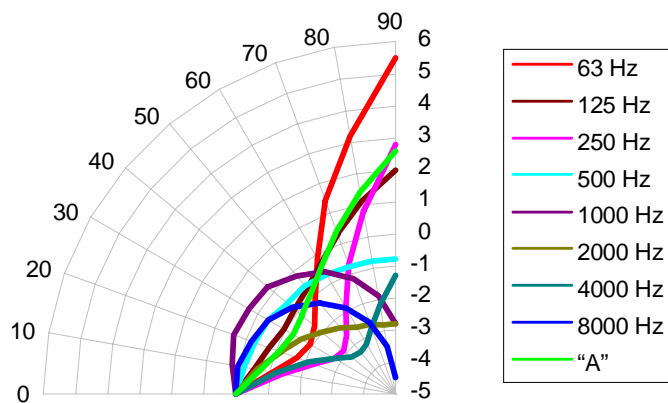
Contemporaneamente veniva rilevata la velocità di transito a mezzo di un cronometro, attivato dal passaggio del convoglio davanti alla prima fotocellula, sita 50 m a monte della postazione microfonica, ed arrestato dal passaggio del treno davanti alla seconda fotocellula, posta 50 m a valle dell'array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

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

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

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

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



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

La figura a lato illustra i valori di direttività in dB ottenuti, alle varie

frequenze, per i veicoli di tipo V3 (treni passeggeri lunga percor.) nella fascia di velocità più bassa (C1): file DIRTC1V3.TXT.

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

3.6 Algoritmo di calcolo del programma Disiapyr

Il file dati di input per il programma Disiapyr viene realizzato da Citymap; esso contiene una dettagliata descrizione della geometria, rappresentata da superfici quadrilatere nello spazio tridimensionale, ottenute da entità tipo *3DFACE* presenti nel file .DXF importato da CAD.

3.6.1 descrizione della geometria

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:

$$ax + by + cz + d = 0$$

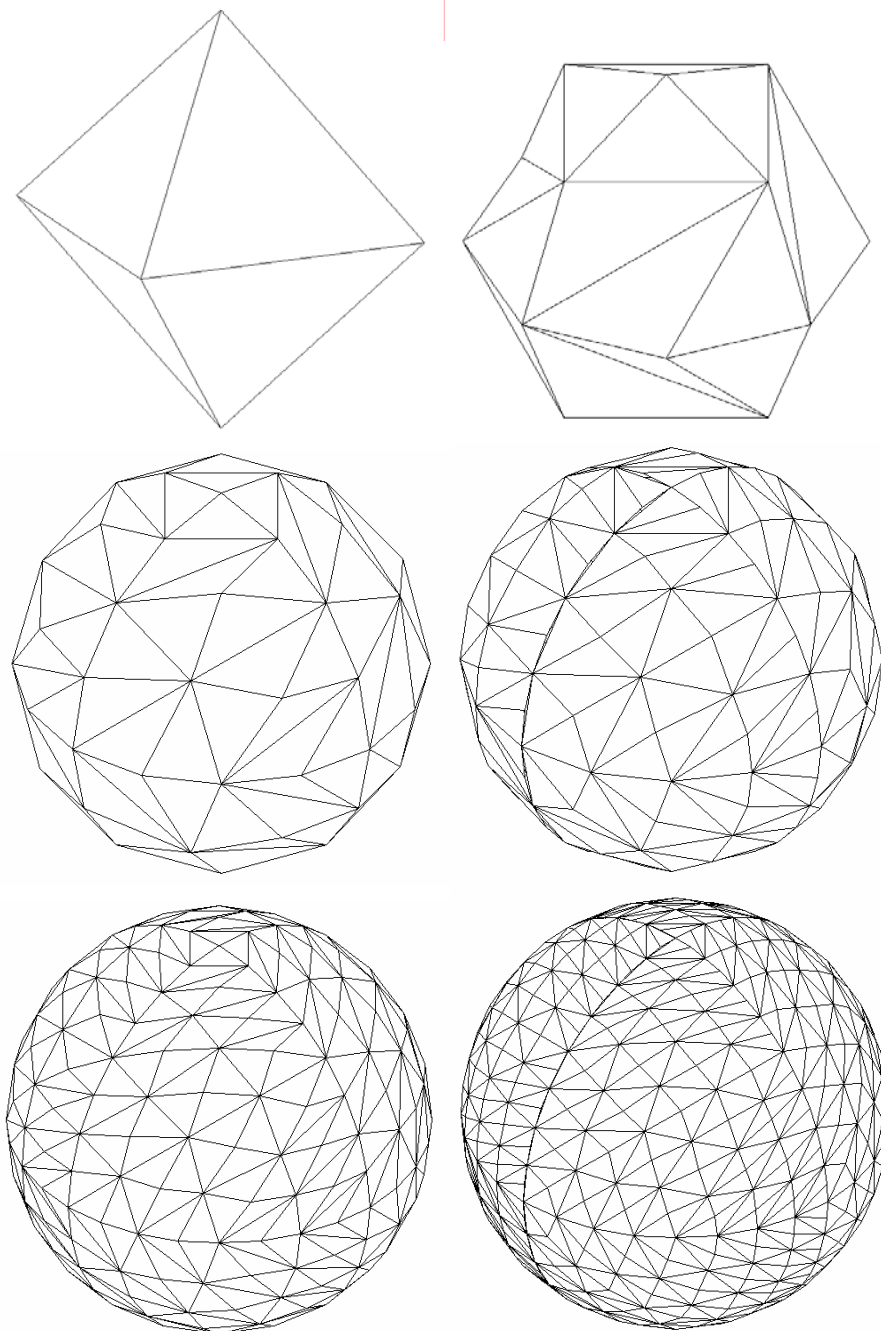
dove a , b , c e d sono i parametri cercati.

3.6.2 Generazione delle piramidi

Il Pyramid Tracing considera solo sorgenti puntiformi: pertanto le sorgenti lineari vengono scomposte in una successione di sorgenti puntiformi, con distanza prefissata dall'utente.

E' possibile scegliere il livello di suddivisione della sfera sorgente: al minimo, la sfera verrà suddivisa in otto piramidi, oppure in sedici e così via secondo la serie 8×2^N .

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



Suddivisione della sfera in 8, 32, 128, 256, 512 e 1024 triangoli.

3.6.3 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.

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 . Il raggio viene descritto mediante l'equazione parametrica di una retta, in funzione del parametro ρ , corrispondente allo spazio percorso a partire dall'origine.

Il punto di intersezione del raggio con il piano di una generica superficie si ottiene calcolando il parametro ρ dall'equazione:

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

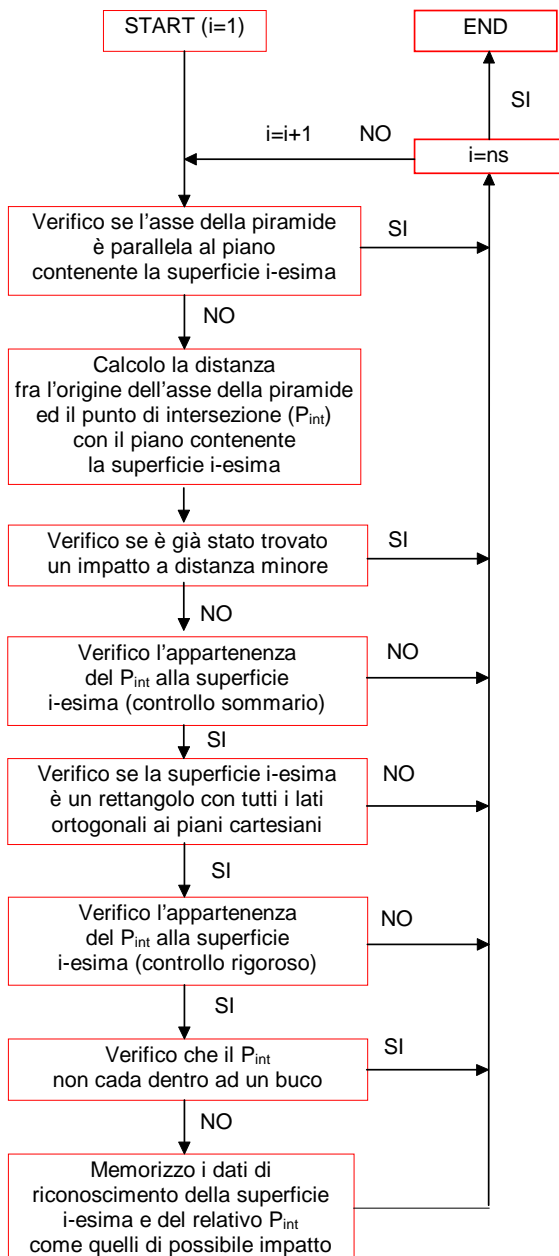
Se la retta che rappresenta il raggio non è parallela al piano cui appartiene la superficie, ovvero se:

$$a\alpha + b\beta + c\gamma \neq 0$$

il valore di ρ è dato dall'espressione:

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

Il controllo di non parallelismo 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.

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 si verifica se la superficie trovata è un rettangolo con tutti i lati paralleli o perpendicolari ai piani ortogonali: se sì si è accertato l'impatto sulla superficie in esame, altrimenti si passa all'ultimo controllo.

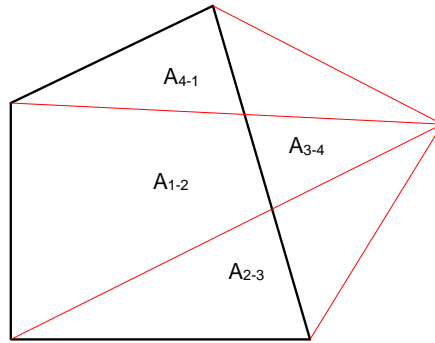
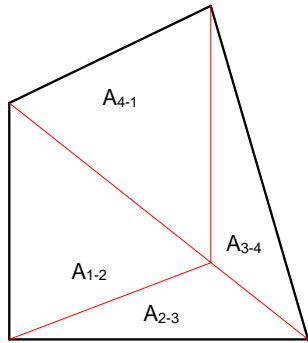
Il terzo controllo di appartenenza, rigoroso ma decisamente più lento del precedente, per arrivare ad esprimere un giudizio definitivo, si basa su di un confronto di aree. Vengono infatti calcolate le aree dei triangoli A_{1-2} , A_{2-3} , A_{3-4} e A_{4-1} che il punto di intersezione individua rispetto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

$$A_{1-2} + A_{2-3} + A_{3-4} + A_{4-1} \leq A_{\text{sup}} + \varepsilon$$

dove A_{sup} è l'area della superficie e ε , posto pari a 10^{-6} m^2 , serve a coprire eventuali errori numerici.

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:

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



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, ottenute dalle:

$$v_x = (y_m - y)(z_n - z) - (y_n - y)(z_m - z)$$

$$v_y = (x_n - x)(z_m - z) - (x_m - x)(z_n - z)$$

$$v_z = (x_m - x)(y_n - y) - (x_n - x)(y_m - y)$$

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 ulteriore controllo con il compito di verificare se l'impatto avviene in corrispondenza di eventuali buchi (*holes*), porte o finestre; nel caso venga incontrato un buco la superficie viene immediatamente scartata, poichè il raggio sta attraversando tale superficie.

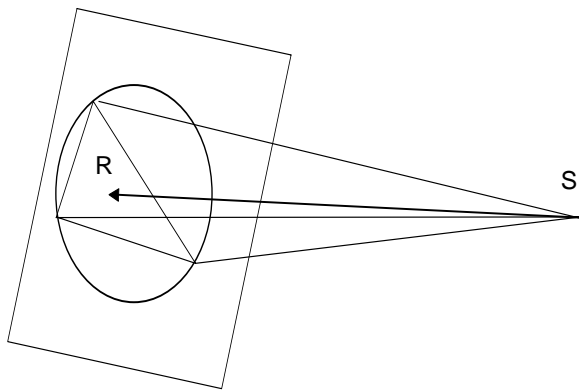
La presenza di eventuali buchi (quanti e quali) è rapidamente verificata "interpellando" un indice predisposto in fase di caricamento dei dati; il controllo di appartenenza (poiché di questo si tratta) avviene esattamente nello stesso modo visto nel caso di superfici senza buchi.

Se invece è stata incontrata una porta o una finestra, essa viene memorizzata come superficie di impatto. 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.

3.4 Ricerca degli impatti con i ricevitori

Durante il suo percorso, oltre ad ostacoli, la piramide di cui il vettore è l'asse, potrà incontrare anche ricevitori, che sono schematizzati come dei punti nello spazio predisposti dall'utente. Per sapere quali ricevitori ogni piramide abbia impattato, 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.

3.6.4 Estinzione delle piramidi

Ciascuna piramide viene seguita per un "tempo di corsa" del raggio prefissato. Il controllo di estinzione viene fatto in realtà sullo spazio percorso dal raggio dal momento della sua emissione, tenendo conto della velocità del suono.

Esiste anche un altro modo per limitare la corsa di una piramide; 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 l'intero tempo limite sia trascorso, indipendentemente dal numero di rimbalzi effettuati.

3.6.5 Attenuazione dell'energia

Una sorgente sonora irradia una certa potenza che si propaga nel mezzo con l'avanzare delle onde sonore. In un campo sonoro se W è la potenza irradiata dalla sorgente, avente direttività Q nella direzione considerata, la intensità I che perviene alla distanza r è data dall'espressione:

$$I = \frac{W \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad L_I = L_W + 10 \cdot \lg \left[\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \right] \text{ (dB)}$$

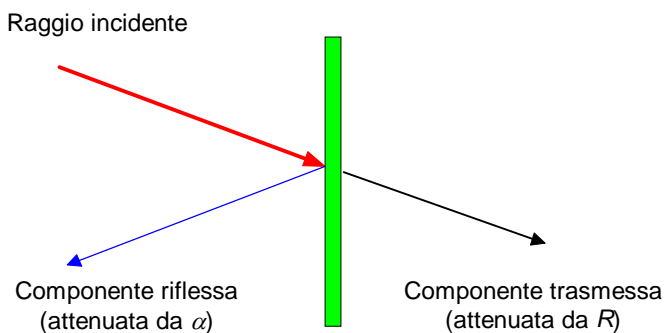
In un'onda sferica pertanto l'intensità diminuisce con il quadrato della distanza, ovvero di 6 dB ad ogni raddoppio di distanza

Occorre poi tenere conto dell'assorbimento di tutte le pareti (A_p) su cui impatta ogni singolo raggio, dell'eventuale potere fonoisolante di qualche schermo attraversato (A_o) e dell'assorbimento dell'aria (A_β):

$$A_e = A_p + A_o + A_\beta$$

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:

$$A_p = 10 \log \left[\prod_i (1 - \alpha_i) \right] \text{ (dB)}$$



Tutte le volte che il percorso del raggio è ostacolato da uno schermo (parete dichiarata “obstructing”) costituito da un materiale di cui siano stati 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 fonoisolante dello

schermo stesso (R), viene associata ad un nuovo raggio che continua oltre lo schermo la traiettoria del raggio incidente, come in figura. Pertanto l’attenuazione per attraversamento A_0 è data semplicemente dal valore di R .

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

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

I gradienti di temperatura e di velocità del vento, nonché l’effetto radente, nel caso di propagazione in campo aperto su lunghe distanze possono dar luogo a variazioni anche notevoli sui risultati [5]; questo programma non ne tiene conto proprio perché è stato progettato principalmente per prevedere il campo sonoro in zone delimitate, a distanze non eccessive dalle sorgenti.

3.6.6 Calcolo dell’attenuazione per diffrazione sui bordi liberi delle schermature

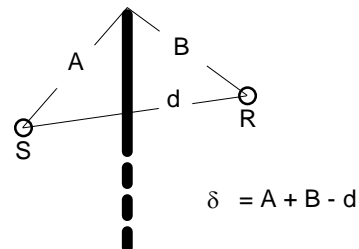
Uno dei principali aspetti che differenzia il tracciatore piramidale di Disapyr dagli altri metodi di Beam Tracing è la possibilità di dichiarare “obstructing” alcune superfici (o tutte). Quando una piramide colpisce una di queste superfici, vengono attivati ulteriori controlli, onde verificare se dietro 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), come verrà illustrato al paragrafo successivo. Si verifica poi se la superficie presenta bordi liberi, ed in caso affermativo viene portato un ulteriore contributo di energia al ricevitore a partire da ciascun bordo libero, calcolato con la nota relazione di Kurze-Anderson:

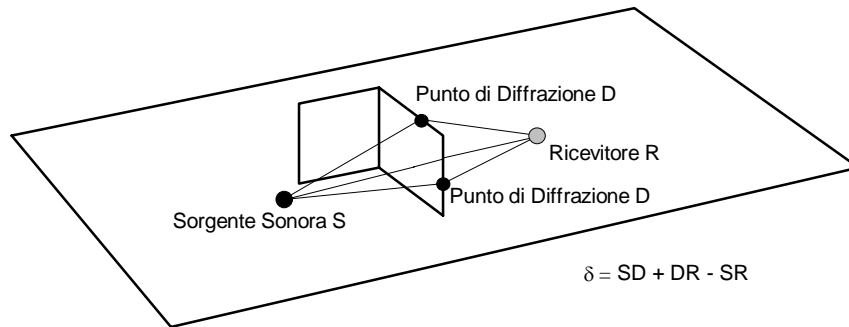
$$L_{\text{diff}} = L_{\text{dir}} - 5 - 10 \log \left(\frac{\sqrt{2\pi|N|}}{\tanh \sqrt{2\pi|N|}} \right)$$

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

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

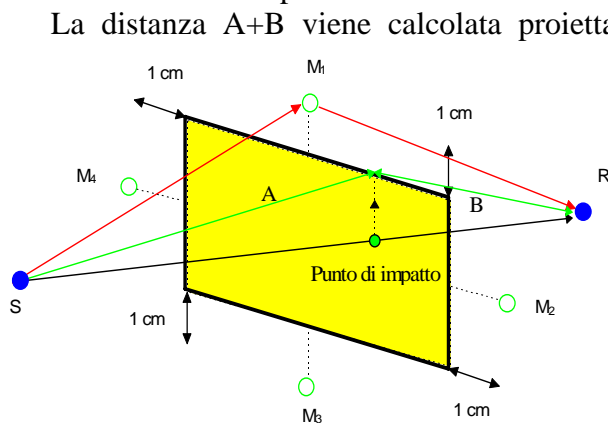
La sottostante figura mostra le traiettorie dei raggi che vengono tracciati in questi casi (diffratti ed attraversante). L’algoritmo di ricerca dei bordi liberi è ricorsivo, pertanto viene considerata anche l’onda diffratta dal bordo sinistro del pannello laterale, che comunque non è disegnata nella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





Per verificare automaticamente che un lato di una parete obstructing sia libero, e dunque dia luogo a diffrazione, 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 e ciascun 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 di Kurze-Anderson;
- nel caso opposto tale contributo non viene computato, ma vengono comunque ricercati ulteriori bordi liberi sulla superficie che è stata individuata come bloccante per il raggio considerato.

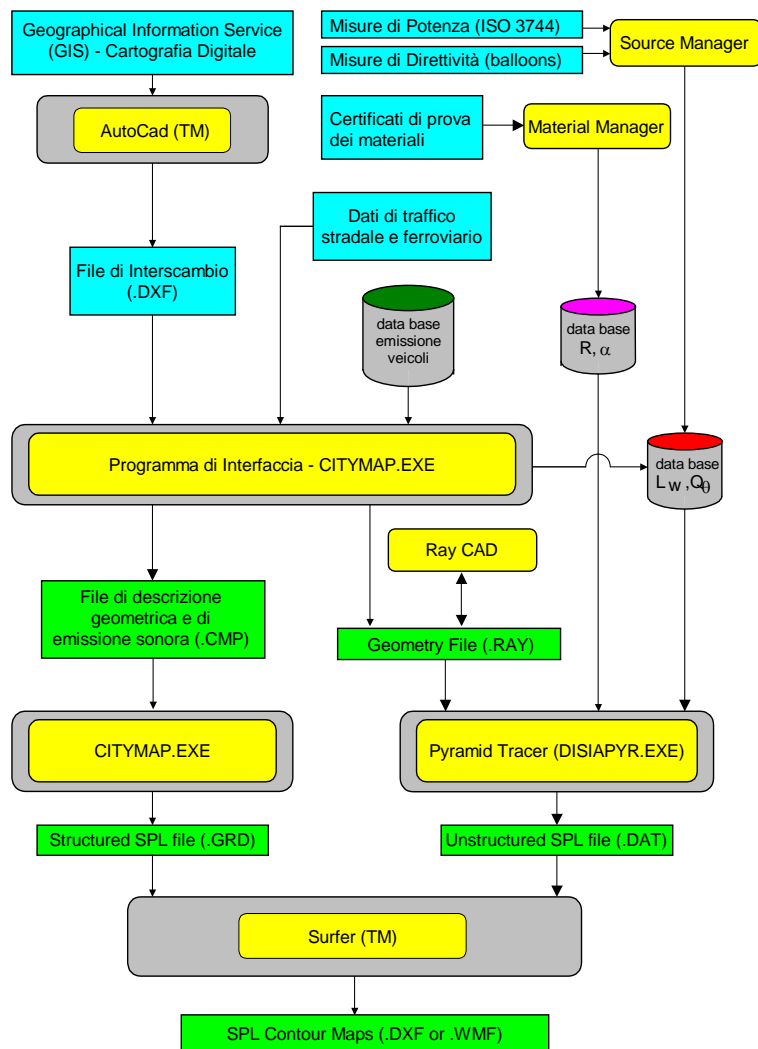


La distanza $A+B$ viene calcolata proiettando sul bordo libero (diffrangente) il punto di impatto con lo schermo della congiungente sorgente-ricevitore. Dopodichè viene calcolato il cammino effettivamente percorso in due tratti: il primo che va dalla sorgente al bordo dello schermo più il secondo che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

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.

3.7 Interfaccia con l'utente e con altri programmi

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



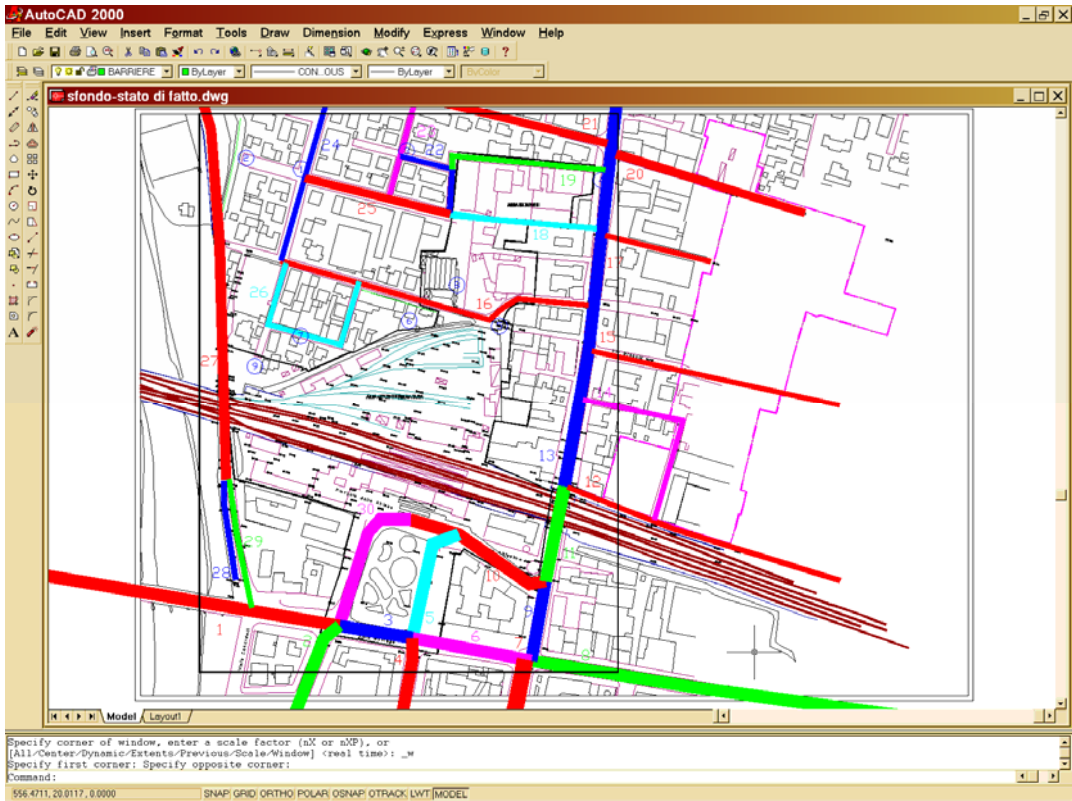
Come si nota numerosi programmi sono chiamati ad interagire: di essi due sono programmi commerciali (Autocad™ e Surfer™), mentre gli altri sono stati realizzati in proprio.

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

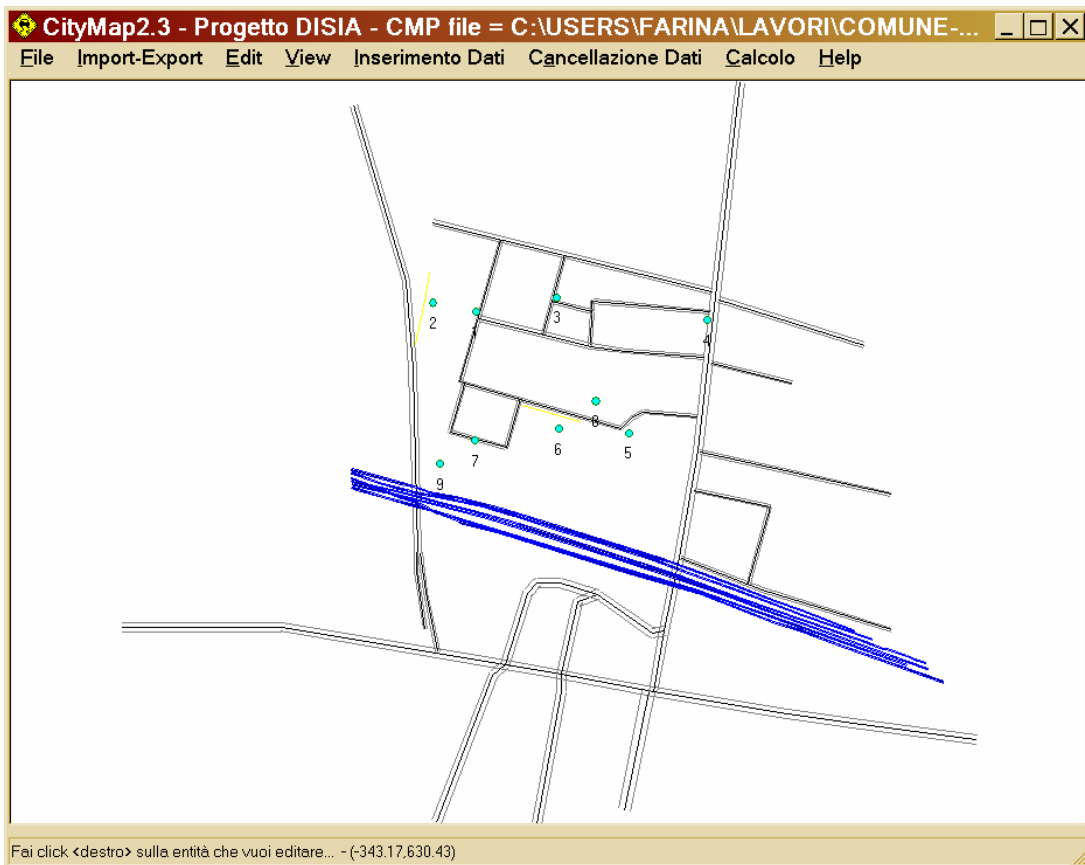
A questo punto, volendo operare un calcolo della mappa del rumore con l'algoritmo semplificato, si impiega ancora Citymap, che produce un file .GRD leggibile da Surfer, e contenente i valori del livello sonoro

su una griglia rettangolare equispaziata.

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



Una volta salvate le informazioni geometriche, si lancia il programma Citymap, che consente di rileggerle dal file .DXF.



Dopo aver letto il file .DXF, è possibile effettuare l'aggancio dei dati di traffico alle sorgenti di rumore stradale e ferroviario. Per far ciò si può semplicemente "clickare" su ciascuna entità

grafica, oppure si attiva una apposita tendina, che provvede ad evidenziare in sequenza i singoli tratti omogenei di strada o di binario, come mostrato dalla precedente figura.

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

Editazione dati traffico stradale

Selezione Tratto Stradale
 Tratto n. 75 Nome: VIALE DEL PIAVE
 Preced. Success. Fine
 Leq,7.5m (G/N) 70.4 63.1 Fisso Calcola

Proprietà
 Tipo di Pavimentazione 1-Asfalto Liscio
 Pendenza (%. +|-) 0-5%
 hmed edifici lato Sinistro 0.
 hmed edifici lato Destro 0.

Traffico diurno complessivo

N.autovetture (V1)	16807	C6-(70-90 km/h)
N.camion 2 assi (V2)		C1-(0-30 km/h) acc.
N.camion 3 assi (V3)	1768	C6-(70-90 km/h)
N.TIR (V4)		C1-(0-30 km/h) acc.
N.motocicli (V5)		C1-(0-30 km/h) acc.

Traffico notturno complessivo

N.autovetture (V1)	1627	C6-(70-90 km/h)
N.camion 2 assi (V2)		C1-(0-30 km/h) acc.
N.camion 3 assi (V3)	119	C6-(70-90 km/h)
N.TIR (V4)		C1-(0-30 km/h) acc.
N.motocicli (V5)		C1-(0-30 km/h) acc.

Imposta automaticamente i dati della strada precedente

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

Editazione dati traffico ferroviario

Selezione Tratto Ferroviario
 Tratto n. 2 Nome: Linea 1
 Preced. Success. Fine
 Leq,7.5m (G/N) 51. 43. Fisso Calcola

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

Traffico diurno complessivo

	Num.	Lungh.	Velocità
tr.merci (V1)			C1-(0-60 km/h)
tr.pass. locali (V2)	12	19	C2-(60-90 km/h)
tr.pass. l.perc. (V3)			C1-(0-60 km/h)

Traffico notturno complessivo

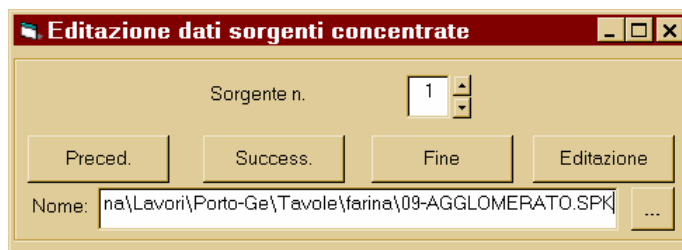
	Num.	Lungh.	Velocità
tr.merci (V1)			C1-(0-60 km/h)
tr.pass. locali (V2)	1	18	C2-(60-90 km/h)
tr.pass. l.perc. (V3)			C1-(0-60 km/h)

Imposta automaticamente i dati del binario precedente

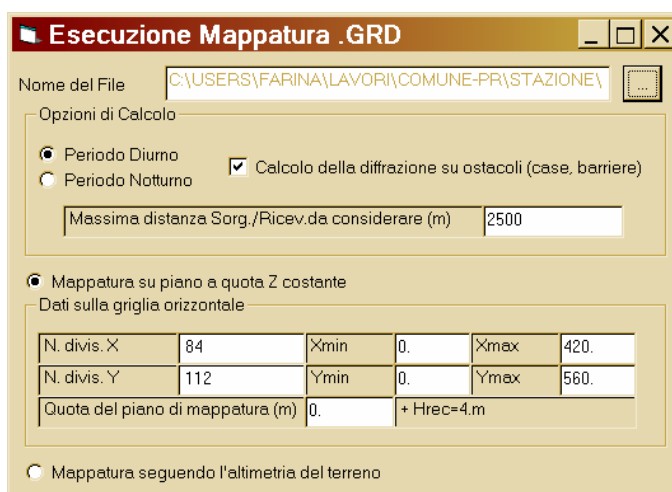
Come si nota, per le strade sono disponibili 6 “bottoni” che impostano automaticamente i dati di traffico “tipici” di 6 diversi tipi di strade. Per le sorgenti lineari di tipo industriale (caso tipico il perimetro di uno stabilimento), è necessario aver preventivamente disegnato un tratto “pseudo-stradale”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

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

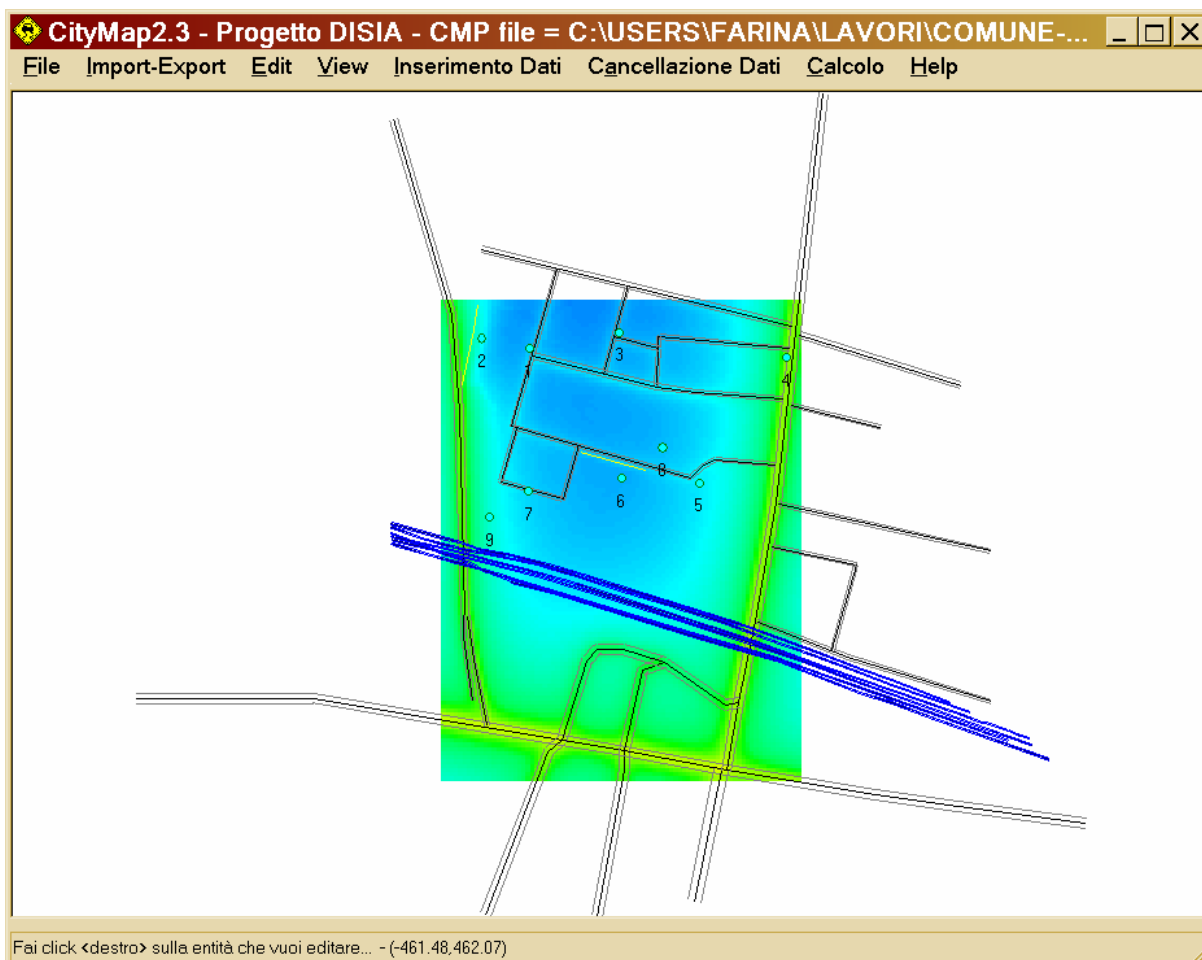
Si possono anche inserire i dati di sorgenti puntiformi, poichè Citymap le considera assieme alle sorgenti lineari. Per far ciò si impiega l'apposita tendina, che evidenzia sul disegno le entità di questo tipo, e fa comparire la mascherina qui riportata.



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

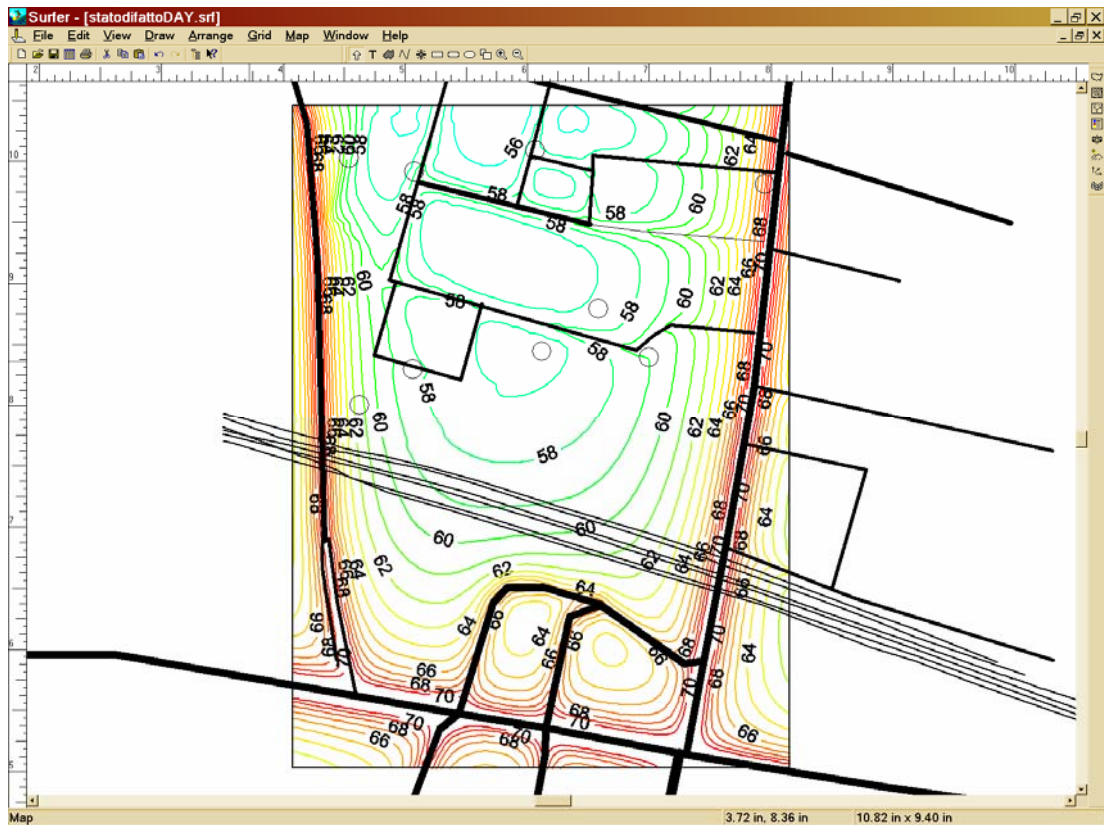


Nel corso del calcolo, il programma provvede a colorare progressivamente l'area mappata, in modo da fornire all'utente un'indicazione sulla frazione del lavoro totale già compiuta. Al termine lo schermo risulta completamente colorato, come mostra la seguente figura:



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

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



Da Surfer, infine, si può esportare l'insieme delle curve isolivello, in formato vettoriale. Esse possono poi venire re-importate in Autocad, realizzando quindi in tale ambiente la tavola finale, che mostra la mappa del rumore sovrapposta allo sfondo cartografico dettagliato di partenza.

4 Esempio di utilizzo del sistema di modellistica previsionale nello studio del “progetto Bohigas” per la nuova stazione ferroviaria di Parma

Viene qui utilizzato a scopo di esempio uno studio recentemente eseguito in relazione al cosiddetto “progetto Bohigas”, per la nuova stazione ferroviaria di Parma. Si tratta di un intervento che coinvolge, ovviamente, la rumorosità causata dai treni, che prevede l’edificazione di una notevole volumetria adibita a vari scopi, incluso il residenziale, all’interno dell’area di pertinenza dell’infrastruttura ferroviaria, e porterà ad una sostanziale modificazione dei flussi di traffico stradale, causa la costruzione di un vasto parcheggio sotterraneo, del nuovo terminal per le corriere extraurbane, e di due tunnel che sottopassano l’area della attuale stazione ferroviaria garantendo un migliore collegamento lungo la direttrice Nord-Sud.

Si tratta pertanto di un esempio particolarmente generale, dove tutte le problematiche relative alla modellizzazione acustica verranno adeguatamente affrontate.

La modellazione numerica dello stato di fatto è stata basata sulla taratura dei modelli matematici, resa possibile da una estesa campagna di rilievi sperimentali a ciò espressamente dedicati.

Si è poi proceduto a simulare lo stato di progetto, ipotizzando un scenario abbastanza remoto nel tempo. Poiché esso ha mostrato di poter dar luogo a limitate zone di superamento dei limiti di rumorosità, si sono infine definite le opere di mitigazione (barriere antirumore) idonee a garantire il rientro nei limiti suddetti.

4.1 Rilievi fonometrici nello stato ante-operam

I rilievi fonometrici sono stati eseguiti nei giorni 7-8 gennaio 2003. Si è impiegata la nota tecnica del doppio campionamento: una postazione fissa con campionamento in continua per 24h, ed una seconda postazione mobile che è stata posizionata in numerosi punti di misura per periodi di tempo brevi, ma comunque significativi.

Poiché i rilievi di breve durata sono stati effettuati simultaneamente a quello di lungo periodo, avendo sincronizzato gli orologi dei due analizzatori, è stato in seguito possibile valutare la correlazione fra postazione fissa e postazione mobile, e conseguentemente estendere la validità temporale di tutti i punti di misura, in modo da ottenere una stima ragionevolmente accurata, in ciascuno di essi, del livello sonoro equivalente riferito al periodo diurno (dalle 6 alle 22) e notturno (dalle 22 alle 6).

La strumentazione impiegata è costituita da:

- N. 2 analizzatori di spettro in tempo reale B&K tipo 2260
- N. 1 kit microfonico per esterni B&K tipo UA 1440.
- N. 2 calibratori microfonici B&K tipo 4231
- N. 2 tripodi Manfrotto mod. 140.
- N. 2 cavi di prolunga microfonica da 10m
- N. 1 cavo piatto microfonico per passaggio sottoporta

La strumentazione suddetta risulta conforme alle prescrizioni del D.M.Amb. 16-3-1998.

Nel corso dei rilievi cadeva una leggerissima pioggia, il vento era assente e la temperatura era pari a circa 3 °C.

La seguente mappa mostra la posizione della postazione di lungo periodo (0) e delle 8 posizioni in cui è stata collocata la postazione mobile (1..8).

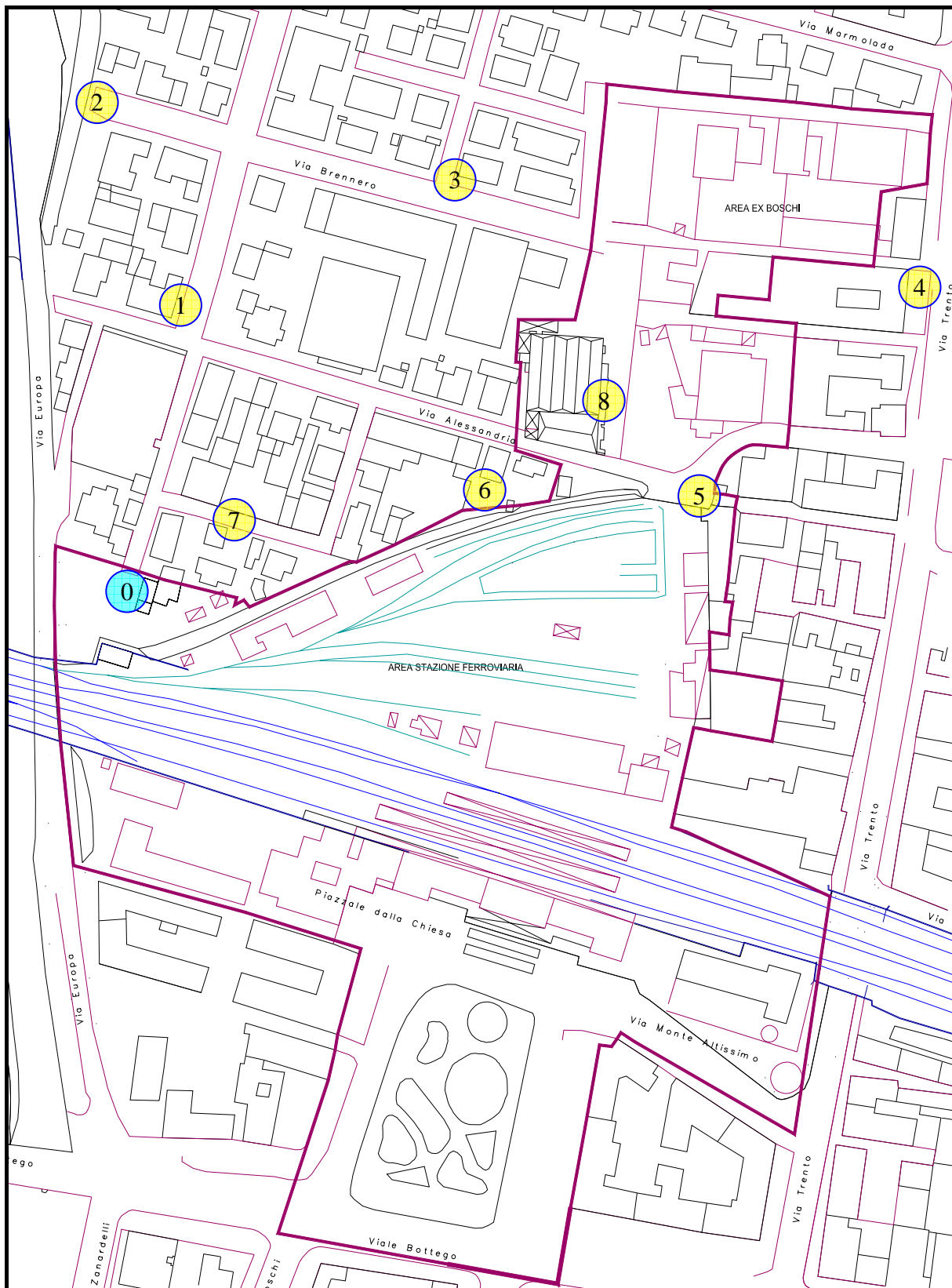


Fig. 1 - posizione dei punti di rilevamento fonometrico

Nell'allegato n. 1 sono riportate le schede di rilevamento delle 9 postazioni suddette, ciascuna corredata di fotografia, di profilo temporale del livello sonoro per l'intera durata del rilevamento, di spettro complessivo del livello sonoro equivalente, di diagramma della distribuzione statistica

del livello sonoro (con livelli percentili) e di una tabella che compendia i valori numerici di tutti i singoli parametri acustici misurati.

Si riportano invece qui soltanto i risultati di maggior rilevanza ai fini della valutazione del clima acustico nello stato ante-operam, e che sono stati poi impiegati per la verifica della taratura del modello matematico impiegato per il calcolo delle mappature isolivello sonoro nello stato di fatto e nello stato di progetto.

La seguente tabella contiene i valori di $L_{A,eq}$ misurati nella postazione fissa e nelle 8 postazioni di breve durata.

Posizione	L _{Aeq,day}	L _{Aeq,night}
0	63.8	58.6
1	57.0	
2	54.8	
3	50.6	
4	72.7	
5	58.8	
6	50.8	
7	52.9	
8	57.0	

Onde valutare, anche nelle 8 postazioni oggetto dei rilievi di breve periodo, i valori di $L_{A,eq}$ relativi all'intero periodo diurno e notturno, si è proceduto come di seguito spiegato.

Si è anzitutto estrapolato, dal diagramma temporale di 24h della postazione fissa, il segmento temporale relativo alla durata di ciascun rilievo di breve durata, valutando il valore di $L_{A,eq}$ corrispondente, e conseguentemente determinando la differenza fra $L_{A,eq}$ nella posizione considerata e $L_{A,eq}$ nella posizione di riferimento di lungo periodo, come riepilogato nella seguente tabella:

Posizione	Orario	L _{Aeq, post.mobile}	L _{Aeq,post. fissa}	Differenza
1	14:17:55-14:28:14	57.0	62.9	-5.9
2	14:38:19-14:46:43	54.8	62.6	-7.8
3	14:52:01-14:59:26	50.6	63.4	-12.8
4	15:05:34-15:13:22	72.7	64.9	+7.8
5	15:27:48-15:38:01	58.8	63.7	-4.9
6	15:47:16-15:56:12	50.8	64.0	-13.2
7	16:05:40-16:10:49	52.9	64.5	-11.6
8	16:17:23-16:57:00	57.0	64.0	-7.0

In linea di principio, occorre poi applicare i valori delle differenza trovati in ciascun punto di rilevamento di breve periodo ai valori di livello equivalente misurati nella posizione di lungo periodo.

Si ottiene in tal modo la seguente tabella, che riporta, per ciascuna posizione, il valore (misurato o calcolato come sopra indicato) del Livello Equivalente ponderato "A" riferito al periodo diurno (dalle 6 alle 22) ed al periodo notturno (dalle 22 alle 6).

Posizione	$L_{Aeq,day}$	$L_{Aeq,night}$
0	63.8	58.6
1	57.9	52.7
2	56.0	50.8
3	51.0	45.8
4	71.6	66.4
5	58.9	53.7
6	50.6	45.4
7	52.2	47.0
8	56.8	51.6

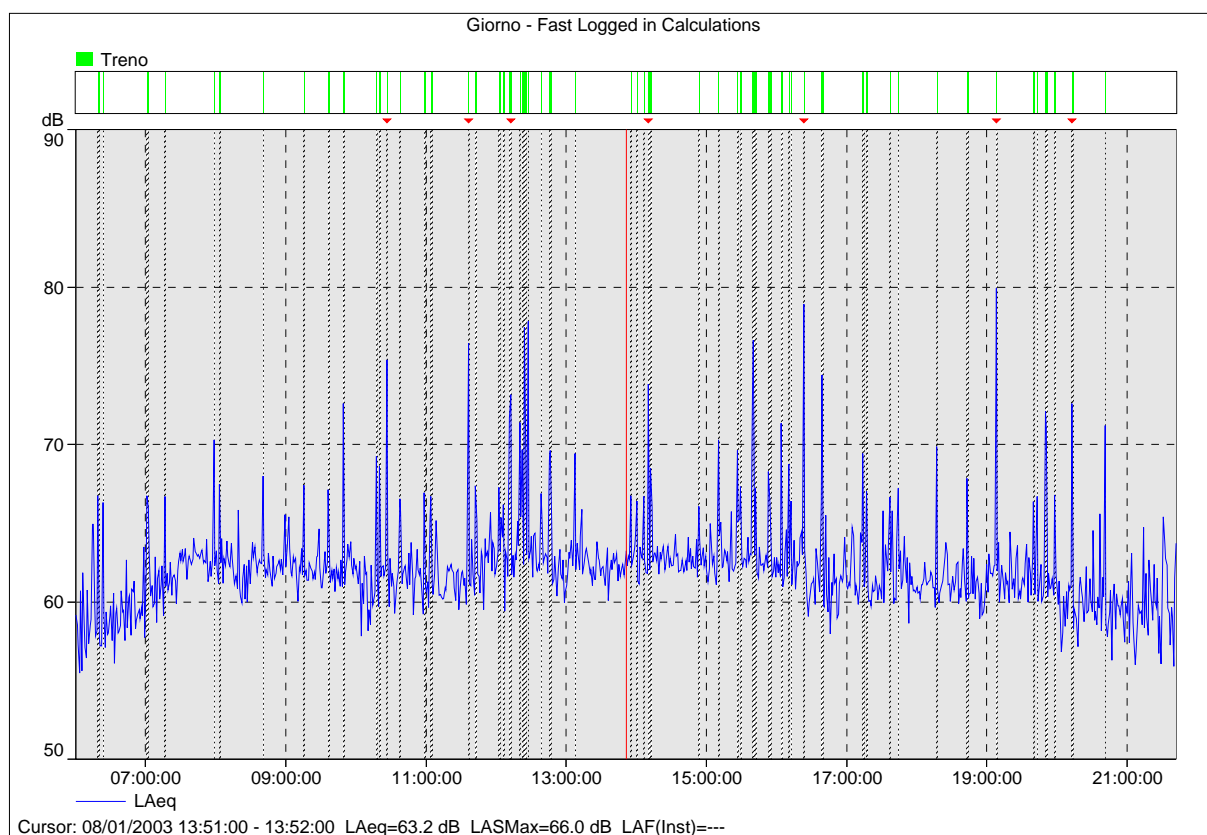
Le elaborazioni sin qui eseguita si riferiscono alla rumorosità complessiva in ciascuna postazione, derivante sia dal traffico stradale, sia da quello ferroviario.

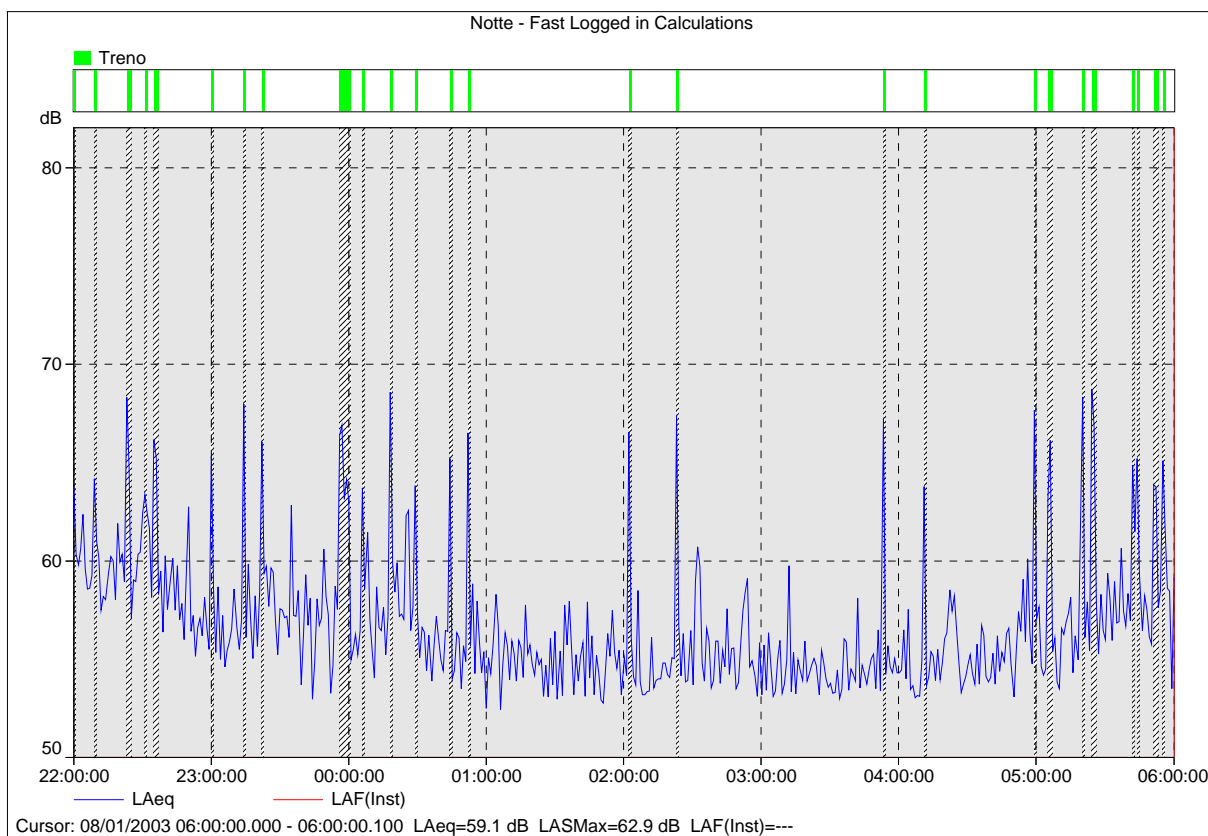
In realtà, poiché gran parte del territorio interessato dall'intervento si trova all'interno delle fasce di pertinenza dell'infrastruttura ferroviaria, è necessario operare una valutazione separata del rumore da traffico stradale e del rumore da traffico ferroviario.

La separazione fra le due tipologie di sorgenti sonore è fattibile, impiegando una metodologia adeguata, operando sui dati acquisiti nella postazione fissa.

Infatti, osservando il tracciato temporale riportato nell'allegato n. 1, si nota la presenza dei "picchi" causati dal transito dei convogli ferroviari. Tali eventi sonori, costituiti dal passaggio dei treni, sono stati separati dal rumore residuo impostando una opportuna soglia di discriminazione, pari a 64 dB(A) per una durata di almeno 20s.

A seguito di tale operazione, sono stati "marcati" tutti gli eventi sonori, separatamente per il periodo diurno e per il periodo notturno, come mostrato dalle seguenti due figure.





Integrando separatamente l'energia degli eventi e quella del "rumore residuo" presente fra evento ed evento, si è ottenuta la separazione della rumorosità complessiva diurna e notturna nella quota causata dai treni ed in quella residua. La seguente tabella riporta i risultati di tale operazione.

Posizione 0 (fissa) – determinazione della quota di rumore ferroviario

	Giorno	Notte
Leq,tot	63.8	58.6
Leq,residuo	61.6	56.4
Leq,treni	59.8	54.5

Le misure e le conseguenti elaborazioni effettuate nelle posizioni di rilevamento mobile non consentono di operare con altrettanta semplicità la separazione della quota del rumore ferroviario. Essa è peraltro del tutto influente in tutte le posizioni analizzate, con eccezione delle posizioni n. 6 (retro case di via Alessandria) e n. 8 (via Alessandria 6).

Comunque, operando in modo semiempirico sulla base della analisi statistica del livello sonoro (quantificata dalla curva distributiva, che è riportata in allegato 1 per ciascuna misurazione), si è giunti, per tali due posizioni, ad una stima del contributo relativo del rumore ferroviario. Le seguenti due tabelle riportano i risultati di tale analisi.

Posizione 6 (mobile) – determinazione della quota di rumore ferroviario

	Giorno	Notte
Leq,tot	50.6	45.4
Leq,residuo	48.4	43.2
Leq,treni	46.6	41.3

Posizione 8 (mobile) – determinazione della quota di rumore ferroviario

	Giorno	Notte
Leq,tot	56.8	51.6
Leq,residuo	54.6	49.4
Leq,treni	52.8	47.5

Una prima osservazione dei dati risultanti dai rilievi fonometrici e dalle successive elaborazioni porta a concludere che la gran parte del territorio analizzato, compreso fra la linea FF.S. MI-BO a Sud, via Trento ad Est, via Marmolada a Nord e via Europa ad Est è caratterizzato da rumorosità molto contenuta, ampiamente inferiore ai limiti di zona previsti dalla nuova zonizzazione acustica del Comune di Parma, che stabilisce una classe IV in tutta l'area suddetta (con limiti diurno di 65 dBA e limite notturno di 55 dBA).

Solamente al confine di tale area territoriale si risente della rumorosità delle due grosse arterie che portano il traffico stradale dal centro alla periferia e viceversa, costituite rispettivamente da Via Trento e da via Europa.

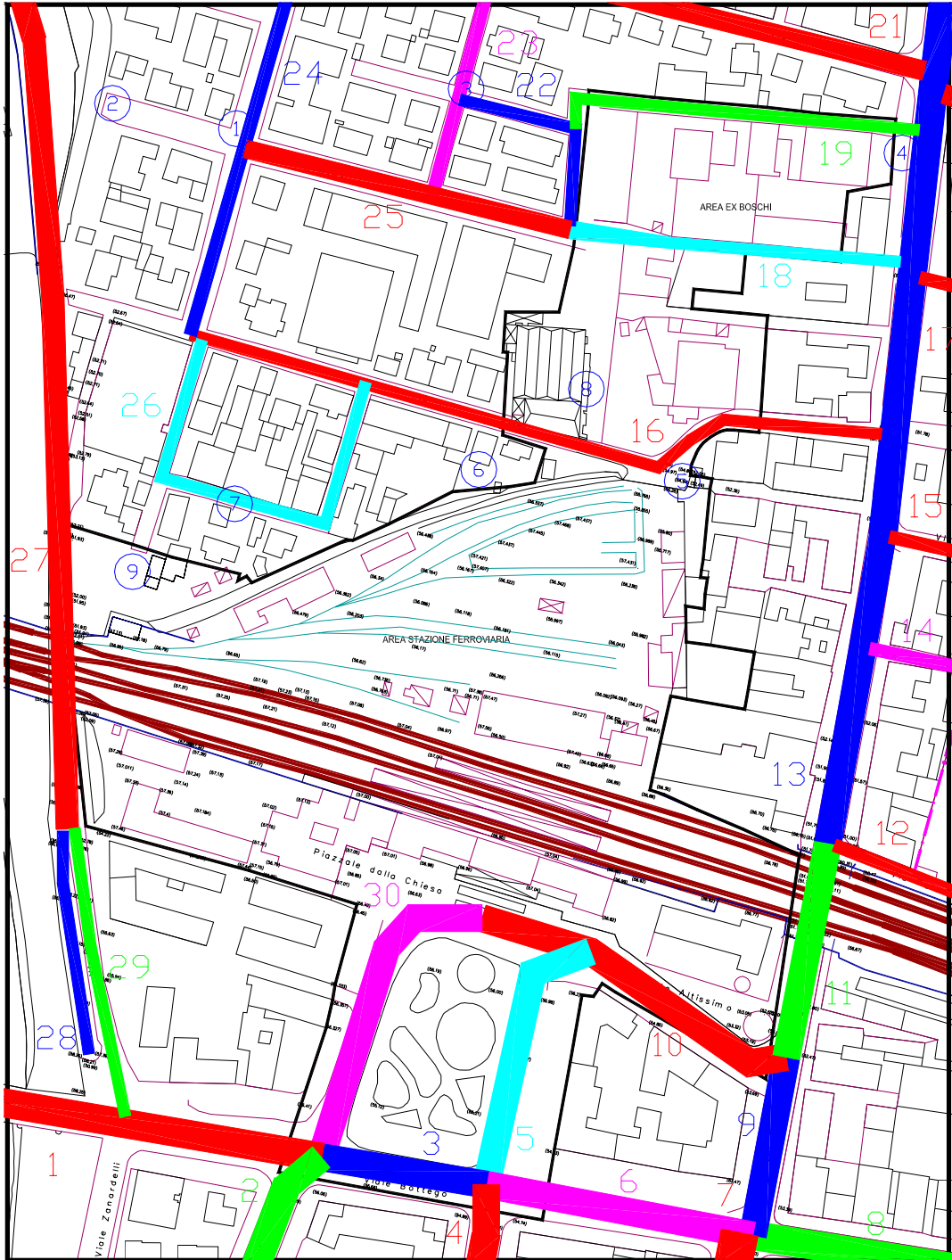
Soprattutto nel primo caso, infatti, sono stati riscontrati sistematici superamenti del limite di immissione, sia diurno che notturno.

Lungo via Europa, invece (postazione fissa n. 0), il livello diurno rimane ampiamente entro i limiti, e solo durante il periodo notturno si ha un superamento del limite molto ridotto (56.4 dBA contro un limite di 55 dBA).

Si deve pertanto ritenere che l'impatto acustico dell'opera qui analizzata possa ritenersi accettabile se all'interno dell'area suddetta i livelli sonori resteranno ampiamente entro i limiti di zona (così come lo sono già oggi), mentre lungo la viabilità perimetrale dell'area si ottenga una certa riduzione della rumorosità (anche se, ovviamente, non è pensabile che un intervento quale quello qui valutato possa portare ad una così radicale redistribuzione dei flussi veicolari stradali da dar luogo ad un cospicuo miglioramento in tali aree prospicienti i grossi assi stradali).

4.2 Simulazione numerica dello stato di fatto

Partendo dal grafo del traffico attuale nell'ora di punta, e lavorando sulla tavola Autocad che rappresenta lo stato di fatto, è stata realizzata la rete stradale e ferroviaria da impiegare con il programma Citymap. La seguente figura mostra il grafo degli archi di strada e di binario, con la numerazione delle strade (che sono colorate di colori diversi onde agevolarne l'identificazione).



Grafo della viabilità stradale e ferroviaria – Stato di Fatto

Applicando i fattori moltiplicativi fra traffico equivalente dell'ora di punta e traffico complessivo diurno e notturno sono stati definiti i dati di traffico stradale riportati nella seguente tabella:

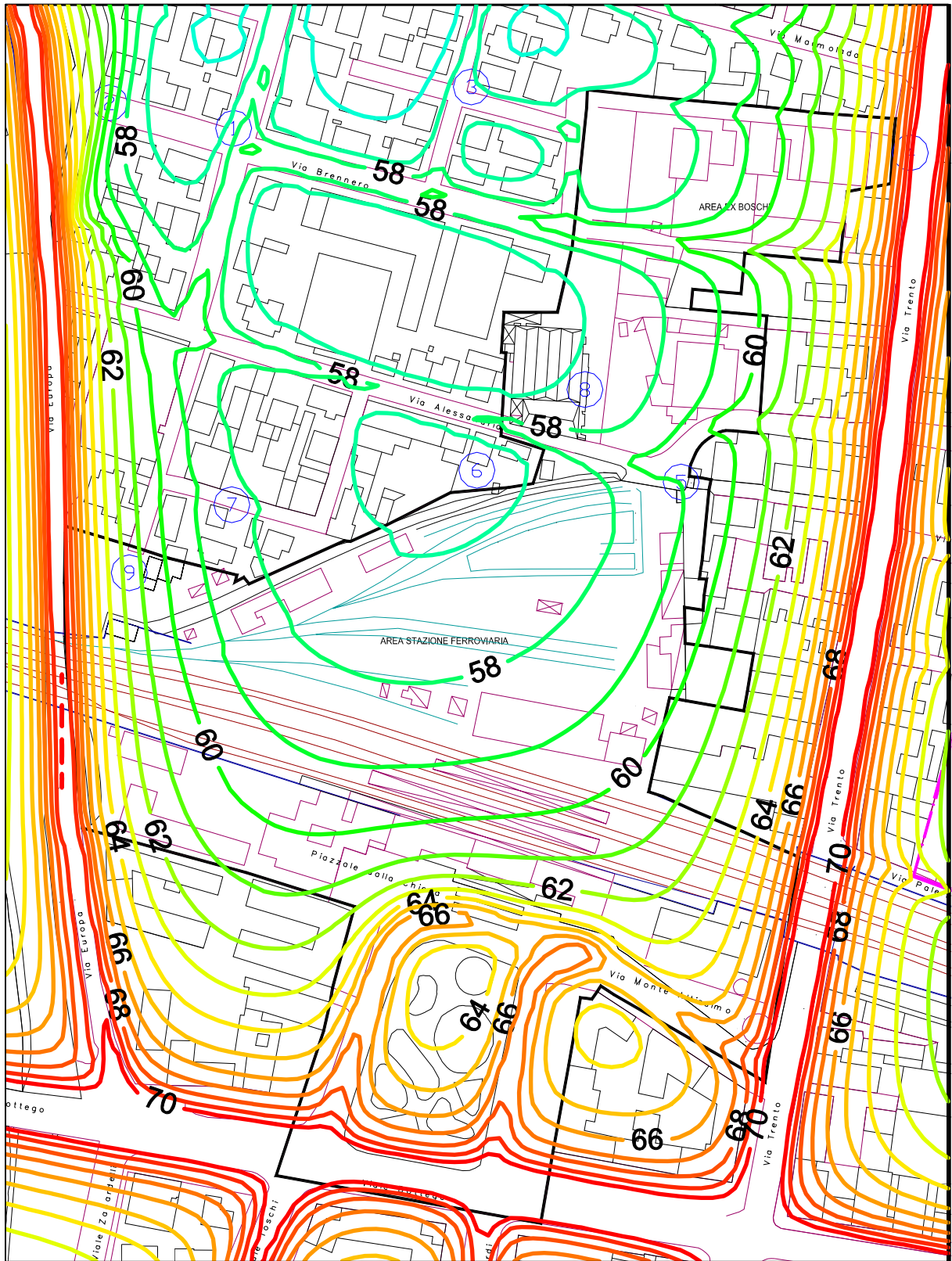
Strada n.	O.Punta s.	O.Punta d.	Legg/G	Pes/G	Legg/N	Pes/N
1	2206	994	32108	6942	2430	1041
2	1268	0	12723	2751	963	413
3	1111	793	19105	4131	1446	620
4	635	245	8830	1909	668	286
5	468	74	5438	1176	412	176
6	1705	1239	29540	6387	2235	958
7	1737	141	18844	4074	1426	611
8	2084	0	20911	4521	1582	678
9	1093	890	19897	4302	1506	645
10	220	61	2820	610	213	91
11	1135	1091	22335	4829	1690	724
12	269	0	2699		204	
13	1098	872	19767	4274	1496	641
14	121	0	1214		92	
15	95	106	2017		153	
16	161	158	3201		242	
17	86	59	1455		110	
18	175	189	3652		276	
19	3	35	381		29	
20	86	59	1455		110	
21	73	0	732		55	
22	93	148	2418		183	
23	198	129	3281		248	
24	193	172	3662		277	
25	86	76	1625		123	
26	18	0	181		14	
27	998	212	12141	2625	919	394
28	998	0	10014		758	
29	212	0	2127	2625	161	394
30	475	0	4766	1031	361	155

E' stato anzitutto operato un calcolo per punti, valutando i livelli sonori negli stessi 9 punti oggetto dei rilevamenti fonometrici. In tale modo è possibile un raffronto fra dati simulati dal programma Citymap e dati calcolati sulla base dei rilievi sperimentali, che viene mostrato nella seguente tabella.

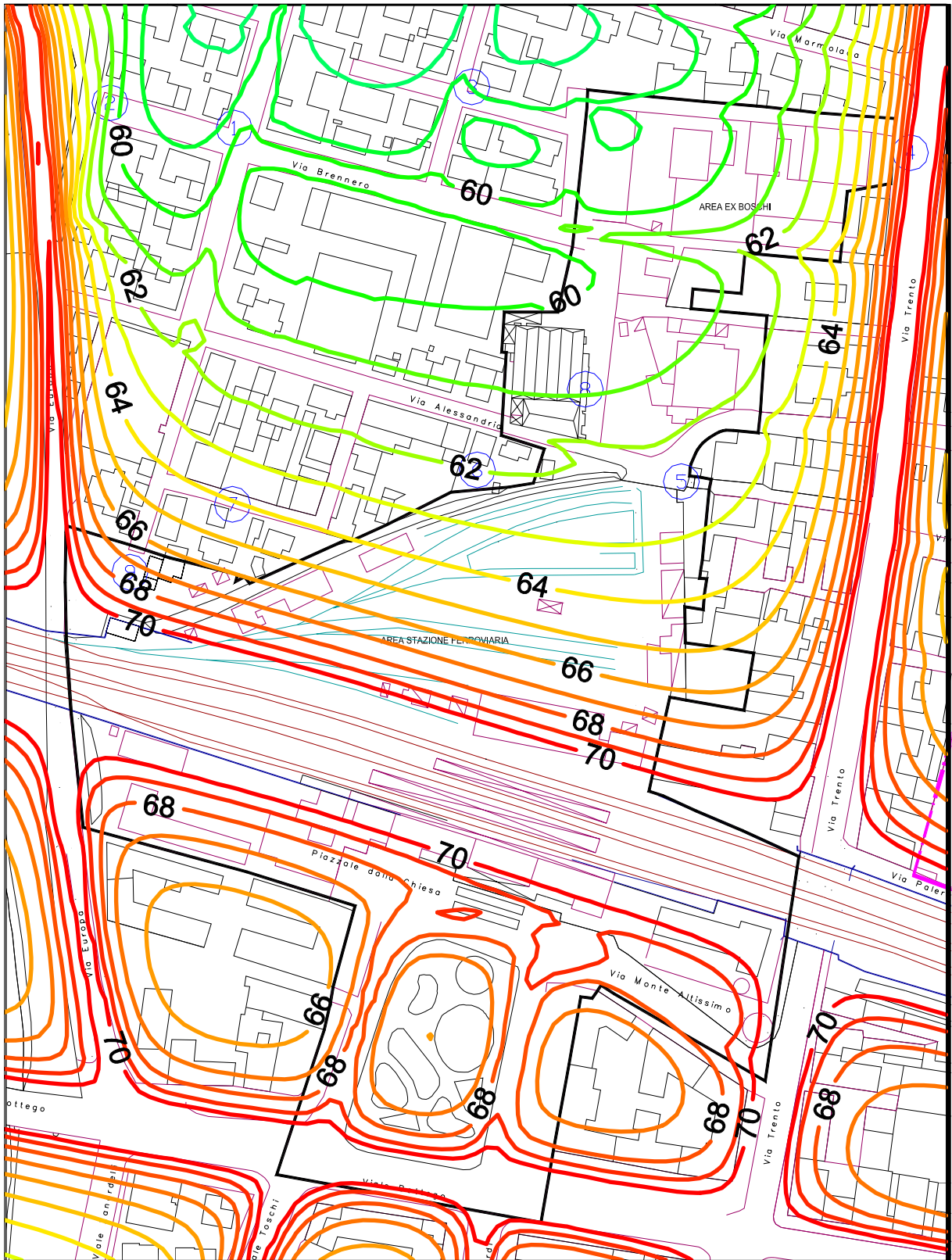
Posizione	Sperimentale $L_{Aeq,day}$	Sperimentale $L_{Aeq,night}$	Simulato $L_{Aeq,day}$	Simulato $L_{Aeq,night}$
0	63.8	58.6	61.6	55.6
1	57.9	52.7	58.8	52.2
2	56.0	50.8	60.9	54.9
3	51.0	45.8	57.7	50.2
4	71.6	66.4	69.9	64.0
5	58.9	53.7	59.1	53.2
6	50.6	45.4	57.1	51.1
7	52.2	47.0	58.5	52.5
8	56.8	51.6	57.4	51.4

Avendo verificato la ragionevole congruenza con i dati sperimentali nei punti di raffronto, si è operato il calcolo della mappature isolivello sonoro reative al periodo Diurno ed al periodo Notturno, relative al solo rumore stradale ed al rumore complessivo (stradale+ferroviario), che vengono riportate nelle 4 figure seguenti.

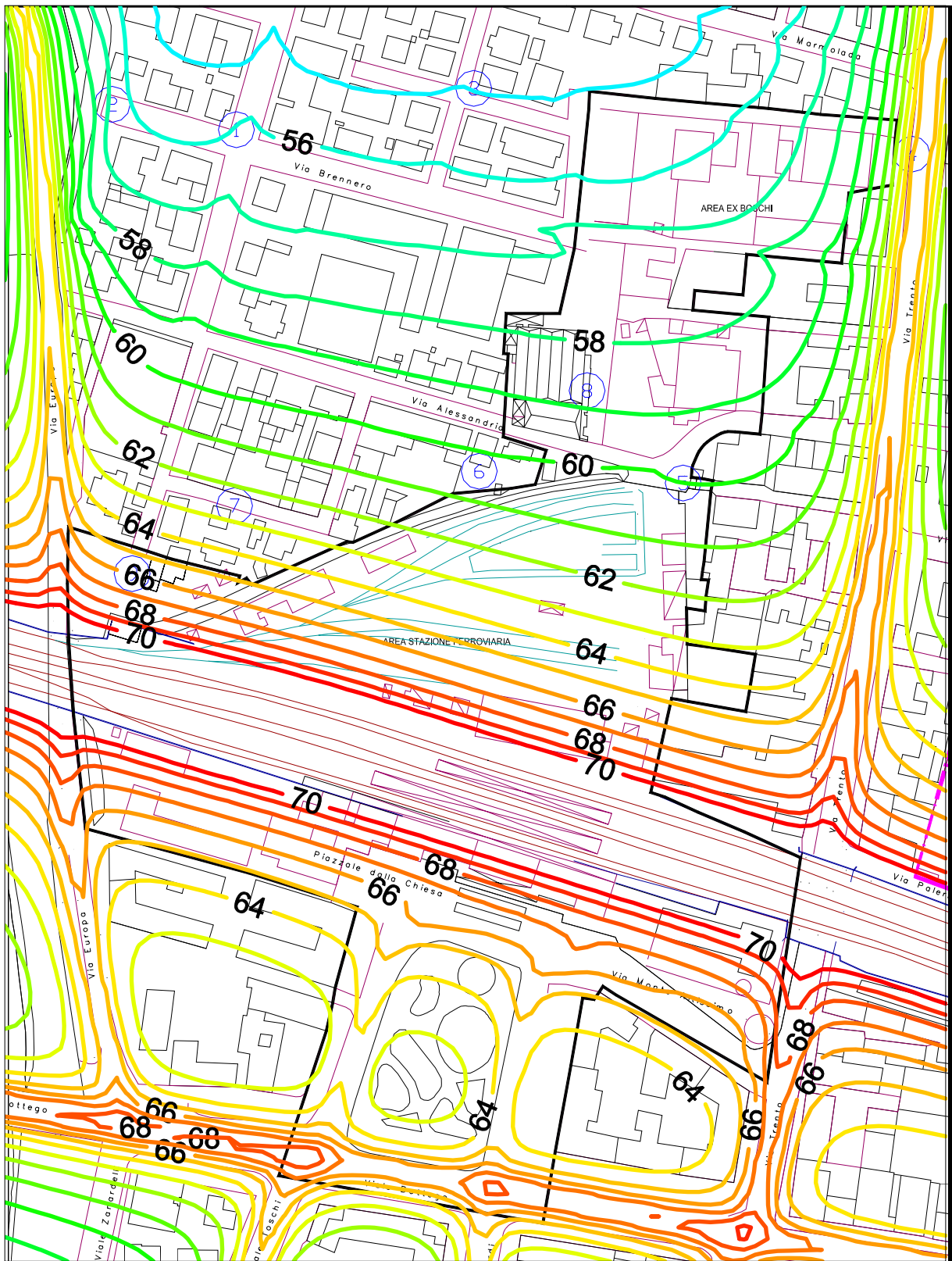
Mappa isolivello sonoro – solo rumore stradale – Stato di fatto, periodo diurno



Mappa isolivello sonoro –rumore stradale e ferroviario – Stato di fatto, periodo diurno



Mappa isolivello sonoro –rumore stradale e ferroviario – Stato di fatto, periodo notturno



L'osservazione delle mappe isolivello precedenti non deve trarre in inganno il lettore: il calcolo è stato eseguito senza tenere conto della schermatura degli edifici, e ad una altezza dal suolo di circa 4m; conseguentemente i livelli indicati non sono rappresentativi della rumorosità esistente al suolo, che è notevolmente inferiore a quella calcolata.

Tuttavia, le mappature isolivello indicano abbastanza correttamente i livelli sonori rilevabili ai piani alti degli edifici, sul lato esposto alla sorgente del rumore. Esse pertanto forniscono le indicazioni corrette dal punto di vista della valutazione di impatto ambientale acustico, in quanto visualizzano la possibilità di superamento dei limiti di rumorosità in corrispondenza dei punti più sfavoriti dei recettori residenziali.

Comunque, prescindendo dal rumore causato dal traffico ferroviario, che come è noto non va cumulato a quello di origine stradale, si osserva che il limite diurno di 65 dB(A) è rispettato ovunque, e che quello notturno di 55 dB(A) viene superato unicamente sulla facciata degli edifici rivolta direttamente su Via Trento e su via Europa. All'interno dell'area di intervento, anche il limite notturno è rispettato praticamente ovunque.

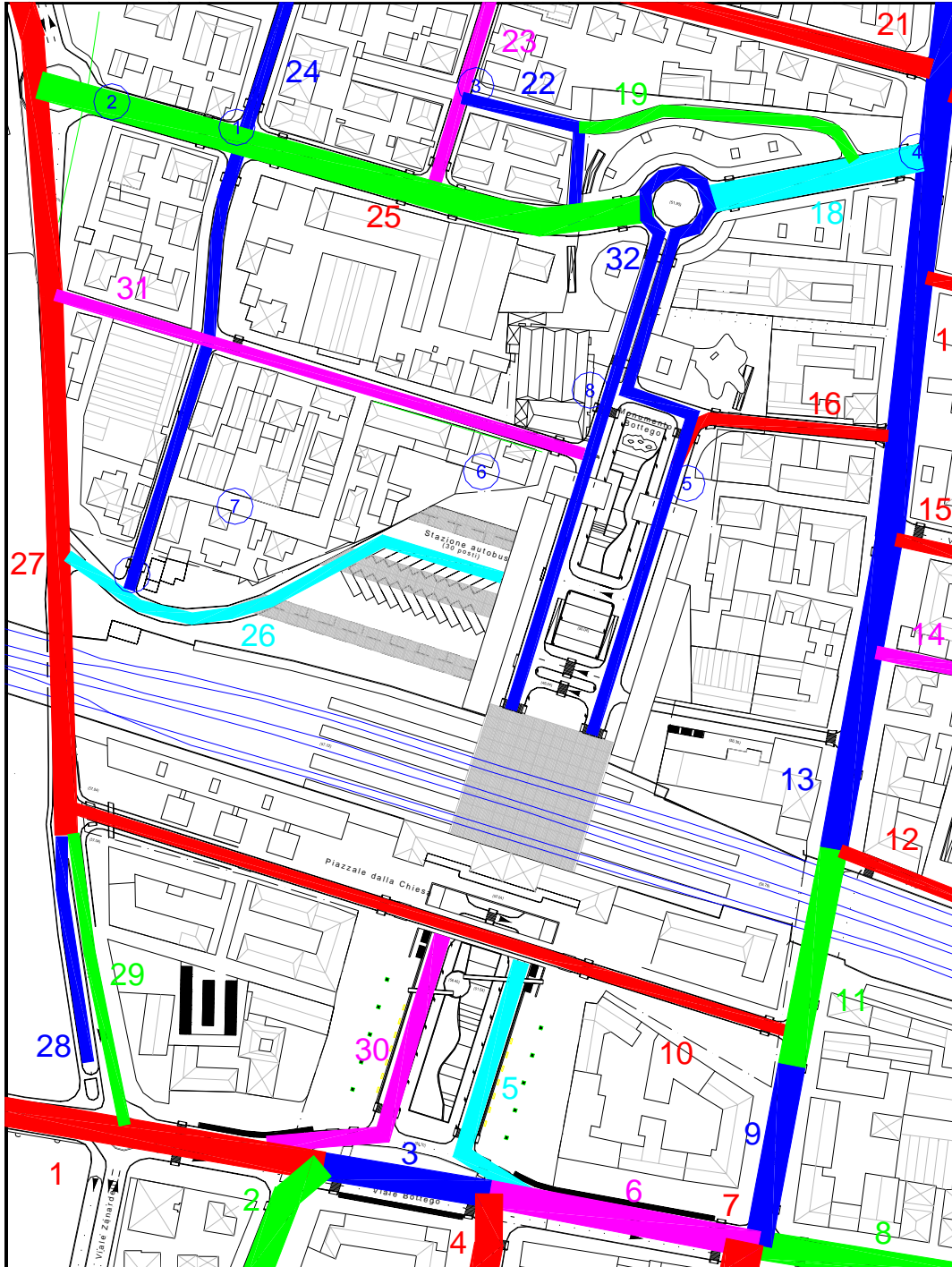
Lo stato di fatto può dunque essere considerato sostanzialmente accettabile per quanto riguarda il rumore da traffico stradale, mentre evidentemente si ha un certo impatto di origine ferroviaria, che sconsiglia la realizzazione di nuovi edifici residenziali all'interno della prima fascia di pertinenza dell'infrastruttura ferroviaria (che è ampia 100m a partire dalla mezzeria del binario più esterno del fascio).

A valle di tale scelta, si considera irrilevante valutare nello stato di progetto il contributo del rumore ferroviario (che peraltro resta sostanzialmente inalterato rispetto allo stato di fatto), visto che il livello cumulativo non può essere confrontato con i limiti derivanti dalla zonizzazione acustica.

Nel seguito si è pertanto proceduto alla valutazione unicamente della quota di rumore di origine stradale.

4.3 Simulazione numerica dello stato di progetto

Partendo dal grafo del traffico stimato per l'anno 2005 nell'ora di punta (elaborazione Systematica), e lavorando sulla tavola Autocad che rappresenta lo stato di progetto, è stata realizzata la rete stradale e ferroviaria da impiegare con il programma Citymap. La seguente figura mostra il grafo degli archi di strada e di binario, con la numerazione delle strade (che sono colorate di colori diversi onde agevolare l'identificazione).



Grafo della viabilità stradale e ferroviaria – Stato di Progetto

Applicando i fattori moltiplicativi fra traffico equivalente dell'ora di punta e traffico complessivo diurno e notturno sono stati definiti i dati di traffico stradale riportati nella seguente tabella:

Strada n.	O.Punta s.	O.Punta d.	Legg/G	Pes/G	Legg/N	Pes/N
1	2200	1707	39202	8476	2967	1271
2	893		8960	1937	678	291
3	2105	1997	41159	8899	3115	1335
4	484	539	10265	2219	777	333
5	586	286	8750	1892	662	284
6	2018	1666	36965	7992	2797	1199
7	1772	138	19165	4144	1450	622
8	2038		20449	4421	1547	663
9	966	1265	22386	4840	1694	726
10	533	175	7104	1536	538	230
11	1212	1152	23720	5129	1795	769
12	280		2809		213	
13	1212	1152	23720	5129	1795	769
14	201		2017		153	
15	111	86	1977		150	
16	92	96	1886		143	
17	115	32	1475		112	
18	600	300	9031	1953	683	293
19	171	195	3672		278	
20	115	32	1475		112	
21	156		1565		118	
22	42	35	773		58	
23	56	58	1144		87	
24	143	111	2549		193	
25	600	300	9031	1953	683	293
26	18			198		
27	447	1077	15292	3306	1157	496
28	1077		10807		818	
29	447		4485	970	339	145
30	586	286	8750	1892	662	284
31	150	126		599	210	
32	586	286	8750	1892	662	284

E' stato anzitutto operato un calcolo per punti, valutando i livelli sonori negli stessi 9 punti oggetto dei rilevamenti fonometrici. In tale modo è possibile un raffronto fra dati simulati dal programma Citymap nello stato di fatto e nello stato di progetto, che viene mostrato nella seguente tabella.

Posizione	Stato di fatto	Stato di fatto	Stato di progetto	Stato di progetto
	$L_{Aeq,day}$	$L_{Aeq,night}$	$L_{Aeq,day}$	$L_{Aeq,night}$
0	61.6	55.6	64.2	57.1
1	58.8	52.2	60.9	54.9
2	60.9	54.9	60.2	57.2
3	57.7	50.2	58.3	51.2
4	69.9	64.0	70.8	64.9
5	59.1	53.2	61.7	55.4
6	57.1	51.1	58.0	52.5
7	58.5	52.5	59.8	53.5
8	57.4	51.4	60.5	54.3

Si è poi operato il calcolo della mappature isolivello sonoro relative al periodo Diurno ed al periodo Notturno, relative al solo rumore stradale, che vengono riportate nelle 2 figure seguenti.

Il confronto fra le mappature qui riportate e quelle relative allo stato di fatto (cap. 6) mostra un lieve, generalizzato aumento della rumorosità (oco più di 1 dBA).

Esso non è imputabile alla realizzazione dell'intervento il cui progetto viene qui analizzato. Viceversa, l'aumento di rumorosità si verifica sull'intera rete stradale di Parma, causa il previsto incremento dei flussi veicolari che viene evidenziato dalle elaborazioni condotte da Systematica, tramite il modello Viper/Trips, e che era già stato descritto nel cap. 4.2.

La realizzazione dell'intervento sulla stazione ferroviaria di Parma comporterà infatti solo un lievissimo maggior afflusso di veicoli leggeri, quantificato in 1000 autovetture durante il periodo diurno e 100 autovetture durante il periodo notturno. Non si avrà alcun aumento numerico del flusso di veicoli pesanti diretti alla stazione, semplicemente le corriere extraurbane seguiranno un diverso percorso, attestato sulla nuova stazione delle corriere posta subito a Nord della linea FF.S..

In sostanza, la realizzazione dell'intervento qui analizzato non solo non avrà rilevanti effetti negativi, ma porterà anzi ad un significativo miglioramento della distribuzione dei flussi veicolari attorno alla stazione, contribuendo a decongestionare il deflusso sugli assi più trafficati, quali via Trento e via Bottego.

Nel caso di altre forme di inquinamento di cui si deve operare la valutazione di impatto ambientale, quali l'inquinamento atmosferico, è normale quantificare gli effetti dell'opera progettata non mediante confronto fra stato di progetto e stato di fatto, ma mediante confronto fra stato di progetto ed "opzione zero". Con tale locuzione si intende uno scenario di analisi previsionale comunque proiettato nel futuro, allo stesso anno in cui si stima la situazione ambientale di progetto (nel 2005, in questo caso), ma nel quale si ipotizza che l'opera da analizzare NON venga realizzata. Da tale confronto si evince il reale effetto positivo o negativo dell'opera, senza il "bias" causato dalle condizioni generali che sono in corso di mutazione, indipendentemente dalla realizzazione della specifica opera.

Se si operasse tale confronto anche in campo acustico, risulterebbe evidente che il progetto della nuova stazione di Parma ha effetti per lo più benefici sulla rumorosità della zona, rispetto a quanto accadrebbe se esso non venisse realizzato, e si dovessero dunque avverare le ipotesi di flusso stradale all'anno 2005 oggetto della simulazione compiuta da Systematica.

Tale confronto con l' "opzione zero" non è tuttavia previsto dalla attuale legislazione sulla Valutazione di Impatto Ambientale Acustico, descritta nel capitolo 2.2 della presente relazione. I vigenti dispositivi legislativi prevedono infatti che la valutazione di impatto acustico sia basata sulla stima delle modificazioni introdotte al clima acustico esistente.

Detto ciò, si deve comunque notare che lo scenario futuro è comunque in generale del tutto accettabile dal punto di vista acustico, in quanto:

- in gran parte dell'area circostante la zona di intervento ed in tutta l'area di intervento propriamente detta, i limiti di rumorosità vigenti (classe IV, 65 dBA diurno e 55 dBA notturni) continuano ad essere rispettati.
- Nelle zone frontaliere alle vie di grande traffico i limiti di zona non sono rispettati nello stato di fatto, e continuano a non esserlo nello stato di progetto; comunque non spetta all'intervento qui analizzato farsi carico della problematica acustica causata dall'intera rete stradale di Parma.
- La redistribuzione dei flussi di veicoli diretti alla Stazione di Parma e la disponibilità di un agevole accesso al nuovo parcheggio sotterraneo porteranno ad una minore congestione e criticità circolatoria di alcuni nodi particolarmente rilevanti, quali l'incrocio fra via Trento, via Bottego e via Fratti.
- Alcune opere accessorie previste lungo la viabilità esterna all'area di intervento, quali roatorie, raccordi e rampe, porteranno ad una fluidificazione dei percorsi e conseguentemente ad una minor emissione di rumore a parità di veicoli transitati (cosa che non risulta dalle mappature isolivello, in quanto il programma Citymap non contiene un

adeguato sistema di correzione della emissione sonora tipica dei veicoli in funzione della “scorrevolezza” del flusso, ma tiene conto unicamente della velocità media dello stesso).

- Va tuttavia segnalato che, in una piccola area posta immediatamente a Nord del fascio dei binari, in corrispondenza alle ultime case di via Novara, la realizzazione della nuova bretellina per l’efflusso delle corriere extraurbane dal rispettivo deposito comporterà un significativo peggioramento della situazione attuale, e conseguentemente si corre il rischio di arrivare al superamento dei limiti di zona.
- Poiché comunque proprio questa zona, sin dall’inizio preventivata come la più critica dal punto di vista dell’impatto acustico, è stata oggetto di un dettagliato monitoraggio di lungo periodo e di una accurata valutazione previsionale di dettaglio, si è concluso che è necessario installare a protezione di tale area un limitato tratto di pannellature fonoisolanti, cosa che comporta alcune piccole modifiche al progetto, modifiche la cui attuabilità risulta peraltro subordinata ad alcuni passaggi di consegna burocratici, che sono ancora da verificare.

Il successivo capitolo contiene comunque una analisi della problematica acustica di tale zona critica, con conseguente dimensionamento delle opere di mitigazione e nuova simulazione riferita all’ipotesi di progetto modificata con l’inserimento di tali opere di mitigazione.

4.4 Definizione degli interventi di mitigazione ed ipotesi di modifica al progetto

In questo capitolo viene analizzata in dettaglio la situazione che si verrà a creare lungo la bretellina di uscita delle corriere dal deposito retrostante la stazione ferroviaria.

La seguente figura mostra un dettaglio dell'area in esame, secondo la sistemazione attualmente prevista dal progetto.



Si osserva che il punto 0, ove è stato fatto il rilevamento fonometrico in continua per 24h, si verrà a trovare al centro del previsto prolungamento di via Novara, che verrà aperta e collegata alla bretella di uscita dal deposito corriere.

Pertanto tale punto assume un significato specifico, essendo ben rappresentativo dell'esposizione al rumore degli edifici più esposti.

E' stata pertanto eseguita la mappatura isolivello sonoro, riferita allo stato di progetto, nell'area rappresentata dalla figura sovrastante. Poiché l'uscita di tutte le corriere avviene all'interno del periodo diurno, si è analizzata soltanto la situazione diurna.

La seguente figura riporta tale mappatura isolivello di dettaglio.



Si nota che il limite diurno di 65 dB(A) viene leggermente superato in corrispondenza degli edifici posti in prossimità della confluenza fra la bretella di uscita delle corriere e via Europa.

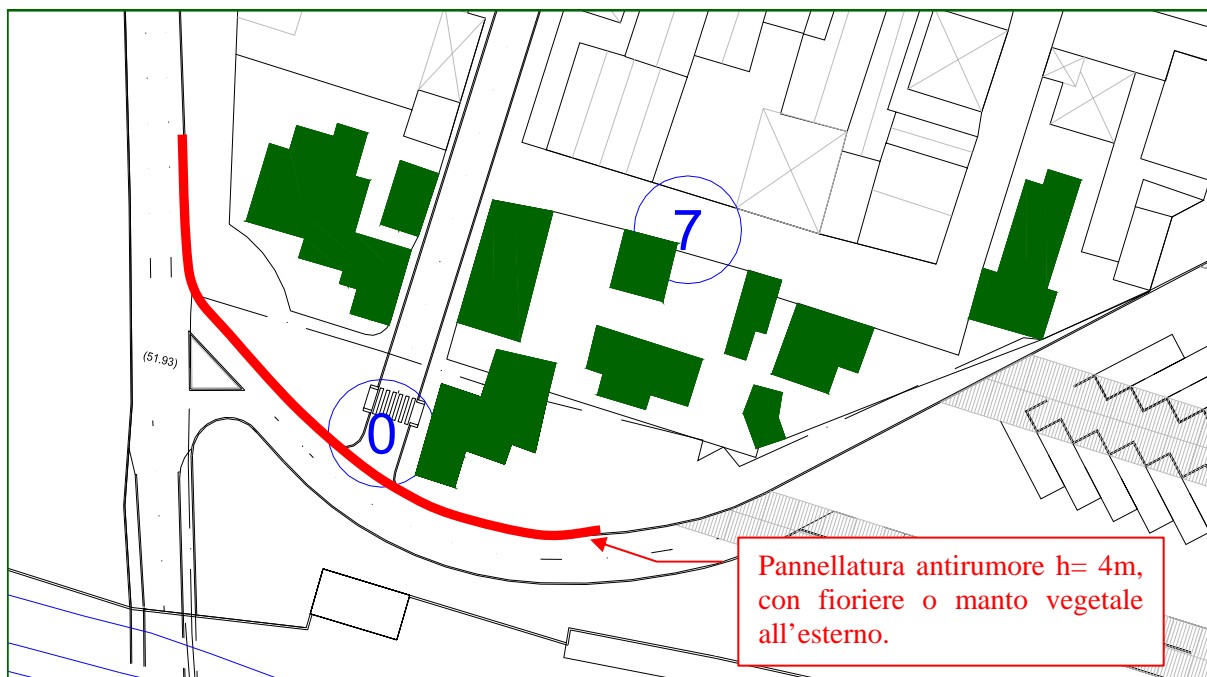
Il superamento è abbastanza limitato, tuttavia pare doveroso provvedere mediante l'installazione di idonea barriera antirumore.

L'installazione della stessa è tuttavia problematica per due motivi:

- 1) Essa limita la visibilità per le corriere che si debbono immettere su via Europa, e conseguentemente appare opportuno canalizzare il flusso in modo tale che sia vietata la svolta a sinistra per le corriere in uscita dal deposito (cosicché le stesse uscendo possano andare solo verso Nord) e vietare la svolta a sinistra in ingresso, per le corriere che provengono da Nord lungo via Europa. In sostanza, sia in entrata che in uscita i veicoli debbono sempre interagire unicamente con la corrente veicolare che percorre via Europa in direzione Nord, mentre la corrente opposta, che scorre in direzione Sud, non deve avere nessuna possibile interazione con la bretella qui esaminata.
- 2) La presenza del prolungamento della via Novara, sino ad innestarsi sulla bretella, impedisce di realizzare una barriera continua che avvolga completamente tutta la zona di sbocco. Occorre osservare che, allorché due o tre corriere si accodano per uscire, e debbono attendere che non sopraggiungano veicoli da Sud per fare ciò, esse producono una rilevante dose di rumore restando ferme con il motore in moto. E' pertanto opportuno che la schermatura non sia soltanto lungo via Europa, ma prosegua per un tratto lungo il raccordo di uscita della bretella, cosa che può essere effettuata solo se via Novara continua a restare, come adesso, una via senza sbocco.

Onde risolvere i due problemi suddetti e realizzare l'intervento di schermatura nella sua configurazione geometrica ottimale, si è pensato di declassare il tratto finale di via Novara a strada privata condominiale, in modo che il Comune non sia più tenuto a garantirne la pervietà circolatoria. Se si riuscirà ad operare le necessarie procedure burocratiche, il tratto terminale di via Novara resterà come nello stato di fatto, e si potrà installare in prossimità dell'innesto della bretella su via Europa una schermatura antirumore dimensionata correttamente.

La seguente figura mostra questa ipotesi di intervento di mitigazione, schizzata in modo semplificato sopra al progetto attuale.



L'efficacia della soluzione mitigatoria proposta è stata verificata effettuando nuovamente l'elaborazione con il programma Citymap della mappatura isolivello sonoro nel periodo diurno, che viene presentata nella successiva figura.



Si può osservare come la schermatura abbia prodotto una notevole riduzione della rumorosità presso tutti gli edifici ad essa retrostanti, portando ovunque al rispetto dei limiti.

5 Conclusioni

Il caso utilizzato come esempio ha mostrato quali metodiche di analisi e di taratura e quali tipi di risultati possono essere ottenuti facendo impiego di idonee metodiche previsionali. Ovviamente in casi specifici l'analisi può essere ulteriormente raffinata, eseguendo ad esempio mappature isolivello più dettagliate su singoli edifici, mappature su sezioni verticali onde apprezzare la variazione del livello sonoro ai diversi piani, o l'effetto di opere schermanti.

Ad una analisi più dettagliata non corrispondono però solitamente risultati più accurati: infatti le metodiche di calcolo sono sempre le stesse, l'incertezza sui dati di ingresso (flussi veicolari, descrizione geometrica del sito, caratteristiche acustiche delle superfici) non varia, e viceversa viene richiesto al programma di simulazione di evidenziare variazioni spaziali del livello sonoro anche molto modeste. Ciò significa che in realtà la scala piuttosto grossolana a cui è stato condotto lo studio, è la minima onde far sì che i risultati della simulazione siano affetti da un'incertezza sui valori confrontabile con l'incertezza "di posizione" dei punti di calcolo sulla mappa.

Volendo quantificare tale incertezza, non si può non riferire dei risultati di un test comparativo fra programmi di calcolo per la simulazione del rumore stradale, svoltosi nel 1995 [8]. 23 diversi gruppi di ricerca parteciparono ad un confronto impiegando 11 diversi programmi. Il confronto prevedeva due casi, uno molto semplice (strada lunga e dritta, prova di ostacoli) ed uno più complesso (svincolo con sovrappasso, terrapieno e boschetto). Nel complesso, la dispersione dei dati calcolati dai diversi programmi è stata molto elevata: nel punto situato a breve distanza dalla strada lunga e dritta, si sono avute differenze massime di 8 dB(A), con deviazione standard di 2.7 dB(A), mentre nei punti più lontani, parzialmente schermati, si è arrivati a differenze massime di oltre 14 dB(A), con deviazione standard di oltre 4.5 dB(A). Si tenga inoltre conto che tali differenze si sono avute partendo da dati assolutamente identici per tutti i programmi, mentre nell'impiego reale occorre aggiungere anche l'incertezza sui dati di traffico e sulla descrizione geometrica del sito.

In conclusione, si può affermare che l'impiego dei programmi di simulazione può fornire una accuratezza del tutto insufficiente se gli stessi non vengono usati con accortezza, effettuando sempre la taratura nello stato di fatto sulla base di idonei rilievi sperimentali, e lasciando al programma così tarato solo l'onere di estrapolare una situazione non troppo diversa da quella di taratura. In assenza di tale procedura di impiego, i valori numerici prodotti dal calcolo saranno inevitabilmente affetti da una incertezza di almeno 6/7 dB(A); e pertanto ben difficilmente potranno essere utilizzati per valutare il rispetto dei limiti di legge e dunque per stabilire se l'opera progettata sia o meno accettabile dal punto di vista acustico.

6 Note bibliografiche

- [1] **A. Farina** - “Modelli matematici per la previsione della diffusione del suono” - *Acqua Aria*, n. 3, pagg. 257-268, Marzo 1991.
- [2] Bunderminister für Verkehr, Schall 03, ed. 1990
- [3] Bunderminister für Verkehr, Richtlinien für den Larmschutz an Strassen, RLS-81, (1981).
- [4] **A. Farina** , G. Semprini - “RLS81” - Atti del convegno AIA 1989 “Metodi numerici di previsione del rumore da traffico”, Parma, 12 Aprile 1989.
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] **A. Farina** , L. Maffei - “Sound Propagation Outdoor: comparison between numerical previsions and experimental results” - In the volume “Computational Acoustics and its Environmental Applications” pp. 57-64, Editor C.A. Brebbia, Computational Mechanics Publications, Southampton (GB) 1995.
- [8] Pompoli R., **Farina A.**, Fausti P., Bassanino M., Invernizzi S., Menini L., “Intercomparison of traffic noise computer simulations”, in: atti del XXIII Convegno Nazionale AIA - 18th International Congress for Noise Abatement AICB, Bologna, 12-14 settembre 1995, supplemento, p.523-559.