

SOFTWARE PREVISIONALE ACUSTICO PER ESTERNI: UN NUOVO APPROCCIO MULTIALGORITMO E MULTIPIATTAFORMA

Angelo Farina¹, Paolo Galaverna², Guido Truffelli³

¹Università degli Studi di Parma, ²Genesis acoustic workshop (Parma),

³Laboratorio di Acustica ed Elettroacustica (Parma)

SOMMARIO

Il modello illustrato nasce dall'esperienza di due progetti sviluppati nel passato: il sistema Ramsete e il modello Citymap (Progetto DISIA). L'unione delle esperienze dello stesso gruppo di lavoro ha portato a sviluppare un nuovo strumento software che si pone sul mercato integrando alcuni classici tools di modellistica in una struttura di ultima generazione.

Nasce così un programma per l'analisi dell'impatto acustico di sorgenti di qualsiasi tipo (strade, ferrovie o sorgenti concentrate di tipo generico) utilizzando i modelli di calcolo attualmente più diffusi ed aperto all'integrazione di nuove procedure di calcolo. L'articolo descrive gli algoritmi impiegati nel programma CityMap 3.0. Questo software è molto semplice da utilizzare, in quanto richiede solo una minima descrizione geometrica del luogo, delle sorgenti e dei ricettori. Gli algoritmi impiegati sono una semplificazione dei metodi computazionali attualmente richiesti in Italia, dopo che la direttiva europea sul rumore ambientale è stata convertita in legge con il DL194 del 19/08/2005. In un prossimo futuro saranno inseriti i motori di calcolo che rispettino le seguenti norme: NMPB-Routes-96(SETRACERTU-LCPC-CSTB) per il rumore stradale; Reken-en Meetvoorschrift Railverkeerslawaaai '96, Ministerie Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (20 Novembre 1996) per il rumore ferroviario; ISO 9613/2 per il rumore industriale.

1. RAMSUTE

Uno dei primi progetti realizzati dal Laboratorio di Acustica ed Elettroacustica [1] è stata la riscrittura del software per il calcolo dell'impatto acustico di strade e ferrovie denominato CityMap, avendo un duplice obiettivo:

- un significativo incremento delle prestazioni;
- recepire nuove normative nel campo della simulazione.

Il primo obiettivo è stato pienamente raggiunto, riscrivendo il programma in linguaggio C++ e ricorrendo ad algoritmi di calcolo ottimizzati per il problema specifico. Tale software soffriva tuttavia di alcune limitazioni: pur permettendo di associare le proprietà di emissione ad ogni sorgente lineare o puntiforme in maniera molto dettagliata, non era dotato di nessuno strumento di inserimento o modifica del modello geometrico, per cui l'utente era obbligato a servirsi di uno o più programmi esterni, che fossero in grado di esportare le più semplici primitive geometriche (punti, cerchi, poligoni) in formato DXF, cioè il formato standard di interscambio dati di AutoCAD. Questa limitazione nell'editing delle geometrie era ed è tuttora comune a moltissimi software commerciali e non, prodotti all'interno di enti di ricerca o di strutture di consulenza pubbliche e private. La maggior parte di loro si basa sulla importazione da AutoCAD, ArcInfo o altri software di terze parti per l'importazione del modello dell'ambiente e delle fonti di inquinamento esistenti, mentre gestisce internamente le fonti simulate. Alcuni si basano su file di testo in formato proprietario inseriti manualmente o quasi. Durante lo sviluppo del programma di simulazione acustica per interni

Ramsete, nel corso degli anni è stato realizzato un notevole insieme di strumenti piuttosto sofisticati ed al tempo stesso molto semplici per qualsiasi utilizzatore, che permettono l'inserimento del modello geometrico su cui effettuare le simulazioni. L'ultima versione di tale software contiene alcune estensioni, pensate per l'utilizzo anche in ambiente esterno, ad esempio si può facilmente importare un'immagine vettoriale della cartografia e selezionare in maniera veloce le piante degli edifici e generare il loro modello tridimensionale.

1.1. Il modulo rumore

Il programma può importare facilmente dati geometrici dalla maggior parte dei sistemi CAD esistenti e richiede solo minime informazioni riguardo sorgenti e ricevitori. Grazie ad un nuovo motore di calcolo molto ottimizzato scritto in C++, il programma può mappare con un'alta risoluzione spaziale aree vaste anche in presenza di molti ostacoli e su terreni con qualsiasi conformazione.

Poiché lo scostamento dovuto all'inserimento di dati stimati in modo approssimativo è ridotto, i risultati sono spesso più credibili di quelli di modelli teoricamente più accurati che sono normalmente molto sensibili agli errori sui dati di input. Per verificare questo fenomeno e l'accuratezza del modello descritto sono state effettuate delle misurazioni in situ di un caso reale che poi è stato simulato sia con il nuovo programma sia con un modello molto accurato basato su pyramid tracing, Ramsete [2]

2. L'ALGORITMO DI CALCOLO

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 3.0 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, serale e notturno, la classe di velocità, nonché alcune informazioni morfologiche (pendenza, tipo di pavimentazione o di armamento, altezza degli edifici, etc.).

Il primo problema è dunque calcolare il livello equivalente medio a 7.5 m 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:

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

Nella formula precedente si assume una durata del giorno pari a 16 ore, chiaramente tale valore nel periodo serale o notturno può variare a seconda della norma adottata da ogni stato. 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 3.0 per il momento non tiene conto né della composizione in frequenza del rumore emesso, né 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 finché essi non

divengono abbastanza corti. In questo modo il raffinamento 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 7.5 m 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 ricevitore 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 β 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 :

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

Si noti come l'altezza della sorgente è stata prudenzialmente assunta a 0.5 m 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).

3. VALIDAZIONE CON MISURE SPERIMENTALI

E' stata utilizzata una tecnica di misura ormai consolidata che si basa sulle proprietà matematiche del segnale MLS (Maximum Length Sequence). Il segnale MLS prodotto da una scheda audio collegata ad un PC portatile alimentava un amplificatore collegato ad un altoparlante. L'apparato di misura è composta da un fonometro cui è collegato un registratore DAT tramite la sua uscita AC calibrata.

An innovative measuring technique was used to collect experimental data with little background noise contamination. It is based on the mathematical properties of the MLS (Maximum Length Sequence) excitation signal, as suggested by Chu for room acoustics measurements [11].

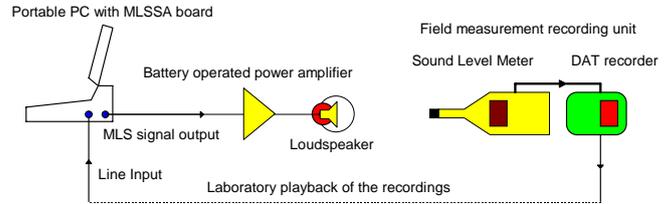


Fig. 1. Sistema di misura

Dopo aver effettuato la registrazione in tutti i punti di misura, l'uscita del DAT è stata connessa con l'ingresso della scheda audio e tramite il software Aurora [3] il segnale MLS viene deconvoluto per ottenere le risposte all'impulso tra la sorgente e ciascun ricevitore. Poiché le registrazioni erano calibrate, tramite Aurora si poteva ottenere il vero valore del livello di pressione sonora.

Tale metodo di misura è stato scelto poiché permette di ottenere un alto valore del rapporto S/N e in questo modo risulta possibile misurare correttamente i valori di decadimento sonoro di un segnale particolare anche in presenza di altri rumori disturbanti, che in ambiente esterno sono sempre possibili.

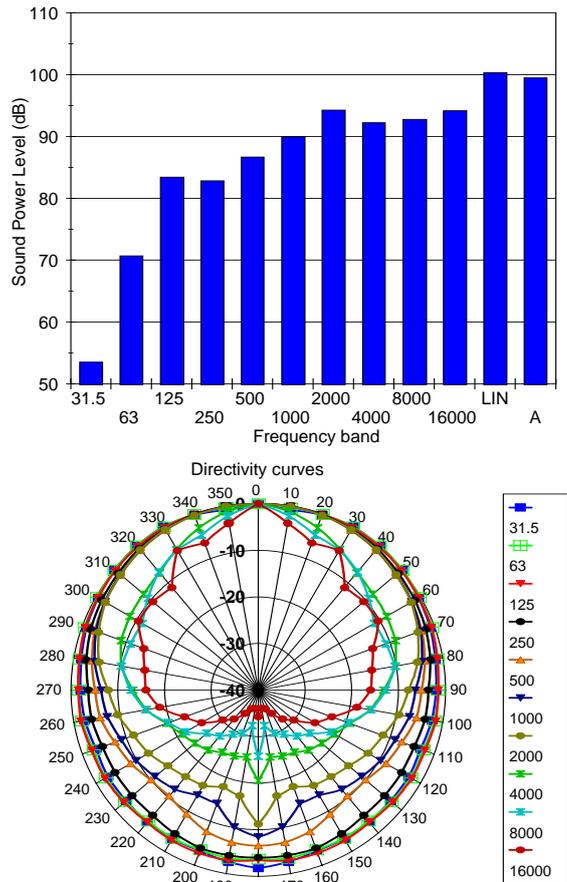


Fig. 2. Livello di potenza (con rumore bianco) e direttività della sorgente sonora

La figura precedente mostra le caratteristiche della sorgente sonora utilizzata sotto forma del suo spettro e della curva di direttività. Poiché la sorgente è perfettamente

assialsimmetrica basta un unico piano di direttività per caratterizzare completamente il suo balloon.

3.1. Il test case

Le misure sono state effettuate presso il campus universitario di Parma, in un parcheggio vuoto fra gli edifici della facoltà di ingegneria. Nella figura seguente riportiamo la aerofotogrammetria dell'area di prova, in cui è evidenziata la sezione di misura lungo la quale è stato misurato il decadimento della sorgente sonora.



Fig. 3. Aerofotogrammetria dell'area di prova

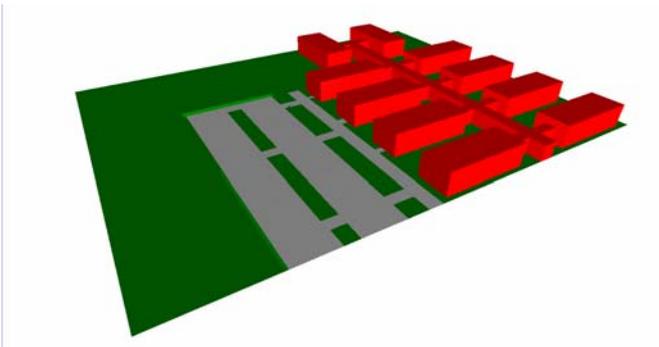


Fig. 4. Modello solido dell'area di test

Lungo la sezione di misura dell'area di parcheggio è stata collocata la sorgente di rumore e sono state scelte posizioni di misura collocate su di una linea retta e distanziate 10 m le une dalle altre. La sorgente era puntata verso gli edifici parallelamente alla sezione di misura.

Questo test case coinvolge la propagazione sui due diversi tipi di suolo (asfalto ed erba) con terrapieni di altezza pari a 1 m ed edifici alti 7 o 10 m. Le facciate di questi edifici sono di cemento con ampie vetrate a nastro.

Per evidenziare la differenza tra le modalità di input dei due modelli riportiamo le due geometrie utilizzate. Nel caso di Ramsete è stato inserito un modello tridimensionale vero e proprio in cui sono stati specificati i parametri acustici dei materiali di ogni singola faccia. In CityMap 3.0 sono state inseriti semplicemente dei poligoni alla quota di gronda dei singoli ostacoli.

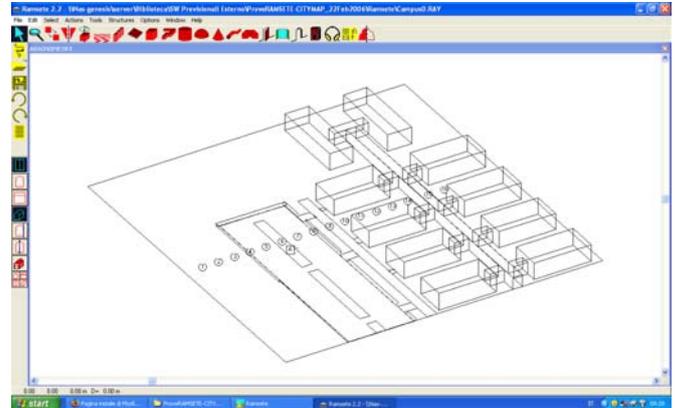


Fig. 5. Modello tridimensionale in Ramsete 3.0

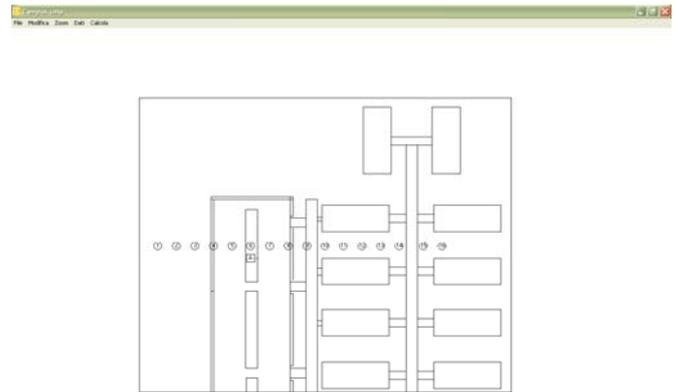


Fig. 6. Modello bidimensionale in CityMap 3.0

4. RISULTATI COMPARATIVI

Sono state effettuate due simulazioni distinte: una con Ramsete (dapprima senza considerare nessun effetto diffrattivo, poi considerando un solo livello di diffrazione, poi due livelli ed infine senza nessun limite di livello utilizzando la nuova opzione per il calcolo esterno); l'altra con CityMap 3.0.

I risultati sperimentali sono presentati insieme a quelli delle simulazioni numeriche per facilitarne il confronto.

Per prima cosa riportiamo la risposta all'impulso misurata nel punto 6, il più vicino alla sorgente. Dalle figure si nota una buona corrispondenza tra i valori sperimentali e quelli simulati.

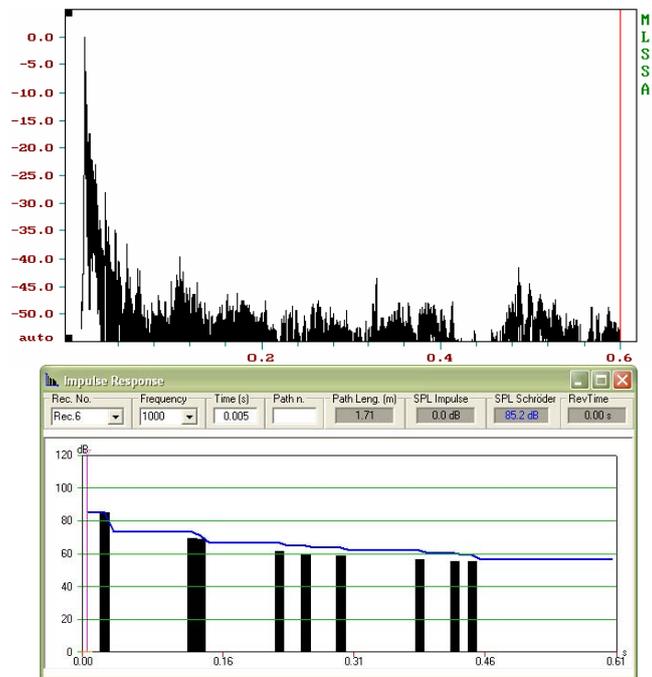


Fig. 7. Modello solido dell'area di test

Nel grafico sotto riportato vengono messi a confronto i risultati delle simulazioni con quelli rilevati sperimentalmente rappresentati dalla linea continua. La linea tratteggiata identifica i valori calcolati tramite l'algoritmo semplificato di CityMap, mentre gli istogrammi rappresentano i risultati con le quattro modalità di calcolo della diffrazione di Ramsete: nessuna diffrazione; un livello; due livelli; diffrazioni illimitate. Possiamo notare da questo grafico che, nonostante il modello geometrico di Ramsete sia molto più raffinato e completo, i risultati che si ottengono sono dello stesso ordine di accuratezza di quelli ottenuti da CityMap 3.0. Ci pare importante sottolineare che nel caso degli ultimi due ricettori, completamente schermati da più ostacoli consecutivi, Ramsete riesce ad ottenere una stima del livello di pressione sonora solo utilizzando il nuovo e computazionalmente oneroso algoritmo di calcolo per esterni.

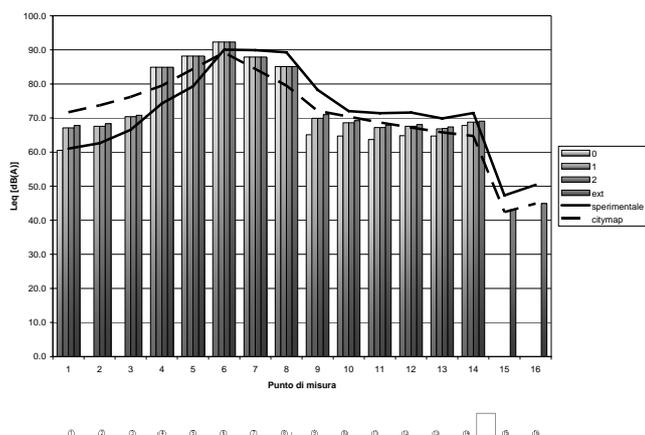


Fig. 8. Grafico comparativo delle simulazioni con la misura sperimentale nei 17 punti campione

4. PIATTAFORME MULTIPLE

Il nuovo software CityMap 3.0 è stato inserito in una nuova suite multiplatforma che permette l'utilizzo del programma su tutte le più diffuse piattaforme hardware e software. Nella figura seguente possiamo osservare il risultato della mappatura del caso studiato nel nuovo ambiente Mac OS X.

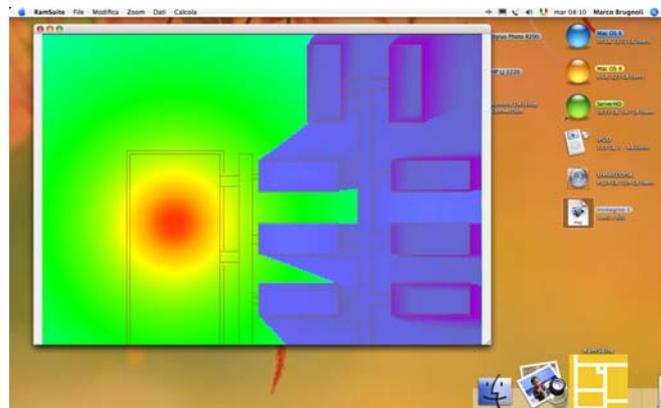


Fig. 9. Visualizzazione dei risultati in ambiente Mac

4. CONCLUSIONI

I più diffusi programmi di simulazione acustica per esterni tendono a diventare sempre più complessi; a volte il loro utilizzo diventa insensato, poiché necessitano di dati in ingresso molto accurati, che nella maggior parte dei casi non sono ottenibili. Così molto spesso può accadere che un modello di simulazione molto complesso e teoricamente molto accurato porti a risultati discutibili, perché l'utilizzatore non ha potuto inserire tutti i dati richiesti, poiché non disponibili. Il caso esaminato dimostra la buona congruenza tra valori sperimentali e valori simulati anche nel caso di utilizzo di modelli "semplificati". E' in corso di sviluppo un nuovo modello di calcolo, che verrà integrato nel sistema RamSuite, vista la necessità di recepire le nuove normative comunitarie:

- NMPB-Routes-96(SETRACERTU-LCPC-CSTB) per il rumore stradale
- Reken-en Meetvoorschrift Railverkeerslawaaai '96, Ministerie Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (20 Novembre 1996) per il rumore ferroviario;
- ISO 9613/2 per il rumore industriale

1 LAE, Laboratorio di Acustica ed Elettroacustica, www.laegroup.org
 2 Ramsete, www.ramsete.com
 3 Aurora, www.aurora-plugins.com