autostrade per l'italia

Mappatura acustica della rete di Autostrade per l'italia

Decreto Legislativo 19 Agosto 2005, N. 194
Attuazione della Direttiva 2002/49/CE relativa alla Determinazione e Gestione del Rumore Ambientale.

RELAZIONE TECNICA

Roma, aprile 2007

progetti e servizi

INDICE

1. Premessa 3
1.1. Scopo del documento 3
1.2. Struttura del documento 4
2. Descrizione del modello NMPB 96 4
2.1. Caratteristiche generali 5
2.2. Modello di propagazione 7
2.2.1. Effetti meteorologici 7
2.2.2. Sorgenti elementari e definizione parametri funzionali 10
2.2.3. Attenuazione per divergenza geometrica 11
2.2.4. Attenuazione atmosferica 11
2.2.5. Attenuazione per effetto del terreno 11
2.2.6. Attenuazione per diffrazione 15
2.3.7. Contributo delle riflessioni 15
2.3. Modello di emissione 16
2.3.1. Categorie veicoli 17
2.3.2. Categorie pavimentazioni e tipologia di infrastruttura 18
2.3.3. Condizioni di traffico 19
2.3.4. Calcolo dell'emissione 20
2.3.5. Modello di sorgente 21

3. Adattamento del modello NMPB 96 22
3.1. Generalità 22
3.2. Aggiornamento banca dati di emissione 22
3.2.1. Stato dell'arte 24
....3.2.3. Misure di statistical pass-by 24

4. Confronto tra modello di calcolo NMPB 96 con diverse banche dati 26
4.1. Set up dei casi di test 26
4.2. Risultati di misura e simulazione 37

5. Conclusioni 38
6. Bibliografia 38

1. Premessa

A seguito della pubblicazione del decreto legislativo n. 194 del 19 agosto 2005 che recepisce la direttiva comunitaria 2000-49-CE , per quanto riguarda i gestori/possessori di "assi stradali principali" sono entrati in vigore i seguenti obblighi:

entro 31/12/06: fornire i dati delle mappe acustiche relativamente alle tratte della propria rete con traffico superiore a 6.000.000 veicoli/anno e che ricadono entro gli agglomerati con popolazione superiore a 250,000 abitanti;

entro 30/06/07: trasmissione,alla regione o alla provincia autonoma competente, della mappatura acustica degli assi stradali principali su cui transitano più di 6.000.000 di veicoli all'anno nonché di alcuni dati statistici inerenti l'esposizione all'inquinamento acustico di persone ed edifici, riferiti al precedente anno solare. Nel caso di infrastrutture principali che interessano più regioni gli stessi enti trasmettono la mappatura acustica ed i dati statistici al Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio ed alle regioni o province autonome competenti;

entro 18/07/08: trasmissione, alla regione od alla provincia autonoma competente, dei piani di azione per gli assi stradali principali su cui transitano più di 6.000.000 di veicoli all'anno tenendo conto dei risultati della mappatura acustica. Nel caso di infrastrutture principali che interessano più regioni gli stessi enti trasmettono i piani d'azione al Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio ed alle regioni o province autonome competenti.

La Commissione Europea ha inoltre emanato linee guida e documenti relativi alle procedure con cui effettuare le mappe acustiche e trasmettere i relativi dati agli enti interessati [(1),(3)].

1.1. Scopo del documento

Nel caso di rumore da traffico stradale il decreto legislativo n. 194 consiglia l'uso della procedura di calcolo "NMPB-Routes-96 (SETRA-CERTU-LCPC-CSTB), riportato in '"Arretè du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routieres, Journal Officiel du 10 mai 1995, article 6" e nella norma XPS 31-133. Per i dati di ingresso concernenti l'emissione, questi documenti fanno capo al documento "Guide du bruit des transports terrestres, fascicule prevision des niveaux sonores" edita dal CETUR nel 1980[(1)].

In considerazione che i dati di input cui la procedura fa riferimento risalgono ad oltre trenta anni fa, la stessa commissione in una successiva raccomandazione[(2)] consiglia una adeguata procedura per adeguare i valori di emissioni alle nuove caratteristiche di veicoli e di pavimentazioni.

Nei successivi paragrafi viene dettagliatamente descritto il metodo consigliato dalla Commissione (ed impiegato da Autostrade per l'italia per realizzare la mappatura acustica) nonché l'approccio adottato per effettuare l'aggiornamento delle banche dati di input.

1.2. Struttura del documento

Il capitolo 2 riporta la descrizione delle caratteristiche del modello NMPB-96, mettendone in evidenza struttura, peculiarità e modalità operative.
Il capitolo 3 riporta la descrizione delle modalità di aggiornamento del modello NMPB-96 adottate da Autostrade per l'italia, evidenziando i motivi per cui si è reso utile l'esecuzione di specifiche campagne di rilievi sperimentali.
Il capitolo 4 riporta le conclusioni.

2. Descrizione del modello NMPB 96

Prima di entrare nel dettaglio degli argomenti, è importante puntualizzare le differenze sussistenti fra il concetto di "modello di calcolo" e "software di calcolo".

Per "*modello di calcolo*" si intende una procedura operativa in cui vengono definiti i criteri secondo cui schematizzare le sorgenti e l'ambiente di propagazione (terreno, vegetazione, edifici, barriere, etc.), calcolare i principali fenomeni fisici della propagazione (diffrazioni e riflessioni) ed individuare i ricettori.
Per "*software di calcolo*" si intende la trasposizione delle suddette procedure in pacchetti di programmi commerciali: a titolo esemplificativo il "modello di calcolo" NMPB-96 è implementato in molteplici "software di calcolo". , come ad esempio Soundplan, Cadna, Predictor, Immi, Lima, Mythra, Sintef, etc.

È anche opportuno evidenziare che non esiste attualmente a livello comunitario o nazionale una procedura legislativa armonizzata utilizzabile per convalidare un "software di calcolo" né quantomeno un "modello di calcolo": le norma tecnica di riferimento per il confronto dei software è la norma DIN 45687, mentre altre indicazioni tecniche metodologiche si possono trovare nelle norme NF 31-130/131/132 e nella norma UNI 11143-1.

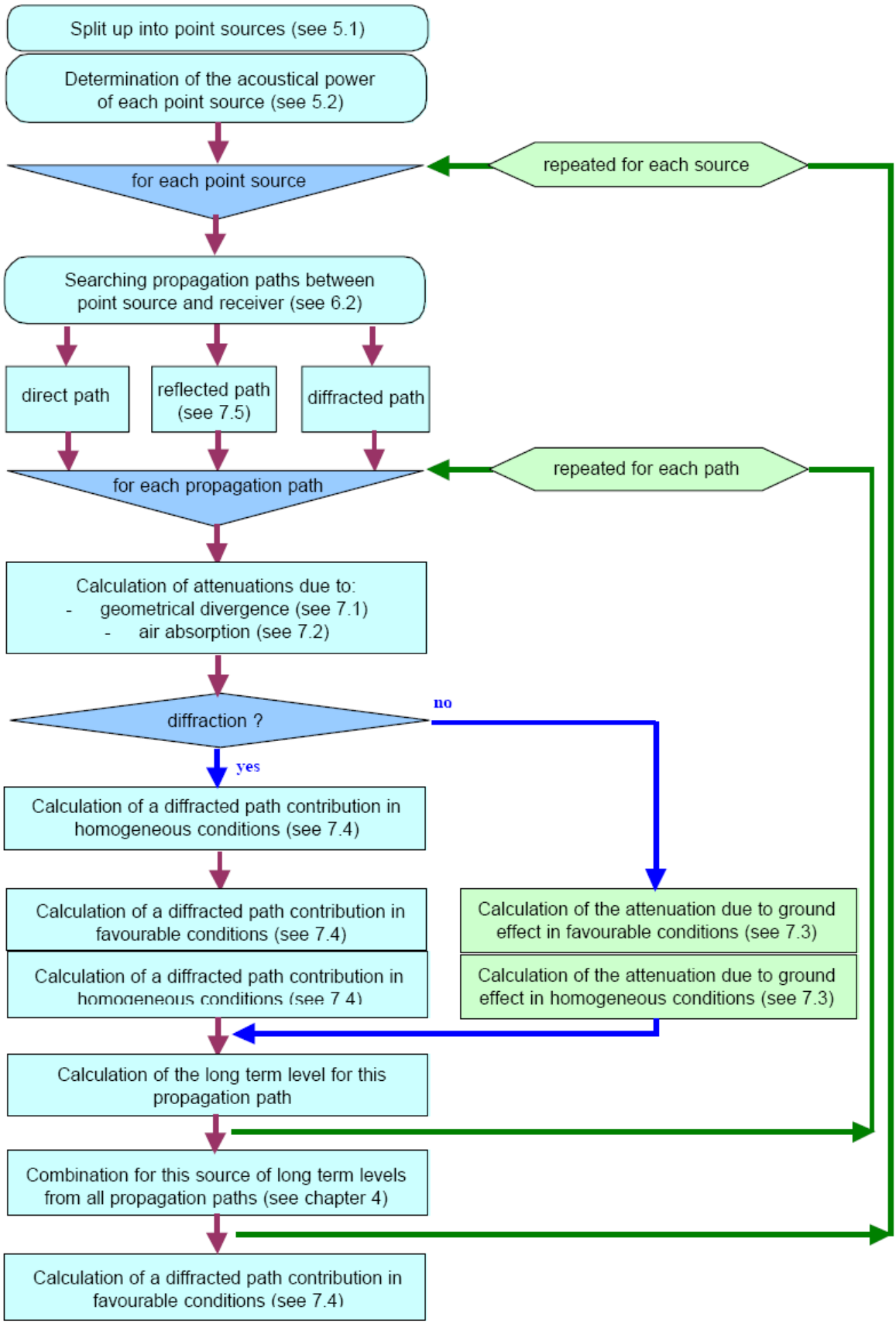
2.1. Caratteristiche generali

Il metodo di calcolo Nmpb-96 costituisce un metodo per la previsione dei livelli acustici a distanze fino a 800 metri dall'infrastruttura stradale, tenendo in considerazione gli effetti meteorologici. NMPB consente il calcolo dei parametri $L_{Aeq(10pm-6am)}$ and $L_{Aeq(6am-10pm)}$, ma può, con opportuni accorgimenti, essere adattato anche per il calcolo del parametro L_{DEN} richiesto dalla direttiva 2000-49-CE.

I calcoli sono effettuati in bande di ottava da 125 Hz a 4 kHz, ed il metodo è basato sulla suddivisione delle linee di traffico in single sorgenti puntiformi.; la procedura prende in considerazione principalmente la propagazione e non fa riferimento a valori di emissione che pertanto devono essere ottenuti da altre fonti (in particolare la direttiva 2000-49-CE fa riferimento alla "Guide du bruit" del 1980). I valori di emissione da prendere in considerazione sono i valori di livelli di potenza sonora in bande di ottava, possibilmente completi di fattori di direttività orizzontale e verticale.
NMPB-96 prende in considerazioni due condizioni meteorologiche, e precisamente l'una omogenea e l'altra favorevole alla propagazione: il risultato del calcolo, ovvero il livello equivalente di lungo termine può essere ottenuto dalla combinazione dei due calcoli, definendo la percentuale di tempo in cui si verificano le condizioni di propagazione di tipo "favorevole".
La procedura di calcolo tiene conto dei seguenti effetti

- divergenza geometrica;
- assorbimento atmosferico;
- effetto terreno, tenendo conto dell'altezza delle sorgenti e dei ricettori;
- calcolo in condizioni meteorologiche omogenee ed in condizioni meteorologiche favorevoli alla propagazione;
- diffrazioni semplice e multiple, mediante calcolo delle differenze fra traiettoria diretta e traiettoria difratta e successiva definizione dell'attenuazione A_{dif};
- riflessione su ostacoli verticali.

Per sorgenti di altezza elevata rispetto al terreno, il modello può essere impiegato per ricettori disposti perpendicolarmente all'infrastruttura stradale ad una distanza massima di 800 m ed ad un'altezza da terra di almeno 2 m; il dominio di validità decresce però nel caso in cui sia la sorgente che il ricettore siano ad altezze inferiori.
La seguente figura mostra il diagramma di flusso funzionale del modello NMPB-96.


Split up into point sources (see 5.1)
Determination of the acoustical power of each point source (see 5.2)
for each point source
repeated for each source
Searching propagation paths between point source and receiver (see 6.2)
direct path
reflected path (see 7.5)
diffracted path
for each propagation path
repeated for each path
Calculation of attenuations due to:
- geometrical divergence (see 7.1)
- air absorption (see 7.2)
diffraction ?
no
yes
Calculation of a diffracted path contribution in homogeneous conditions (see 7.4)
Calculation of a diffracted path contribution in favourable conditions (see 7.4)
Calculation of a diffracted path contribution in homogeneous conditions (see 7.4)
Calculation of the attenuation due to ground effect in favourable conditions (see 7.3)
Calculation of the attenuation due to ground effect in homogeneous conditions (see 7.3)
Calculation of the long term level for this propagation path
Combination for this source of long term levels from all propagation paths (see chapter 4)
Calculation of a diffracted path contribution in favourable conditions (see 7.4)

2.2. Modello di propagazione

2.2.1. Effetti meteorologici

Data anche la configurazione del territorio ed il grado di urbanizzazione della Francia, la procedura NMPB-96 tiene in particolare considerazione gli effetti meteorologi, soprattutto per ricettori posti a distanza maggiore di 250 m dall'infrastruttura stradale.

La "sorgente strada" viene rappresentata come una sorgente lineare, successivamente ricondotta ad una serie di sorgenti puntiformi distribuite con criteri predefiniti lungo una serie di linee emettitrici; l'attenuazione durante la propagazione fra una sorgenti puntiformi ed i ricevitori è stimata attraverso la somma di termini rappresentativi della divergenza sferica, dell'assorbimento dell'aria, dell'effetto terreno, della diffrazione su ostacoli e della riflessione su elementi verticali. Tutte questi termini sono calcolati per due condizioni meteorologiche, e precisamente la condizione favorevole alla propagazione, a cui corrisponde il livello L_F e la condizione omogenea, a cui corrisponde il livello L_H.

Il livello di lungo termine ponderato A, L_{LT}, è quindi stimato dalla relazione

$$L_{LT} = 10 \log[p \times 10^{LF/10} + (1 - p) \times 10^{LH/10}] \qquad [1]$$

dove:

p è la percentuale di tempo (espressa con valori fra 0 e 1) in cui si verificano condizioni favorevoli alla propagazione. In altri termini, per determinare le condizioni di "livelli di lungo termine", il metodo NMPB non prende in esame le condizioni meteorologiche statistiche peculiari del sito, ma sostituisce le "condizioni sfavorevoli alla propagazione" con le "condizioni omogenee", e pertanto perviene ad una "sovrastima" dei reali livelli di inquinamento acustico.

La percentuale di tempo in cui occorrono le condizioni favorevoli (espressa nel metodo come percentuale **p**), può essere valutata qualitativamente con il metodo di Zouboff, il quale si basa sulla seguente matrice a doppia griglia che richiede semplici informazioni meteorologiche relative ad $\mathbf{U_i}$ ovvero scelta di una delle 5 classi di vento) e$\mathbf{T_i}$, ovvero scelta di 5 classi termiche, di cui 3 diurne e due notturne).

I valori di probabile occorrenza **p** sono stati calcolati in Francia (e quindi sono strettamente validi in quel territorio), in 40 diverse stazioni meteorologiche, sia nel periodo diurno (06.00-22.00) che in quello notturno (22.00-06.00), con direzioni fra sorgente e ricettore variabili a step di 20°; i risultati corrispondono all'integrazione di almeno 10 anni di dati meteorologici.

La norma prevede anche la possibilità di effettuare nei singoli siti di interesse rilevazioni e successive analisi statistiche delle condizioni meteorologiche (cosa evidentemente incompatibile con una mappatura di oltre 2800 km di rete di Autostrade per l'italia). La stessa norma consente, nel caso che un territorio non disponga di dati, di adottare valori di default, ad esempio **p = 0,5** nel periodo notturno (100% di occorrenza di condizioni favorevoli) e **p = 0.25** nel periodo diurno (50% di occorrenza di condizioni favorevoli), secondo quanto consigliato dal Ministero per l'Ambiente e dal WGAEN[(3)].

A titolo di completezza, si riporta comunque la tabella di Zouboff, rimandando i dettagli a quanto riportato nella norma NS 31-133. (le zone grigie nel diagramma corrispondono a situazioni meteorologiche "impossibili" o "estremamente poco probabili").

	U1	U2	U3	U4	U5
T1		- -	-	-	
T2	- -	-	-	Z	+
T3	-	-	Z	+	+
T4	-	Z	+	+	+ +
T5		+	+	+ +	

Legenda
- attenuazione normale (raggi curvi in l'alto)
- - attenuazione forte(raggi verso l'alto)
Z effetti meteorologici nulli (raggi rettilinei)
+ moderata amplificazione (raggi curvi in basso)
+ + forte amplificazione (raggi curvi in basso)

U_1:vento forte (3 to 5 m/s) opposto alla direzione di propagazione

U_2: vento debole o moderato (1 to 3 m/s)opposto o forte vento in direzione non opposta

U_3: vento nullo o vento trasversale

U_4: vento moderato nella direzione della propagazione o vento forte a 45°

U_5: vento forte

T_1: periodo diurno con forte radiazione solare e superfici asciutte e non troppo vento

T_2: stese condizioni di T_1 , ma con una delle condizioni di T1 non realizata

T_3:alba o tramonto o (tempo nuvoloso con vento e superfici non troppo umide)

T_4: periodo notturno con nuvole o vento

T_5: periodo notturno con cielo sereno e vento debole.

È importante sottolineare, come evidenziato nel diagramma funzionale sopra riportato, che il calcolo degli effetti meteorologici và effettuato per bande di ottava e per tutte le direzioni congiungenti sorgente e ricettore.

Viene qui di seguito descritto in dettaglio come deve essere effettuato il calcolo relativamente all"intervallo di tempo preso in esame (un anno, secondo la Direttiva 2000-49-CE):

1. decomposizione delle sorgenti di rumore in sorgenti elementari puntuali
2. determinazione del livello di potenza sonora per ciascuna sorgente, in bande di ottava
3. ricerca delle traiettorie di propagazione da ciascuna sorgente a ciascun ricettore (diretta, di fratta e riflessa) ;
4. su ciascuna traiettoria di propagazione, calcolare per ogni banda di ottava:
   - l'attenuazione in condizioni favorevoli;
   - l'attenuazione in condizioni omogenee;

5. il livello di lungo termine, tenendo conto dell'occorrenza di condizioni favorevoli ed omogenee;
6. somma dei diversi contributi di lungo termine di tutte le traiettorie per calcolare il livello globale di lungo termine per bande di ottava;
7. calcolo del livello sonoro globale di lungo termine ponderato A.

Per una sorgente sonora puntuale Si di potenza L_{Awi}, e per ciascuna banda di ottava considerata,il livello globale di lungo termine presso un ricettore R per determinate condizioni atmosferiche è dato da

1. Calcolo livello sonoro in condizioni favorevoli per la traiettoria (Si, R)

$$\mathbf{L_{Ai,\,F} = L_{Awi} - A_{i,F}} \qquad [2]$$

Il termine Ai,F rappresenta l'insieme delle attenuazioni lungo il percorso di propagazione e si compone dei seguenti termini in condizioni di propagazione favorevole:

$$\mathbf{A_{i,F} = A_{div} + A_{atm} + A_{sol,F} + A_{dif,F}} \qquad [3]$$

dove

$\mathbf{A_{div}}$ è l'attenuazione per divergenza geometrica

$\mathbf{A_{atm}}$ è l'attenuazione per assorbimento atmosferico

$\mathbf{A_{sol,F}}$ è l'attenuaione per effetto del terreno

$\mathbf{A_{dif,F}}$ è l'attenuazione dovuta lla diffrazione

2. Calcolo livello sonoro in condizioni omogenee per la traiettoria (Si, R)

$$\mathbf{L_{Ai,H} = L_{Awi} + D_{hi} + D_{vi} - A_{i,}} \qquad [4]$$

dove i termini hanno il medesimo significato del punto precedente, ma iferiti alle condizioni omogenee.

3. calcolo livello sonoro di lungo termine per la traiettoria (Si, R)

Il livello sonoro dovuto alla singola sorgente puntuale è dato dalla somma energetica dei livelli in due condizioni omogenea e favorevole, ponderata con il fattore p di occorrenza relativo alla traiettoria (Si, R)

4. Calcolo lLivello sonoro di lungo termine al punto R per tutte le traiettorie di propagazione

Il livello sonoro al ricettore per la banda di ottava j è ottenuto per somma dei contributi sonori dell'insieme dell'insieme delle sorgente sonore puntuali e delle loro eventuali sorgenti immagine

$$L_{Aeq,LT}(j) = 10\,\lg\left[\sum_{i} 10^{0,1 L_{Ai,LT}(j)} + \sum_{i'} 10^{0,1 L_{Ai',LT}(j)}\right] \qquad [5]$$

dove **i** rappresenta l'insieme delle sorgenti puntuali e **i'** l'insieme delle sorgenti immagine corrispondenti a delle riflessioni su ostacoli verticali.

2.2.2. Decomposizione in sorgenti elementari e definizione dei parametri funzionali

Il primo step è la divisione geometrica dell'infrastruttura in "archi elementari" su cui l'emissione sonora del traffico non varia ed ha caratteristiche omogenee riguardo alla tipologia costruttiva e funzionale (pendenza, numero corsie, larghezza della piattaforma). Ciascun arco elementare è modellizzato con un numero variabile di "linee emettitrici" , posizionando in genere una linea su ciascuna corsia.

Successivamente ciascun arco è decomposto in un insieme di sorgenti puntuali elementari, rispettando il criterio base che la distanza fra due punti non può essere superiore alla metà della distanza ortogonale fra ricettore e sorgente puntuale ad esso più vicina. A ciascuna sorgente puntuale identificata viene assegnato un livello di potenza sonora in dB(A) per ciascuna banda di ottava i dato dalla formula:

$$\mathbf{L_{Awi} = L_{Aw/m} + 10 \log (li)} \qquad [6]$$

dove:

$\mathbf{L_{Aw/m}}$ è il livello di potenza sonora/metro della linea di sorgenti di rumore in dB(A),per banda di ottava

li è la lunghezza (in metri) della porzione di arco relativa alla sorgente puntiforme **i** .

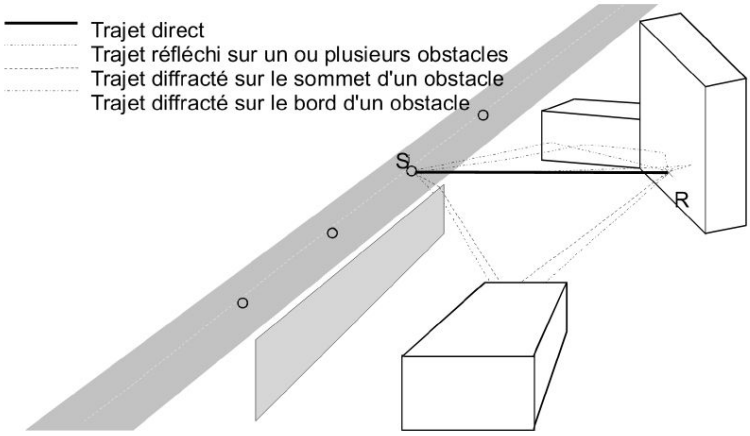
I valori di $\mathbf{L_{Aw/m}}$ sono determinati secondo la norma NS 31-130, che sostanzialmente richiama la "Guide du Bruit des Transports Terrestres — Fascicule «Prévision desniveaux sonores» (1980)"

L'altezza delle singole sorgenti è fissata a 0.5 m dal suolo, e le sorgenti sono considerate omnidireionali; i ricettori devono essere posti ad un'altezza dal suolo di almeno 2 m e a 2 metri di distanza dalla facciata.

Il metodo si basa sulla determinazione delle traiettorie di propagazione rettilinee fra sorgente e ricettore, e può essere applicato sia rigorosamente in 3 dimensioni o, preferibilmente, in "pseudo 3D" ovvero in 2D½, in modo da semplificare il problema della propagazione, riducendo le 3 dimensioni ad un insieme di problematiche elementari a 2 dimensioni; in pratica l'infrastruttura è scomposta in archi elementari e le propagazioni (dirette, riflesse e difratte) fra ciascuna sorgente ed il punto di ricezione sono ricercate solo sulla proiezione sul piano orizzontale. Per ciascuna traiettoria, il calcolo dell'attenuazione dovuta alla propagazione si esegue successivamente sul piano verticale contenete la traiettoria di propagazione.

Se per una coppia sorgente/ricettore esistono numerosi percorsi di propagazione (vedi figura seguente), si prendono in esame esclusivamente gli ostacoli verticali.

Non si considerano riflessioni sul suolo,in quanto questo fenomeno è trattato separatamente.



2.2.3. Divergenza geometrica

L'attenuazione causata dalla divergenza geometrica prende in considerazione la riduzione del livello sonoro dovuto alla distanza di propagazione. Per una sorgente puntuale in campo libero, l'attenuazione in decibel per ciascuna banda di ottava è data da:

$$\mathbf{A_{div} = 10 \log(4\pi d^2) = 20 \log(d) + 11} \qquad [7]$$

dove:

d è la distanza diretta fra sorgente e ricettore (in assenza di ostacoli) , espressa in metri.

2.2.4. Assorbimento atmosferico

L'attenuazione dovuta all'assorbimento atmosferico, A_{atm}, (in decibel)s), lungo una percorso di propagazione di lunghezza d è fornito dalla formula

$$\mathbf{A_{atm} = \alpha d / 1\,000} \qquad [8]$$

dove **d** è la distanza tra sorgente e ricettore ed α è il coefficiente di attenuazione atmosferica (dB/km), ricavabile per banda di ottava dalla seguente tabella, valida per T=15 °C ed umidità relativa del 70 %.

Frequenza centrale (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α (in dB/km)	0.38	1.13	2.36	4.08	8.75	26.4

2.2.5. Effetto del suolo

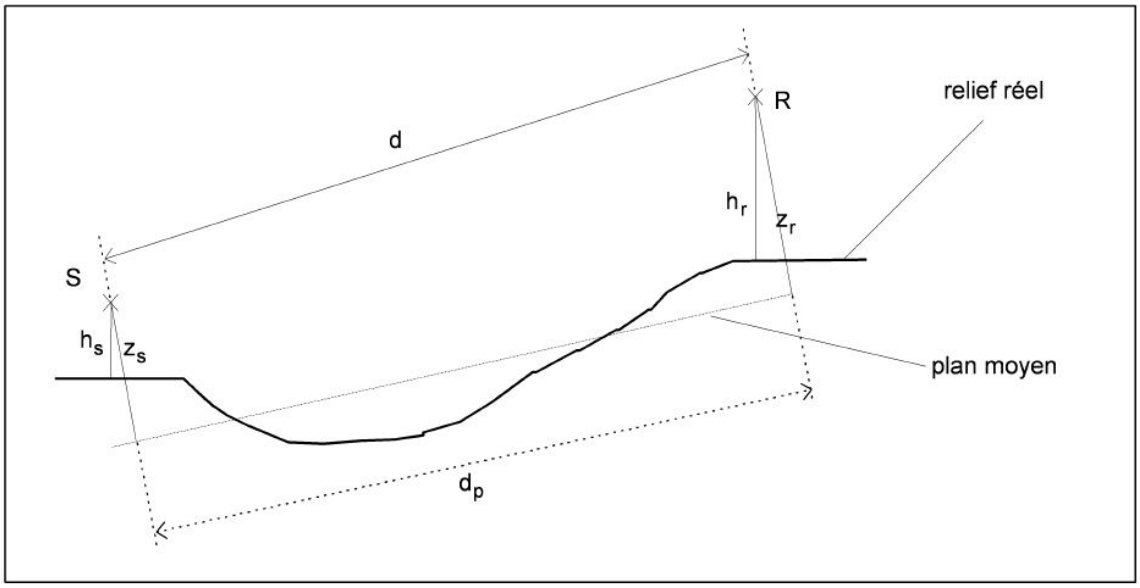
L'attenuazione dovuta all'effetto del suolo è principalmente il risultato dell'interferenza fra il suono riflesso dalla superficie del suolo ed il suono che si propaga direttamente dalla sorgente verso il ricettore. Tale fenomeno è funzione sia delle caratteristiche del terreno sia delle condizioni meteorologiche che modificano la curvatura dei raggi sonori (verso l'alto o il basso): pertanto anche per l'effetto suolo, vengono distinte due tipologie di calcolo,l'una per le condizioni omogenee e l'altra per le condizioni favorevoli di propagazione.

Ai fini del calcolo, l'assorbimento del suolo è rappresentato da un coefficiente G, adimensionale, compreso fra 1 e 0, attribuendo il valore 0 ad un terreno riflettente ed il valore 1 ad un terreno assorbente, mentre può assumere valori intermedi in caso di propagazione lungo suoli di diversa natura.

Tipo di suolo	G (adimensionale)
Suolo assorbente (erba, prato, ballast, etc.)	**1**
Suolo riflettente (rivestimento stradale, asfalto, ecc.)	**0**

Per prendere in opportuna considerazione la realtà del profilo del terreno lungo la di propagazione, le formule di calcolo dell'effetto suolo utilizzano,in luogo delle altezze reali della sorgente e del ricettore (indicate con **h**) la loro altezza equivalente al di sopra del "piano medio del suolo".(indicata con **z**).

In altri termini le altezze equivalenti si ottengono a partire dal profilo reale del terreno e sostituendolo con un piano fittizio rappresentante il profilo medio del terreno, come esemplificato in figura.



L'altezza equivalente, **z** , di un punto è quindi la sua altezza ortogonale a tale piano medio.

Se l'altezza equivalente di un punto assume valori negativi (ovvero se il punto è situato al di sotto del piano medio), la sua altezza equivalente viene posta pari a zero, ed in tal caso il punto coincide con il suo eventuale punto immagine.

Nel caso di condizioni di propagazione favorevole, il calcolo è effettuato in modo separato per le porzioni di suolo nei pressi della sorgente, nel percorso fra sorgente e ricettore e nella zona presso il ricettore, definite rispettivamente zona della sorgente, zona intermedia e zona del ricettore.

Nel caso di condizioni favorevoli, i raggi sonori sono incurvati verso il suolo, e i conseguenza l'effetto suolo è essenzialmente condizionato dalla natura del terreno posta nelle vicinanze della sorgente e del ricettore.; solo per grandi distanze le traiettorie di propagazione possono avere dei "rimbalzi" sul terreno situato fra sorgente e ricettore: in tal caso occorre tener conto anche di questi fenomeni.

Pertanto nel caso di condizioni favorevoli il calcolo và effettuato separatamente sulla zona in vicinanza della sorgente, sulla zona intermedia e sulla zona in vicinanza del ricettore.

Ciascuna di tali zone può essere caratterizzata da un coefficiente del suolo G diverso, definiti rispettivamente G_s, G_m et G_r. Normalmente si possono considerare anche due soli fattori di terreno, ovvero un coefficiente Gs nella regione della sorgente ed un coefficiente Gtraiettoria corrispondente alle caratteristiche medie del suolo sull'insieme del percorso di propagazione, ovvero applicato alla zona intermedia ed alla zona del ricettore ($G_m = G_r = Gt_{raiettoria}$).

Per quanto riguarda le strutture stradali di tipo riflettente G può essere posto = 0 tenendo conto del rivestimento della piattaforma stradale e della piccola altezza della sorgente rispetto al suolo.

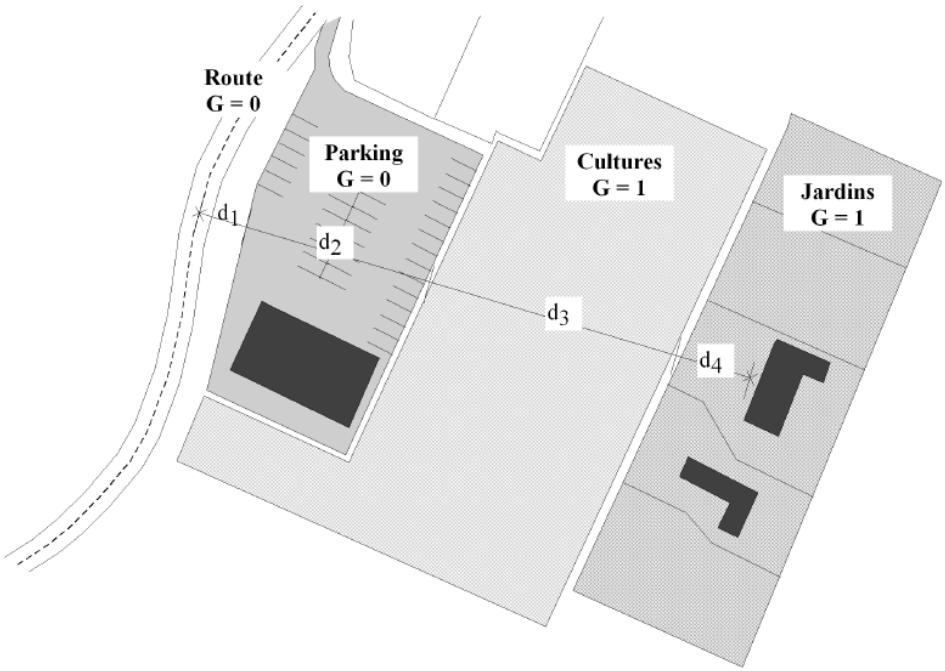
Per il calcolo dell'effetto suolo nelle zone intermedie e del ricettore, si assume il coefficiente $G_{traiettoria}$ pari alla frazione del suolo assorbente situato sull'insieme del percorso di propagazione.

Tuttavia, quando la sorgente ed il ricettore sono vicini, ovvero quando indicativamente $\leq 30(z_s + z_r)$, la distinzione fra le tipologie di terreno preso la sorgente ed il ricettore perdono di significato. Sinteticamente si possono adottare le seguenti regole:

Il fattore di suolo $G_{traiettoria}$ si può calcolare (vedi figura seguente) dalle seguenti formule:

Se $d_p > 30(z_s + z_r)$: $G'_{traiettoria} = G_{traiettoria}$

Se $d_p \leq 30(z_s + z_r)$: $G'_{traietoria} = [G_{traiettoria}\, d_p/30(z_s + z_r)] + [G_s\,(1- d_p/30(z_s+z_r)]$



$d_1 + d_2 + d_3 + d_4 = d$ (distance directe de propagation)

$G_{trajet} = (0.d_1 + 0.d_2 + 1.d_3 + 1.d_4)/d = \mathbf{(d_3+d_4)/d}$

L'attenuazione dovuta all'effetto del suolo in condizioni favorevoli sull'insieme del percorso di propagazione è quindi dato da :

$$\mathbf{A_{sol,F} = A_{s,F} + A_{m,F} + A_{r,F}} \qquad [9]$$

dove :

$A_{s,F}$, $A_{m,F}$, $A_{r,F}$ sono rispettivamente le attenuazioni dovute all'effetto suolo presso la sorgente, in zona intermedia e press il ricettore, calcolati secondo le formule riportate nella seguente tabella:

Fréquence centrale nominale (en Hz)	$A_{s,F}$ ou $A_{r,F}$ (en dB)	$A_{m,F}$ (en dB)
125	$-1{,}5 + G\,a'(z)$	$-3\,q\,(1-G)$
250	$-1{,}5 + G\,b'(z)$	
500	$-1{,}5 + G\,c'(z)$	
1 000	$-1{,}5 + G\,d'(z)$	
2 000	$-1{,}5\,(1-G)$	
4 000	$-1{,}5\,(1-G)$	

où :

$$a'(z) = 1{,}5 + 3{,}0e^{-0{,}12(z-5)^2}\left(1 - e^{-d_p/50}\right) + 5{,}7e^{-0{,}09\,z^2}\left(1 - e^{-2{,}8\times 10^{-6} d_p^2}\right)$$

$$b'(z) = 1{,}5 + 8{,}6e^{-0{,}09\,z^2}\left(1 - e^{-d_p/50}\right)$$

$$c'(z) = 1{,}5 + 14{,}0e^{-0{,}46\,z^2}\left(1 - e^{-d_p/50}\right)$$

$$d'(z) = 1{,}5 + 5{,}0e^{-0{,}9\,z^2}\left(1 - e^{-d_p/50}\right)$$

$q = 0$ si $d_p \le 30\,(z_s + z_r)$

$q = 1 - 30\,(z_s + z_r)/d_p$ si $d_p > 30\,(z_s + z_r)$

(Per $A_{s,F}$ porre $z = z_s$ e $G = G_s$; per $A_{r,F}$ porre $z = z_r$ e $G = G'_{traiettoria}$; per $A_{m,F}$ porre $G = G'_{traiettoria}$)

Per il calcolo in condizioni omogenee, ovvero quando le traiettorie di propagazione sono rettilinee, non è necessario distinguere le zone sorgente, intermedia e ricettore: si considera pertanto un unico coefficiente di suolo $G_{traiettoria}$ jet per l'isieme dei percorsi dii propagazione, di valore identico a quello utilizzato per il calcolo in condizioni favorevoli.

L'attenuazione per effetto suolo in condizioni omogenee si calcola quindi con le seguenti formule:

$$A_{sol,H} = -10\,\lg\left[4\frac{k^2}{d_p^2}\left(z_s^2 - \sqrt{\frac{2C_f}{k}}z_s + \frac{C_f}{k}\right)\left(z_r^2 - \sqrt{\frac{2C_f}{k}}z_r + \frac{C_f}{k}\right)\right] \ge -3\left(1 - G'_{trajet}\right) \qquad [10]$$

dove:

$k = 2\pi f_c/c$, con f_c frequenza centrale di banda di ottava e c è la velocità del suono nell'aria

$Cf = d_p\ 1 + \dfrac{3wd_p e^{-(wdp)0{,}5}}{1 + wd_p}$ dove w è dato in funzione della frequenza f_c e di $G_{traiettoria}$ dalla formula

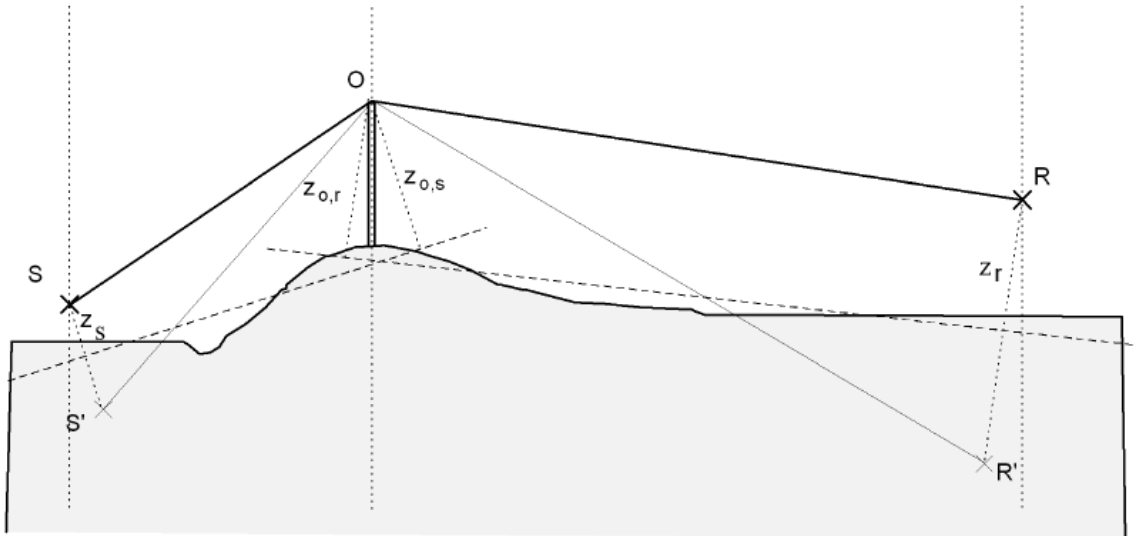
$W = 0{,}0185\ \ (f_c^{2,5}\,G^{2.6}_{traiettoria})/\ f_c^{1,5}\,G^{2.6}_{traiettoria} + 1.3 \times 10^3 f_c^{0.75} G^{1.3}_{traiettoria} + 1.16 \times 10^6$

2.2.6. Diffrazione

Possono essere presi in considerazione effetti di diffrazione semplice o multipla, $\mathbf{A_{diff}}$ **,** su schermi sottili e spessi, su edifici, su rilevati sia naturali che artificiali ed anche sui bordi di trincee e viadotti (vale comunque la regola che si considerano solo ostacoli di altezza minima pari a 2metri).

Il primo passo è la verifica, fatta per ogni banda di ottava, se realmente un ostacolo determina un effetto di diffrazione, fatta calcolando la differenza di percorso Δ sulla traiettoria sorgente-ricettore: se la traiettoria passa "sufficientemente in alto" al di sopra del bordo di diffrazione, non occorre calcolare l'attenuazione per diffrazione e la sorgente ed il ricettore vengono considerati in "vista diretta" (non schermati)., ponendo il termine A_{diff} uguale a 0 db(A).

Nel caso contrario, viene calcolato il termine $\mathbf{A_{diff}}$ secondo quanto qui seguito definito ed esemplificato dalla seguente figura.



Legenda

S = Sorgente

R = Ricettore

S' = Sorgente immagine in relazione al piano medio del suolo, "lato sorgente"

R' = Ricettore immagine in relazione al piano medio del suolo, "lato ricettore"

O = punto di diffrazione

$\mathbf{z_s}$ = Altezza equivalente della sorgente in rapporto al piano medio del suolo, "lato sorgente"

$\mathbf{z_{o,s}}$ = Altezza equivalente del punto di diffrazione O in rapporto al piano medio del suolo, "lato sorgente

$\mathbf{z_r}$ = Altezza equivalente del ricettore R in relazione al piano medio del suolo, "lato ricettore"

$\mathbf{z_{o,r}}$ = altezza equivalente del punto di diffrazione O in rapporto al piano del suolo, "lato ricettore"

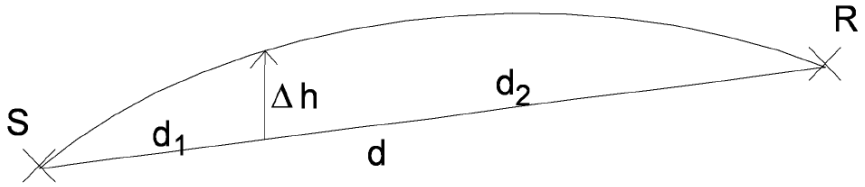
Il metodo si basa sulla decomposizione del percorso di propagazione in due parti, e precisamente il "lato sorgente", situato fra la sorgente ed il punto di diffrazione, ed il "lato ricettore" situato tra bordo di diffrazione e ricettore. La procedura seguita è la seguente:

- determinazione del piano del suolo medio fra sorgente ed ostacolo e successivamente fra ostacolo e ricettore;
- creazione della sorgente immagine S' in rapporto al piano medio del "lato sorgente";
- creazione del ricettore immagine R' in rapporto al piano medio del "lato ricettore";
- calcolo della differenza di percorso δ per ciascuna traiettoria SR, S'R e SR';
- calcolo dell'attenuazione per diffrazione Δ_{diff} per ciascuna delle traiettorie SR, S'R e SR';
- calcolo dell'attenuazione dovuta dall'effetto suolo dal lato sorgente $\Delta_{sol(S,O)}$ e lato ricettore $\Delta_{sol(O,R)}$
- calcolo dell'attenuazione A_{diff} dovuta alla diffrazione, prendendo in conto l'effetto suolo sia dal lato sorgente che dal lato ricettore.

La differenza di percorso δ è calcolata sul piano verticale (anche se ciò rappresenta un'approssimazione) contenente la sorgente ed il ricettore.

Nel caso di propagazione in condizioni omogenee il calcolo di δ viene effettuato in modo tradizionale, considerando una propagazione rettilinea; viceversa nel caso di condizioni favorevoli, l'effetto della curvatura dei raggi sonori, viene simulato spostando verso l'alto il punto della traiettoria diretta situata a destra dl bordo di diffrazione , di una quantità Δ_h data dalla seguente formula (vedi figura seguente)

$$\mathbf{\Delta_h = d1d2/2\gamma} \qquad [9]$$



dove **γ** è il raggio di curvatura in metri. **γ** è assunto pari a 8d, dove d è la distanza diretta di propagazione, ed in ogni caso **γ** non può essere inferiore a 1.000 m (se **γ** < 1000 m si pone **γ** = 1000m).

Per determinare se esiste un apprezzabile effetto di attenuazione per diffrazione, la differenza di percorso **δ** sulla traiettoria SR è paragonata per ciascuna banda d'ottava alla quantità **λ**/20 dove **λ** è la frequenza centrale i centro banda: se la differenza di percorso δ è inferiore a λ/20 si tralascia di calcolare l'effetto di diffrazione e la sorgente ed il ricettore sono considerati in "vista diretta".

Il calcolo della diffrazione si effettua secondo le seguenti formule:

se (40/ λ)C" δ ·≥ -2 $\qquad \mathbf{\Delta_{diff} = 10log[3+(40/\lambda)C''\delta]}$

se (40/ λ)C" δ ≤ -2 $\qquad \mathbf{\Delta_{diff} = 0}$

dove

C' è un coefficiente che tiene conto delle diffrazioni semplici e multiple, assumendo i seguenti valori

per le diffrazioni semplici **C'' =1**

per le diffrazioni multiple **C'' = $[1+(5\lambda/e)^2]/[1/3 + (5\lambda/e)^2]$**

dove e rappresenta la distanza totale fra le diffrazioni estreme, come esemplificato nella seguente figura.

Valgono i seguenti criteri generali:

- se $\Delta_{diff} < 0$ si assume $\Delta_{diff} = 0$
- se $\Delta_{diff} > 25$ si assume $\Delta_{diff} = 25$
- sulle diffrazioni su bordi verticali non esistono limiti

Per quanto riguarda il calcolo $\Delta_{sol(S,O)}$ si usa la formula seguente:

$$\Delta_{sol(S,O)} = -20\log[1+(10^{-\Delta sol(S,O)/20} -1)10^{-(\Delta diff(S,R') - \Delta diff(s,r)/20}] \qquad [11]$$

dove

$\mathbf{A_{sol(O,R)}}$ è l'attenuazione dovuta all'effetto del suolo fra il bordo di diffrazione O ed il ricettore R, calcolato secondo le condizioni favorevoli o nelle condizioni omogenee, con le seguenti ipotesi:

$$z_s = z_{o,r}$$

$$d = OR$$

in condizioni favorevoli :$G_s = G_m = G_r = G_{traiettoria}$ calcolato fra O ed R

in condizioni omogenee : $G = G_{traiettoria}$ calcolato fra O ed R

$\Delta_{dif(S,R')}$ è l'attenuazione dovuta alla diffrazione fra S ed il ricettore immagine R'

$\Delta_{dif(S,R)}$ e l'attenuazione dovuta alla diffrazione fra S e R,

L'attenuazione dovuta alla diffrazione , prendendo in esame tutti gli effetti relativi al lato sorgente ed al lato ricettore, sono infine calcolati con la formula:

$$A_{diff} = \Delta_{dif(S,R)} + \Delta_{sol\,(S,O)} + \Delta_{sol\,(O,R)} \qquad [12]$$

dove :

$\mathbf{\Delta_{dif\,(S,R)}}$ è l'attenuazione per diffrazione fra la sorgente S ed il ricettore R;

$\mathbf{\Delta_{sol\,(S,O)}}$ è l'attenuazione per effetto suolo, calcolata relativamente alla diffrazione lato sorgente;

$\mathbf{\Delta_{sol\,(O,R)}}$ è l'attenuazione per effetto suolo, calcolata relativamente alla diffrazione lato ricettore.

d = SO

2.2.7. Riflessioni sugli ostacoli verticali

Le riflessioni sugli ostacoli verticali (barriere antirumore, facciate degli edifici, trincee, muri, etc.) sono trattate con la teoria delle sorgenti immagine. Vengono assimilati ad ostacoli artificiali anche tutte le superfici con un'inclinazione fino a 15°.

Per tener conto di ostacoli inclinati o di forme complesse, occorre sviluppare un metodo di maggior dettaglio, in tridimensionale.

Nel calcolo delle riflessioni si possono trascurare tutti gli ostacoli le cui dimensioni sono piccole rispetto alla lunghezza d'onda della banda d'ottava considerata.

Le riflessioni sul suolo non vengono prese in considerazione, in quanto il loro effetto è integrato direttamente nel calcolo dell'effetto del terreno (vedi paragrafo 2.2.5.)

Se L_w è il livello di potenza sonora della sorgente S e α_r il coefficiente di assorbimento della superficie su cui avviene la riflessione, il livello di potenza sonora della sorgente immagine S' è dato dalla formula:

$$\mathbf{L_{w'} = L_w + 10\ lg(1 - \alpha_r)} \qquad \mathbf{con\ 0<\alpha_r<1}$$

Alle traiettorie riflesse si applicano tutti I criteri validi per le traiettorie dirette o difratte.

2.3. Modello di emissione

Quanto finora trattato, si riferisce alla sola schematizzazione dei fenomeni inerenti la propagazione del rumore dalla sorgente al ricettore.

È comunque da tener presente che alcune linee guida sviluppate su finanziamento della DG Ambiente, sconsigliano l'uso delle correzioni meteorologiche in ambienti densamente edificati (come ad esempio gli agglomerati) e soltanto in terreni piatti e non collinari/montuosi come ad esempio l'Italia.

Per quanto riguarda il calcolo di livelli di potenza sonora delle singole sorgenti, come già precedentemente riportato, il modello NMPB-96 e la norma NS 13-133, in mancanza di dati più attendibili, rimandano a quanto riportato nella"Guide du bruit des transports terrestres, fascicule prevision des niveaux sonores" edita dal CETUR nel 1980.

Qui di seguito si riportano i punti salienti d tale documento CETUR.

2.3.1. Categorie veicoli

Vengono distinte due tipologie di veicoli, e precisamente

Veicoli leggeri = ovvero veicoli con un peso totale a terra (P.T.T.) inferiore a 2.5 ton

Veicoli pesanti = ovvero veicoli con un peso totale a terra (P.T.T.) superiore a 3.5 ton

2.3.2. Categorie pavimentazioni e tipologia di infrastruttura stradale

La "Guide du bruit" non fa riferimento ad un particolare tipo di pavimentazione: in considerazione del periodo in cui sono stati ricavati i dati, è presumibile che tutti i dati siano relativi ad un mix di pavimentazioni (in bitume e cemento), ma non su pavimentazioni fonoassorbenti o a basa emissione di rumore (nel 1977 in Francia non erano ancora in uso pavimentazioni drenanti/fonoassorbenti, pavimentazioni ecodrenanti o ecotecniche, etc.).

Per quanto riguarda la tipologia di infrastruttura stradale, la "Guide du bruit" si riferisce a tre profili longitudinali, e precisamente:

- carreggiata orizzontale o carreggiata il cui gradiente nel senso del flusso del traffico è inferiore al 2%;
- carreggiata in salita, dove il gradiente in direzione del flusso del traffico è superiore al 2%;
- carreggiata in discesa, dove il gradiente in direzione del traffico è superiore a -2%.

Nel caso di infrastrutture a doppia carreggiata, si applicano i suddetti criteri a ciascuna carreggiata.

2.3.3. Condizioni di traffico

Vengono distinte quattro diverse tipologie di flussi di traffico, e precisamente

- *Flusso continuo fluido*

Questa situazione si realizza quando i veicoli si muovono sulla tratta in esame a velocità quasi costante, senza accelerazioni o decelerazioni; si considera "fluido" se il flusso è stabile nello spazio e per un tempo di almeno dieci minuti. Questa tipologia di traffico è quella tipica di un'autostrada, una strada a scorrimento veloce, strade interurbane di collegamento, strade urbane principali (al di fuori delle ore di punta).

- *Flusso continuo pulsante*

Tale condizione è caratterizzata da una "turbolenza di tipo fluidodinamico" : un flusso turbolento consiste in una sensibile percentuale di veicoli in condizioni di accelerazione o decelerazione, e non è stabile nel tempo (ovvero avvengono improvvise variazioni di flusso in brevi intervalli di tempo) come anche nello spazio (in ogni momento si possono verificare concentrazioni irregolari di veicoli nel tratto stradale in esame). Comunque è possibile definire una velocità media globale, come un valore stabile e ripetitivo per un periodo di tempo sufficientemente lungo.

Questo tipo di flusso è caratteristico delle strade del centro città, sulle principali arterie in condizioni di "quasi saturazione", in strade con numerosi accessi od incroci, in parcheggi ed in prossimità di attraversamenti pedonali.

- *Flusso pulsante accelerato*

In tali condizioni una significativa percentuale di veicoli si muove in accelerazione, e pertanto il concetto di velocità ha significato solo su brevi tratti di strada e non è mai stabile. Questa situazione è tipica di una strada di scorrimento veloce dopo un incrocio o in ingresso ad un'autostrada.

- *Flusso pulsante decelerato*

Questa condizione, esattamente opposta alla precedente, si concretizza in genere in avvicinamento ad un incrocio principale o in uscita da un'autostrada, quando gran parte dei Veicoli sono in decelerazione.

2.3.4. Calcolo dell'emissione

La Guide du bruit des Transports Terrestres "Prevision des niveaux sonorres" del CETUR non fornisce i valori di potenza dei diversi veicoli nelle varie condizioni di impiego e sulle diverse tipologie di pavimentazioni/infrastruttura, ma ricorre al concetto di "isofona di riferimento" .

Relativamente a tale isofona, viene calcolata l'emissione sonora **E**, ovvero il livello equivalente sul periodo di un'ora, dovuto al transito di un singolo veicolo su un punto situato a 30 metri dal bordo della sede stradale e a 10 metri di altezza, in assenza di ostacoli ed in presenza di un suolo riflettente, nelle ipotesi di strada rettilinea. Il valore dell'emissione E è fornito dalla formula:

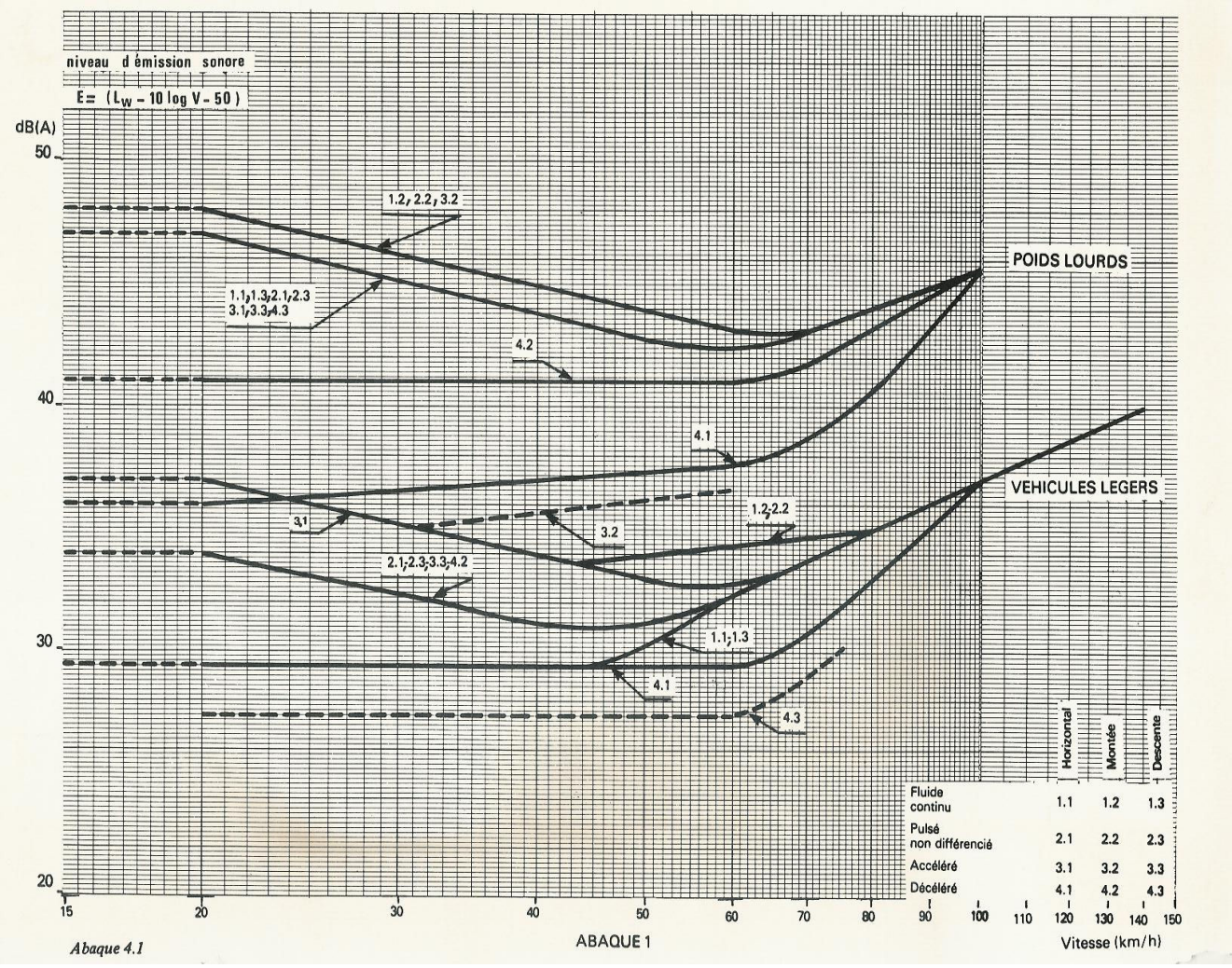
$$\mathbf{E = (L_w - 10 \log V - 50)} \qquad [13]$$

dove:

V è la velocità media del flusso dei Veicoli, definite come la velocità che viene raggiunta o superata da almeno il 50% dei veicoli, o la velocità media maggiorata di ½ della deviazione standard.

$\mathbf{L_W}$ è la potenza sonora del singolo veicolo.

La seguente figura riporta i valori di E differenziati fra veicoli leggeri e pesanti.



2.3.5. Modello di sorgente

Il metodo XP-S 31-133 richiede come dati di input i valori di potenza sonora ponderata A per metro di infrastruttura stradale, ovvero la grandezza $\mathbf{L_{Aw/m}}$, come riportato dalla formula [6].

Il livello di potenza sonora $\mathbf{L_{Awi}}$, in dB(A), di una sorgente puntuale composita **i** in una determinata banda di ottava **j** è calcolato a partire dal valore di emissione sonora E fornito dal precedente nomogramma, per veicoli leggere e pesanti, utilizzando la seguente relazione:

$$\mathbf{L_{Awi} = L_{Aw/m} + 10lg(li) + R(j)} \qquad [14]$$

dove:

$\mathbf{L_{Aw/m}}$ è la potenza sonora per metro di strada della specifica sorgente per banda di ottava, data da :

$$\mathbf{L_{Aw/m} = [(E_{lv} + 10lg(Q_{lv}) \oplus (E_{hv} + 10lg(Q_{hv})] + 20}$$

dove:

$\mathbf{E_{lv}}$ è il valore di emissione sonora per veicoli leggeri, ricavabile dal precedente nomogramma

$\mathbf{E_{hv}}$ è il valore di emissione sonora per Veicoli pesanti, ricavabile dal precedente nomogramma

$\mathbf{Q_{lv}}$ è il volume di traffico di veicoli leggeri, nel periodo di riferimento

$\mathbf{Q_{hv}}$ è il flusso di veicoli pesanti , nel periodo di riferimento

$\oplus$ e la somma energetica di livelli data da : $L1 \oplus L2 = 10 \log[10^{(L1/10)} + 10^{(L2/10)}]$

li è la lunghezza della porzione di sorgente rettilinea rappresentata dalla singola sorgente puntiforme **i**

R(j) è il valore spettrale in dB(A), per ciascuna banda **j** dato dalla seguente tabella

N° banda	Frequenza [hz]	Valore di Rj
1	125	- 14.5
2	250	-10.2
3	500	-7.2
4	1000	-3.9
5	2000	-6.4
6	4000	-11.4

3. Adattamento del modello NMPB 96

3.1. Generalità

Come riportato nei paragrafi precedenti, per il rumore da traffico stradale e per la mappatura degli assi stradali principali, la direttiva END consiglia l'uso del metodo di calcolo ufficiale francese «NMPB-Routes-96 (SETRACERTU-LCPC-CSTB)», citato nell'«Arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières, Journal Officiel du 10 mai 1995, article 6» e nella norma francese «XPS 31-133».
La stessa direttiva, nell'allegato B comma 2.2. evidenzia che i dati di ingresso di ingresso concernenti l'emissione fanno capo al documento «Guide du bruit des transports terrestres, fascicule prévision des niveaux sonores, CETUR 1980».

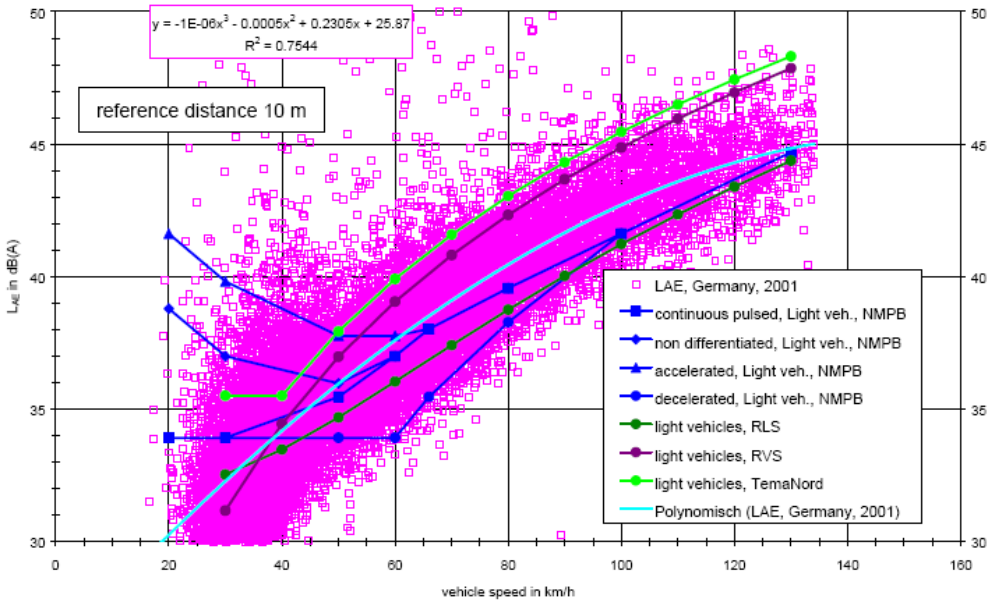
Nel comma 3.1.1. della Raccomandazione della Commissione del 6 agosto 2003 concernente le linee guida relative ai metodi di calcolo aggiornati per il rumore del traffico stradale, si evidenzia che " *nel 2002 le autorità francesi hanno avviato un progetto destinato a rivedere i valori di emissione*" e successivamente si riporta il concetto che se "*lo Stato membro che adotti questo metodo provvisorio di calcolo desidera aggiornare i fattori di emissione, si raccomanda il procedimento di misurazione di seguito descritto: il livello di emissione acustica di un veicolo è caratterizzato dal massimo livello sonoro di passaggio* L_{Amax} *in dB misurato a 7,5 m dall'asse di spostamento del veicolo; tale livello sonoro è determinato separatamente per diversi tipi di veicolo, velocità e flussi di traffico; l"inclinazione stradale è individuata, ma la superficie stradale non è presa in considerazione in modo esplicito".*

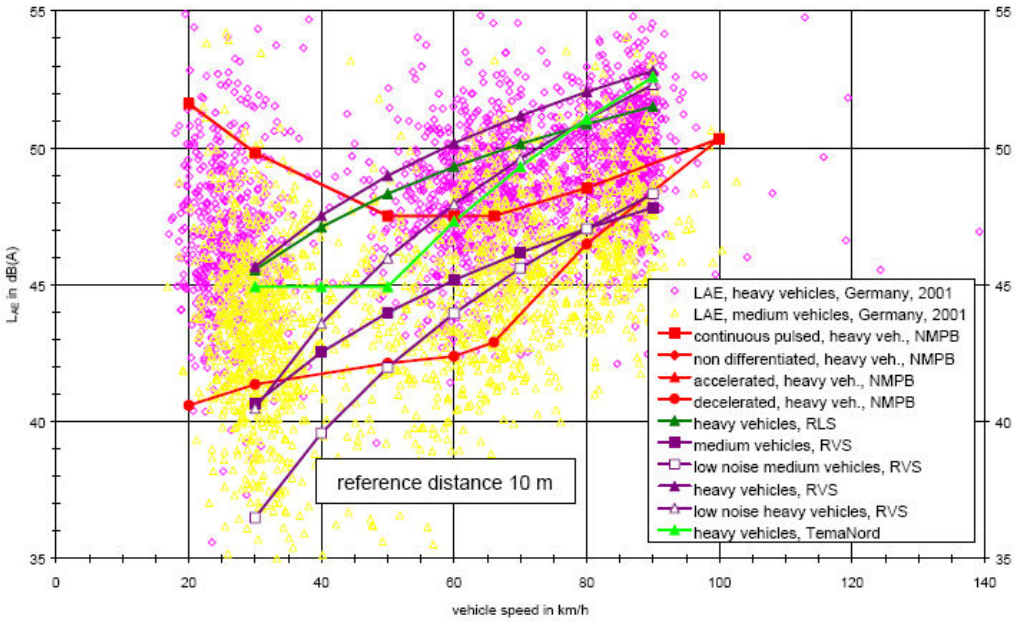
La metodologia di misura sommariamente descritta nella raccomandazione del 6 agosto 2003, è più dettagliatamente specificata nella norma UNI-ISO 11819-1 "Statistical pass-by": al fine di rendere più accurate le simulazioni effettuate allo scopo di mappare acusticamente la propria rete, Autostrade per l'italia ha portato a termine specifiche campagne seguendo tale procedura. Le misure sono state eseguite nel periodo dal 2004 al 2006.

3.2. Aggiornamento banca dati di emissione

3.2.1. Stato dell'arte

La necessità di procedere all'aggiornamento della banca dati è evidenziata dalle seguenti figure, che evidenziano le notevoli differenze riscontrate nei dati di emissione relativi al parco veicoli/tipologia di pavimentazioni di nazioni europee (risultati della ricerca "**Adaptation and revision of the interim noise computation methods for the purpose of strategic noise mapping**" commissionata dalla DG Environment nel 2002 alla socie Wölfel Meßsysteme Software GmbH & Co.





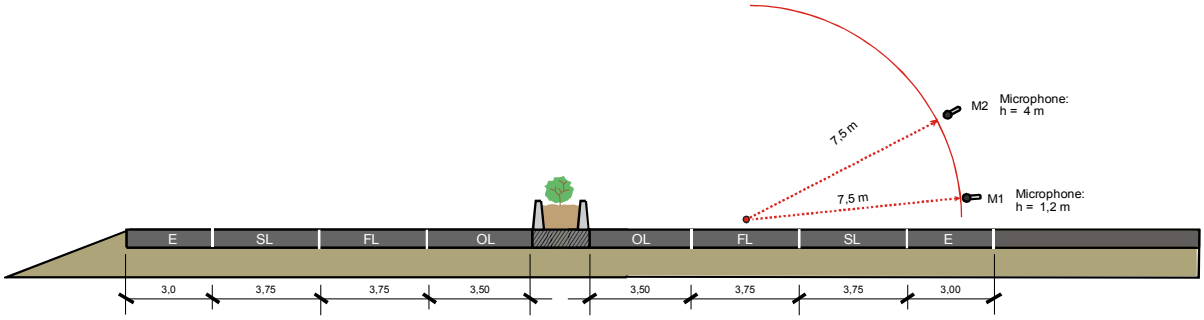
Secondo quanto definito dalla norma XPS 31-133 e a norma delle specifiche della «Guide du Bruit 1980», il livello di potenza sonora L_w e l'emissione acustica E sono stati calcolati dal livello di pressione sonora misurata L_p e dalla velocità del veicolo V mediante:

$$L_w = L_p + 25{,}5 \qquad \text{ed} \qquad E = (L_w - 10 \log V - 50)$$

Tali formule sono state utilizzate per calcolare i livelli di potenza a partire dai risultati delle misure di seguito descritte.

3.2.2. Misure di Statistical Pass-by

Le modalità di misura sono schematicamente riportate nella seguente figura, da cui si evidenzia che oltre alla posizione standard del microfono (7.5 m di distanza dall'asse di marcia e 1.2 m di altezza da terra), si sia utilizzata anche una postazione integrativa supplementare, secondo quanto definito nel progetto europeo di ricerca Immagine, per ottenere informazioni circa la direttività delle diverse tipologie di veicoli.



Per la misura delle velocità di transito è stato utilizzato un teleradar con precisione di ± 3% , mentre il rispetto delle condizioni meteorologiche previste dalla norma è stato effettuato con un monitoraggio continuativo di temperatura, umidità, intensità e direzione vento.

Categorie veicoli e condizioni di flusso

Si sono valutate le pavimentazioni di più comune impiego sulla rete di Autostrade per l'italia, ovvero:

- pavimentazioni ecodrenanti
- pavimentazioni drenanti tradizionali
- pavimentazioni chiuse

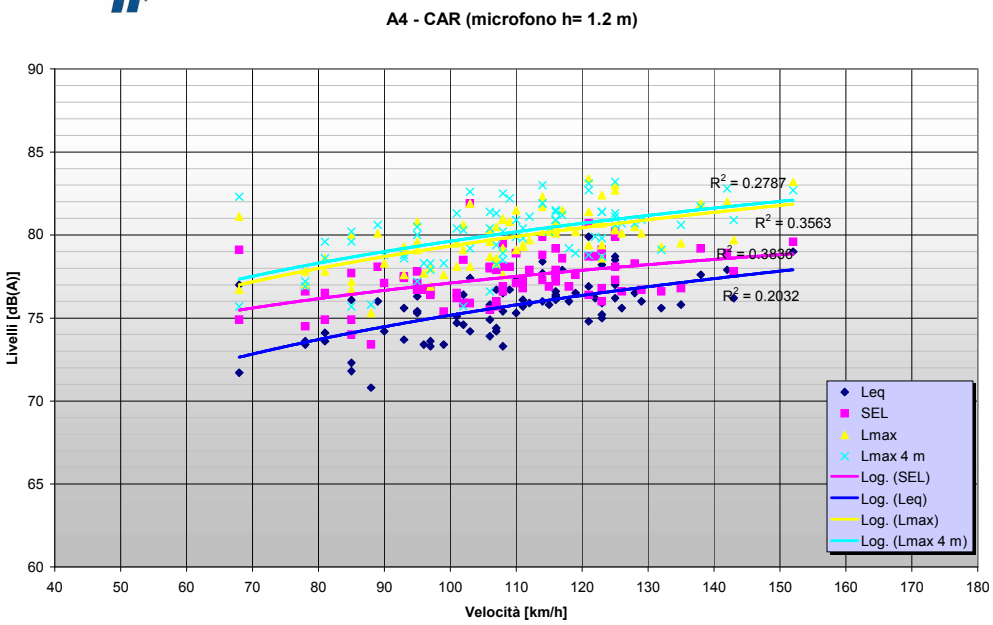
Riguardo alla tipologia di infrastruttura, sono state prese in esame le seguenti condizioni:

- pendenza longitudinale nulla
- pendenza longitudinale positiva pari a – 3%
- pendenza longitudinale negativa pari a + 3%

Infine sono state valutate le seguenti condizioni di flusso

- velocità costante (70 ÷140 km/h)
- accelerazione (0 ÷ 70 Km/h)
- decelerazione (70 ÷ 20 km/h)

Nelle seguenti figure sono riportati alcuni esempi dei dati ricavati.



Le misure sono state eseguite per le diverse categorie di veicoli definiti dalla procedura UNI-ISO, ovvero:

1a. Autovetture:

- autovetture passeggeri

1b. Altri veicoli leggeri:

- autovetture con rimorchio
- autovetture con roulotte
- furgoncini leggeri e veicoli per trasporto di merci con un massimo di 4 ruote
- minibus o furgoncini per trasporto persone con un massimo di 4 ruote
- camper

2a. Veicoli pesanti a doppio assale:

- autocarri commerciali con 2 assali e più di 4 ruote
- autobus e pullman con 2 assali e più di 4 ruote

2b. Veicoli pesanti multiassale:

- Autocarri, autobus e pullman con più di 2 assali

Al fine di rendere compatibili i dati rilevati con quanto richiesto dal modello NMPB 96, le diverse categorie sono state successivamente raggruppate nelle categorie principali:

- **Veicoli leggeri** = categorie 1a + 1b
- **Veicoli pesanti** = categorie 2a + 2b

I risultati sono successivamente stati interpolati mediante regressioni lineari, in modo da ottenere curve SEL/velocità tramite cui implementare le banche dati input.

4. Confronto tra modello di calcolo NMPB 96 con diverse banche dati

Al fine di verificare la rappresentatività della banca dati di emissione acustica di Autostrade per l'italia, è stata presa in esame una specifica località, dove sono stati effettuati:

- cartografia vettoriale tridimensionale mediante tecnica LIDAR e caratterizzazione del territorio mediante fotografie iperspettrali;
- rilievi strumentali di traffico (velocità e composizione, per ogni corsia di marcia);
- monitoraggi acustici in punti significativi;
- monitoraggi dei principali parametri meteorologici (umidità, temperatura, intensità e direzione vento).

Attraverso tali rilievi strumentale si sono ottenuti idonei elementi di confronto fra dati di calcolo e dati di misura, in modo da poter successivamente stimare l'accuratezza del modello di calcolo e quindi valutare l'attendibilità della procedura utilizzata per effettuare la mappatura acustica prevista dalla direttiva END.

4.1. Set up dei casi di test

La località presa in esame è costituita dal territorio del comune di Ferentino, attraversato dall'autostrada A1 Milano – Napoli e compreso fra le progressive km 612+652 e Km 620+138.

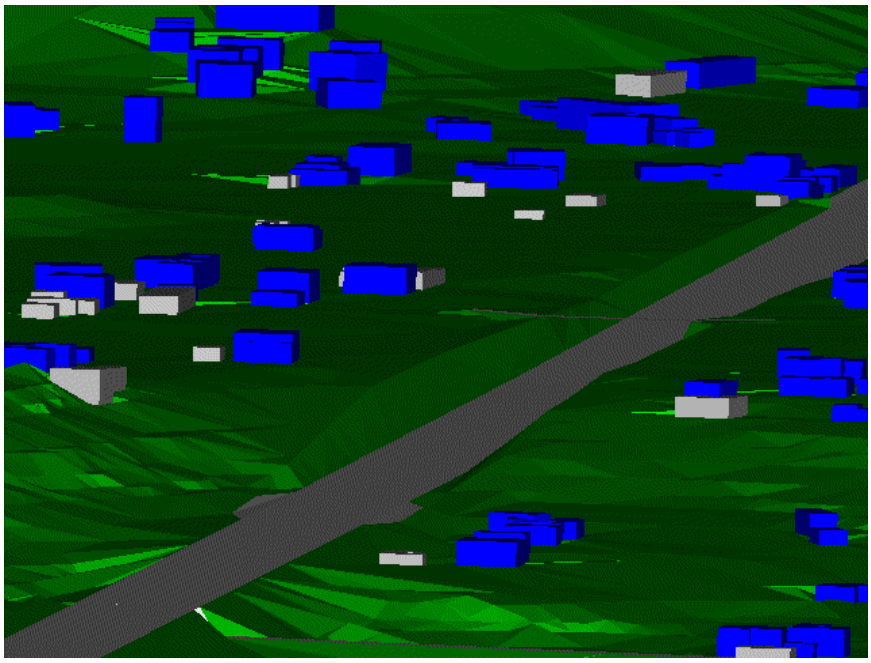
Relativamente alla fascia di territorio di 300 metri dai cigli strada, sono stati ottenuti:

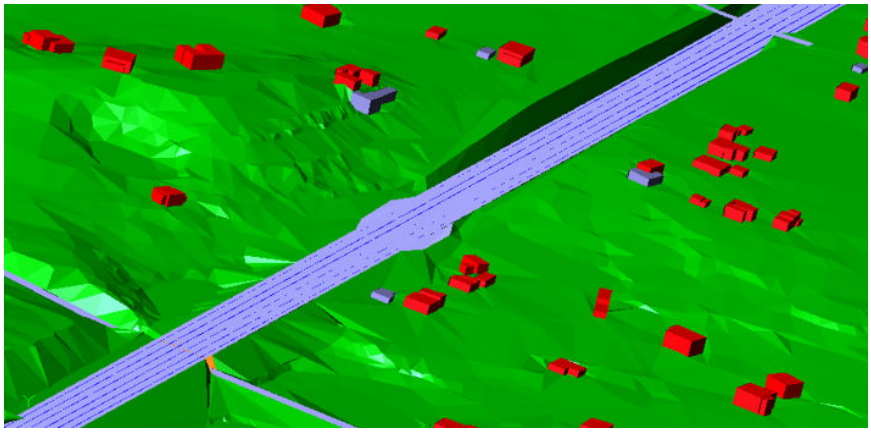
- rappresentazione vettoriale dell'infrastruttura autostradale e delle altre sorgenti concorsuali
- DBM (Digital Building Model), attraverso descrizione del perimetro e dell'altezza degli edifici(di gronda e di colmo)
- DTM (Digital Terrain Model), espresso sia come TIN che curve di livello con passo 0.5 – 2 metri

L'acquisizione dei dati, (velocità ed altezza dei sorvoli, punti/m^2) e le successive elaborazioni sono state effettuate con modalità operative tali da garantire le seguenti specifiche di accuratezza

Grandezza Rappresentata	**Parametro Caratteristico**	**Fascia di indagine, valutata rispetto all'asse della strada (metri)**					
		F_1 fino a 15	F_2 da 15 a 25	F_3 da 25 a 50	F_4 da 50 a 100	F_5 da 100 a 200	**F_6** oltre 200
Geometria Corpo Stradale	Passo del DTM	0.30 m	0.30 m	Non applicabile	Non applicabile	Non applicabile	Non applicabile
Morfologia Terreno	Passo del DTM	1.00 m	1.00 m	1.00 m	2.00	2.00	2.00
Posizione relativa Strada – Ricettori	Distanza relativa Strada – Ricettori	<0.20 m	<0.40 m	<0.8 m	<1.00 m	<1.50 m	<1.50 m
Posizione relativa Strada – Ricettori	Altezza relativa Strada – Ricettori	<0.10	<0.20	<0.50	<0.75	<1.00	<1.00
Ostacoli naturali, barriere	Altezza relativa Sor – Ost – Ric	<0.20	<0.30	<0.75	<1.00	<1.50	<1.50

Qui di seguito sono riportate alcune ricostruzioni tridimensionali illustranti i siti presi in esame.





Monitoraggi di rumore

Si sono presi in esame i seguenti punti, posizionando sempre il microfono ad 1 m dalla facciata più esposta:

- Ps1 – edificio a 8 m di distanza dal ciglio dell'autostrada, con ricettore a 3.5 m sopra la quota strada;
- Ps2 – edificio a 25 m di distanza dal ciglio dell'autostrada, con ricettore a 14.5 m sopra la quota strada
- Ps3 – edificio a 50 m di distanza dal ciglio dell'autostrada, con ricettore a 17.5 m sopra la quota strada
- Ps4 – edificio a 122 m di distanza dal ciglio dell'autostrada, con ricettore a 3 m sotto la quota strada
- Ps5 – edificio a 88 m di distanza dal ciglio dell'autostrada, con ricettore a 1 m sotto la quota strada
- Ps6 – edificio a 13 m di distanza dal ciglio dell'autostrada, con ricettore a 1.5 m sopra la quota strada
- Ps7 – edificio a 30 m di distanza dal ciglio dell'autostrada, con ricettore a 4.5 m sopra la quota strada

I rilievi di rumore sono stati effettuati in modo continuativo per sette giorni, registrando i seguenti parametri

- time history del L_{Aeq} su base 1 secondo
- time history del L_{Aeq} e livelli percentili L1, L5, L10, L50, L90, L99 su base oraria
- L_{Amax} time history su base oraria
- valori medi settimanali di $L_{Aday[06:00 – 22:00]}$ e $L_{Anight[22:00 – 06:00]}$

La figura seguente illustra un esempio dei report di misura.

PROGETTI E SERVIZI

SINTESI MONITORAGGIO ACUSTICO

Autostrada: A 1 Milano - Napoli **Comune di:** Ferentino **Provincia:** FR **Data inizio misure:** 14/06/2006

Punto: PS 1 **Piano:** 1° **Descrizione:** Via Cartiera Quarto, 271

Annotazioni:

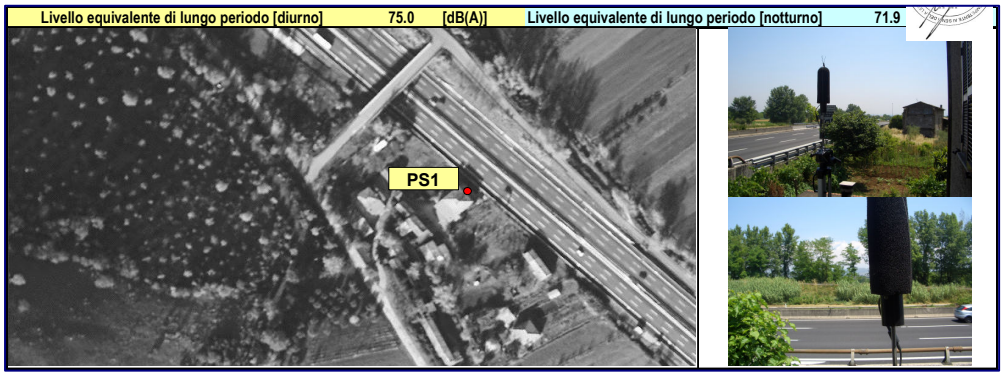
Livello equivalente di lungo periodo [diurno] 75.0 [dB(A)] **Livello equivalente di lungo periodo [notturno]** 71.9 [dB(A)]

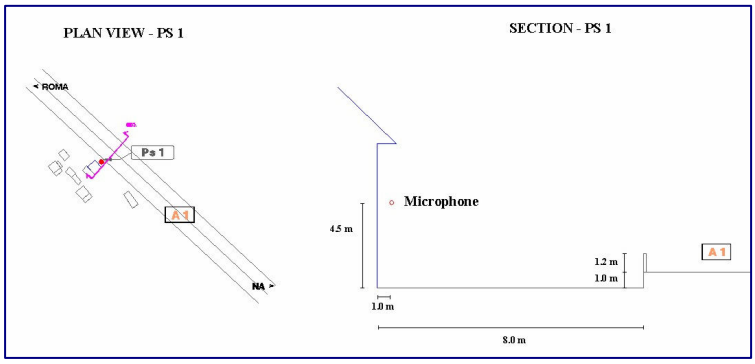
data	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	D	N	giorno
14/06/2006														75.0	75.3	75.4	75.8	76.0	75.8	75.4	75.2	74.3	73.2	72.7		71.9	Mercoledì
15/06/2006	71.7	70.9	70.2	70.7	71.1	73.6	75.4	76.2	76.4	76.2	76.0	75.6	75.4	75.3	75.3	75.0	75.8	76.0	75.8	75.4	75.0	73.8	73.8	73.3	75.6	72.7	Giovedì
16/06/2006	73.0	72.3	70.1	70.5	71.8	74.7	76.0	76.6	76.9	76.0	76.2	75.7	75.5	76.0	76.2	76.7	76.7	76.8	76.6	76.5	76.1	75.1	74.3	73.8	76.3	73.3	Venerdì
17/06/2006	73.0	72.8	72.4	71.5	72.7	74.8	76.0	76.7	76.6	76.4	76.1	75.8	75.2	74.2	74.3	74.7	74.5	74.2	74.2	73.5	72.4	70.5	70.3	70.1	75.0	69.2	Sabato
18/06/2006	69.8	68.7	67.7	67.4	68.3	69.9	71.3	72.6	73.9	74.2	74.3	74.3	72.8	72.3	72.3	73.1	74.2	74.5	74.0	73.8	73.3	72.1	71.4	71.0	73.4	71.1	Domenica
19/06/2006	70.9	71.5	69.0	68.6	70.9	73.5	74.8	75.2	74.6	74.4	74.6	75.0	74.2	74.3	74.8	74.6	75.0	74.8	74.3	74.4	74.2	72.3	72.2	71.1	74.5	71.6	Lunedì
20/06/2006	70.5	69.9	70.0	70.4	72.3	74.5	75.7	75.7	75.8	75.1	75.2	74.6	74.6	74.5	74.6	75.0	75.4	75.4	75.2	74.4	73.9	73.3	72.5	71.9	74.9	72.3	Martedì
21/06/2006	70.7	70.0	69.7	70.3	73.8	75.5	76.2	76.6	76.0	75.6	75.4	75.2	74.8	75.1	75.2	75.3	75.5	75.3	75.1								Mercoledì
22/06/2006																											Giovedì
23/06/2006																											Venerdì

Le sezioni ed i punti di misura sono stati scelti in modo da poter rappresentare le condizioni tipiche di attraversamento autostradale, prendendo in esame quindi sezioni a raso, in trincea ed in rilevato.

Ps1

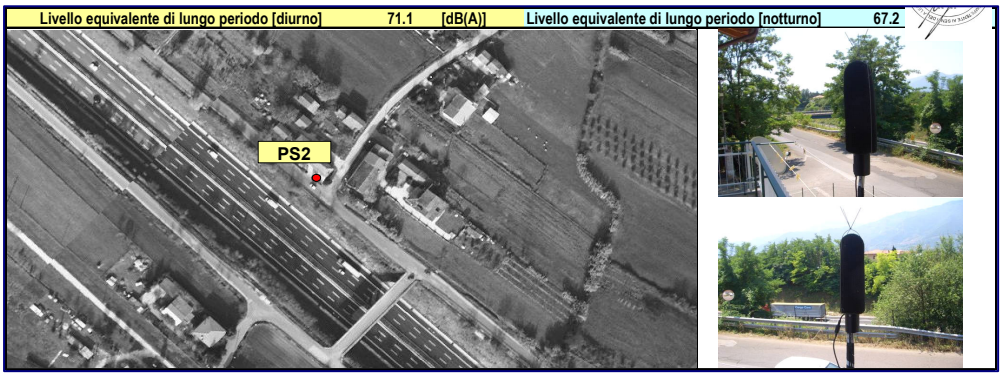
Questo punto è rappresentativo di un ricettore molto vicino all'autostrada, con assenza di ostacoli e con esposizione della sorgente pari a 180°, con infrastruttura a raso.

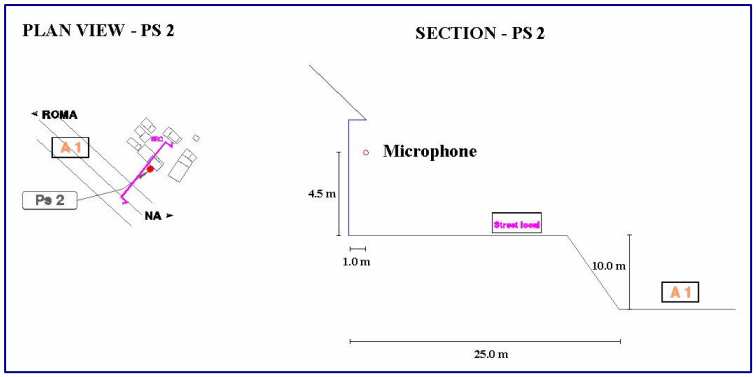




Ps2

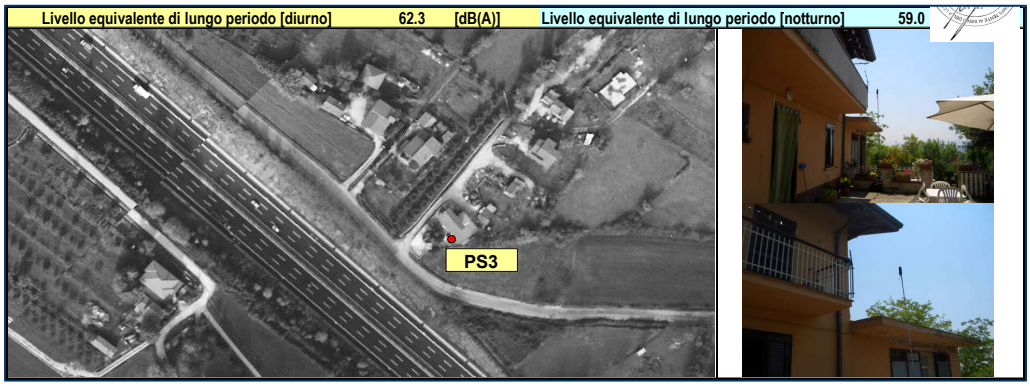
Questo punto è rappresentativo di un ricettore vicino all'autostrada, con assenza di ostacoli e con esposizione della sorgente pari a 180°, con infrastruttura in trincea profonda.

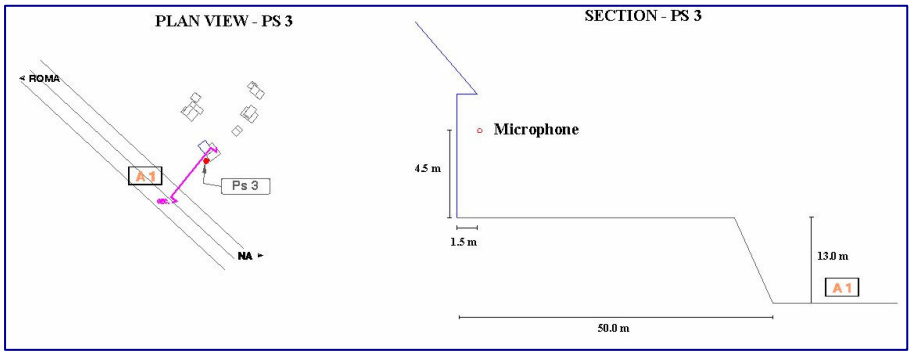




Ps3

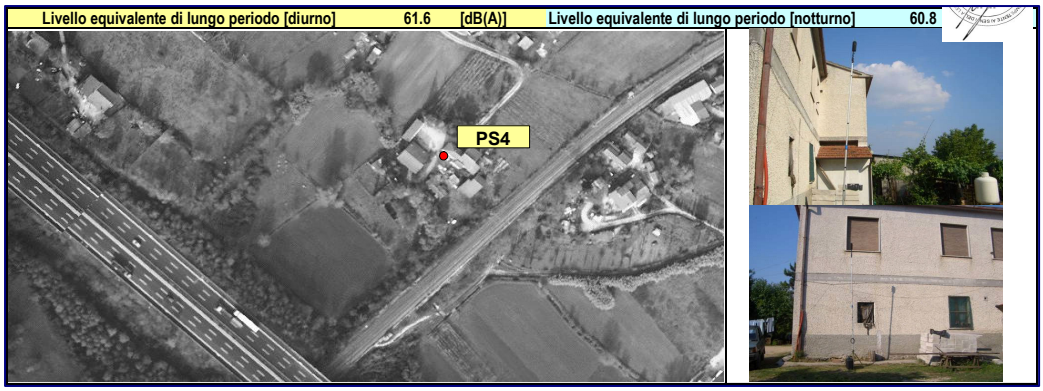
Questo punto è rappresentativo di un ricettore a media distanza dall'autostrada, con assenza di ostacoli e con esposizione parziale alla sorgente, con infrastruttura in trincea media.

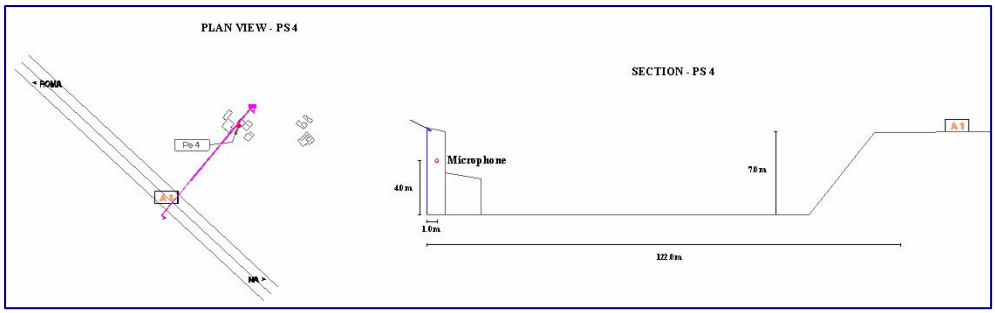




Ps4

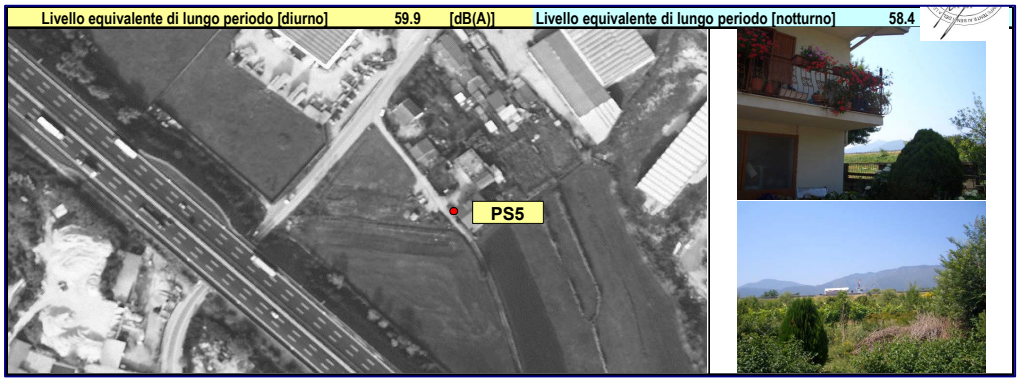
Questo punto è rappresentativo di un ricettore a distanza medio-alta dall'autostrada, con assenza di ostacoli e con esposizione parziale della sorgente, con infrastruttura in rilevato.

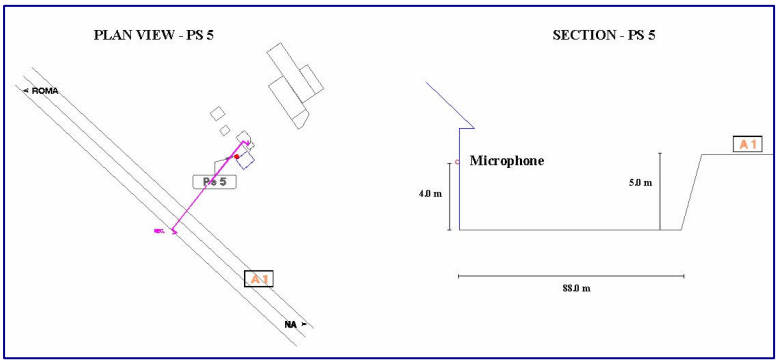




Ps5

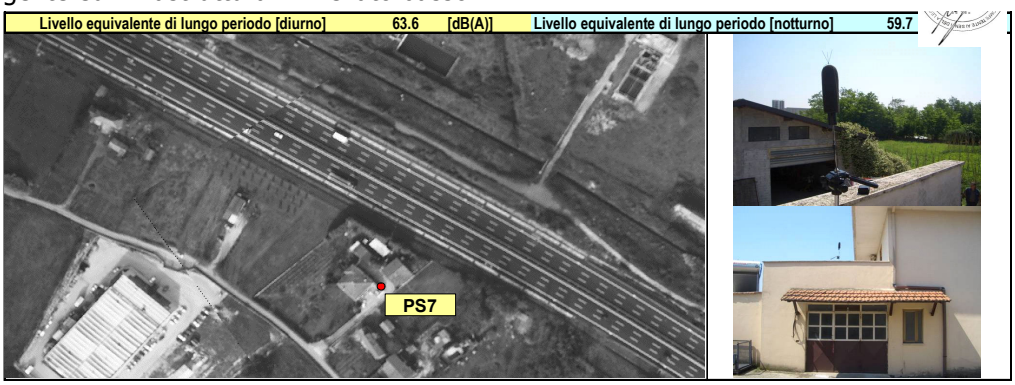
Questo punto rappresenta un ricettore a media distanza dall'autostrada, in assenza di ostacoli , con esposizione parziale alla sorgente ed infrastruttura in rilevato.

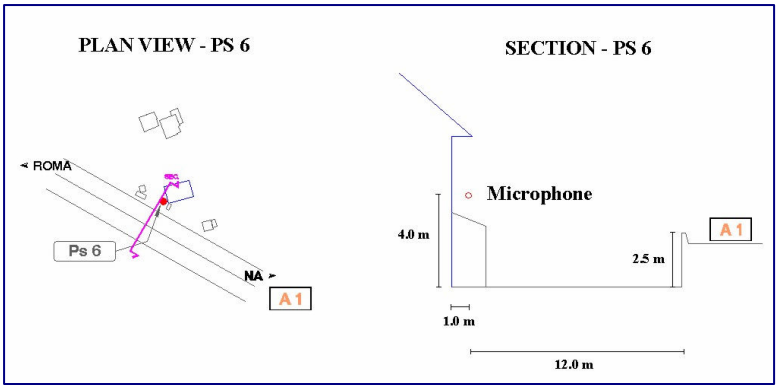




Ps6

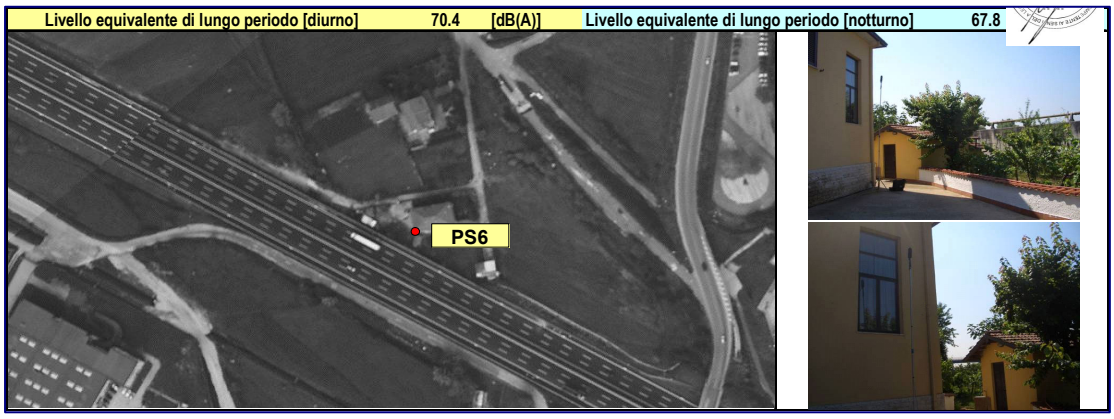
Questo punto rappresenta un ricettore molto vicino all'autostrada, con ostacoli ed esposizione parziale alla sorgente ed infrastruttura in rilevato basso.

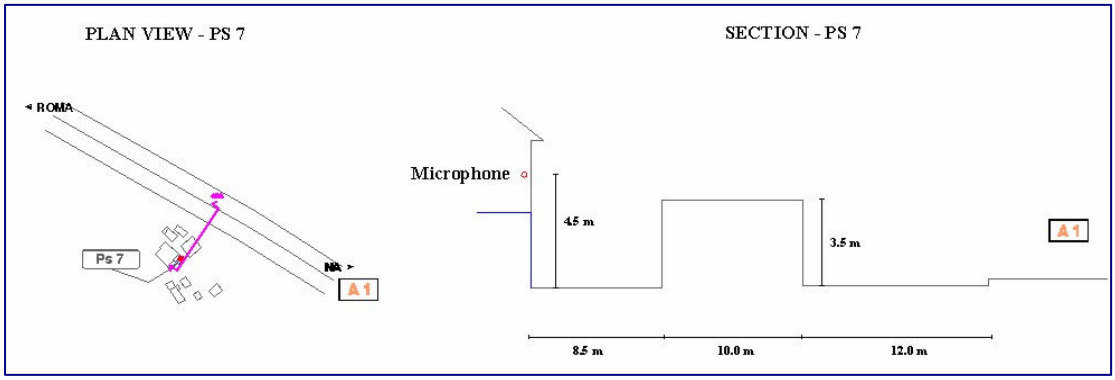




Ps7

Questo punto è rappresentativo di un ricettore a media distanza dall'autostrada, con presenza di ostacoli ed esposizione parziale alla sorgente, con infrastruttura a raso.





Come si può notare dalle precedenti fotografia, la tipologia di terreno fra sorgente e punto di misura è molto variabile (vegetazione fitta, erba, cemento, asfalto, terra battuta, etc.) in modo da poter tener conto delle varie casistiche previste dalla procedura NMPB-96 relativamente all'influenza del terreno.

Monitoraggio dei parametri meteorologici

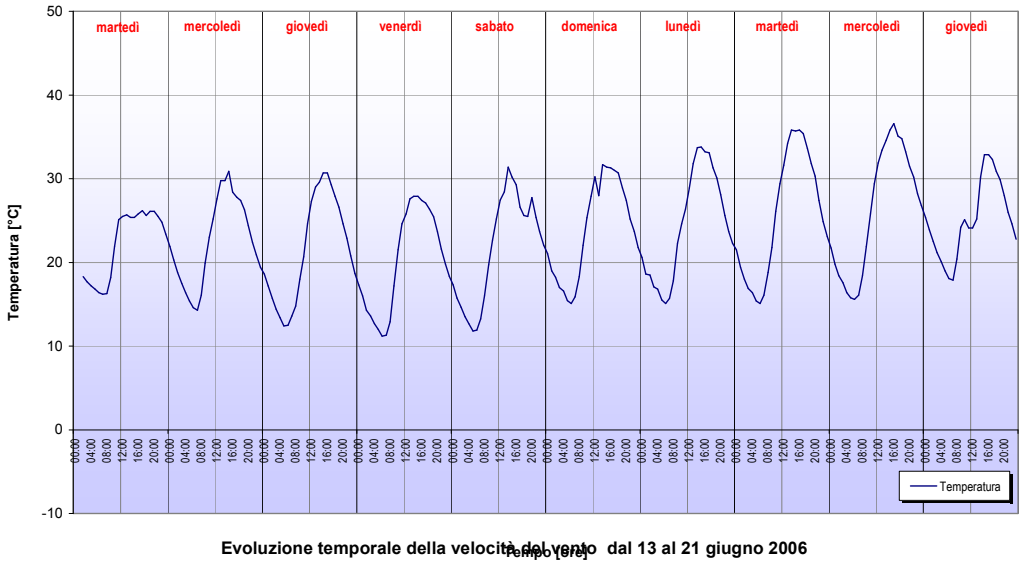
Le condizioni meteorologiche occorrenti durante le campagne di misura sono state continuamente misurate per mezzo di una postazione fissa Davis Vintage Pro, mediante cui si è valutata l'evoluzione dei seguenti parametri:

- temperatura dell'aria
- umidità
- quantità di pioggia
- direzione ed intensità del vento

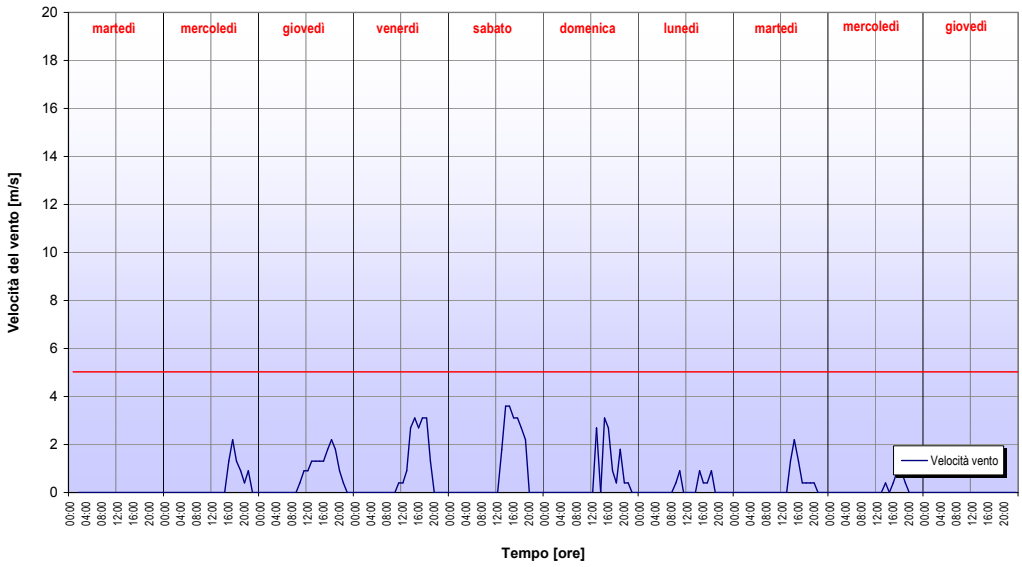
Si sono inoltre effettuate valutazioni relative alla copertura del cielo (sereno,poco coperto, mediamente coperto, molto coperto)

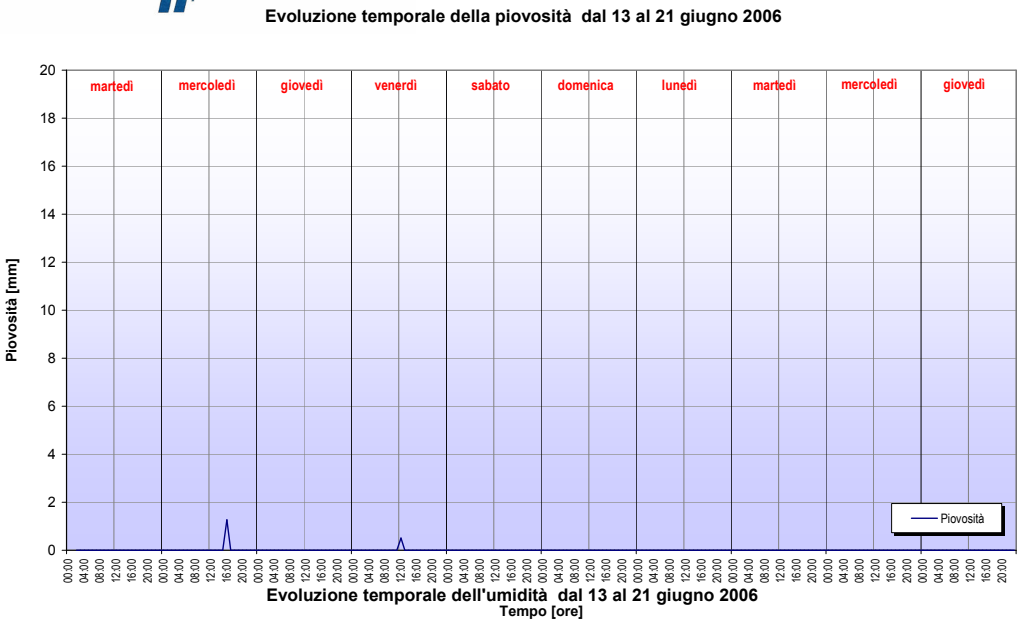
I risultati dei monitoraggi meteorologici sono riportati nei seguenti diagrammi.

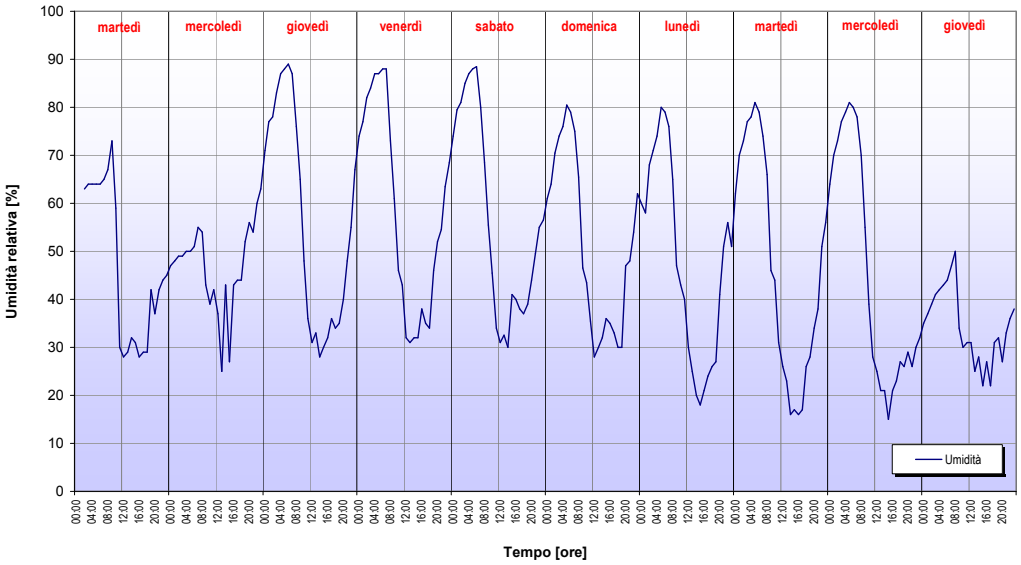
Evoluzione temporale della temperatura dal 13 al 21 giugno 2006



Evoluzione temporale della velocità del vento dal 13 al 21 giugno 2006







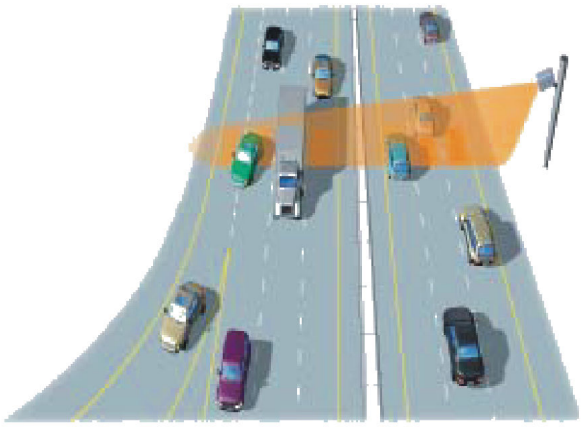
Come si può notare durante l'intero periodo di monitoraggio, le condizioni atmosferiche si sono mantenute in condizioni tali da poter classificare gli effetti meteorologici come di come "moderata amplificazione/attenuazione" o di "influenza nulla". Nel computo delle percentuali di "condizioni omogenee" o "condizioni favorevoli alla propagazione" si sono assunti i valori medi nei periodi di riferimento diurno e notturno.

Monitoraggi di traffico

Si è utilizzata una strumentazione basata sulla tecnologia a micro-onde, in modo non modificare le condizioni della pavimentazione. Per ciascuna corsia si sono rilevati i flussi (veicoli/h) di:

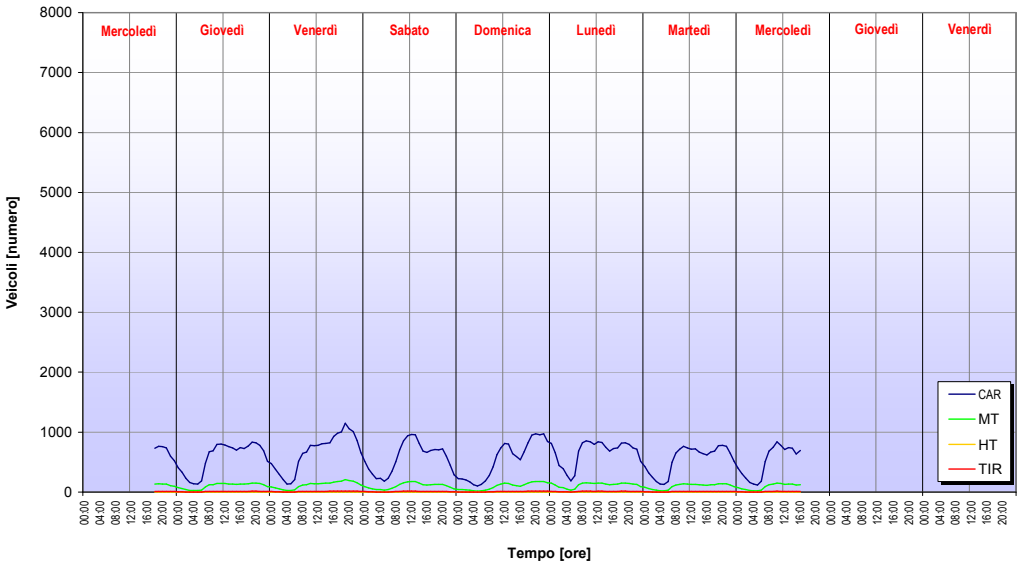
- veicoli leggeri
- veicoli medi
- veicoli pesanti
- autoarticolati

Inoltre mediante post-procesing dei dati si è rilevata la velocità media di transito su ciascuna corsia.



A titolo di esempio, si riportano qui di seguito i risultati per la corsia di marcia lenta in direzione Napoli.

PuntoTs1- Evoluzione temporale del traffico marcia normale (dir. NA) dal 14 al 22 giugno 2006



Oltre alle misure di flussi e velocità medie, sono stati eseguiti anche rilievi di velocità per transiti isolati di veicoli, disaggregati per categoria e corsia di marcia.

I risultati sono riportati nella seguente tabella:

Direzione	Corsia	Leggeri	Medi	Pesanti	Autoarticolati
Roma	Lenta	92.4	94.8	81.9	78.1
	Centrale	121.5	101.3	94	84.8
	Sorpasso	140.3	-	-	-
Napoli	Lenta	102.7	101.7	89.9	91.2
	Centrale	131.2	112.5	97	96.4
	Sorpasso	145	-	-	-

Da tali rilievi si sono anche ricavati i diagrammi delle distribuzioni statistiche di velocità di transito, successivamente utilizzati come dati di input per la modellizzazione.

Caratteristiche della pavimentazione

Sul tratto di autostrada in esame è presente una pavimentazione di tipo drenante-fonoassorbente, stesa fra il 1998 ed il 2006, secondo il seguente schema:

Direzione Napoli

Corsia di marcia lenta: ottobre 1998

Corsie di marcia normale e di sorpasso :febbraio-giugno 1999

Direzione Roma

Corsia di marcia lenta: maggio 2005- maggio 2006

Corsie di marcia normale : maggio 2005

Pendenze

Le pendenze sono fornite relativamente alla carreggiata in direzione Napoli

612+500 - 612+ 700 pendenza negativa da 2% a 3%

612+700 - 613+ 165 pendenza negativa da 1% a 2%

613+ 165 - 614+ 670 pendenza inferiore a 1%

614+ 670 - 614+ 850 pendenza negativa da 1% a 2%

614+850 - 615+ 000 pendenza negativa da 2% a 3%

615+000 - 617+ 000 pendenza negativa superiore a 3%

617+000 - 617+ 100 pendenza negativa da 2% a 3%

617+100 - 617+ 240 pendenza negativa da 1% a 2%

617+240 - 620+ 150 pendenza negative inferiore 1%

Caratteristiche della pavimentazione

	SUMMS Apr. 2006					ARAN Sett. 2005
	CAT	CATcor	TEX	DO%	sx/dx	IRI
A1 sud 612+660-620+140	57	57	0,99	0	SX	1,72
	55	55	1,06	0	DX	
A1 sud 612+600-614+700	60	61,1	1,08	0,05	SX	
	60	61,0	1,15	0,0	DX	

4.2. Risultati di misura e simulazione

II dati di ingresso al modello (geometria tridimensionale dell'edificato e dell'ambiente di propagazione, natura del terreno e delle altre superfici interessate ai fenomeni acustici, parametri meteorologici, flussi , composizione e velocità del traffico) sono stati ricavati tutti con un elevato grado di dettaglio, al fine di ridurre al minimo gli errori di schematizzazione dei fenomeni da studiare e poter così confrontare in modo significativo i risultati di calcolo.

I risultati delle modellizzazioni effettuate sono riportati nella seguente tabella

	Misura		**Modello $_{Italia}$**		**Modello$_{Francia}$**		**Differenza (It)**		**Differenza (Fr)**	
	day	night	day	night	day	night	day	night	day	night
Ps1	75.0	71.9	75.3	71.9	77.0	73.5	0.3	0.0	2.0	1.6
Ps2	71.1	67.2	70.4	67.0	73.5	70.1	-0.7	-0.2	2.4	2.9
Ps3	62.3	59.0	63.7	60.9	65.7	62.1	1.4	1.9	3.4	3.1
Ps4	61.6	60.8	60.4	57.8	62.1	59.2	-1.2	-2.5	0.5	-1.6
Ps5	59.9	58.4	61.7	59.0	64.2	61.7	1.8	0.6	4.3	3.3
Ps6	70.4	67.8	71.3	68.4	73.2	70.2	0.9	0.6	2.8	2.4
Ps7	63.6	59.7	65.5	61.3	67.1	63.5	1.9	1.6	3.5	3.8

dove:

- **Psn** è l'identificativo delle varie posizioni del microfono in corrispondenza di cui è stato anche posizionato un punto di calcolo
- **Misura** rappresenta il livello equivalente in db(A) misurato durante I periodi di riferimento
- **Modello$_{Italia}$** è il livello equivalente in db(A) calcolato utilizzando la procedura NMPB-96 e la banca dati di Autostrade perl'italia
- **Modello$_{Francia}$** è il livello equivalente in dB(A) calcolato utilizzando la procedura NMPB-96 e la banca dati ricavata dai valori di emissione della "Guide du Bruit des TransportsTerrestres" del CETUR
- **Differenza (It)** è la differenza (modello – misura) fra valori misurati e calcolati utilizzando la banca dati di Autostrade per l'italia
- **Differenza (Fr)** è la differenza (modello – misura) fra valori misurati e calcolati utilizzando la banca dati ricavata dai valori di emissione della "Guide du Bruit des TransportsTerrestres" del CETUR
- Day è il periodo di riferimento diurno [06:00 – 22:00]
- Night è il periodo di riferimento notturno [22:00 – 06:00]

5. Conclusioni

Dall'analisi dei dati si possono dedurre le seguenti conclusioni:

1. La procedura di calcolo raccomandata dalla Direttiva END come metodo di calcolo ad interim fornisce in genere valori sovrastimati rispetto ai risultati di monitoraggi acustici;
2. Utilizzando la procedura NMPB-96 e la banca dati di Autostrade per l'italia, il valore medio della sovrastima è pari a 0.6 dB(A) nel periodo diurno e 0.2 dB(A) nel periodo notturno;
3. Utilizzando la procedura NMPB-96 e la banca dati di Autostrade per l'italia, tutti i valori calcolati nei diversi punti di misura rientrano nel range di ± 2 dB(A) rispetto ai risultati delle misurazioni effettuate negli stessi punti;
4. Utilizzando la procedura NMPB-96 e la banca dati della "Guide du bruit des transports terrestres" il valore medio della sovrastima è pari a 2.7 dB(A) nel periodo diurno e 2.2 dB(A) nel periodo notturno;
5. Utilizzando la procedura NMPB-96 e la banca dati della "Guide du bruit des transports terrestres" il 70% dei dati di calcolo differisce per più di ± 2 dB(A) rispetto ai risultati delle misurazioni effettuate negli stessi punti.

Al fine di rendere la mappatura acustica richiesta da END più rispondente ai dati reali si è pertanto adottata la banca dati dedotta dagli specifici rilievi di pass-by effettuati lungo la rete di Autostrade per l'italia.

6 Bibliografia

1) Direttiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 25 giugno 2002 relativa alla determinazione e alla gestione del rumore ambientale.

2) Raccomandazione della Commissione del 6 agosto 2003 (2003/613/CE) , concernente le" Linee guida relative ai metodi di calcolo aggiornati per il rumore dell'attività industriale, degli aeromobili, del traffico veicolare e ferroviario e i relativi dati di rumorosità".

3) European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise -(WG-AEN), Position Paper Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure, January 2006.