



COMUNE DI PARMA
SETTORE MOBILITA' ED AMBIENTE

SISTEMA DI TRASPORTO DI MASSA A
GUIDA VINCOLATA PER LA CITTA' DI PARMA
Studio di Impatto Ambientale
(S.I.A.)

Sindaco
Elvio Ubaldi

Assessore Mobilità ed Ambiente
Pietro Vignali

Segretario Generale
Stello Manuele

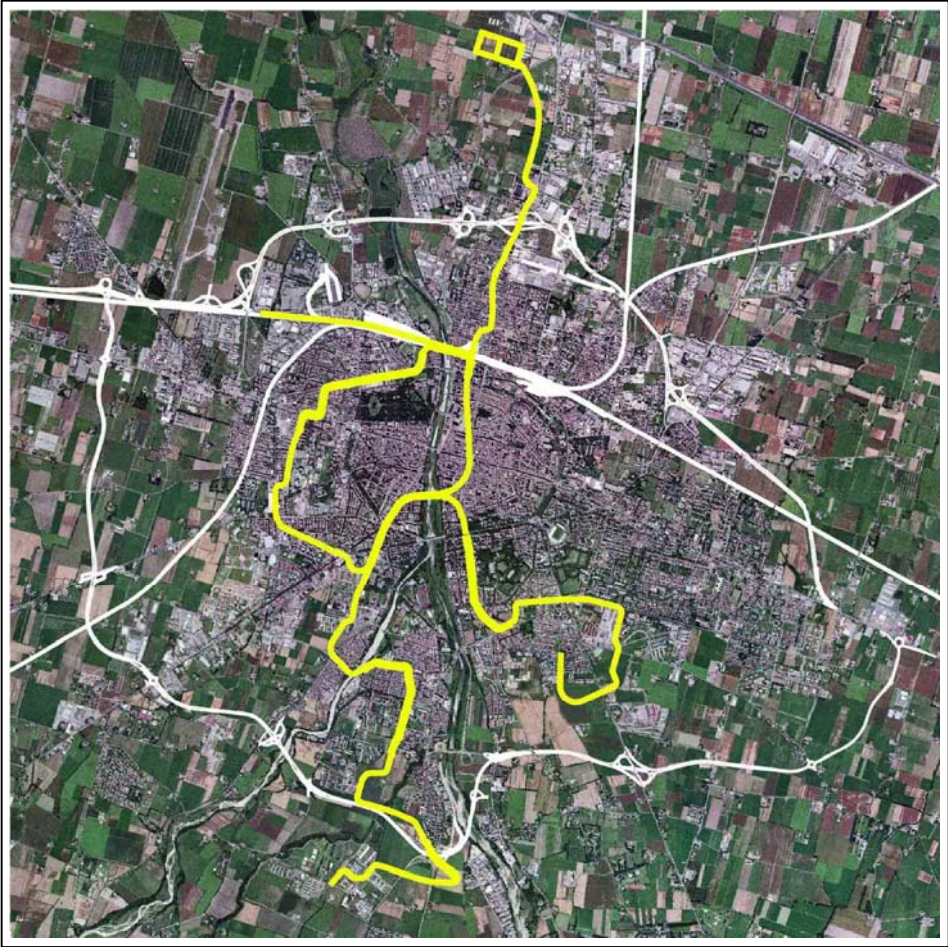
Direttore Generale
Carlo Frateschi

Direttore del Settore Mobilità Ambiente
Giovanni de Leo

Direttore del Servizio Mobilità
Dante Bertolini

Progettista:
Dott. Ing. Giovanni de Leo

Responsabile di procedimento:
Dott. Ing. Dante Bertolini



E la collaborazione di:

Metropolitana Milanese

Studio Prof. Dell'Oso

Polireo

Systematica

CI.TRA

VAMS

AMBITER

Università di Parma

Università "Bocconi" (MI)

Alfa ingegneria

Alfa Progetti

Sovrintendenza per i beni archeologici dell'Emilia Romagna

Astran

Nord Progetti

AIDA

Coordinamento del SIA:
CITRA

QUADRO DI RIFERIMENTO AMBIENTALE

Componente: RUMORE E VIBRAZIONI
ENERGIA
ELETTROMAGNETISMO

1. Valutazione dell'impatto da Rumore	3
1.1 Introduzione metodologica e normativa	3
1.1.1 Inquadramento della problematica del rumore	3
1.1.2 Analisi del quadro legislativo	3
1.1.2.1 Il D.P.C.M. 1 marzo 1991	3
1.1.2.2 Il D.P.C.M. n° 377 del 10/8/1988 (V.I.A.)	4
1.1.2.3 La Legge Quadro sull'Inquinamento Acustico	4
1.1.2.4 L'Accordo di Programma fra Ministero dell'Ambiente e Ferrovie dello Stato	5
1.1.2.5 Il D.P.C.M. 14 novembre 1977	6
1.1.2.6 Il D.P.C.M. 3 dicembre 1997	7
1.1.2.7 D.M.Amb. 16 marzo 1998 Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico	7
1.1.2.8 Il D.P.R. 18 novembre 1998, n. 459	8
1.1.2.9 Il D.M.Amb. 29 novembre 2000	8
1.1.2.10 Il Parere del Ministero dell'Ambiente sulla Tramvia di Verona	9
1.1.3 Descrizione della tecnica di elaborazione computerizzata	9
1.1.3.1 Introduzione e scopi dell'algoritmo di simulazione	9
1.1.3.2 Rilievi sperimentali per la determinazione delle emissioni sonore	10
1.1.3.3 Algoritmo di calcolo del programma CITYMAP	13
1.1.3.4 Interfaccia con l'utente e con altri programmi	15
1.1.4 Descrizione della tecnica di misura	17
1.1.5 Valutazione dell'impatto acustico ed eventuale dimensionamento di opere di mitigazione	18
1.2 Valutazione del rumore esistente nello stato di fatto	19
1.2.1 Risultati della campagna di rilevamento fonometrico	19
1.2.2 Localizzazione delle posizioni di misura	21
1.2.3 Modellazione matematica dello stato di fatto	26
1.3 Valutazione del rumore prodotto dall'esercizio del servizio metropolitano ..	28
1.3.1 Valori di rumorosità istantanea dichiarati dai costruttori dei veicoli	28
1.3.2 Caratterizzazione teorica delle emissioni di rumore da parte del materiale rotabile	29
1.3.3 Verifica sperimentale dell'emissione sonora di tram tipo Combino (Siemens) ...	31
1.3.4 Visualizzazione dell'impatto di rumore in condizioni di esercizio	35
1.4 Valutazione del rumore prodotto durante le attività di cantiere	36
1.4.1 Produzioni di rumori	36
1.4.2 Stima degli impatti da rumore prodotti dalle macchine di cantiere – tracciato a raso	37
1.4.3 Stima degli impatti acustici prodotti dalle macchine di cantiere – tracciato in galleria a scavo superficiale	39

1.4.4 Stima degli impatti acustici prodotti dalle macchine di cantiere – tracciato in galleria a foro cieco	40
1.4.5 Valutazione integrata dell'impatto in fase di cantiere	40
1.5 Sintesi e conclusioni dello studio di impatto da rumore	41
1.6 Allegato "A"	42
2. Valutazione dell'impatto da vibrazioni	43
2.1 Introduzione allo studio dei fenomeni vibratorii	43
2.1.1 Generazione delle vibrazioni	43
2.1.2 Propagazione delle vibrazioni	44
2.1.3 Attenuazioni ed amplificazioni nella struttura degli edifici	46
2.1.4 Analisi delle normative tecniche in materia di valutazione delle vibrazioni	48
2.1.5 Descrizione della tecnica di valutazione matematica dell'attenuazione delle vibrazioni ottenibile con sistemi di armamento antivibranti	50
2.2 Valutazione delle vibrazioni esistenti nello stato di fatto	51
2.2.1 Localizzazione delle sezioni di misura	52
2.2.2 Risultati delle misure di vibrazioni	53
2.2.3 Analisi dei risultati relativi allo stato ante-operam	70
2.3 Valutazione delle vibrazioni prodotte dall'esercizio del servizio metropolitano	71
2.3.1 Caratterizzazione teorica delle emissioni di vibrazioni da parte del materiale rotabile	71
2.3.2 Valutazione sperimentale degli spettri tipici di vibrazioni di convogli metrotranviari	73
2.3.2.1 Rilievi eseguiti presso la rete metrotranviaria di Torino	74
2.3.2.2 Rilievi eseguiti presso la rete metrotranviaria di Milano	75
2.3.2.3 Rilievi eseguiti presso la rete metrotranviaria di Potsdam	77
2.3.3 Definizione dello spettro tipico di accelerazione	78
2.3.4 Descrizione dei sistemi di armamento antivibrante	79
2.3.4.1 BINARIO SU PLATEA IN C.A. IN GALLERIA	80
2.3.4.2 BINARIO SU PLATEA IN C.A. CON ROTAIE A GOLA	81
2.3.4.3 ARMAMENTO SU BALLAST CON ROTAIE A GOLA	82
2.3.5 Valutazione dell'attenuazione delle vibrazioni ottenuto grazie all'armamento antivibrante	82
2.3.6 Valutazione dell'impatto vibrazionale in condizioni di esercizio	84
2.4 Valutazione delle vibrazioni prodotte durante la attività di cantiere	86
2.4.1 Caratterizzazione delle emissioni di vibrazioni da parte delle macchine ed attrezzature di cantiere	86
2.4.2 Valutazione della propagazione delle vibrazioni nel terreno	88
2.4.3 Stima degli impatti vibrazionali prodotti dalle macchine di cantiere – tracciato a raso	91

2.4.4 Stima degli impatti vibrazionali prodotti dalle macchine di cantiere – tracciato in galleria a scavo superficiale	92	4.3.2 Caratteristiche dei materiali per l'isolamento della sottostruttura (soluzione antivibrante, Terra di Struttura a Terra Comune esterna)	126
2.4.5 Stima degli impatti vibrazionali prodotti dalle macchine di cantiere – tracciato in galleria a foro cieco	93	4.4 Sistema di armamento Milano Modificato	126
2.4.6 Valutazione integrata dell'impatto in fase di cantiere	94	4.4.1 Caratteristiche dei materiali per l'isolamento delle rotaie (Terra Trazione e Terra di Struttura)	127
2.5 Sintesi e conclusioni dello studio di impatto vibrazionale	95	4.4.2 Caratteristiche dei materiali per l'isolamento della sottostruttura (soluzione antivibrante, Terra di Struttura a Terra Comune esterna)	127
3. VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI DA CAMPI ELETTRICI, CAMPI MAGNETICI, CORRENTI VAGANTI	96	4.5 Sintesi e conclusioni dello studio di impatto da correnti vaganti	128
3.1 Introduzione metodologica e normativa di riferimento	96	<i>Allegato A</i>	129
3.1.1 Analisi degli effetti sull'uomo dei campi elettromagnetici a basse frequenze (ELF)	96	<i>Allegato B</i>	131
3.1.2 Modellizzazione matematica e simulazione dei fenomeni elettromagnetici a basse frequenze	97	<i>Allegato C</i>	132
3.1.3 Normativa vigente per l'esposizione a campi elettromagnetici a basse frequenze (ELF)	99	<i>Allegato D</i>	133
3.2 Valutazione dello stato ante-operam (misure e simulazioni)	103	<i>Allegato E</i>	135
3.2.1 Campi a frequenze industriali (50Hz)	103		
3.2.1.1 Campi a frequenze industriali (50Hz): misure dello stato di fatto	103		
3.2.1.2 Campi a frequenze industriali (50Hz): simulazioni dello stato di fatto	113		
3.2.2 Campi a frequenza nulla (in continua): misure e simulazioni dello stato di fatto	114		
3.3 Valutazione delle emissioni da parte del nuovo sistema di trasporto rapido in esercizio (simulazioni)	115		
3.3.1 Modellizzazione del nuovo sistema di trasporto	116		
3.3.2 Simulazioni del campo magnetico generato dal nuovo servizio di trasporto	117		
3.4 Sintesi e conclusioni dello studio di impatto da campi elettromagnetici	118		
3.4.1 Campi a frequenze industriali (50Hz)	118		
3.4.2 Campi a frequenza nulla	118		
3.5 Analisi delle emissioni in fase di cantiere	119		
4. ANALISI DELL'ISOLAMENTO ELETTRICO, CORRENTI VAGANTI	119		
4.1 Introduzione metodologica e normativa di riferimento	119		
4.2 Sistema di armamento realizzato su platea in c.a. con rotaie a gola	120		
4.2.1 Caratteristiche dei materiali per l'isolamento delle rotaie (Terra Trazione e Terra di Struttura)	122		
4.2.2 Caratteristiche dei materiali per l'isolamento della sottostruttura (soluzione antivibrante, Terra di Struttura a Terra Comune esterna)	123		
4.3 Sistema di armamento realizzato su ballast con rotaie a gola	123		
4.3.1 Caratteristiche dei materiali per l'isolamento delle rotaie (Terra Trazione e Terra di Struttura)	125		

1. Valutazione dell'impatto da Rumore

1.1 Introduzione metodologica e normativa

1.1.1 Inquadramento della problematica del rumore

In questo sottoparagrafo si premettono alcuni concetti base, atti alla comprensione del fenomeno fisico del rumore ed alla sua valutazione.

La principale fonte di rumore prodotta dalla circolazione di veicoli metro-tranviari è causata dal contatto ruota-rotaia. Il rumore della motorizzazione è invece ovviamente dominante a vettura ferma, ma esso è sostanzialmente inferiore a quello causato dal veicolo in circolazione. Pertanto in termini di impatto acustico è la situazione a veicolo in movimento quella più significativa.

Il rumore prodotto dal passaggio di un tram è caratterizzato da un profilo temporale che mostra una variazione molto accentuata in un lasso di tempo relativamente breve: i valori istantanei, che verranno evidenziati nei successivi paragrafi possono apparire preoccupantemente elevati, mentre, come verrà evidenziato nel cap.1.3, la valutazione del rumore ambientale va fatta considerando il livello sonoro equivalente, che è il valore ottenuto da una media energetica dell'intera storia temporale relativa al periodo diurno (16 h, dalle 6 alle 22) o notturno (8 h, dalle 22 alle 6).

Onde meglio comprendere la rilevanza dei livelli sonori istantanei che vengono discussi nel presente capitolo, ed onde evitare che essi vengano confusi con i corrispondenti livelli equivalenti (a cui si applicano i limiti di legge), viene qui presentata una tabella che mostra i valori di livello sonoro istantaneo tipici di una serie di situazioni facilmente identificabili.

SORGENTE SONORA	LIVELLO SONORO dB(A)
soglia dell'udito	0
soglia di rilevabilità di un normale fonometro	20
ambiente considerato molto silenzioso	25
conversazione sussurrata	30
Frigorifero	35
condizionatore d'aria autonomo	50
auto bassa velocità	55
lavabiancheria lavaggio	60
conversazione normale	60
Aspirapolvere	70
macchina da cucire elettrica	70
cacciata di w.c.	70
Automobile	71
lavabiancheria centrifuga	75
strada a traffico intenso	75

Pianoforte	80
Autocarro	80
Treno in transito	85
strumento musicale a corda	90
clacson auto	97
strumento musicale a fiato	100
aereo in fase di decollo	120
soglia del dolore	130

Si deve quindi notare come i valori istantanei di numerose sorgenti possano essere molto alti, ma allorché si riferiscono a sorgenti che li emettono per una breve durata, l'esposizione umana al rumore che ne consegue è trascurabile. Viceversa, nel caso di sorgenti stazionarie che emettono per l'intera giornata in modo invariante, il valore del livello istantaneo tende ad identificarsi con il livello equivalente.

Il rumore prodotto dal transito di veicoli metrotranviari è chiaramente del primo tipo: come si vedrà nel seguito, la vigente normativa prevede appunto di "spalmare" il rumore prodotto dai transiti, sporadico anche se relativamente elevato, sull'intera durata del periodo diurno (16h), onde trovare il valore di L_{eq} che va confrontato con i livelli di immissione massimi consentiti dalla legge.

1.1.2 Analisi del quadro legislativo

1.1.2.1 Il D.P.C.M. 1 marzo 1991

Il 1/3/1991 è stato emanato il D.P.C.M. dal titolo "Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno"; nell'allegato "A" al D.P.C.M. citato vengono sancite le modalità di misura del livello sonoro (quantificato in modo univoco tramite il Livello di Pressione Sonora Continuo Equivalente Ponderato "A", L_{AeqT}) e le penalizzazioni nel caso di rumori con componenti impulsive o tonali.

Nell'allegato "B" vengono invece riportati i limiti massimi di rumorosità ammessa in funzione della destinazione d'uso del territorio; essi sono (rumore diurno):

I - Aree particolarmente protette	$L_{eq} = 50$ dB(A).
II - Aree prevalentemente residenziali	$L_{eq} = 55$ dB(A).
III- Aree di tipo misto	$L_{eq} = 60$ dB(A).
IV - Aree di intensa attività umana	$L_{eq} = 65$ dB(A).
V - Aree prevalentemente industriali	$L_{eq} = 70$ dB(A).
VI - Aree esclusivamente industriali	$L_{eq} = 70$ dB(A).

Nel periodo notturno (dalle 22.00 alle 6.00) i limiti di rumorosità delle classi I-V vengono ridotti di 10 dB(A).

La applicabilità dei limiti suddetti è subordinata alla zonizzazione del territorio, che compete ai singoli Comuni. In attesa che essi provvedano a tale incombenza, valgono comunque limiti provvisori basati sulla zonizzazione urbanistica. In particolare essi sono:

- Tutto il territorio nazionale Leq = 70/60 dB(A) (D/N)
- Zona A D.M. 1444/68 Leq = 65/55 dB(A) (D/N)
- Zona B D.M. 1444/68 Leq = 60/50 dB(A) (D/N)
- Zona esclusivamente industriale Leq = 70/70 dB(A) (D/N)

Le aree residenziali di completamento sono usualmente classificate in zona B, mentre i centri storici sono in zona A.

Va tuttavia precisato che una lettura pedissequa del testo del D.P.C.M. citato porta ad escludere l'applicabilità dei limiti provvisori alle sorgenti mobili, giacché il testo della norma recita testualmente:

“In attesa della suddivisione del territorio comunale nelle zone di cui alla tabella 1, si applicano **per le sorgenti sonore fisse** i seguenti limiti di accettabilità: etc. etc.”

Tuttavia la nuova Legge Quadro sull'Inquinamento Acustico, di cui si riferisce in un successivo paragrafo, ha modificato in maniera definitiva questo punto, in quanto essa include esplicitamente le infrastrutture di trasporto fra le sorgenti sonore fisse.

Va infine precisato che, a livello di misurazione del rumore ambientale, il D.P.C.M. distingue chiaramente fra sorgenti sonore fisse e sorgenti mobili. Per queste ultime il Livello Equivalente va misurato (o calcolato) relativamente all'**intera durata** del periodo di riferimento considerato (diurno e notturno), mentre per le sorgenti fisse la misura va limitata all'effettiva durata del fenomeno rumoroso. Questo fatto è estremamente importante nel caso del rumore prodotto dal passaggio di treni, tram o anche degli aerei, costituito da sporadici eventi molto rumorosi: se la misura andasse effettuata nel breve intervallo in cui il mezzo sta passando, si verificherebbero livelli sonori estremamente alti (oltre gli 80 dBA per i treni, oltre i 70 dBA per i tram), mentre in questo modo tale rumorosità viene “diluata” sull'intera durata del periodo diurno o notturno. Anche questo punto è stato in seguito definitivamente chiarito dalla Legge Quadro nel 1995.

Oltre ai limiti assoluti, di cui si è ampiamente riferito sopra, il D.P.C.M. 1 marzo 1991 prevede anche limiti di tipo differenziale: nessuna sorgente sonora **specificata** può portare ad un innalzamento della rumorosità superiore a 5 dB diurni e 3 dB notturni, misurati **negli ambienti abitativi**, a finestre aperte. Normalmente si assume che, sebbene a rigore tale verifica andrebbe effettuata all'interno delle abitazioni, il rispetto del limite differenziale verificato all'esterno degli edifici sia garanzia sufficiente anche per il rispetto di tale limite all'interno.

In base alle definizioni riportate nell'allegato A al D.P.C.M. si evince che il criterio differenziale può essere applicato solo a specifiche sorgenti disturbanti, e non alla “rumorosità d'insieme” in un certo sito. L'applicabilità del criterio differenziale al rumore da traffico stradale è stata dunque ampiamente contestata, e sicuramente non può essere sostenuta in termini assoluti (confrontando cioè il rumore rilevato in presenza di traffico con quello che si ha in completa assenza dello stesso), anche e soprattutto perché considerando il traffico stradale nel suo insieme viene a mancare la **specificata individuazione delle sorgenti** che è invece chiaramente richiesta dal D.P.C.M..

1.1.2.2 Il D.P.C.M. n° 377 del 10/8/1988 (V.I.A.)

Sono inoltre state emanate norme riguardanti la valutazione di impatto ambientale. Il D.P.C.M. n° 377 del 10/8/1988 ha infatti parzialmente recepito la Direttiva del Consiglio CEE n° 337/85; l'art. 2, § 3 del decreto citato prevede che:

“La comunicazione ...<omissis>... oltre al progetto, comprenda uno studio di impatto ambientale contenente ...<omissis>... e) La specificazione delle emissioni sonore prodotte e degli accorgimenti e delle tecniche riduttive del rumore previsti”.

In seguito sono state emanate le Norme Tecniche relative al D.P.C.M. 377/88, mediante il D.P.C.M. del 27/12/1988; l'allegato II, § G (Rumore e Vibrazioni) di tali Norme Tecniche prescrive che:

“La caratterizzazione della qualità dell'ambiente in relazione al rumore dovrà consentire di definire le modifiche introdotte dall'opera, verificare la compatibilità con gli standards esistenti, con gli equilibri naturali e la salute pubblica da salvaguardare e con lo svolgimento delle attività antropiche nelle aree interessate, attraverso: a) la definizione della mappa di rumorosità secondo le modalità precisate nelle Norme Internazionali I.S.O. 1996/1 e 1996/2 e stima delle modificazioni a seguito della realizzazione dell'opera.”

La norma I.S.O. 1996/1 riguarda la definizione delle grandezze rilevanti per la descrizione del rumore ambientale e delle tecniche di misura da utilizzare, mentre la 1996/2 riguarda propriamente la tecnica di costruzione delle mappe del rumore.

1.1.2.3 La Legge Quadro sull'Inquinamento Acustico

La Legge Quadro sull'inquinamento acustico, è stata approvata dalla Camera dei Deputati il 25 maggio 1995 e, con modifiche molto limitate, dalla Commissione Ambiente del Senato il 26 luglio 1995. La firma della legge e la conseguente pubblicazione sulla G.U. sono datate rispettivamente 25 ottobre 1995 e 4 novembre 1995.

Sebbene la legge diverrà pienamente operativa soltanto dopo l'emanazione di tutti i previsti decreti attuativi, essa ha introdotto sin dalla sua emanazione alcune significative innovazioni al quadro legislativo, soprattutto perché chiarisce alcuni punti lasciati nel vago dal D.P.C.M. 1 marzo 1991.

I decreti attuativi avrebbero dovuto essere emanati tutti entro due anni dall'entrata in vigore della Legge Quadro, ed invece, a 6 anni dall'entrata in vigore, ne sono stati emanati solo poco più della metà. Mancano, in particolare, quelli relativi al rumore da traffico stradale ed alle tranvie.

Vengono pertanto qui illustrati i punti maggiormente significativi della Legge Quadro per quanto attiene le problematiche della rumorosità emessa da infrastrutture di trasporto terrestre.

L'art. 1 riporta le finalità della legge.

L'art. 2 contiene le definizioni dei termini. In particolare, il comma c) definisce come sorgenti sonore **fisse**: ...le infrastrutture stradali, ferroviarie, aeroportuali, marittime, industriale, artigianali, agricole; ...

L'art. 3 definisce le competenze dello Stato.

L'art. 4 definisce le competenze delle Regioni. Entro il termine di 1 anno, esse debbono emanare una legge regionale sulla classificazione del territorio in zone secondo il D.P.C.M. 1 marzo 1991; in tale legge regionale deve essere previsto esplicitamente il divieto di far confinare aree con limiti di rumorosità diversi di più di 5 dB(A), anche se appartenenti a comuni diversi. Inoltre devono essere precisati modalità, sanzioni e scadenze per l'obbligo di classificazione del territorio per i comuni che adottano nuovi strumenti urbanistici generali o particolareggiati.

L'art. 5 definisce le competenze delle Provincie.

L'art. 6 definisce le competenze dei Comuni. Essi sono tenuti ad adeguare entro 1 anno i regolamenti locali di igiene e sanità o di polizia municipale, in modo da renderli conformi alla Legge Quadro.

L'art. 7 definisce i piani di risanamento acustico. Tale articolo prevede anche che entro 2 anni, e successivamente con cadenza biennale, i Comuni con più di 50.000 abitanti siano tenuti a presentare una relazione sullo stato acustico del Comune.

L'art. 8 reca disposizioni in materia di Impatto Acustico. Vengono ricondotti entro i limiti di questa legge tutti i procedimenti di V.I.A. resi obbligatori dalla legge 8/7/86 n. 349, dal D.P.C.M. 10/8/88 n. 377 e dal D.P.C.M. 27/12/88. In ogni caso deve essere fornita al Comune una relazione di Impatto Acustico relativa alla realizzazione, modifica o potenziamento delle seguenti opere:

- a) aeroporti, eliporti, aviosuperfici.
- b) strade ed autostrade di ogni ordine e grado, escluse le interpoderali o private.
- c) discoteche.
- d) impianti sportivi e ricreativi.
- e) ferrovie ed altri sistemi di trasporto su rotaia.

Va poi notato che è richiesto uno studio di compatibilità acustica anche come allegato alla richiesta di licenza edilizia, per quegli edifici situati in prossimità delle opere di cui ai precedenti punti a), b) e c) (restano dunque escluse le ferrovie!). In pratica, però, la relazione di compatibilità acustica è richiesta quasi ovunque, basta che ci sia una strada comunale nei dintorni...

L'art. 9 riguarda ordinanze contingibili ed urgenti.

L'art. 10 riguarda le sanzioni amministrative previste. Il comma 5 di tale articolo stabilisce che le società e gli enti gestori di servizi pubblici di trasporto o delle relative infrastrutture, ivi comprese le autostrade, nel caso di superamento dei valori limite vigenti, hanno l'obbligo di presentare entro 6 mesi al Comune competente territorialmente piani di contenimento ed abbattimento del rumore. Essi debbono indicare tempi di adeguamento, modalità e costi e sono obbligati ad impegnare, in via ordinaria, una quota fissa non inferiore al 5% dei fondi di bilancio previsti per le attività di manutenzione e di potenziamento delle infrastrutture stesse per l'adozione di interventi di contenimento ed abbattimento del rumore.

L'art. 11 prevede 4 Regolamenti d'Esecuzione, che verranno emanati entro 1 anno mediante appositi D.P.R., sulla disciplina dell'inquinamento acustico prodotto dalle specifiche sorgenti: stradali, ferroviarie, marittime ed aeree.

L'art. 12 limita il volume dei messaggi pubblicitari tele o radio trasmessi.

L'art. 13 regola i contributi delle Regioni agli enti locali.

L'art. 14 regola le attività di controllo.

L'art. 15 riguarda il regime transitorio. Fino all'emanazione dei Regolamenti di Esecuzione di cui all'art. 11, si applica il D.P.C.M. 1 marzo 1991, fatta eccezione per le infrastrutture di trasporto, limitatamente al disposto di cui agli art. 2, comma 2, e 6, comma 2.

Ciò significa che **il criterio differenziale non va applicato alle infrastrutture di trasporto** (strade, ferrovie, aeroporti); esse tuttavia, essendo state comprese esplicitamente nella definizione di sorgenti fisse, sono comunque soggette ai limiti assoluti provvisori, che in determinati casi possono risultare più restrittivi dei limiti definitivi derivanti dalla zonizzazione acustica. Questo problema non riguarda comunque la città di Parma, la cui zonizzazione acustica è in vigore dalla fine del 1998.

L'art. 16 riguarda l'abrogazione di norme in conflitto con la Legge Quadro.

L'art. 17 definisce l'entrata in vigore della legge: 60 giorni dopo la pubblicazione sulla Gazzetta Ufficiale.

1.1.2.4 L'Accordo di Programma fra Ministero dell'Ambiente e Ferrovie dello Stato

Il 16 maggio 1996 è stato firmato un Accordo di Programma fra le Ferrovie dello Stato ed il Ministero dell'Ambiente: tale accordo era teso a stabilire, prima dell'uscita del decreto attuativo di cui all'art. 11 della Legge Quadro (poi emanato con DPR 459 del 18/11/1998), le modalità generali che avrebbero dovuto ispirare tale decreto.

Pertanto tale accordo è risultato essere comunque un documento ufficiale per quanto riguarda il rumore ferroviario, mentre costituisce un precedente molto importante (anche se non vincolante) anche per quanto riguarda il rumore autostradale, che presumibilmente verrà trattato in modo molto simile nel decreto attuativo pertinente, ancora non emanato.

L'Accordo di Programma sancisce alcuni principi base, ed esplicita con gran dettaglio i limiti cui deve sottostare il rumore prodotto dal transito dei convogli ferroviari sulla infrastruttura. In particolare, i punti qualificanti sono i seguenti:

La rumorosità causata dall'infrastruttura ferroviaria deve venire valutata integrando sull'intero periodo diurno o notturno, e prendendo in considerazione il solo rumore prodotto dai treni (Rumore Immeso).

Si definisce una "fascia di pertinenza dell'infrastruttura ferroviaria": è una fascia che si estende per 60 m a partire dalla mezzera del binario più esterno, ed all'interno della quale non si applicano i limiti di zona previsti dal DPCM 1 marzo 1991, ma quelli previsti dal punto successivo (il citato successivo DPR459/98 estenderà poi di parecchio l'ampiezza delle fasce di pertinenza).

All'interno della fascia di pertinenza suddetta, il limite di rumorosità **immessa** dall'infrastruttura ferroviaria è di 70 dB(A) diurni e 60 dB(A) notturni. Inoltre se esistono all'interno di tale fascia edifici di destinazione particolare (ospedali, case di cura e di riposo, scuole), all'interno degli stessi vige un limite diurno di 50 dB(A) ed un limite notturno (escluse le scuole) di 40 dB(A),

misurati a centro stanza e finestre chiuse. Per gli edifici abitativi esistenti, invece, il limite è solo notturno e pari a 50 dB(A), sempre a centro stanza e finestre chiuse.

Al di fuori della fascia di pertinenza ferroviaria si applicano normalmente i limiti di zona previsti dal DPCM 1 marzo 1991 o dal successivo, specifico decreto attuativo della Legge Quadro, ma a partire da una classe IV o superiore. Ciò significa che, all'esterno della fascia di pertinenza di cui sopra, si deve sempre trovare come minimo una fascia di classe IV, di ampiezza tale da consentire alla rumorosità di decadere di ulteriori 5 dB, onde consentire poi la presenza di zone in classe immediatamente inferiore (questo fatto non è esplicitamente indicato nel successivo DPR 459/98, ma è stato di fatto sostituito dall'adozione di una seconda fascia di pertinenza, esterna alla prima, ove vigono limiti uguali a quelli della classe IV).

I punti suddetti sono estremamente importanti, perché consentono di fissare in maniera certa l'ampiezza della fascia di pertinenza ferroviaria, e contemporaneamente stabiliscono anche la classe del territorio circostante. Inoltre va segnalato che l'accordo impegna le FF.S. a procedere alla bonifica delle situazioni che risultino eccedere i limiti di cui sopra, adottando criteri di priorità degli interventi di bonifica basati sulla considerazione sia dell'entità del superamento dei limiti, sia soprattutto della consistenza della popolazione esposta a tali superamenti. Talei criteri di prioritizzazione degli interventi di bonifica è stato in seguito oggetto dell'emanazione di un specifico decreto, in particolare il D.M.Amb. 29 novembre 2000.

1.1.2.5 Il D.P.C.M. 14 novembre 1977

Sulla G.U. n. 280 del 1/12/1997 è stato pubblicato questo nuovo DPCM, che sostituisce ed integra il "vecchio" DPCM 1/3/1991, stabilendo i nuovi limiti assoluti e differenziali di rumorosità vigenti sul territorio, nonché i criteri di assegnazione delle classi (che restano sostanzialmente gli stessi già visti).

Le principali novità del nuovo DPCM sono le seguenti:

Si definiscono per ciascun tipo di sorgente sonora due diversi limiti, detti **di emissione** e **di immissione**. I primi rappresentano il rumore prodotto nel punto recettore dalla sola sorgente in esame, mentre i secondi costituiscono la rumorosità complessiva prodotta da tutte le sorgenti (quello che nel DPCM 1 marzo 1991 veniva chiamato "rumore ambientale"). Si osservi come queste definizioni risultino in parziale contrasto sia con la stessa Legge Quadro, sia con analoghe definizioni esistenti in normative di altri paesi: ad es., in Germania si definisce Livello di Immissione il rumore prodotto dalla singola sorgente sonora nel punto ricettore, mentre si definisce Livello di Emissione il rumore prodotto ad una distanza fissa normalizzata di 25m dalla singola sorgente; il livello sonoro complessivo, prodotto da tutte le sorgenti, si chiama ancora rumore ambientale. Anche la Legge Quadro suggerisce una definizione analoga, sebbene non sufficientemente specifica.

I limiti di immissione sono gli stessi già indicati dal DPCM 1 marzo 1991, così come la definizione delle classi di destinazione d'uso del territorio. Inoltre, in attesa che i comuni provvedano all'attribuzione di tali classi, si adottano i limiti provvisori previsti dal DPCM 1 marzo 1991.

I limiti di emissione sono anch'essi tabellati in funzione della classe di destinazione d'uso del territorio, e sono in pratica sempre inferiori di 5 dB rispetto ai relativi limiti di immissione. Per esempio, se si ipotizza di trovarsi in una zona di classe IV (lim. diurno 65 dB(A)), una singola sorgente sonora non può superare (da sola) i 60 dB(A), mentre l'assieme di tutte le sorgenti sonore non può superare i 65 dB(A). Tuttavia non è chiaro a che distanza dalla sorgente sonora stessa dovrà essere effettuata la verifica del limite di emissione...

Per le infrastrutture di trasporto si rimanda agli emanandi decreti attuativi per quanto riguarda i limiti del rumore immesso dalle stesse all'interno delle previste fasce di pertinenza (vedi paragrafo precedente). Tuttavia all'interno di tali fasce il rumore prodotto dalle altre sorgenti sonore continua ad essere soggetto ai limiti di emissione ed immissione previsti per la classe di appartenenza del territorio. Si chiarisce dunque che la fascia di pertinenza di una ferrovia non costituisce una zona territoriale autonoma, dotata di propria classe di rumorosità, ma ad essa va attribuita la classificazione acustica come se la ferrovia non ci fosse, dopodiché il rumore prodotto dalla stessa dovrà sottostare i limiti specifici previsti dal relativo decreto attuativo, mentre ai fini di tutte le altre sorgenti sonore la presenza della ferrovia e della relativa fascia di pertinenza risultano del tutto influenti. Lo stesso accadrà per le altre infrastrutture di trasporto (strade, autostrade, tranvie, etc.) non appena anche ad esse i relativi decreti, ancora non emanati, assegneranno le opportune fasce di rispetto.

Vengono ribaditi i valori limite differenziali di immissione di 5 dB diurni e 3 dB notturni, validi all'interno delle abitazioni. Tali limiti non si applicano nelle zone di classi IV, V e VI, ed inoltre quando il livello di immissione, misurato a finestre aperte, è inferiore a 50 dB(A) di giorno ed a 40 dB(A) di notte, ovvero quando, a finestre chiuse, tali valori sono inferiori rispettivamente a 35 dB(A) diurni e 25 dB(A) notturni. Sulla base di questo, diventa possibile ipotizzare, nel caso di superamento dei limiti differenziali, non solo di intervenire alla fonte, ma anche di dotare le abitazioni disturbate di serramenti in grado di produrre una sufficiente attenuazione, in modo da rientrare nell'ultimo caso di esenzione previsto. Inoltre i limiti differenziali non si applicano alle infrastrutture di trasporto, alla rumorosità prodotta in maniera occasionale ed estemporanea (feste, schiamazzi, litigi, etc.) e dai servizi ed impianti a servizio comune dell'edificio disturbato stesso (ascensore, centrale termica).

Le norme transitorie non stabiliscono limiti di emissione validi fino all'adozione da parte dei comuni della suddivisione in zone del relativo territorio comunale. Sembra pertanto che gli stessi entrino in vigore solo dopo che è stata effettuata la zonizzazione acustica.

Alcuni punti oscuri del DPCM vengono poi chiariti dal successivo decreto sulla strumentazione e tecniche di misura (D.M. Amb. 16/3/1998).

1.1.2.6 Il D.P.C.M. 3 dicembre 1997

Si tratta di uno dei decreti attuativi della Legge Quadro, avente per titolo “Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici”. In sostanza si tratta di un dispositivo molto semplice, che fissa la prestazioni minime in termini di isolamento al rumore aereo fra unità abitative adiacenti R_w , dell'isolamento di facciata $D_{2m,nT,w}$, del livello normalizzato di calpestio su solai separanti unità abitative diverse $L_{n,w}$, nonché del rumore massimo prodotto dagli impianti tecnologici a funzionamento saltuario L_{ASmax} e continuo L_{Aeq} , sempre con riferimento agli effetti nelle unità abitative adiacenti quella in cui sono installati.

I requisiti richiesti sono variabili in funzione delle destinazioni d'uso dei locali, definite nella seguente tab. A:

categoria A :	edifici adibiti a residenza o assimilabili
categoria B :	edifici adibiti ad uffici e assimilabili
categoria C :	edifici adibiti ad alberghi, pensioni ed attività assimilabili
categoria D :	edifici adibiti ad ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili
categoria E :	edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli ed assimilabili
categoria F :	edifici adibiti ad attività ricreative o di culto ed assimilabili
categoria G :	edifici adibiti ad attività commerciali o assimilabili

I valori dei parametri acustici da rispettare sono riportati nella seguente tab. B:

Tab. B – valori limite dei parametri acustici

Categorie di cui alla Tab. A	Parametri				
	$R_w(*)$	$D_{2m,nT,w}$	$L_{n,w}$	L_{ASmax}	L_{Aeq}
1.D	55	45	58	35	25
2.A,C	50	40	63	35	35
3.E	50	48	58	35	25
4.B,F,G	50	42	55	35	35

Si deve osservare che i valori numerici delle prime due colonne sono valori minimi, quindi sono da desiderare risultati maggiori di quelli indicati in tabella, mentre le successive tre colonne riportano dei valori massimi, che non debbono venire superati.

Per maggior chiarezza, vengono qui succintamente descritte le 5 grandezze atte a quantificare la prestazione acustica degli edifici, richiamando le relative norme UNI per la definizione e le modalità di misura:

- Isolamento acustico normalizzato – da misurare su pareti divisorie cieche di unità abitative confinanti – requisito minimo da garantire per edifici di civile abitazione $R_w > 50$ dB.

- Isolamento normalizzato di facciata – da misurare su facciate con serramenti rivolte all'esterno dell'edificio - requisito minimo per edifici di civile abitazione $D_{2m,nT,w} > 48$ dB.
- Livello normalizzato di calpestio – da misurare su solai divisorii di unità abitative diverse – requisito minimo per edifici di civile abitazione $L_{n,w} < 63$ dB.
- Livello massimo Slow, ponderato “A”, del rumore prodotto da impianti a funzionamento discontinuo - requisito minimo per edifici di civile abitazione $L_{ASmax} < 35$ dB.
- Livello equivalente ponderato “A” del rumore prodotto dagli impianti a funzionamento continuo - requisito minimo per edifici di civile abitazione $L_{Aeq} < 25$ dB.

E' ovvio che tutti gli edifici realizzati dopo l'entrata in vigore del decreto vadano progettati e realizzati con idonei accorgimenti costruttivi e soluzioni tipologiche tali da garantire il rispetto dei limiti prestazionali di cui sopra. Nel caso tali valori non vengano raggiunti, potrà essere negata l'abitabilità o l'agibilità dell'edificio, ovvero potranno essere negate le autorizzazioni per l'esercizio di attività produttive o commerciali.

Non è chiaro tuttavia se il rispetto dei limiti prestazionali debba venire dimostrato (o garantito) anche in sede di domanda di concessione edilizia, in quanto l'ottenimento dei risultati voluti dipende solo parzialmente dalle soluzioni progettuali definite in tale sede, ed in misura ben maggiore dalle tecniche esecutive delle strutture e degli impianti.

1.1.2.7 D.M.Amb. 16 marzo 1998 Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico

Questo decreto ha sostituito l'allegato “A” al DPCM 1 marzo 1991, ed ha introdotto numerose innovazioni e complicazioni alle tecniche di rilievo.

Le complicazioni riguardano in particolare la definizione e la modalità di rilevamento dei fattori di penalizzazione per presenza di componenti impulsive, tonali e di bassa frequenza, che fortunatamente però non si applicano al rumore generato dai mezzi di trasporto. Pertanto non si riferisce qui in merito a tali complesse problematiche.

Per quanto riguarda il rilevamento del rumore prodotto dal traffico stradale, il decreto prevede un rilevamento in continua per 1 settimana, con memorizzazione dei livelli equivalenti ponderati “A” ogni ora, e calcolo a posteriori del livello equivalente medio del periodo diurno e notturno. Non è prevista né l'analisi statistica del rumore, né il tracciamento di profili temporali con risoluzione inferiore all'ora. A parte dunque la necessità di protrarre il rilevamento per una intera settimana (cosa giustificabile in alcuni casi, ma non certo in tutti), questa nuova normativa prevede un rilevamento molto semplice, attuabile anche con strumentazione di costo molto basso.

Viceversa, per quanto riguarda il rilevamento del rumore ferroviario, è richiesto un rilievo in continua della durata di 24 ore, nel corso delle quali si debbono identificare gli eventi sonori causati dal passaggio dei singoli treni.

Di ciascun passaggio occorre determinare il SEL (livello di singolo evento), indi il livello equivalente prodotto dal solo rumore dei treni si ottiene sommando energeticamente i SEL di tutti i transiti, e diluendo il risultato sul tempo di riferimento diurno o notturno, espresso in secondi:

$$L_{Aeq,TR} = 10 \cdot \lg \left[\sum_{i=1}^N 10^{0.1 \cdot SEL_i} \right] - 10 \cdot \lg [T_R]$$

In pratica con questa procedura si “depura” il rumore ambientale complessivo del rumore residuo, e si ottiene un livello equivalente dei soli treni, direttamente confrontabile con i limiti di cui allo specifico decreto attuativo.

1.1.2.8 Il D.P.R. 18 novembre 1998, n. 459

Questo decreto fissa i limiti di rumorosità ammessi per le sorgenti di rumore ferroviario, nonché l'estensione delle cosiddette “fasce di pertinenza” circostanti le infrastrutture ferroviarie.

Esso è il primo dei decreti relativi alle varie tipologie di infrastrutture di trasporto, ed in pratica costituisce un po' la “linea guida” su cui si presume anche gli altri analoghi decreti verranno realizzati.

In pratica, si distingue fra linee ferroviarie già in esercizio e linee di nuova realizzazione; per queste ultime, si distingue ulteriormente fra linee a bassa ed alta velocità (> 200 km/h).

Per le linee ferroviarie esistenti e per quelle di nuova realizzazione a bassa velocità, vengono previste due diverse fasce di pertinenza, con limiti differenziati. La fascia più interna ha ampiezza pari a 100m a partire dalla mezzzeria dl binario più esterno, ed all'interno della stessa vige un limite di immissione del solo rumore ferroviario pari a 70 dB(A) diurni e 60 dB(A) notturni. La fascia più esterna ha ampiezza di ulteriori 150m (va dunque dai 100 ai 250 m dalla mezzzeria del binario più esterno): entro tale seconda fascia, il limite di immissione del solo rumore ferroviario scende a 65 dB(A) diurni e 55 dB(A) notturni. Si precisa inoltre che, nel caso di nuove edificazioni in prossimità di una linea già in esercizio, gli interventi eventualmente necessari onde garantire il rispetto dei limiti suddetti sono a carico di chi realizza i nuovi edifici, e non dell'ente gestore della infrastruttura ferroviaria.

In entrambe le fasce, comunque, i ricettori sensibili (scuole, case di riposo, case di cura, ospedali) vengono tutelati con limiti molto più restrittivi (50 dBA diurni, 40 notturni). Per le scuole si applica solo il limite diurno.

Per le linee di nuova costruzione ad alta velocità, invece, esiste una unica fascia di pertinenza ampia 250m, all'interno della quale vigono i limiti di immissione di 65 dB(A) diurni e di 55 dB(A) notturni, tranne che per i ricettori sensibili di cui sopra, che mantengono i valori limite su indicati.

Le altre sorgenti di rumore debbono rispettare i relativi limiti di immissione, come se la sorgente ferroviaria non ci fosse, entro le fasce di pertinenza di quest'ultima. Inoltre, al di fuori delle fasce di pertinenza, il rumore ferroviario concorre al raggiungimento dei limiti di immissione complessivi previsti sulla base della classificazione acustica delle aree.

Questo decreto è estremamente importante anche per il fatto che costituisce il “capostipite” della serie di decreti che dovranno normare le altre infrastrutture fisse legate al trasporto, in particolare traffico stradale ed attività portuali. Il decreto sul rumore ferroviario stabilisce quindi un importante precedente, ed i concetti di area di pertinenza della infrastruttura e di differenziazione dei limiti di rumorosità applicabili all'infrastruttura da quelli applicabili alle altre sorgenti costituiscono

sicuramente l'ossatura su cui verranno basati anche gli attesi decreti attuativi sul rumore stradale e sulle attività portuali (e le bozze recentemente circolate di tali decreti confermano tale ipotesi).

A rigore questo decreto è esplicitamente non applicabile al rumore prodotto dalle tranvie. Tuttavia, come mostrato nel successivo paragrafo, il Ministero dell'Ambiente ha fornito indicazioni che ne consentono l'estensione, su fascia di pertinenza più limitata, anche per il caso delle tranvie urbane.

1.1.2.9 Il D.M.Amb. 29 novembre 2000

Il decreto definisce i criteri per la predisposizione dei piani di contenimento e abbattimento del rumore nel settore delle infrastrutture di trasporto (stradale, ferroviario, aeroportuale). All'art. 1 la norma stabilisce i criteri tecnici da adottare da parte delle società e degli enti gestori delle infrastrutture di trasporto, ai fini della redazione di un piano di contenimento e abbattimento del rumore prodotto dall'infrastruttura stessa.

Nei successivi articoli vengono definiti gli obblighi del gestore (art.2), i criteri di priorità degli interventi (art.3), gli obiettivi delle attività di risanamento (art.4), gli oneri e le modalità di risanamento (art.5), le attività di controllo (art.6).

L'articolo più importantnte è il n.2, che stabilisce le attività da svolgere e le scadenze temporali delle stesse. Si distingue anzitutto tra tre tipi di infrastrutture:

Stradali e ferroviarie di importanza locale e regionale

Stradali e ferroviarie di importanza nazionale e interregionale

Aeroporti

La prima scadenza temporale è prevista dopo 18 mesi dall'entrata in vigore del decreto, quindi è il 4 agosto 2002: entro tale data l'ente gestore dell'infrastruttura deve presentare alla regione competente una relazione sulla verifica del rispetto dei limiti di rumorosità, con individuazione delle aree ove essi sono superati.

Entro ulteriori 18 mesi dalla presentazione di tale relazione, l'ente gestore deve poi presentare il piano di contenimento ed abbattimento del rumore. Tale termine di 18 mesi scatta anche successivamente, in seguito a modificazioni delle infrastrutture o dei flussi veicolari insistenti sulle stesse, tali da scatenare un superamento “ex novo” dei limiti di rumorosità.

Gli obiettivi di risanamento previsti dal piano suddetto debbono poi essere effettivamente conseguiti entro ulteriori 15 anni, anche se la Regione può, in determinate situazioni, fissare un termine diverso.

Un ulteriore scadenza temporale è poi fissata dall'art.6 (Attività di controllo): entro il 31 marzo di ogni anno, e comunque entro tre mesi dall'entrata in vigore del decreto, gli enti gestori delle infrastrutture di trasporto debbono comunicare al Ministero dell'Ambiente, alla Regione ed al Comune, l'entità dei fondi accantonati annualmente e complessivamente a partire dalla data di entrata in vigore della L.447/95 e lo stato di avanzamento dei singoli interventi previsti, sia in corso che già conclusi.

Particolarmente interessanti sono poi i due allegati al decreto: l'allegato 1 contiene una metodica di quantificazione numerica dell'indice di priorità degli interventi di risanamento. Tale indice è ottenuto come somma dei prodotti fra la differenza fra livello sonoro prodotto dall'infrastruttura e limite di legge, ed il numer R di recettori compreso in ciascuna area caratterizzata da un valore uniforme di tale differenza. Il numero di ricettori R si calcola convenzionalmente come prodotto dell'area per l'indice demografico statistico ad essa pertinente, a parte il caso delle strutture sanitarie (n. di posti letto x 4) e delle scuole (n. degli alunni x 3).

L'allegato 2 descrive infine le modalità tecniche di valutazione della rumorosità mediante modelli di calcolo numerico, di cui vengono descritte le caratteristiche funzionali minime, ed i criteri di progettazione acustica delle opere di mitigazione. E' importante osservare come in entrambi i casi i requisiti tecnici previsti coincidano esattamente con le capacità previsionali espletate dai modelli di calcolo Citymap/Disiapyr, che furono sviluppati in collaborazione con il Ministero dell'Ambiente, e che sono stati utilizzati nel presente studio.

1.1.2.10 Il Parere del Ministero dell'Ambiente sulla Tramvia di Verona

Con lettera n. 110960 del 7/12/2000 il Comune di Verona aveva posto al Ministero dell'Ambiente uno specifico quesito, teso a definire quali siano i limiti di rumorosità applicabili sulla base dell'attuale quadro normativo al rumore prodotto da una tramvia urbana. Con lettera n. 1442/2001/SIAR del 10 maggio 2001, il compianto dott. Biondi, dirigente del SIAR di tale Ministero, ha fornita una esauriente e documentata risposta in cui viene chiarito che:

- i limiti differenziali non sono in ogni caso applicabili
- all'interno di una fascia di rispetto di 30m vigono i limiti di immissione relativi al solo rumore prodotto dall'infrastruttura in esame previsti dal DPR 18/11/98 n. 459 (70 dBA diurni, 60 dBA notturni, ad esclusione dei recettori in classe 1 che conservano i loro limiti rispettivamente pari a 50 dBA diurni e 40 dBA notturni)
- all'esterno di tale fascia, il rumore proveniente dalla tranvia concorre, assieme a quello stradale, alla rumorosità immessa complessivamente, che deve rispettare i limiti previsti dalla zonizzazione acustica (tipicamente 65 dBA diurni e 55 dBA notturni per strade di grande traffico e per tutto il centro storico, visto che tali aree sono usualmente poste in classe IV).

Nel seguito dello studio si sono pertanto assunti questi valori come i limiti rispetto a cui valutare l'impatto acustico dell'opera.

In allegato "A" si riporta integralmente copia del Parere del Ministero dell'Ambiente di cui sopra.

1.1.3 Descrizione della tecnica di elaborazione computerizzata

Il programma Citymap è stato sviluppato dal prof. Angelo Farina dell'Università di Parma, nell'ambito di un progetto di ricerca DISIA denominato "Inquinamento acustico nelle aree urbane", organizzato dal Ministero dell'Ambiente nel 1995. Esso si appoggia sul 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).

1.1.3.1 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

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

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 allorché, anziché 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.

Affinché 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.

1.1.3.2 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.

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.

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.

Rumore da traffico stradale

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

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

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

TIPO DI SEDE STRADALE

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

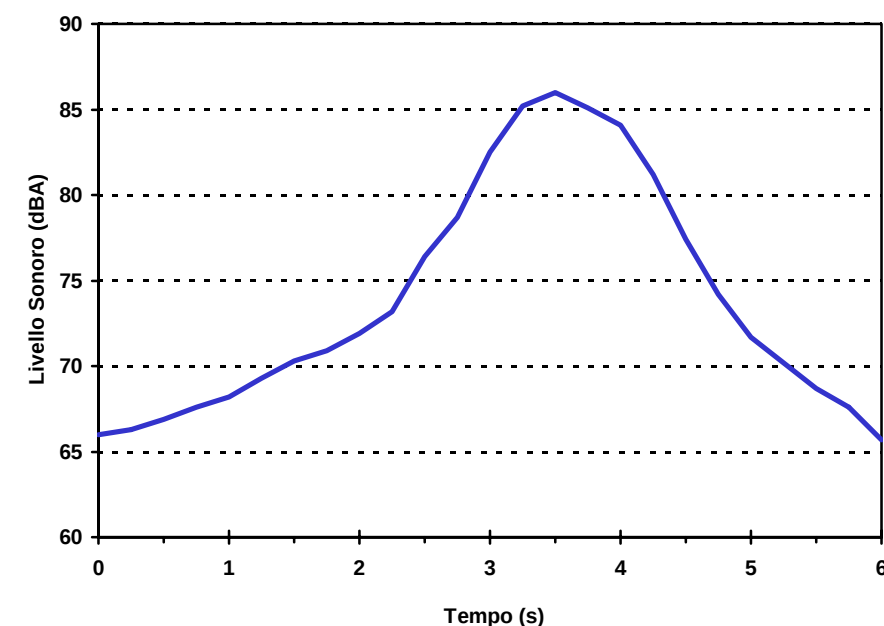
CATEGORIA DI VEICOLI

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

FASCE DI VELOCITA'

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

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



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

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

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.

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		400
	V2	30		30		30		30		120
A2	V3	30		30		30		30		120
	V4	30		30		30		30		120
	V5	20		20		20		20		80
	V1	100		100		100		100		400
	V2	30		30		30		30		120
A3	V3	30		30		30		30		120
	V4	30		30		30		30		120
	V5	20		20		20		20		80
	V1	100		100		100		100		400
	V2	30		30		30		30		120
A4	V3	30		30		30		30		120
	V4	30		30		30		30		120
	V5	20		20		20		20		80
	V1	100		100		100		100		400
	V2	30		30		30		30		120
A5	V3	30		30		30		30		120
	V4	30		30		30		30		120
	V5	20		20		20		20		80
		1620		1620		1620		1620		6480

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

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

File SELSC8V1.TXT

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

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 VELOCITÀ

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

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

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

C4 - $V > 120$ Km/h.

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

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

1.1.3.3 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 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 divengano 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 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:

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

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 :

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

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.

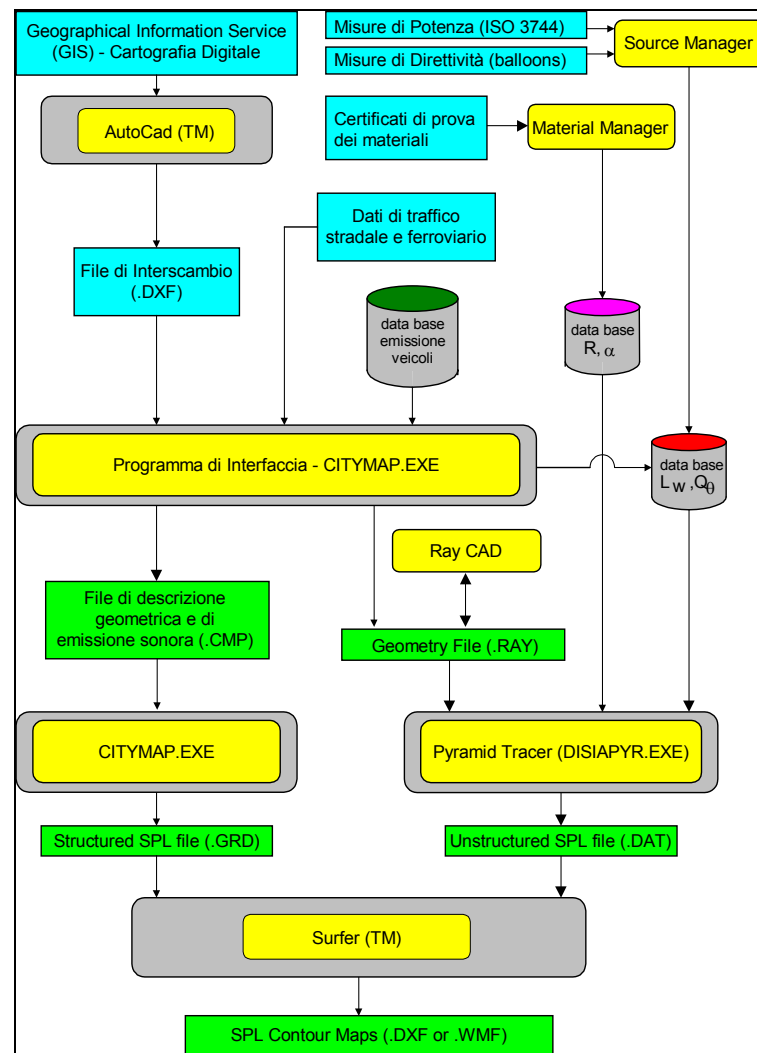
Vengono infine applicate correzioni per riflessioni multiple nel caso la sede stradale presenti una sezione ad L, ad U largo o ad U stretto pari rispettivamente a +1, +3 e +5 dB(A).

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, anziché affidarsi al calcolo basato sul data-base di valori di SEL a corredo del programma. Nel caso in esame, è stato pertanto forzato manualmente il livello di emissione diurno.

In particolare il valore impiegato deriva dall'analisi teorico-sperimentale dettagliatamente descritta nel paragrafo 1.3.2

1.1.3.4 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:

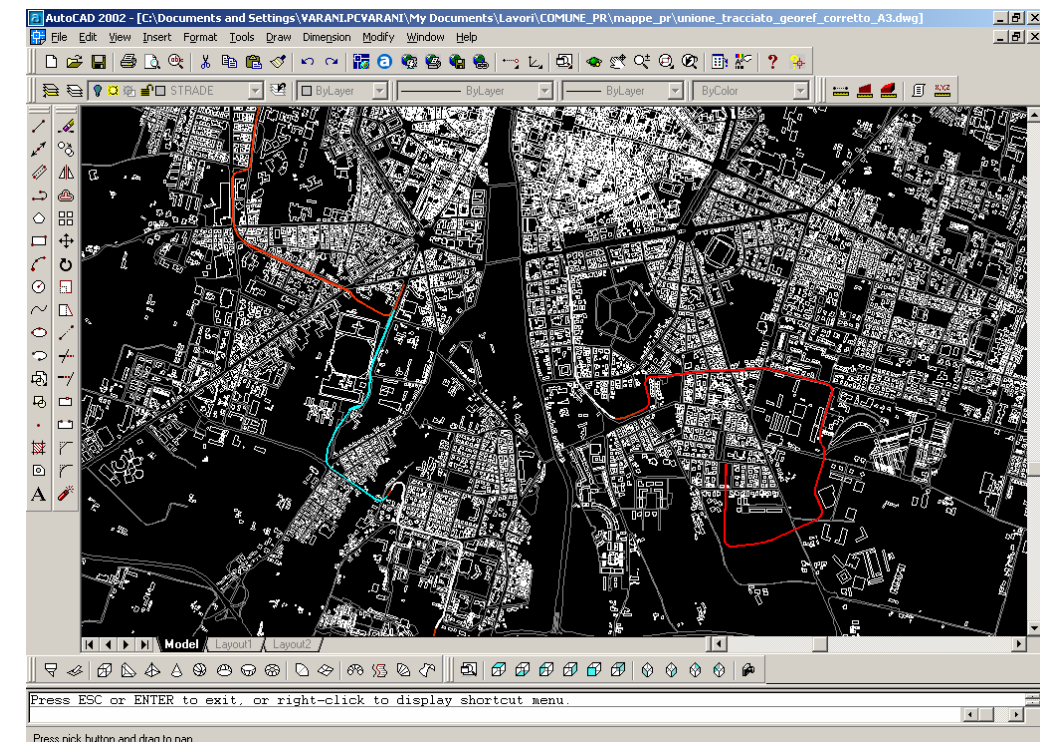


Come si nota numerosi programmi sono chiamati ad interagire: di essi due sono programmi commerciali (Autocad™ e Surfer™), mentre gli altri sono stati realizzati in proprio.

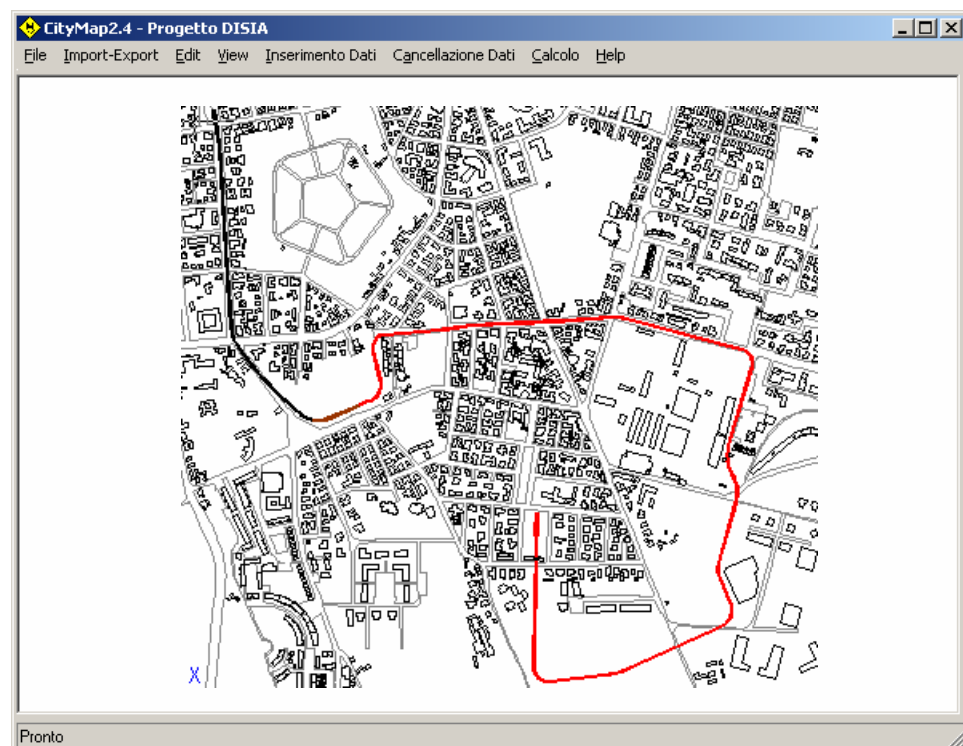
Si parte da Autocad, che serve per tradurre le informazioni cartografiche in un file DXF leggibile da Citymap. All'interno di Citymap, avviene l'introduzione dei dati di traffico stradale e ferroviario, che vengono "agganciati" alle entità geografiche (strade, binari, sorgenti concentrate). Si provvede 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:

Edizione dati traffico stradale

Selezione Tratto Stradale

Tratto n. Nome:

Preced. Success. Fine

Leq,7.5m (G/N) ☐ 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)		C1-(0-30 km/h) acc
N.camion 2 assi (V2)		C1-(0-30 km/h) acc
N.camion 3 assi (V3)		C1-(0-30 km/h) acc
N.TIR (V4)		C1-(0-30 km/h) acc
N.motocicli (V5)		C2-(0-30 km/h) dec

Traffico notturno complessivo

N.autovetture (V1)		C1-(0-30 km/h) acc
N.camion 2 assi (V2)		C1-(0-30 km/h) acc
N.camion 3 assi (V3)		C1-(0-30 km/h) acc
N.TIR (V4)		C1-(0-30 km/h) acc
N.motocicli (V5)		C2-(0-30 km/h) dec

☐ 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

Edizione dati traffico ferroviario

Selezione Tratto Ferroviario

Tratto n. Nome:

Preced. Success. Fine

Leq,7.5m (G/N) ☐ Fisso ☒ Calcola

Proprietà

Tipo di Armamento	1-Bin. cont. saldato su ball.
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)	70	20	C1-(0-60 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)			C1-(0-60 km/h)
tr.pass. l.perc. (V3)			C1-(0-60 km/h)

☐ Imposta automaticamente i dati del binario precedente

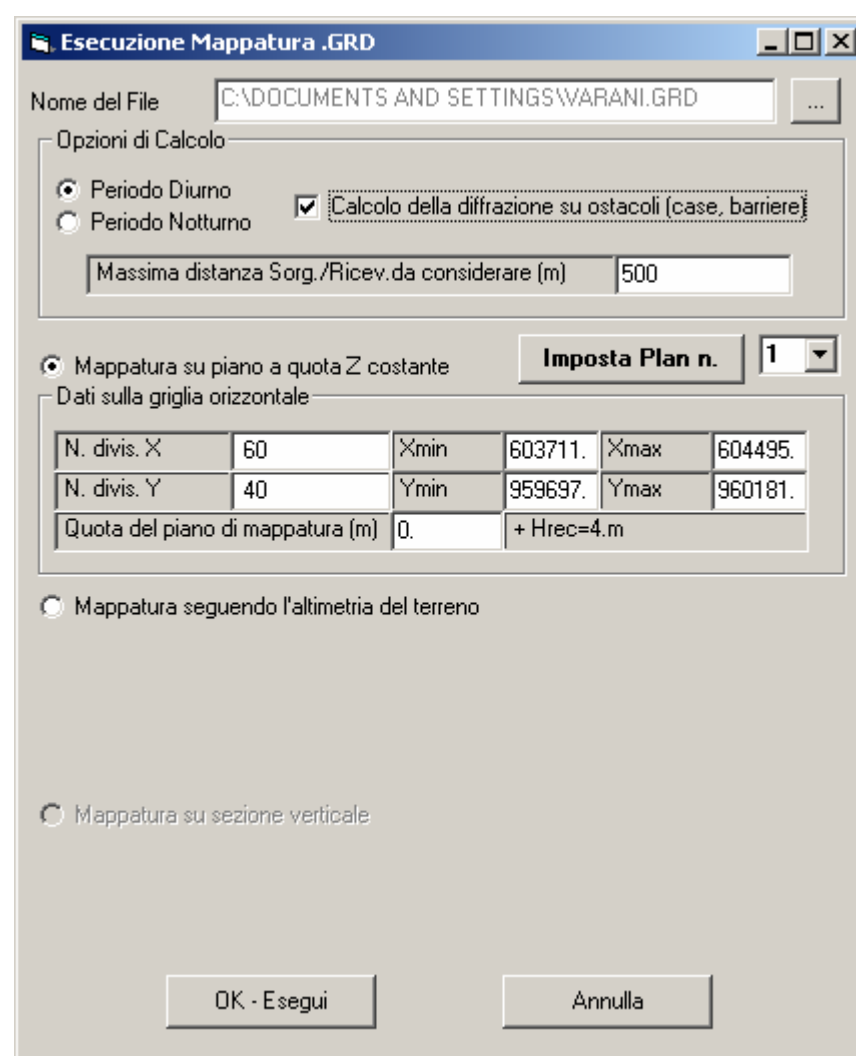
Come si nota, per le strade sono disponibili 6 "bottoni" che impostano automaticamente i dati di traffico "tipici" di 6 diversi tipi di strade. Per le sorgenti lineari di tipo industriale (caso tipico il perimetro di uno stabilimento), è necessario aver preventivamente disegnato un tratto "pseudo-stradale" 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.

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.

Da Surfer, infine, si può esportare l'assieme 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.

1.1.4 Descrizione della tecnica di misura

Per poter utilizzare il programma sopra descritto è stato necessario effettuare una campagna di misura in alcuni punti critici, in modo da poter tarare il modello di calcolo secondo i flussi nelle varie tendine di traffico stradale e ferroviario.

La campagna di misura fonometrica di cui si riportano i valori nel par.**Error! Reference source not found.** si basa su una tecnica chiamata campionamento spazio-temporale. Mediante questa tecnica il valore del livello continuo equivalente L_{Aeq} su periodi medio lunghi non è misurato direttamente, come invece avviene in un rilevamento continuo, bensì è stimato sulla base di una serie di dati rilevati in prefissati intervalli di tempo, solitamente molto brevi rispetto all'intero periodo a cui è riferito il L_{Aeq} .

Nella tecnica di campionamento vengono in genere distinti i seguenti periodi temporali, definiti anche nel Decreto del Ministero dell'Ambiente 16.3.1998:

- Tempo a lungo termine T_L : la cui durata è stabilita in relazione agli obiettivi dell'indagine
- Tempo di riferimento T_R : individuato all'interno di T_L rappresenta il periodo della giornata all'interno del quale si eseguono le misurazioni; il Decreto distingue inoltre tra tempo di riferimento diurno T_{Rd} (tra le 06 e le 22) e tempo di riferimento notturno T_{Rn} (tra le 22 e le 06), e si ha per cui:

$$\sum_{i=1}^r T_{Rdi} = T_{Ld} \quad \sum_{i=1}^r T_{Rni} = T_{Ln}$$

- Tempo di osservazione T_O : collocato all'interno di ogni singolo tempo T_{Ri} e definibile in uno o più tempi T_{Oj} :

$$\sum_{j=1}^o T_{Oj} \leq T_{Ri}$$

- Tempo di misurazione T_M : collocato all'interno di un tempo di ciascun tempo T_{Oj} e vale:

$$\sum_{k=1}^m T_{Mk} \leq T_{Oj}$$

Ad ogni k-esimo intervallo di misura T_{Mk} , di durata t_k , è associato il corrispondente livello equivalente $L_{Aeq, TMk}$. L'ipotesi alla base è che il valore del livello equivalente L_{Aeq} corrispondente all'insieme dei K-esimi livelli misurati $L_{Aeq, TMk}$ coincida con il livello equivalente riferito al tempo di osservazione T_{Oj} contenente i k-esimi tempi T_{Mk} , ossia:

$$L_{Aeq, T_{Oj}} = 10 \log \left[\frac{1}{T_{Mtot}} \cdot \sum_{k=1}^m t_k \cdot 10^{(L_{Aeq, TMk} / 10)} \right]$$

in cui T_{Mtot} è il tempo totale di misurazione contenuto in T_{Oj} pari a:

$$T_{Mtot} = \sum_{k=1}^m t_k$$

dall'insieme dei j-esimi livelli $L_{Aeq, T_{Oj}}$ si ricava il livello equivalente riferito al tempo di riferimento T_{Ri} :

$$L_{Aeq, T_{Ri}} = 10 \log \left[\frac{1}{T_{Ri}} \cdot \sum_{j=1}^o t_j \cdot 10^{(L_{Aeq, T_{Oj}} / 10)} \right]$$

analogamente si ricava il livello equivalente L_{Aeq, T_L} riferito al tempo di riferimento T_L mediante la relazione:

$$L_{Aeq, T_L} = 10 \log \left[\frac{1}{r} \cdot \sum_{i=1}^r 10^{(L_{Aeq, T_{Ri}} / 10)} \right]$$

In pratica, per ciascuna zona da analizzare, si sceglie una postazione particolarmente rilevante in termini di stretta relazione causa-effetto; in pratica, si sceglie un edificio affacciato sulla viabilità principale, in modo che il microfono rilevi un segnale massimamente correlato con il flusso veicolare che costituisce la sorgente sonora primaria.

In questa posizione di riferimento si installa un sistema di misura semi-permanente, che campiona il livello sonoro equivalente ad intervalli di 1 minuto per 24 ore, ed effettua una analisi statistica completa dell'evoluzione temporale del rumore.

Utilizzando un paio di strumenti portatili, nel corso delle 24 ore in cui nella postazione di riferimento è in corso il rilievo in continua, vengono eseguiti rilievi "spot" in alcune posizioni "secondarie", in modo da verificare la distribuzione spaziale del livello sonoro nell'area. Ciascun rilievo "spot" ha una durata tipica di 10-15 minuti.

Ipotizzando che la legge di distribuzione spaziale del rumore resti invariata nel corso delle 24 ore, conoscendo il livello della posizione di riferimento negli stessi 10 minuti in cui si è svolto ciascun rilievo "spot", diventa possibile calcolare per differenza anche il livello equivalente riferito all'intero tempo di riferimento diurno o notturno in ciascuna posizione secondaria, con un errore piuttosto contenuto, soprattutto se si è scelta con cura la postazione di rilievo primario, in modo che il segnale da essa rilevato sia ben correlato con le principali sorgenti di rumore della zona.

1.1.5 Valutazione dell'impatto acustico ed eventuale dimensionamento di opere di mitigazione

Stabilito che al rumore prodotto dalle linee tranviarie non si applica il criterio differenziale, la valutazione dell'impatto acustico dell'opera qui descritta può essere impostata con riferimento a due diverse metodiche:

- confronto fra STATO DI FATTO e STATO DI PROGETTO
verifica del rispetto dei vigenti LIMITI DI EMISSIONE (all'interno della fascia di pertinenza avente un'ampiezza di m 30 per lato) e dei LIMITI COMPLESSIVI DI IMMISSIONE (al di fuori di tale fascia).

Il primo confronto si risolve in maniera semplice, e molto favorevolmente: la situazione acustica dello stato di fatto è in generale molto preoccupante, con valori molto elevati su tutte le strade del centro aperte al traffico veicolare. In particolare è evidente l'effetto causato dagli autobus di linea, che costituiscono una parte importante della frazione di veicoli pesanti in circolazione. Si deve rammentare, a tal proposito, che un mezzo pesante equivale, dal punto di vista acustico, a circa 8 autoveicoli in condizioni di marcia fluida, e ad un numero ancora superiore in caso di incolonnamento o marcia in condizioni di flusso saturato.

Nella situazione di progetto si avrà un significativo decremento del traffico su gomma, nei tratti in cui è previsto il passaggio a raso dei binari su strade che attualmente hanno un elevato traffico cittadino, ed in particolare di mezzi pesanti (visto che numerose corse di autobus vengono sostituite dai tram), e considerando che l'emissione sonora specifica dei tram è inferiore di quella degli autobus che essi andranno a sostituire (guardando i valori di SEL, si può affermare che un autobus equivale a circa 2 tram, pur trasportando meno passeggeri di un singolo tram).

Considerando il fatto che è previsto un incremento generale del traffico di circa il 17% nelle zone limitrofe alla metrotramvia si conclude che la rumorosità di progetto sarà ovunque inferiore a quella ante-operam aggiornata allo scenario del 2013, con riduzione in alcune tratte anche di 3 dB(A) (le riduzioni più forti si hanno laddove il traffico su gomma verrà interdetto).

E' pur vero che questa analisi è giocoforza limitata ad una sottorete abbastanza ristretta dell'intera rete di trasporto della città di Parma; tuttavia è altamente improbabile (pur se lontanamente ipotizzabile) che la riduzione dei flussi su tale sottorete sia accompagnata da importanti fenomeni di redistribuzione, capaci di concentrare flussi veicolari anomali su altri archi della rete esterna.

Si conclude quindi che, dal punto di vista del confronto fra stato di fatto e stato di progetto, l'impatto ambientale del rumore è destinato a ridursi, e l'opera è dunque benefica e priva di controindicazioni.

Si passa ora a valutare il secondo aspetto, cioè il rispetto dei limiti assoluti di rumorosità. A tale fine, si rammenta che esistono due situazioni ben distinte: all'interno di una fascia di pertinenza avente ampiezza pari a 30m a partire dal bordo esterno della sede della tranvia (su ambo i lati), si applicano i limiti definiti dal D.P.R. 18 novembre 1998, n. 459:

- a) 50 dB(A) Leq diurno, 40 dB(A) Leq notturno per scuole, ospedali, case di cura e case di riposo; per le scuole vale il solo limite diurno;

b) 70 dB(A) Leq diurno, 60 dB(A) Leq notturno per gli altri ricettori all'interno della fascia di pertinenza;

E' consentito tuttavia, se si ha il superamento dei limiti suddetti all'esterno dell'edificio, garantire comunque il rispetto della legge allorchè la rumorosità all'interno dei locali, misurata a finestre chiuse, risulti inferiore ai seguenti valori:

35 dB(A) Leq notturno per ospedali, case di cura e case di riposo;

40 dB(A) Leq notturno per tutti gli altri ricettori;

45 dB(A) Leq diurno per le scuole.

Tutti i valori sin qui enunciati si riferiscono al solo rumore prodotto dall'infrastruttura tranviaria, considerato in modo indipendente da ogni altra fonte di rumorosità.

Appare evidente come il limite di tipo b) sarà rispettato con ampio margine ovunque, visto la contenuta emissione sonora prodotta dal transito dei tram.

In generale, viene anche rispettato il limite di tipo a), purchè l'edificio sensibile si trovi ad una distanza dalla linea tranviaria superiore ai 10-15 m.

Con ciò non si vuole certo affermare che la tranvia stessa sarà causa di rumori inaccettabili, quando invece si è dimostrato che essa porterà ad una significativa riduzione della rumorosità complessiva. Tuttavia tale riduzione non è (e non può essere) sufficiente a far rientrare la rumorosità complessiva in un valore così assurdamente stringente, quale è il limite previsto dalla vigente normativa per edifici in classe I.

Si deve qui rilevare che i valori limite della classe I sono sostanzialmente irraggiungibili, anche in aperta campagna. Infatti durante le ore diurne fenomeni naturali come il rumore del vento fra i rami, il canto degli uccelli o degli insetti, portano al superamento dei limiti di alcuni dB. Per non parlare della situazione notturna, allorchè, durante i mesi estivi, basta il canto dei grilli per superare abbondantemente il limite di 40 dB(A).

Nella zona esterna alla fascia di pertinenza della tranvia si trovano infatti anche recettori in classe I per i quali è vigente anche il limite notturno (ad esempio ospedali e case di cura): è evidente che il limite notturno in facciata a tali recettori, pari a 40 dB(A), è attualmente ampiamente superato, e che continuerà ad essere superato qualsiasi intervento si adotti, ivi compresa la completa chiusura al traffico sia privato che dei mezzi pubblici dell'intera città. In sostanza, siamo in presenza di un limite fisicamente irraggiungibile, che il legislatore ha adottato senza una preventiva verifica delle sue ricadute sul territorio.

Il superamento dei limiti di classe I è quindi un fenomeno del tutto generalizzato sul territorio italiano, e se esso venisse considerato preoccupante, il traffico stradale sarebbe stato vietato ovunque nel raggio di 500m da qualunque area di classe I.

L'unica situazione che causerà problemi acustici è la fase di cantierizzazione, particolarmente durante la realizzazione dello scavo dalla superficie previsto nelle tratte di galleria superficiale e delle rampe di accesso alle tratte in galleria a foro cieco. Per queste ultime, invece, si prevede che le operazioni di scavo, realizzate intermanete nel sottosuolo, non forniscano alcun apprezzabile impatto acustico (anche se, come verrà mostrato nel cap. 2, vi saranno impatti vibrazionali, comunque inferiori rispetto a quelli causati dalla costruzione delle tratte in galleria superficiale).

1.2 Valutazione del rumore esistente nello stato di fatto

1.2.1 Risultati della campagna di rilevamento fonometrico

Allo scopo di fornire una verifica sperimentale diretta alla funzionalità del sistema di modellazione matematica impiegato per la simulazione sia dello stato di fatto, sia di quello di progetto, sia di quello di cantiere, si sono operati rilievi fonometrici in un congruo numero di "aree potenzialmente critiche" distribuite lungo il tracciato delle due linee previste dal progetto preliminare della metrotranvia di Parma.

Vengono pertanto riportati qui i dati fonometrici ottenuti, in forma compatta. A richiesta verranno fornite le schede di rilievo dettagliate, che sono state consegnate al Comune di Parma visto che esse serviranno anche per la redazione del Piano di Risanamento Acustico del Comune di Parma, attualmente in corso di realizzazione.

I rilievi fonometrici sono stati effettuati dall'Ing Andrea Avanzini e dall'ing. Christian Varani, con l'ausilio di personale in servizio civile messo a disposizione dal Comune di Parma, nei mesi di Febbraio e Marzo 2004 con la seguente strumentazione:

- Fonometro integratore/analizzatore di spettro B&K 2260
- Fonometro integratore B&K 2236
- Fonometro integratore B&K 2231
- Fonometro integratore/analizzatore di spettro CESVA SC-30
- Fonometro integratore Larson-Davis 812L
- Pc portatile Satellite 5100 Toshiba

La procedura adottata per la campagna di misura è stata quella del campionamento spazio-temporale descritta nel paragrafo 1.1.4. Durante ciascun rilievo sono stati rilevati il livello sonoro equivalente Leq, i valori massimo e minimo, ed i livelli percentili (con ponderazione Fast).

Una rapida osservazione dei risultati mostra comunque come i livelli, in numerose postazioni, siano estremamente elevati, in quanto vengono facilmente superati i 65 dB(A) (limite diurno per le aree in classe IV) ed in alcune sezioni si superano addirittura i 70 dB(A) (limite per le aree industriali).

Va detto che i risultati di rilievi diurni di 10 minuti non sono direttamente confrontabili con i risultati della modellazione matematica, presentati nel successivo paragrafo. Tuttavia essi costituiscono una ragionevole indicazione del "clima acustico" esistente nella città di Parma, e conseguentemente sono un significativo indicatore del fatto che la situazione esistente è non solo già ampiamente degradata, ma in alcuni casi del tutto inaccettabile.

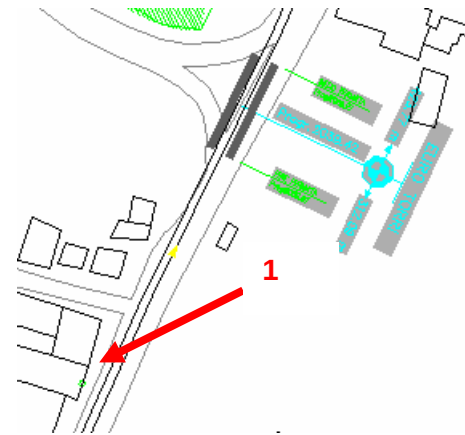
Tabella dei rilievi fonometrici effettuati nei pressi di punti in cui è previsto il passaggio del tracciato metropolitano.

N.	Data	Ora	Durata	Luogo	Leq	Leq,giorno	Leq,notte	L10	L90
1	04/03/2004	16:51	24 h	Via San Leonardo 68		69.5	63.1	76.5	48.0
2	04/03/2004	17:46	10'	Via S. Leonardo n° 6	71.9	71.8	65.4	76.3	48.6
3	04/03/2004	17:31	24 h	Via Trento 67		72.5	67.0	75.0	48.3
4	04/03/2004	17:24	10'	Via Trento n° 59/A	72.2	72.5	67.0	76.2	48.8
5	09/03/2004	16:35	24 h	Piazzale carlo Alberto Dalla Chiesa		66.6	60.2	68.5	42.3
6	16/03/2004	18:18	24 h	Piazzale della Pace		60.6	53.6	69.5	39.5
7	15/03/2004	16:51	24 h	Viale della Villetta 17		67.5	61.3	75.5	43.0
8	15/03/2004	16:05	10'	Viale della Villetta n° 5	70.4	69.1	62.9	74	43.7
9	15/03/2004	15:45	10'	Viale della Villetta (incrocio Via Stirone)	67.6	67.1	60.9	75.3	43.2
10	15/03/2004	15:30	10'	Viale della Villetta n° 41	65.0	64.0	58.8	74.8	43.0
11	18/02/2004	12:35	10'	Via Bramante n° 11	58.5	53.6	47.2	82.3	37.1
12	18/02/2004	16:00	24 h	Via Ognibene		58.9	52.5	82.0	37.6
13	18/02/2004	16:40	24 h	Via Logoscuro 3		57.6	45.4	59.4	37.9
14	24/03/2004	16:27	24 h	Via Solferino 25		64.7	52.7	66.1	44.0
15	24/03/2004	17:00	10'	Via Solferino n° 2	70.6	70.6	58.6	66.0	44.5
16	24/03/2004	17:20	10'	Via Solferino n° 17	70.1	68.6	56.6	66.7	44.3
17	24/03/2004	15:41	24 h	Via Caduti e Dispersi in Russia n° 9		55.3	46.5	64.5	33.0
18	24/03/2004	17:30	10'	Incrocio tra Via Caduti e Dispersi in Russia e Via Anna Frank	63.0	60.5	51.7	64.5	33.5
19	16/03/2004	18:21	24 h	Via De Gasperi 5		53.8	47.5	54.1	38.8

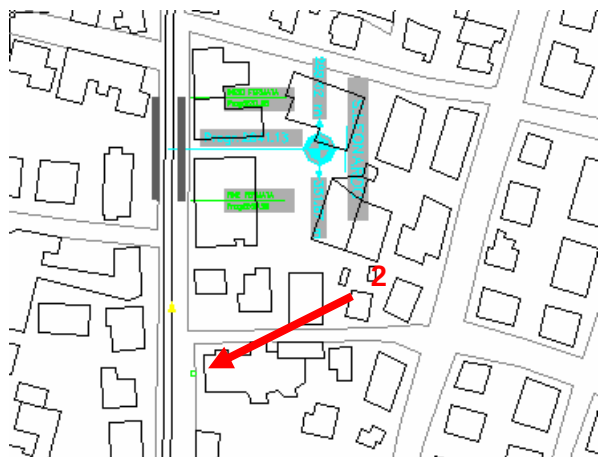
1.2.2 Localizzazione delle posizioni di misura



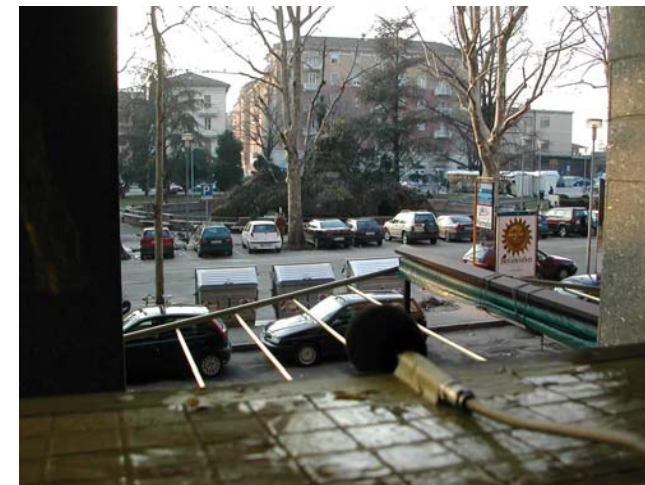
Pos n°1 Via S.Leonardo 68



Pos n° 3 e 4 Via Trento 57- 59/A



Pos n° 2 Via S.Leonardo 6

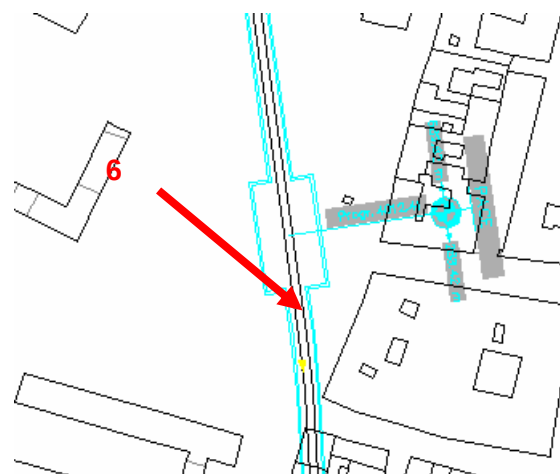


Pos n° 5 Piazzale Carlo Alberto Dalla Chiesa





Pos n° 6 Piazzale della Pace



Pos n° 11 Via Bramante



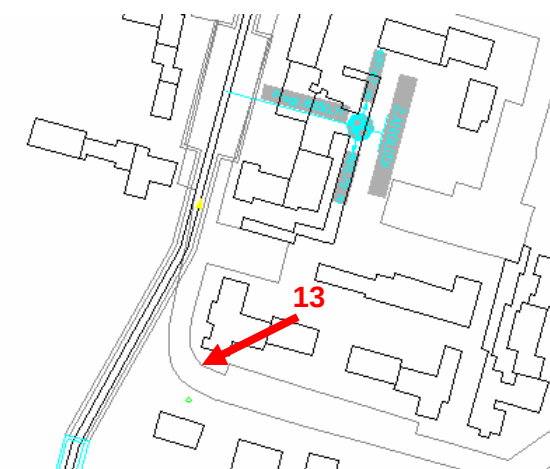
Pos n° 12 Via Ognibene



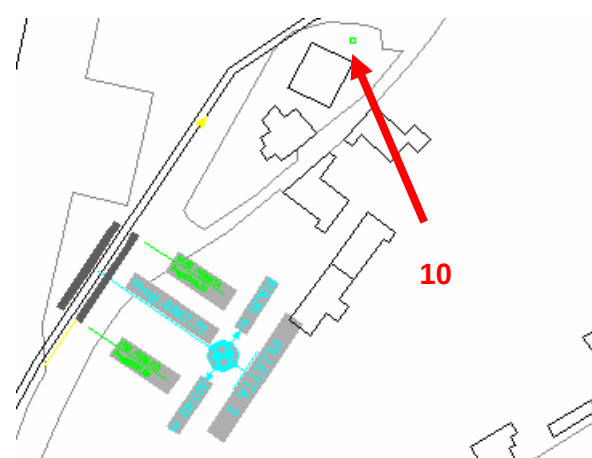
Pos n° 7 e 9 Viale della Villetta n° 17 e incrocio con via Stirone



Pos n° 13 Via Lagoscuro 3



Pos n° 8 Viale della Villetta n° 5



Pos n° 10 Viale della Villetta n° 41



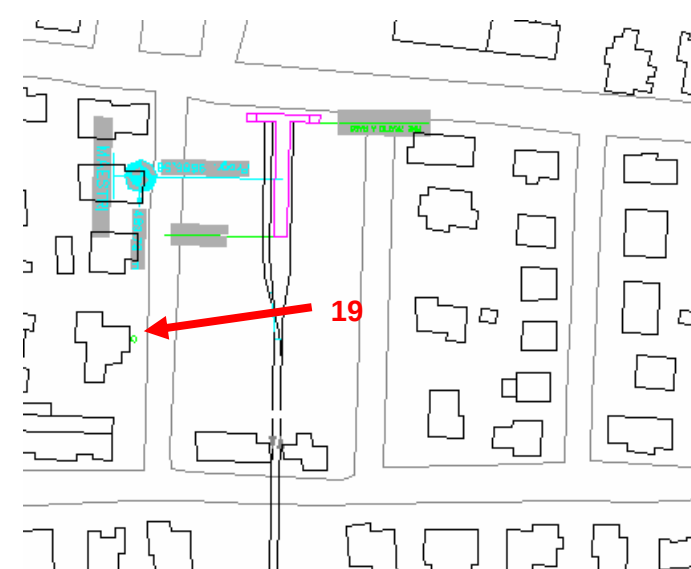
Pos n° 15 via Solforino 2



Pos n° 17 e 18 Via caduti in Russia 9 ed incrocio con Via Anna Frank

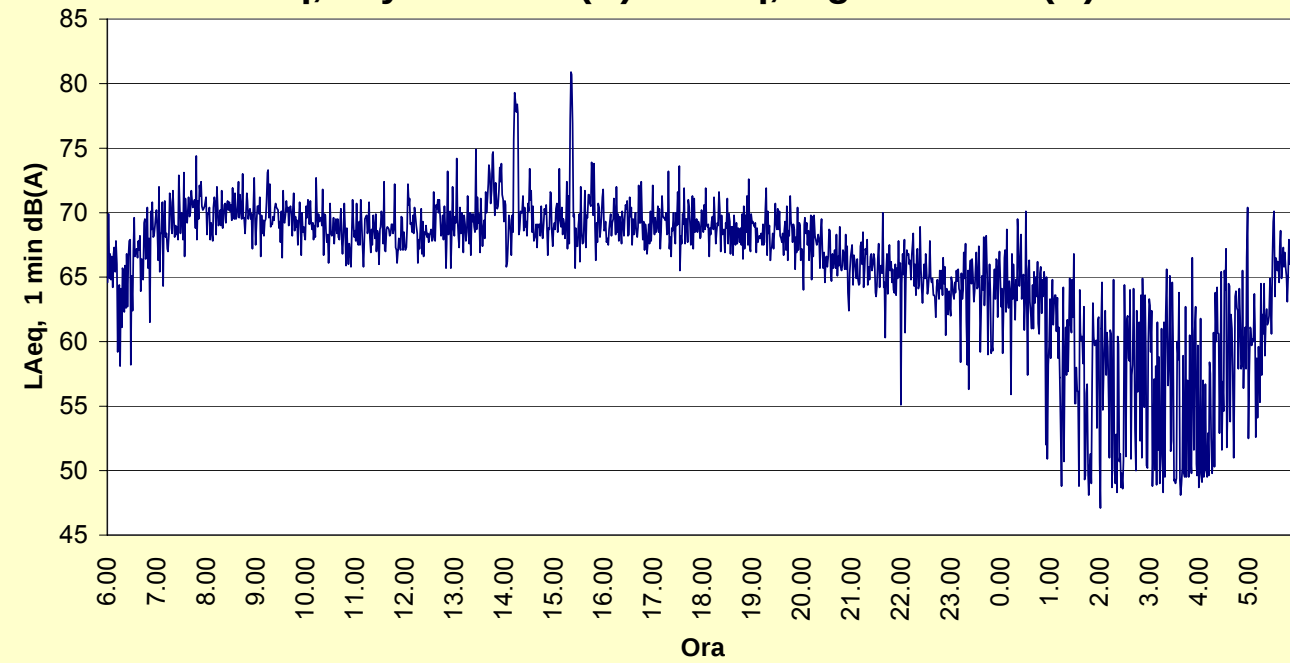


Pos n° 14 e 16 via Solforino 25 e 17

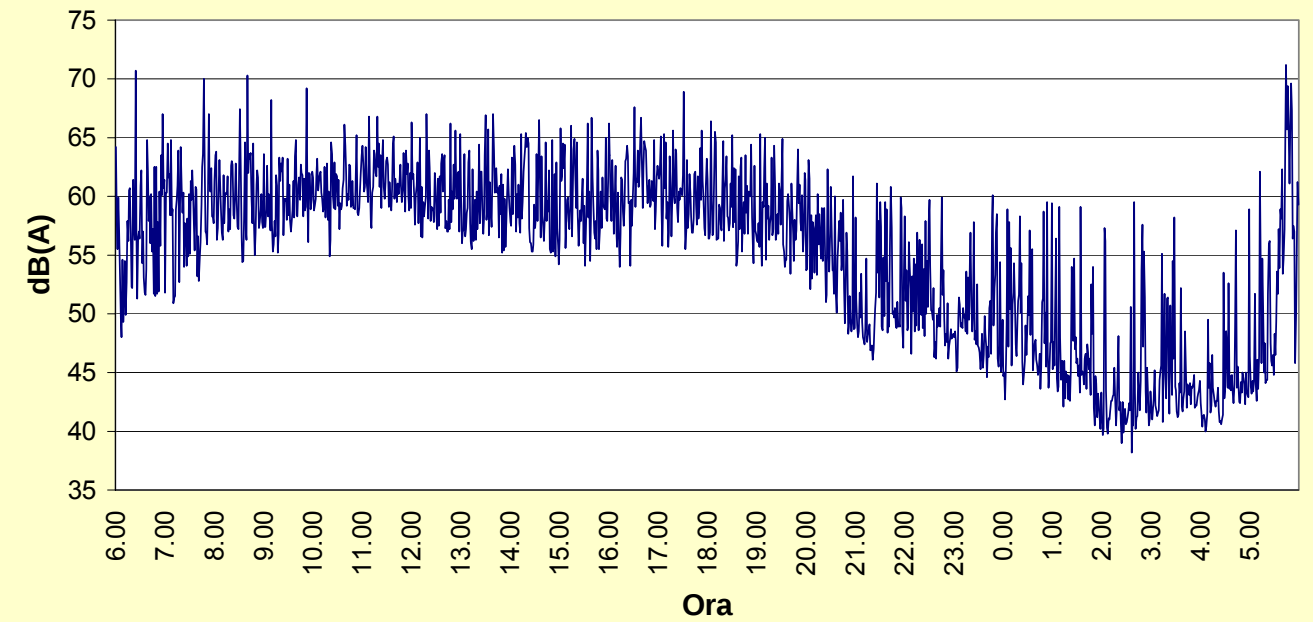


Pos n° 19 Via de Gasperi 5

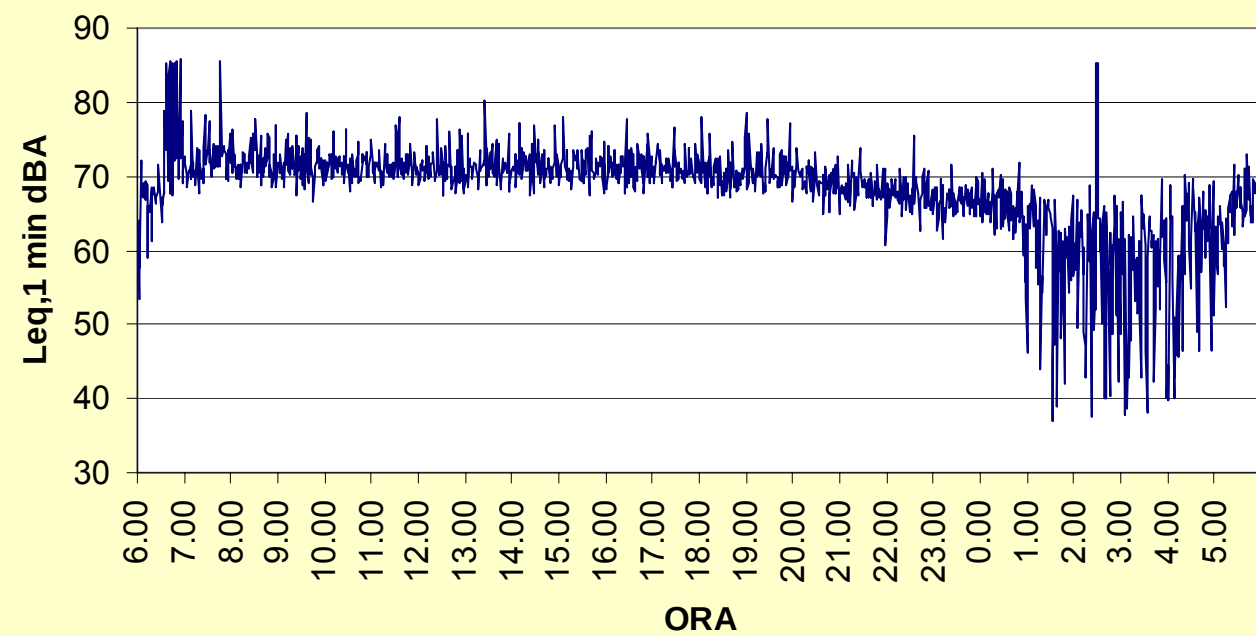
LAeq, 1min in via San Leonardo 68
LAeq, day= 69.5 dB(A) - LAeq, night 63.1 dB(A)



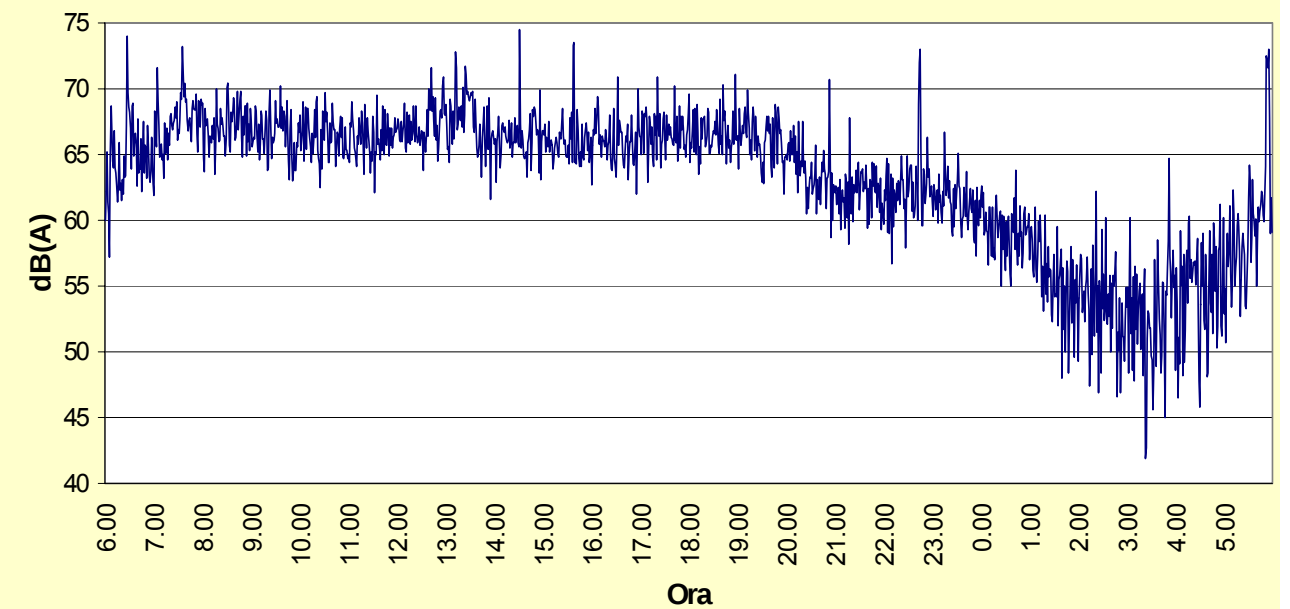
LAeq, 1min Piazzale della pace (via Garibaldi)
LAeq, day = 60.6 dB(A), LAeq, night = 53.6 dB(A)



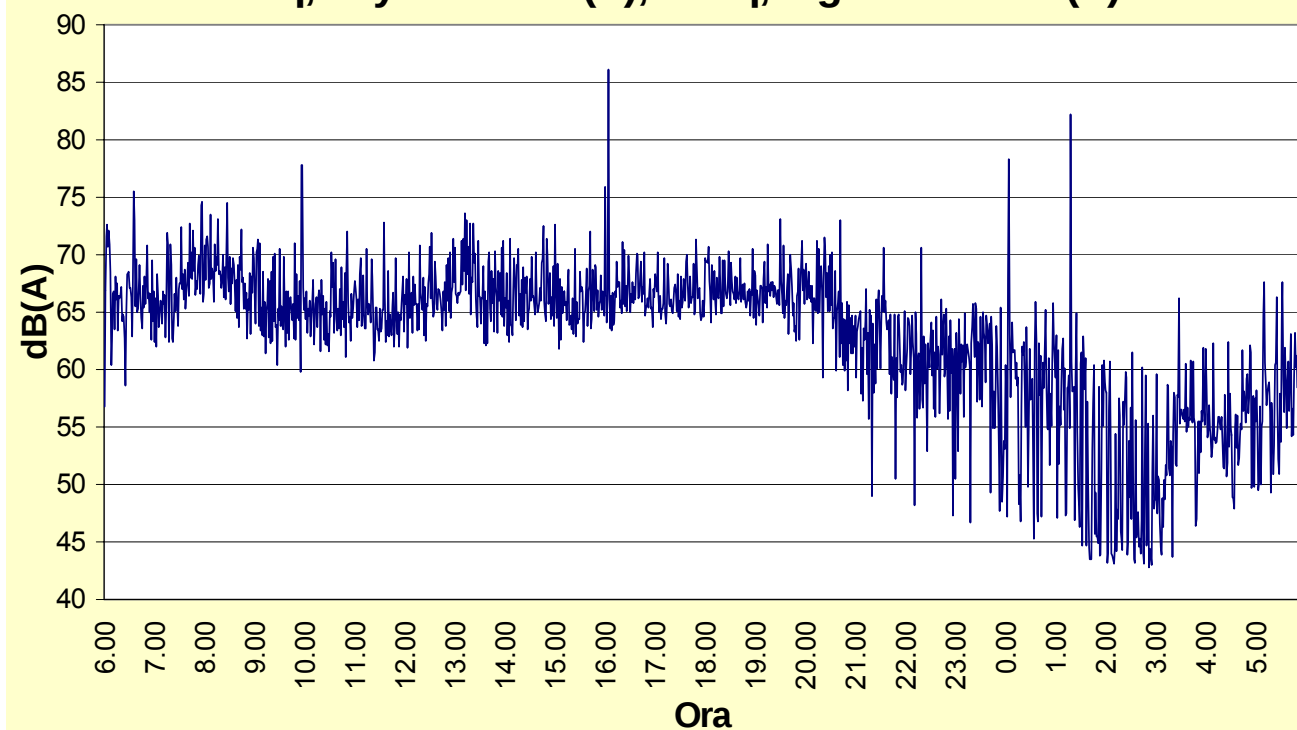
Leq,1 min



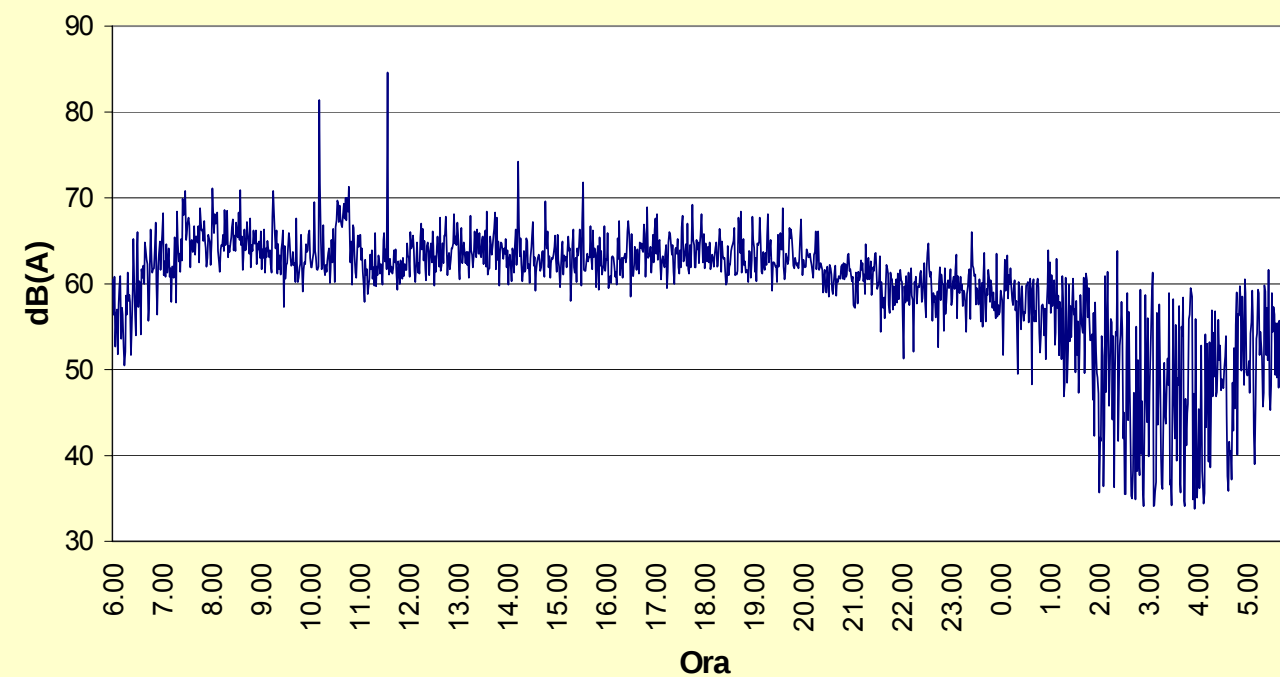
LAeq, 1 min Stazione (Piazzale C. A. Dalla Chiesa)
LAeq, day = 66.6 dB(A), LAeq, night = 60.2 dB(A)



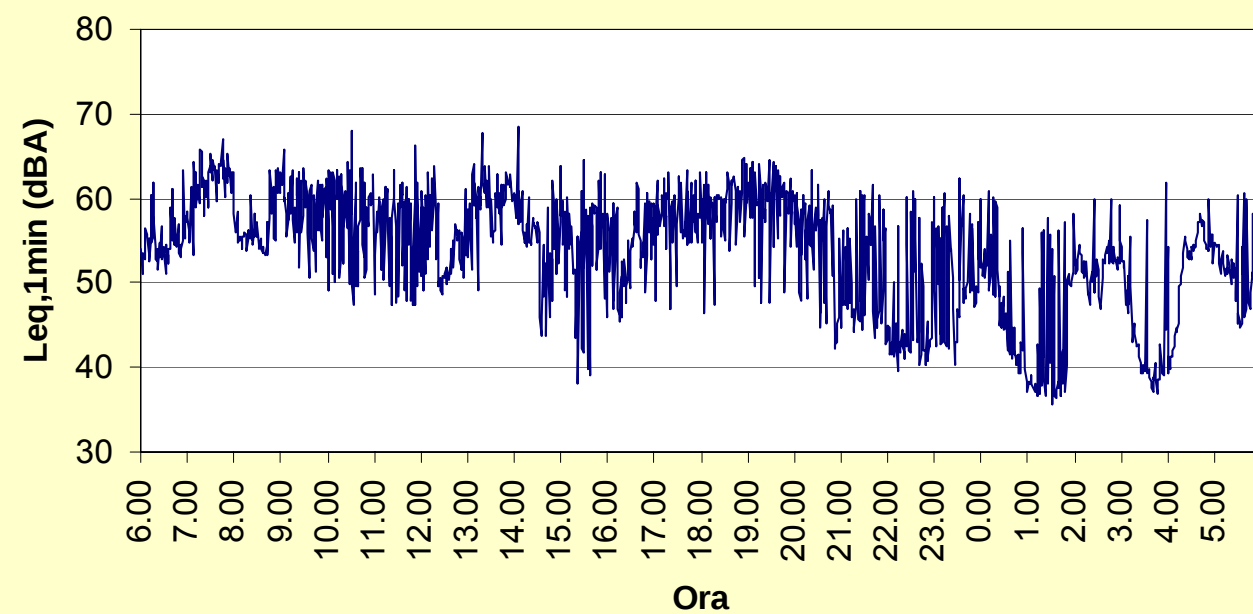
LAeq, 1 min viale della Villetta 17
LAeq, day = 67.5 dB(A), LAeq, night = 61.3 dB(A)



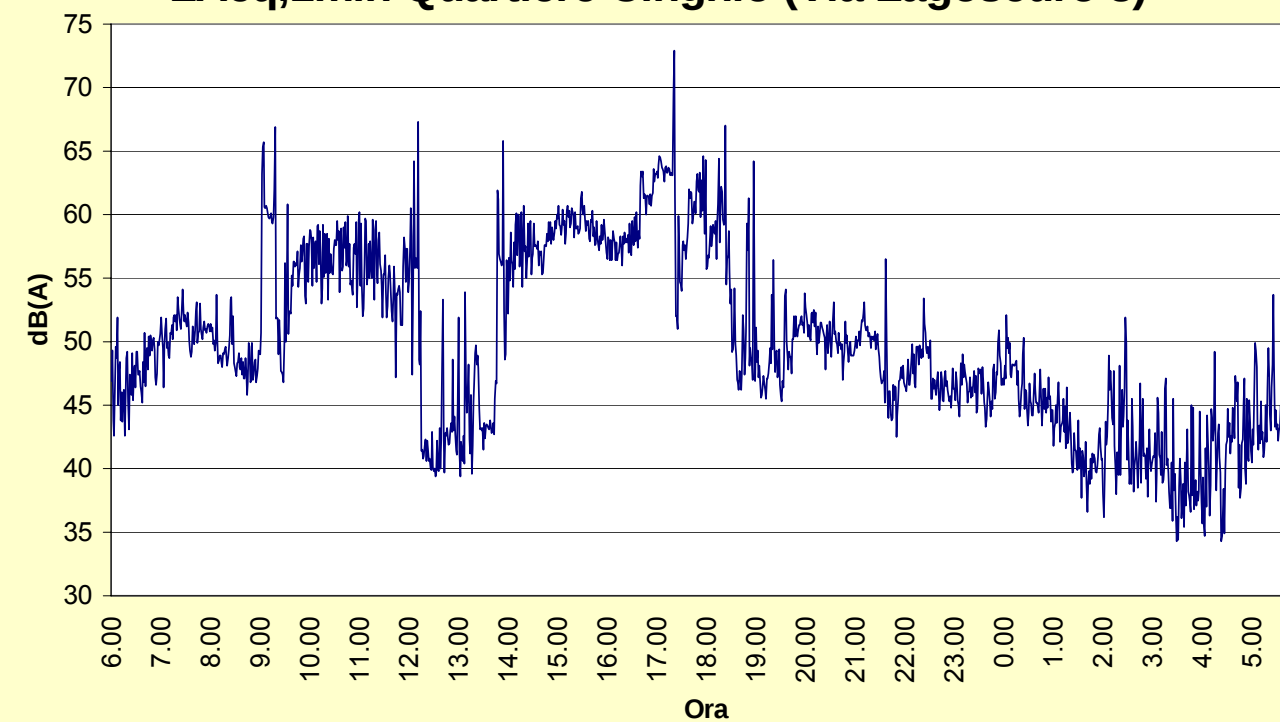
LAeq,1 min Scuola Laura Sanvitale (Via Solferino 25)
LAeq,day = 64.7 dB(A) - LAeq,night = 57.2 dB(A)

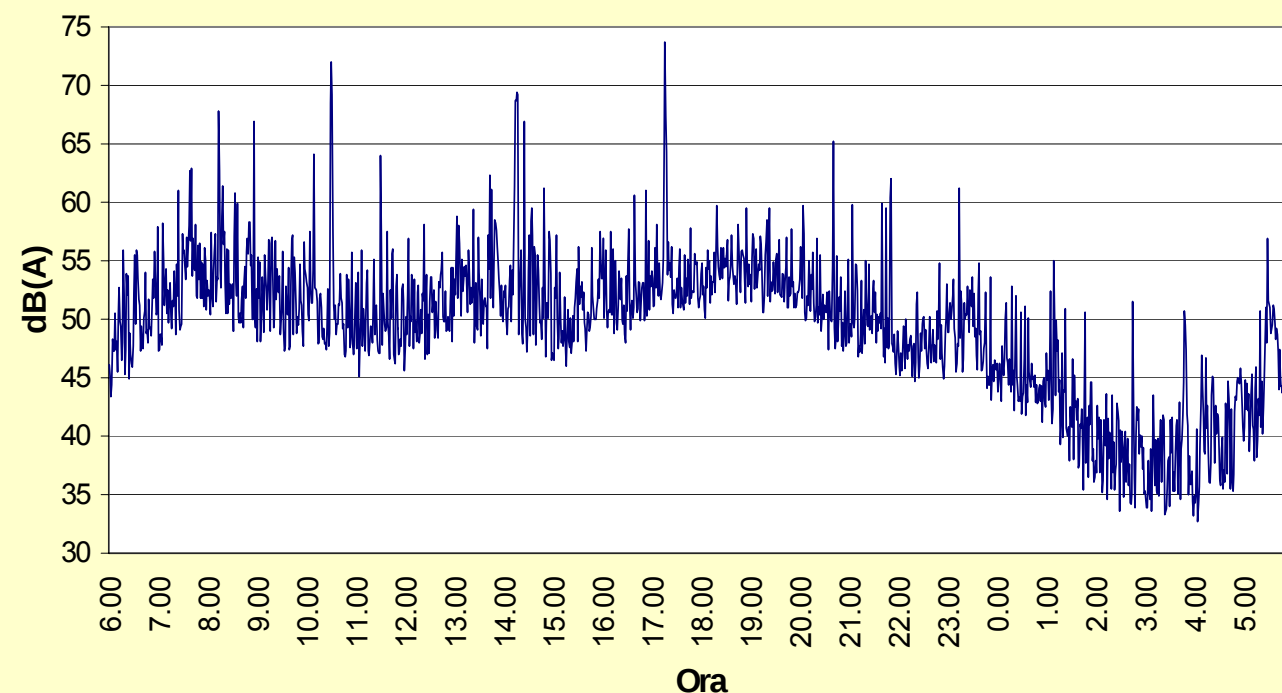
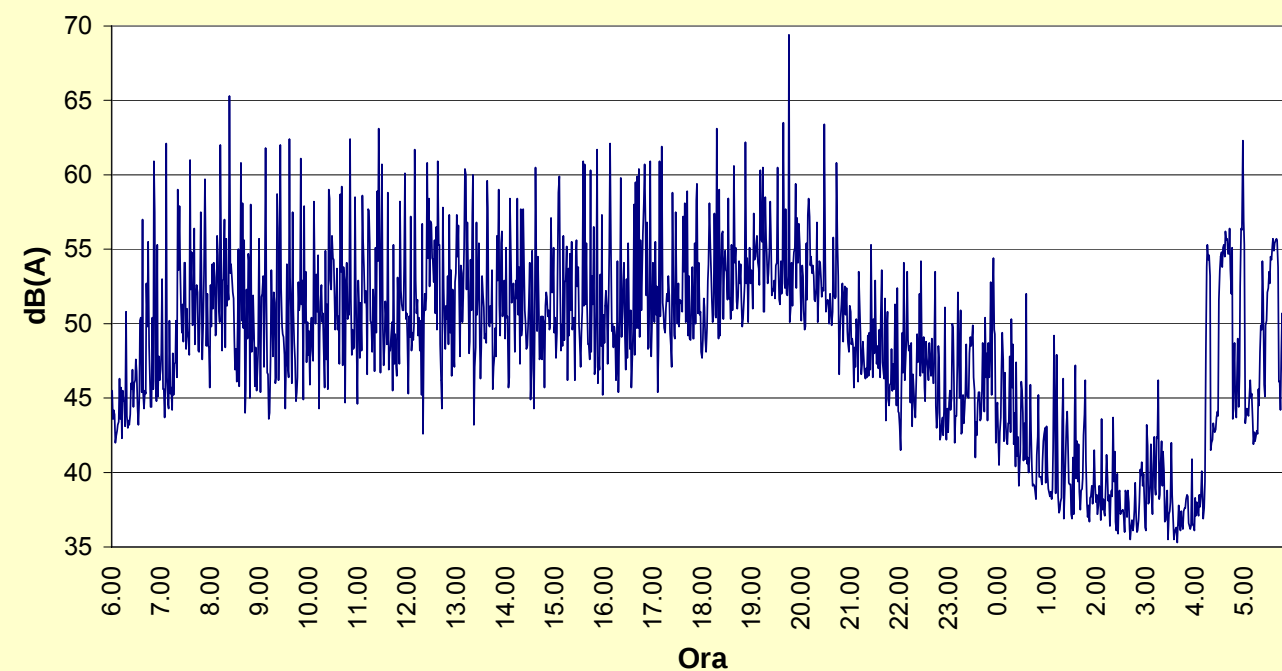


Via Ognibene - Scuola G. Rodari
Leq,day = 58.9 dB(A) - Leq,night = 52.4 dB(A)



LAeq,1min Quartiere Cinghio (Via Lagoscuro 3)



LAeq,1 min - Via Caduti e Dispersi in Russia n° 9**LAeq, day = 55.3 dB(A) - LAeq, night = 46.5 dB(A)****LAeq, 1min Campo Calcio Montebello (via De Gasperi 5)****Laeq, day = 53.8 dB(A), Laeq, night = 47.5 dB(A)****1.2.3 Modellazione matematica dello stato di fatto**

In questo capitolo viene descritta la modellazione matematica dello stato di fatto. Onde garantire la coerenza dei risultati, si è basata la valutazione dello stato di fatto sull'impiego dello stesso modello matematico che viene poi utilizzato per la stima della rumorosità ambientale nella situazione di progetto.

Ciò ha il vantaggio di rendere omogenea la metodologia di valutazione, e conseguentemente di rendere significativo il confronto fra valori relativi allo stato di fatto ed allo stato di progetto.

Come dettagliatamente descritto nel cap. 1.1.3, si è fatto impiego del modello Citymap. Esso richiede in ingresso una dettagliata rete di linee di trasporto (su gomma o su rotaia), costituita da "polylines" tridimensionali, su ciascuna delle quali debbono venire assegnati i dati relativi al flusso veicolare.

Si è pertanto deciso di "potare" la rete complessiva di archi che descrive l'intera città, conservando solo gli archi ed i nodi più prossimi alla progettata linea tranviaria.

E' ovvio come, in base a tale scelta, la simulazione acustica sia in grado di fornire valori accurati del livello sonoro calcolato soltanto lungo la linea tranviaria stessa, mentre non appena ci si allontana da essa, vengono a mancare i dati di emissione sonora del reticolo stradale circostante, e conseguente si ha la sistematica sottostima dei livelli sonori.

Questo modo di procedere comunque è corretto al fine dello scopo proprio del S.I.A.: infatti in tal modo viene evidenziata in modo apprezzabile l'influenza della linea tranviaria stessa, il cui effetto si "perderebbe" se essa venisse valutata in relazione alla intera rete urbana.

Il programma Citymap provvede al tracciamento della mappa del rumore (documento obbligatorio sulla base del vigente D.P.C.M. del 27/12/1988, come illustrato nel paragrafo 1.1.2.2), e ciò facendo stima i livelli sonori anche tutt'attorno alla rete stradale/tranviaria suddetta. Occorre qui chiarire che tale rappresentazione grafica mediante curve isolivello rischia di venire interpretata in modo erroneo, in quanto, per punti posti non nell'immediato "intorno acustico" della viabilità su schematizzata, i livelli sonori indicati non hanno alcuna relazione con i livelli sonori reali (quali sono, ad esempio, i valori ottenuti dai rilevamenti fonometrici ed illustrati nel precedente capitolo).

Si ribadisce il fatto che le mappature isolivello vengono realizzate su un'area vasta perchè così richieste esplicitamente dalla legge, ma che le stesse rappresentano solo la quota del rumore ambientale complessivo causata dalle sorgenti sonore relative alla sottorete stradale che verrà ad essere interessata dalla realizzazione della nuova tranvia. Tali mappature isolivello non contengono quindi il contributo fornito dalla circostante, ben più estesa rete di trasporto stradale e ferroviario, e non debbono quindi essere impiegate per valutare la rumorosità ambientale complessiva sul territorio: esse indicano la sola rumorosità immessa dalle sorgenti sonore più prossime alla linea tranviaria.

Anche i dati di flusso veicolare e di velocità dei veicoli vengono trasferiti durante tale importazione: andando a visualizzare i dati assegnati ad un qualsiasi arco, troviamo che i dati disponibili sono stati assegnati alle due classi principali di veicoli (auto, camion).

Pur essendo disponibili i dati di traffico relativi ai due periodi (diurno e notturno), sono state ottenute tramite Citymap solo le mappature isolivello relative allo stato di fatto diurno (relative cioè

dalle ore 6 alle ore 22), in considerazione del fatto che sia l'esercizio, sia la cantierizzazione saranno sempre ricomprese nella fascia oraria del periodo diurno.

Sono quindi stati elaborate 25 tavolette in scala 1:2000 su un rettangolo avente per dimensione 784x484 m. Per ciascuna tavoletta l'elaborazione ha prodotto un file GRD per Surfer, con risoluzione di punti 60x40.

Il calcolo è stato limitato ad una distanza massima di m 1000 dalle sorgenti sonore, e si è impostato di tenere conto della diffrazione su ostacoli: tali scelte sono congrue con quanto prima enunciato, riguardo il fatto che i livelli sonori indicati al di fuori degli alvei stradali in cui si sviluppano le direttrici di traffico analizzate sono da considerarsi puramente indicativi dell'immissione causata dalle sole sorgenti sonore analizzate, e non rappresentano fedelmente i livelli sonori cumulati anche del contributo delle altre sorgenti sonore esterne alla sottorete analizzata, sorgenti che evidentemente non risentiranno in alcun modo della realizzazione della tranvia (la sottorete estratta è di estensione tale da esaurire al suo interno gli effetti trasportistici che si svilupperanno a seguito della realizzazione dell'opera qui progettata).

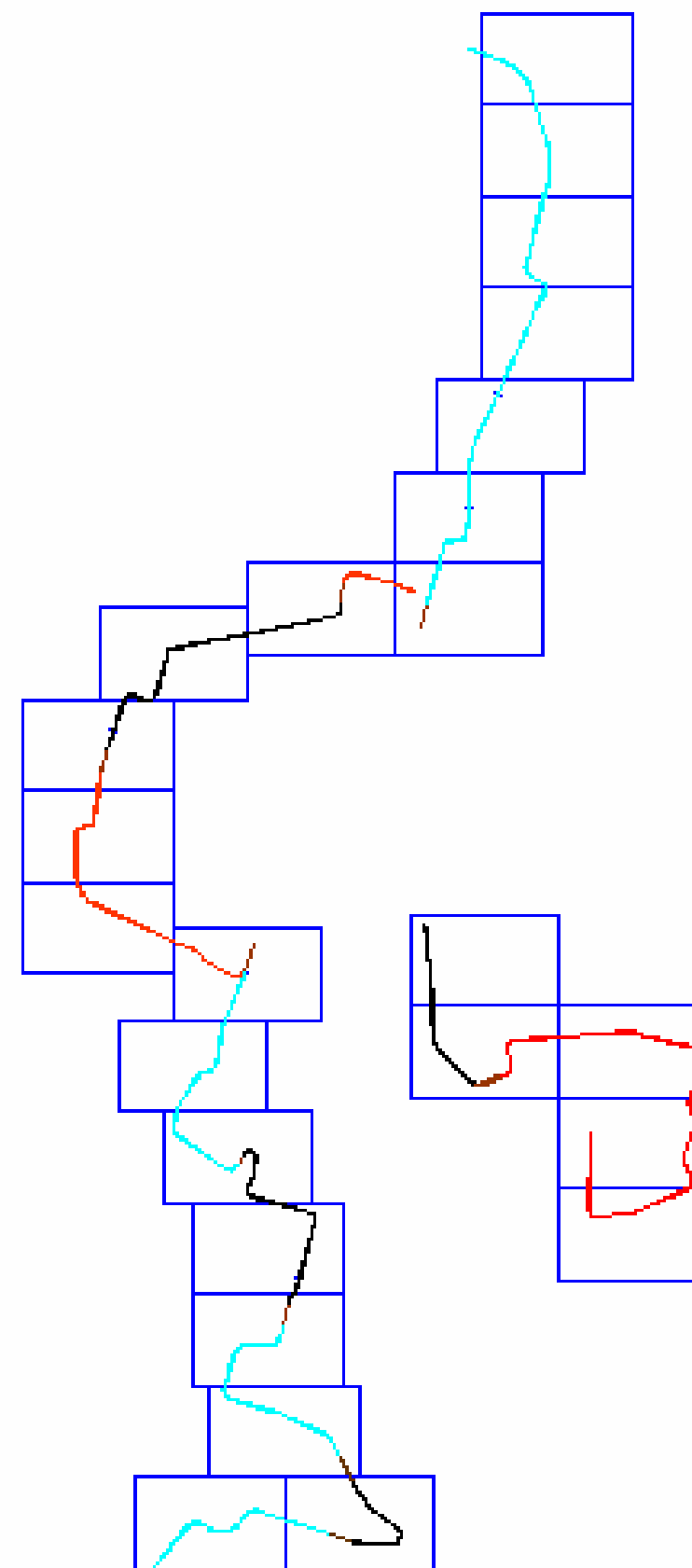
I files GRD prodotti sono stati elaborati con Surfer v. 7.0, e si sono in tal modo ottenute le mappature isolivello sonoro, con risoluzione di 1 dB(A).

Tali mappature isolivello sono state poi convertite in formato DXF, e conseguentemente re-importate in Autocad, ove sono state sovrapposte alla cartografia digitalizzata che rappresenta la città di Parma.

Le tavole numerate da 1 a 76 contengono le seguenti mappature:

- la prima rappresenta il quadro d'unione che viene riportato anche di seguito
- le successive 25 rappresentano lo stato di fatto, calcolato sulla base delle ipotesi riportate nel presente cap. 1
- le successive 25 tavole rappresentano lo stato di esercizio, calcolato sulla base delle ipotesi di cui al successivo cap. 1.3
- infine, le successive 25 tavole rappresentano lo stato di cantiere, calcolato sulla base delle ipotesi di cui al successivo cap. 1.4

Le tavole numerate da 77 a 81 contengono le mappature delle sezioni caratteristiche.



Quadro d'unione del tracciato metropolitano (con esclusione delle tratte in galleria a foro cieco)

1.3 Valutazione del rumore prodotto dall'esercizio del servizio metropolitano

Nei seguenti sottocapitoli viene anzitutto analizzata l'emissione sonora dichiarata da due costruttori di veicoli metrotranviari idonei all'impiego nella metrotranvia di Parma:

- il veicolo Sirio dell'Ansaldo-Breda
- il veicolo Combino della Siemens

Del secondo sono disponibili dati sperimentali derivanti da una campagna di rilievo fonometrico nella città di Potsdam, che hanno mostrato le effettive prestazioni acustiche del tram Combino per confronto con quelle di veicoli tranviari di concezione più vecchia (Tatra).

Vengono infine specificati i dati "medi" di emissione sonora considerati nel presente studio, come ragionevole combinazione delle informazioni suddette, ed applicabili con limitata incertezza alla descrizione della rumorosità di un generico veicolo di moderna concezione idoneo all'esercizio in una rete metrotranviaria quale quella progettata per la città di Parma.

1.3.1 Valori di rumorosità istantanea dichiarati dai costruttori dei veicoli

L'emissione sonora dei tram di tipo Sirio (Ansaldo-Breda) e Combino (Siemens) è stata garantita dai costruttori rispettare i seguenti valori massimi:

Sirio (Ansaldo-Breda)

Velocità (Km/h)	0	40	50
Punto di misura			
D = 1m		85	89
D = 3m		80	84
D = 6m		77	81
D = 7.5 m (secondo ISO 3095)		77	81
D = 15m		73	77
D = 30m		70	74

Combino (Siemens)

Velocità (Km/h)	0	40	70
Punto di misura			
Comparto passeggeri (misurazione in accordo Normativa ISO 3381, con ventilatore a soffitto e ventilatore apparecchiature collocate sul tetto a velocità 1)	58 dB(A)	69 dB(A)	75 dB(A)
Articolazione (misurazione in accordo Normativa ISO 3381, con ventilatore a soffitto e ventilatore apparecchiature collocate sul tetto a velocità 1)	61 dB(A)	69 dB(A)	75 dB(A)
Cabina guida (misurazione in accordo Normativa ISO 3381, aerazione velocità 1)	58 dB(A)	63 dB(A)	67 dB(A)
(misurazione in accordo Normativa ISO 3381, aerazione velocità 2)	63 dB(A)	65 dB(A)	68 dB(A)
Esterno (misurazione in accordo Normativa ISO 3095 effettuata a 7,5m. di distanza dal veicolo e 3,5m. di altezza, ventilatore a soffitto collocate sul tetto a velocità 12 ventilatore apparecchiature collocate sul tetto a velocità 1, aerazione cabina guida velocità 2)	54 dB(A)	73 dB(A)	80 dB(A)

I valori di rumorosità garantiti all'interno dei veicoli sono importanti per garantire il confort dei passeggeri e le condizioni di lavoro del personale di bordo. Tuttavia questi aspetti non sono rilevanti nell'ambito di uno Studio di Impatto Ambientale, ove invece assume primaria importanza la quantificazione del rumore prodotto verso l'esterno.

Nell'esercizio urbano risulta di ben poco significato il valore di emissione esterna garantito a 70 km/h, visto che ovviamente tale velocità non viene mai raggiunta. Il dato di emissione principale è dunque il valore secondo ISO 3095, che è pari rispettivamente a 77 dB(A) per il tram Sirio ed a 73 dB(A) per il Combino.. Si osserva che tale valore è enormemente superiore al valore che si ha a vettura ferma (54 dBA), e che pertanto quest'ultima condizione è del tutto insignificante sull'impatto ambientale acustico.

Il confronto fra i valori dichiarati dai due costruttori mostra che, sulla carta, i veicoli Combino sono molto meno rumorosi dei Sirio. Nella realtà, invece, come verrà mostrato nel successivo capitolo, una serie di rilievi sperimentali hanno conenstito di verificare la situazione reale in esercizio, dalla quale il valore di emissione del Combino risulta in pratica coincidente con quello del Sirio (ma pur sempre meno rumoroso di tram di concezione piu' vecchia, che sono stati pure rilevati sperimentalmente).

Il valore di emissione primario è stato garantito con riferimento alla norma ISO 3095, che si riferisce ai test di omologazione dei veicoli. Si tratta di una prova effettuata su un apposito tratto di prova strumentato, su binario "normale", posizionando il microfono ad una distanza di m 7.5 dall'asse del binario, e ad una quota di m 3.5 sopra il piano del ferro.

Il valore indicato è costituito dal valore massimo con costante di tempo Slow (costante di tempo del circuito RMS pari ad 1s).

Tale valore non corrisponde se non con grossolana approssimazione al valore di emissione sonora integrata del singolo transito del veicolo, definita matematicamente con il parametro SEL (livello di singolo evento), il cui utilizzo al fine di valutare il livello equivalente sull'intero periodo diurno o notturno è reso obbligatorio in Italia dalla vigenti disposizioni di legge.

Di conseguenza, viene qui riportato il procedimento che ha consentito di trasformare il dato di emissione garantito dal costruttore in termine di valore massimo istantaneo del livello sonoro durante la prova di pass-by nel corrispondente valore integrato di SEL, relativo sempre ad un singolo transito del convoglio.

1.3.2 Caratterizzazione teorica delle emissioni di rumore da parte del materiale rotabile

Al fine di caratterizzare correttamente l'emissione sonora da parte dei tram Sirio e Combino, è stato impiegato un modello matematico in grado di descrivere l'intero profilo temporale di un transito (modello di Cato⁶). Tale modello conteneva costanti di taratura valide per la simulazione dei valori assoluti di emissione di treni lunghi e veloci, quindi ovviamente non adatte alla descrizione del rumore prodotto da tram in esercizio urbano.

Tuttavia, abbandonando l'uso delle costanti di taratura originariamente suggerite da Cato, il suo modello conserva piena validità al fine di ricostruire il profilo temporale del livello sonoro durante un transito, poichè tale forma è funzione solo delle caratteristiche geometriche (lunghezza del convoglio, velocità di transito, distanza del microfono), e della caratteristica direttiva dell'emissione tipica delle sorgenti sonore correlate con il contatto ruota-rotaia: il modello di Cato assume una direttività di tipo dipolare, con asse di massima emissione coincidente con l'assale delle ruote.

La relazione matematica che fornisce il profilo temporale secondo Cato è la seguente:

$$L = K - 10 \cdot \lg(l) + 10 \cdot \lg \left\{ \frac{1}{a} \cdot \left[\frac{a \cdot (b+1)}{a^2 + (b+1)^2} - \frac{a \cdot b}{a^2 + b^2} + \arctan\left(\frac{b+1}{a}\right) - \arctan\left(\frac{b}{a}\right) \right] \right\}$$

in cui compaiono i parametri adimensionali a (distanza adimensionale del ricettore: $a=d/l$) e b (posizione adimensionale del convoglio: $b=x/l$). Entrambi tale grandezze sono adimensionalizzate con riferimento alla lunghezza l del convoglio.

La posizione adimensionale b può anche essere intesa come tempo adimensionale, nota che sia la velocità v del convoglio:

$$x = v \cdot t \quad b = \frac{x}{l} = \frac{v \cdot t}{l}$$

secondo Cato, la costante di taratura K per treni elettrici veloci vale:

$$K = 42 \cdot \lg[v] + 34.86 \quad \text{dB(A)}$$

Nel caso qui esaminato, invece, in generale la costante K assumerà un valore non coincidente con quello previsto da Cato.

Se infatti si procede alla costruzione del profilo temporale di L sulla base dei parametri relativi al test di pass-by, adottando questi valori:

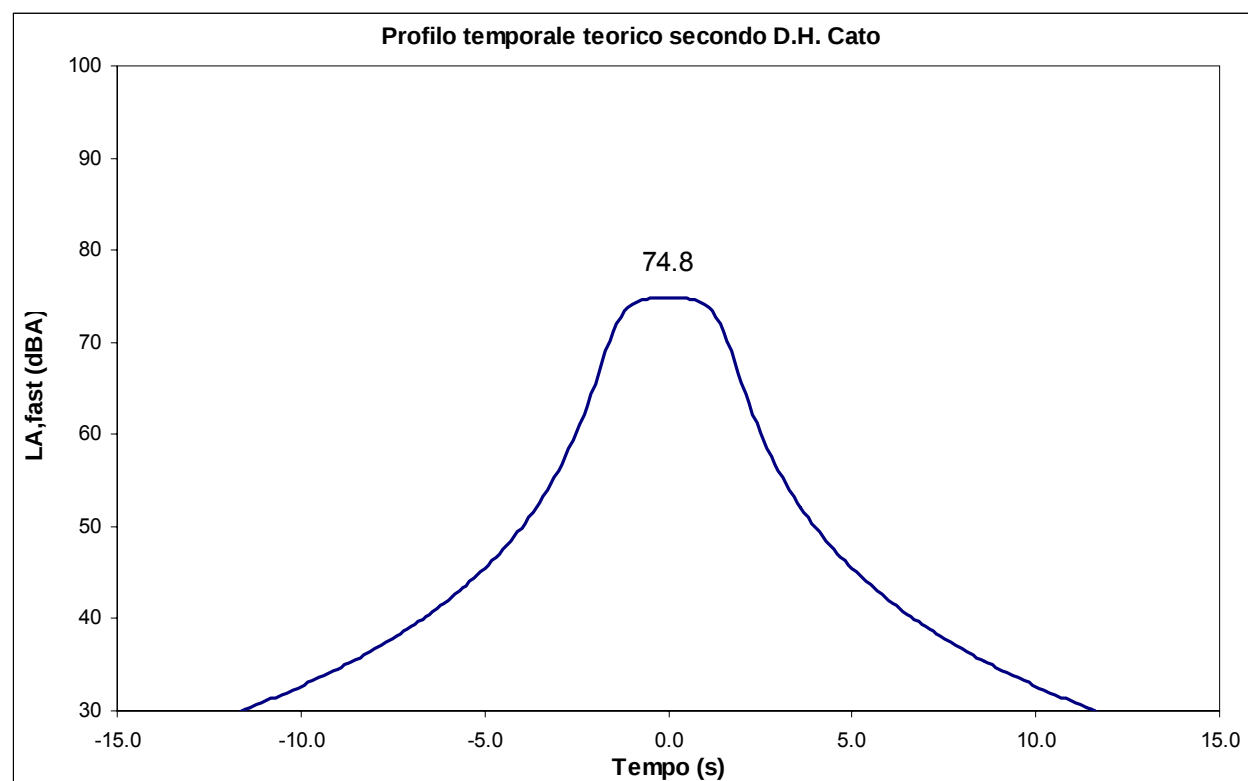
$$l = 31.4 \text{ m}$$

$$d = 7.5 \text{ m}$$

$$V = 40 \text{ km/h}, v = 11.11 \text{ m/s}$$

Utilizzando la costante K di Cato si ottiene questo profilo:

⁶ D.H. Cato – "Prediction of environmental noise from fast electric trains" – Journ. Of Sound and Vibration, n. 46, p. 483 (1976).



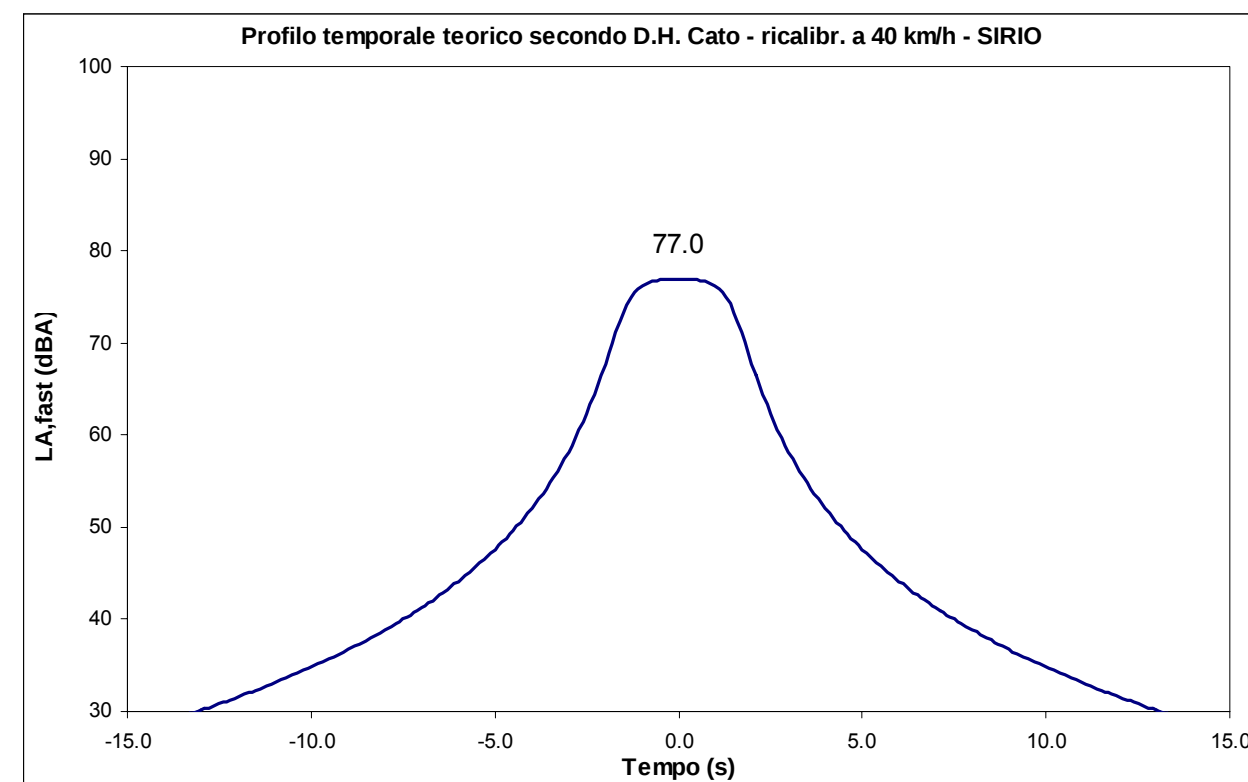
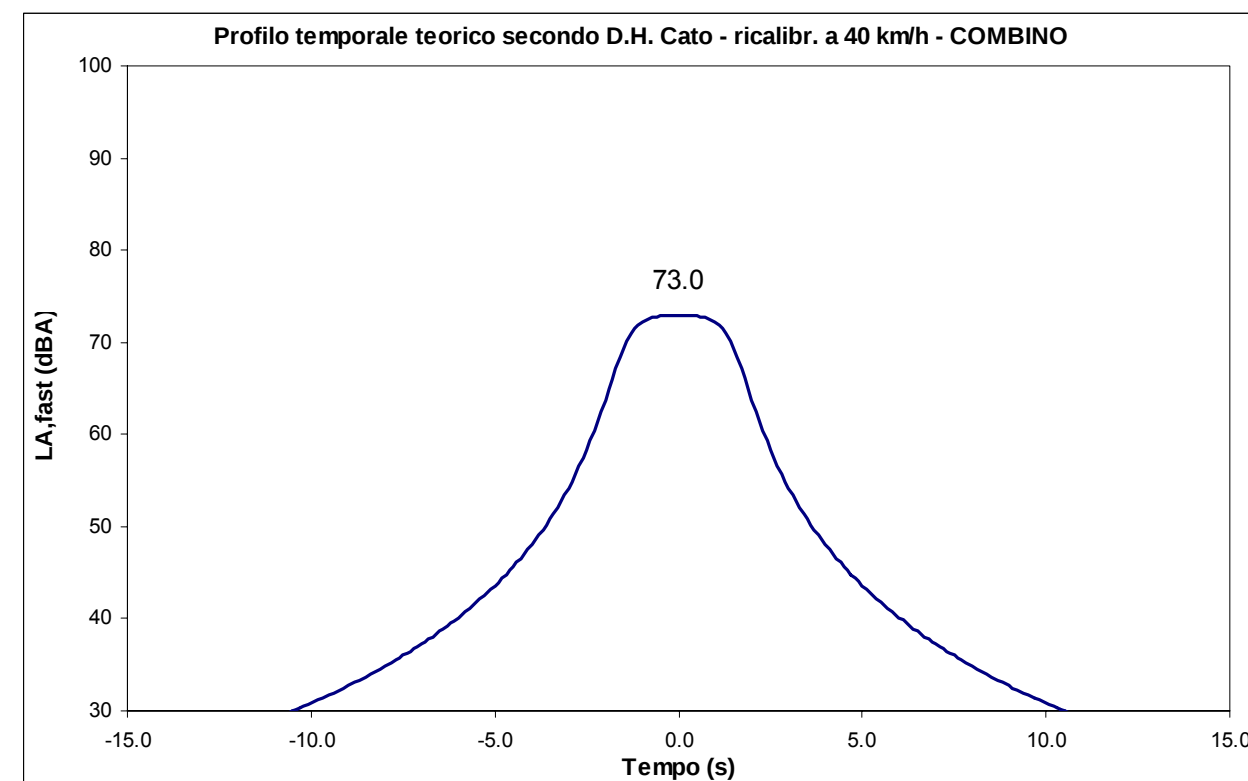
Il valore massimo raggiunto è dunque pari a 74.8 dB(A), mentre il valore effettivo dichiarato dal costruttore per il tram Sirio è di 77 dB(A), e quello del tram Combino è di 73 dB(A).

E' pertanto necessario "ricalibrare" il valore della costante di taratura K contenuta nel modello di Cato. Tale ricalibrazione ha portato a stimare come ottimali le seguenti espressioni:

$$K = 29 \cdot \lg[v] + 50.6 \quad \text{dB(A)} \quad (\text{Sirio})$$

$$K = 29 \cdot \lg[v] + 46.6 \quad \text{dB(A)} \quad (\text{Combino})$$

A seguito di tale ricalibrazione, il modello di Cato è ora in grado di descrivere correttamente il profilo temporale di passaggio dei tram Sirio e Combino, nella configurazione tipica del convoglio di 19m, alla velocità di 40 km/h. Le seguenti due figure mostrano tali profili temporali corretti.



Se ora si procede all'integrazione dell'area sottesa a tali profili di passaggio, diventa possibile ricavare i corrispondenti valori di SEL, facendo impiego direttamente della definizione matematica di tale parametro:

$$SEL = 10 \cdot \lg \left[\int_0^T 10^{L_{ist}/10} \cdot dt \right]$$

Si sono in tal modo ricavati i seguenti valori di emissione unitaria del tram:

Velocità	40 km/h	50 km/h	70 km/h
SEL Sirio	81.6 dB(A)	83.5 dB(A)	86.3 dB(A)
SEL Combino	77.7 dB(A)	79.5 dB(A)	82.3 dB(A)

Occorre poi analizzare eventuali cause di maggior emissione sonora, in condizioni particolari, rispetto al dato “standard” qui sopra valutato. Le cause di maggior emissione potenzialmente rilevanti sono:

rumore di frenatura
 stridio in curva
 riflessioni multiple in strade ad “U”
 effetto cumulativo dato dalla sovrapposizione delle due linee

Per quanto riguarda il rumore emesso in fase di frenatura, si evidenzia che il Combino utilizza il freno meccanico (idraulico) solo in fase di stazionamento oppure in caso di emergenza nel caso di guasto del freno elettrodinamico e quindi il rumore anche in fase di frenatura è generato, come nella fase di marcia, dai motori, reostati di frenatura in accoppiamento con il raddrizzatore e dai ventilatori del sistema di condizionamento; a questo non si sovrappongono sibili dovuti all'utilizzo delle pastiglie del freno meccanico.

Per quanto riguarda il rumore generato in curva, dovuto alle forze assiali agenti sul contatto ruota-rotaia che portano lo scivolamento laterale del bordino sulla rotaia, è determinante la frequenza di vibrazione caratteristica. Questa è dipendente dalla geometria e dal materiale. Per la mitigazione di questo rumore per il tram di Parma, verranno adottati i seguenti accorgimenti;

- le fasce di rotolamento delle ruote verranno separate dalla parte centrale della ruota con elementi in gomma al fine di smorzare le vibrazioni;
- le ruote verranno equipaggiati con elementi fonoassorbenti;
- alcuni carrelli verranno equipaggiati con l'apparato di lubrificazione automatica della fascia di rotolamento.
- il sistema di armamento adottato per sezioni a raso e nelle rampe (non in galleria) prevede un “guanciaie” smorzante in cui è annegata la rotaia.

Tali accorgimenti limitano fortemente i fenomeni di stridio in curva, portando, nell'insieme, alla sostanziale scomparsa del fenomeno.

Possono poi effettivamente verificarsi, nelle sezioni stradali strette (sezioni ad U), rilevanti fenomeni di riflessioni multiple, che possono far crescere il livello sonoro di ulteriori 3-4 dB(A).

Sarà pertanto necessario valutare, con adeguata metodica di simulazione, gli effettivi livelli sonori prodotti lungo il tracciato della linea tranviaria. In tale valutazione, tuttavia, si opererà a favore di sicurezza, trascurando l'esistenza delle fermate e conseguentemente il fatto che la velocità dei tram sarà in media più bassa, essendovi sezioni ove la stessa è sempre estremamente ridotta. Si

considererà invece sempre ed ovunque l'emissione sonora corrispondente alla velocità di esercizio di 40 km/h, assimilando in tal modo ciascun binario ad una sorgente sonora lineare con densità lineare di potenza sonora uniforme.

1.3.3 Verifica sperimentale dell'emissione sonora di tram tipo Combino (Siemens)

Per quel che riguarda i tram di tipo Combino sono state effettuate misure da parte del prof. Angelo Farina a Potsdam, i cui risultati vengono riportati qui di seguito.

I rilievi sono stati eseguiti nei giorni 11-12 febbraio 2002, facendo impiego dei seguenti strumenti:

- fonometro intergatore B&K tipo 2236
- cavo di prolunga microfonica m 10
- calibratore microfonico B&K topo 4230
- schermo antivento

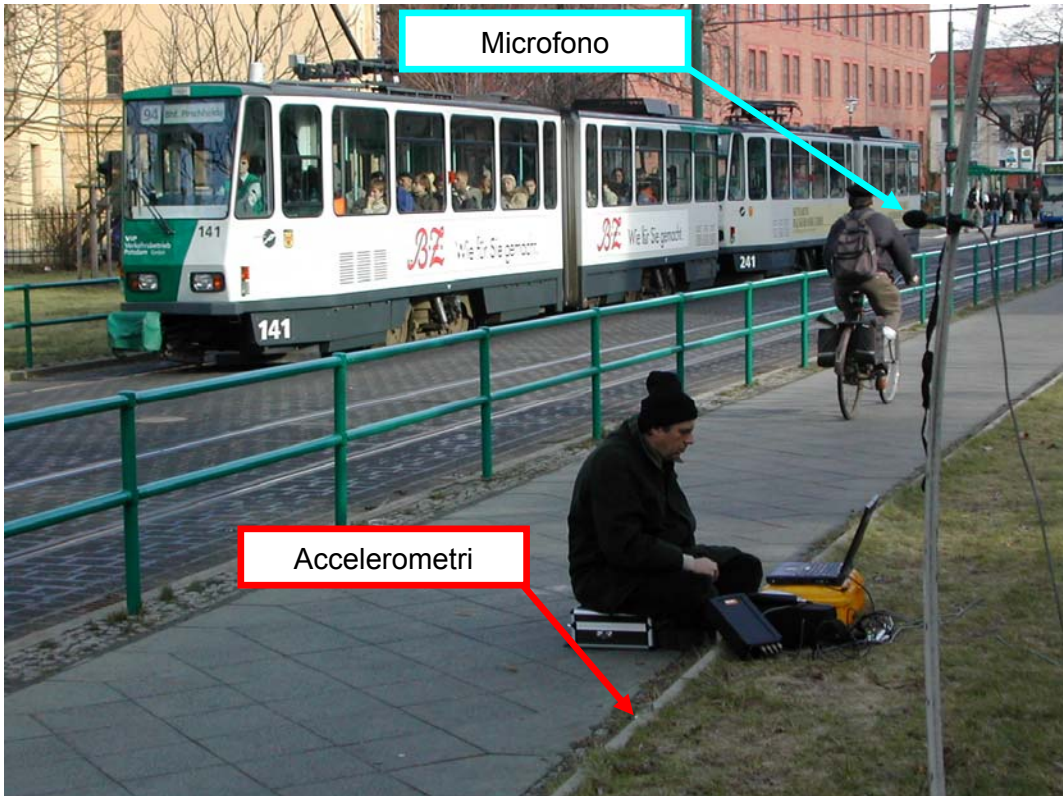
Nella città di Potsdam sono in circolazione due diversi tipi di tram: il Tatra (più vecchio) ed il Combino della Siemens (più recente, e leggermente meno impattante dal punto di vista acustico e vibrazionale). Il primo è visibile nella foto di Zeppelin Strasse, il secondo nella foto di Berliner Strasse, che seguono.

La distanza del microfono era, in entrambe le sezioni, di circa 6m dall'asse del binario più vicino e di circa 9m dall'asse del binario più lontano, pertanto la distanza media era pari a 7.5m.

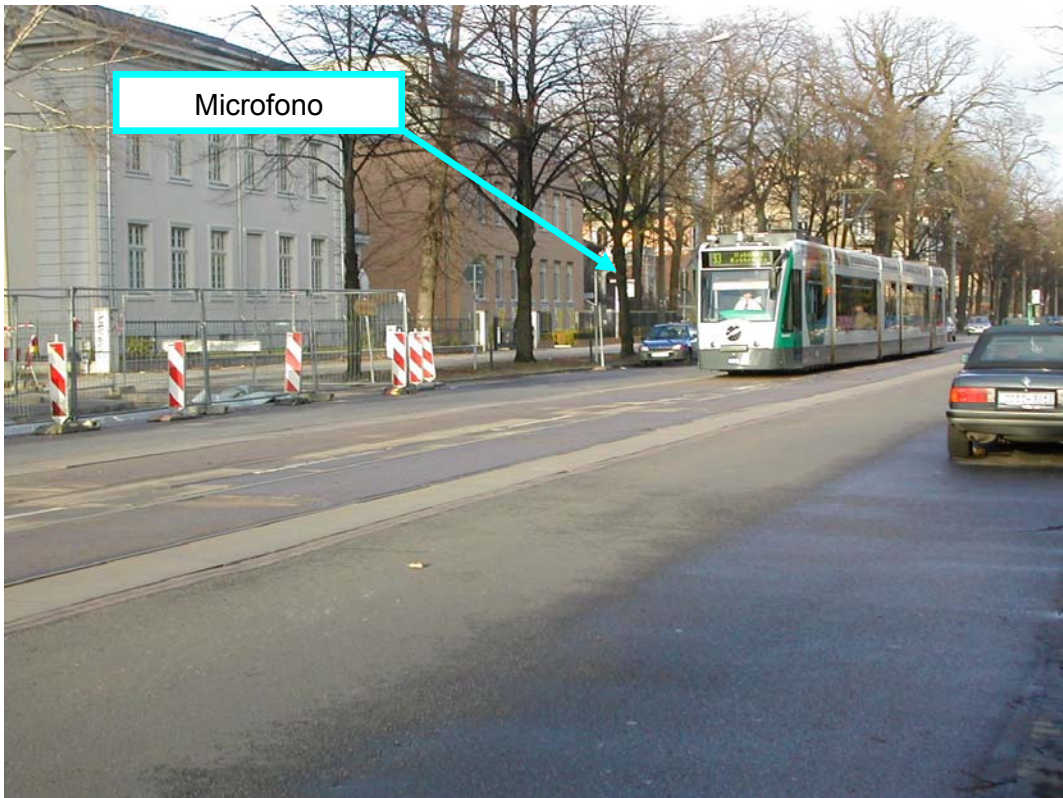
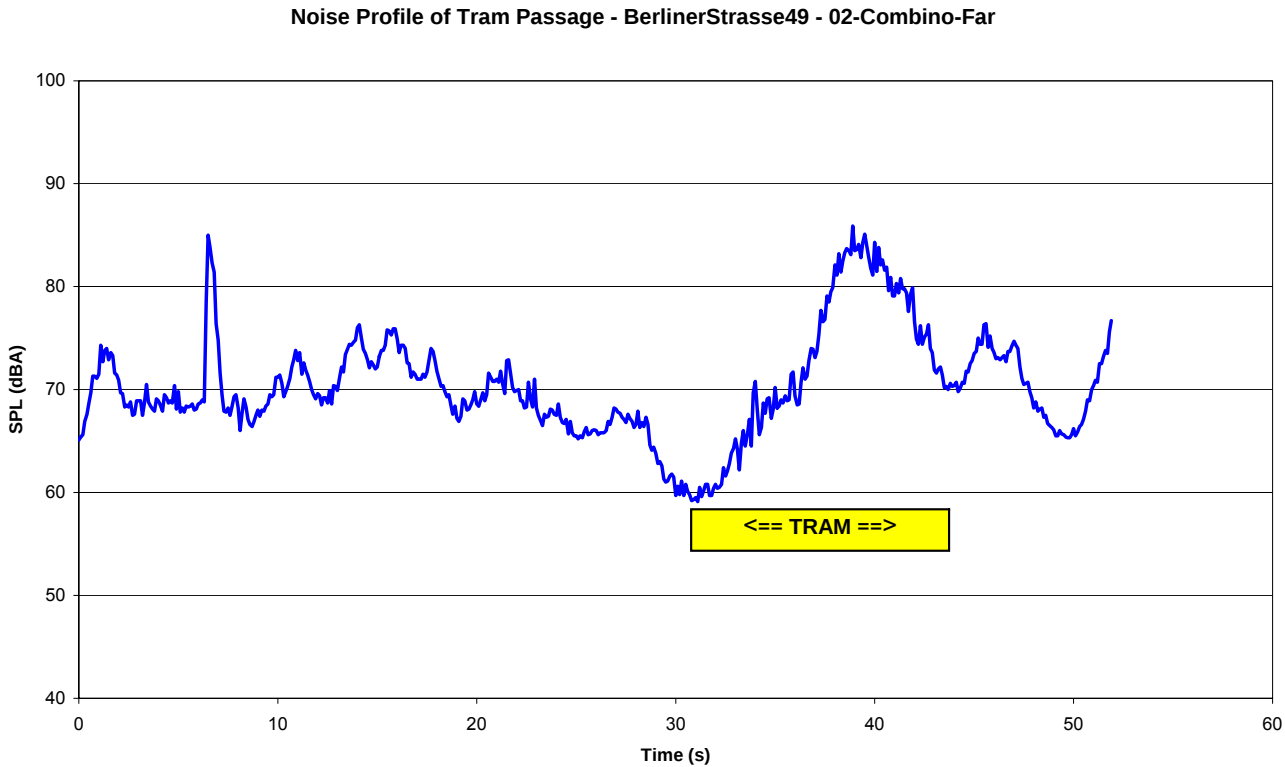
Nel corso dei rilevamenti sono transitati in complesso n. 37 tram. 12 passaggi sono stati registrati nella sezione su Berliner Strasse 49 (sede promiscua, armamento non antivibrante, senza guanciali in gomma) e 25 passaggi sono stati registrati nella sezione dotata di sistema di armamento con guanciali antivibranti (in sede propria, ma pur sempre non flottante) di Zeppelin Strasse.

Ciascun rilievo è consistito nella memorizzazione, nella memoria “logging” del fonometro, del tracciato temporale con passo di 0.1 s. Operando poi mediante un foglio Excel, si sono analizzati solo i segmenti temporali relativi all'effettivo passaggio dei tram, escludendo così ogni influsso esterno da parte del transito di altri veicoli.

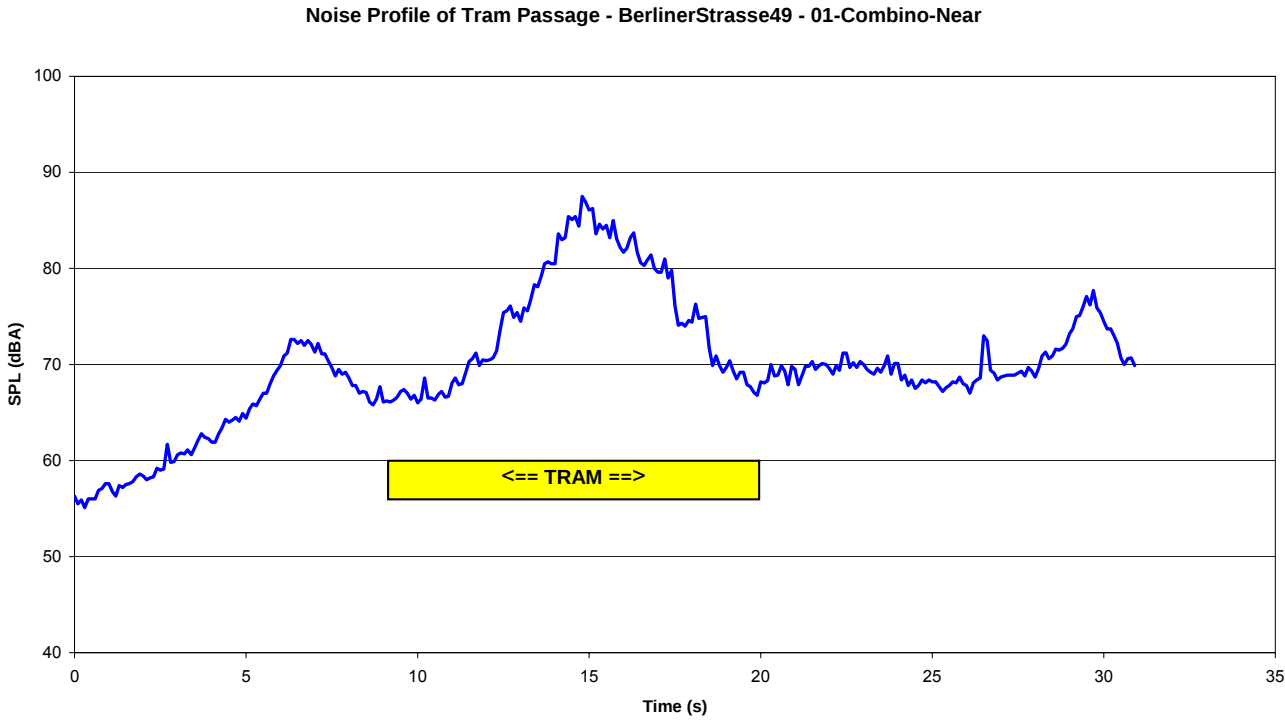
Vengono qui di seguito anzitutto mostrate due fotografie delle due sezioni analizzate, indi vengono mostrati alcuni dei profili temporali registrati.



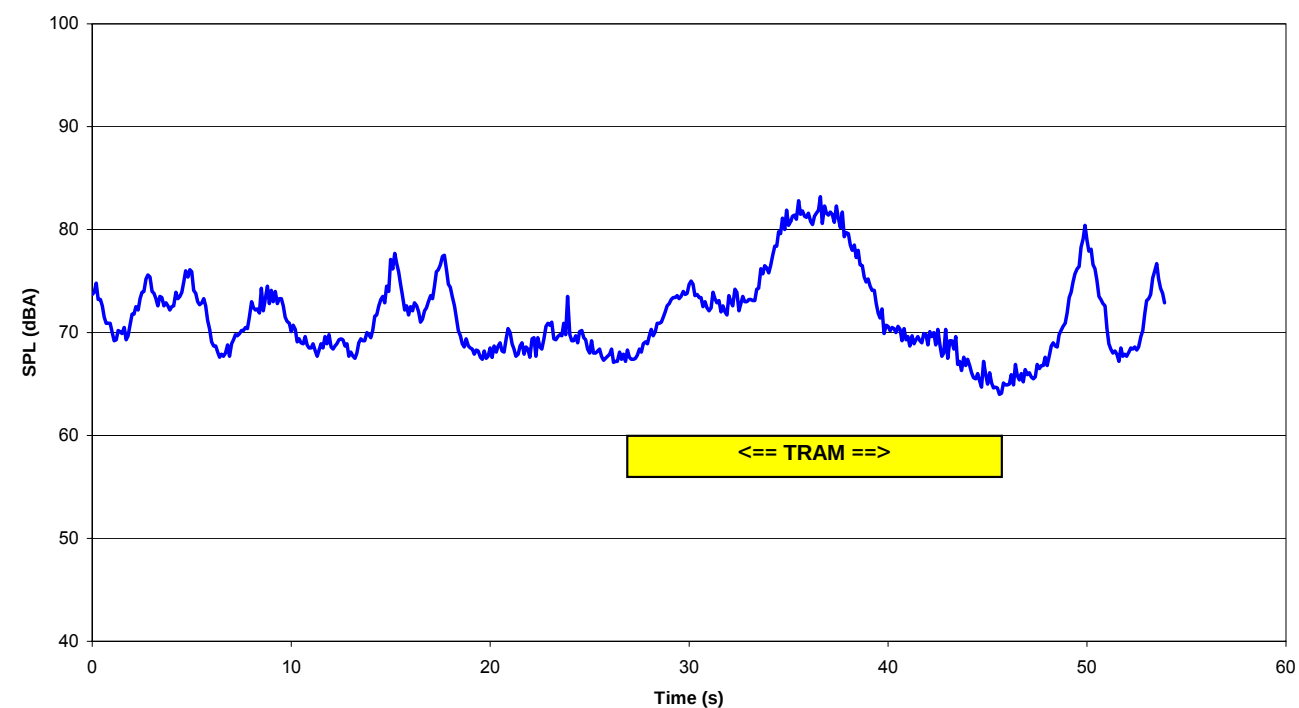
Zeppelin Strasse 4



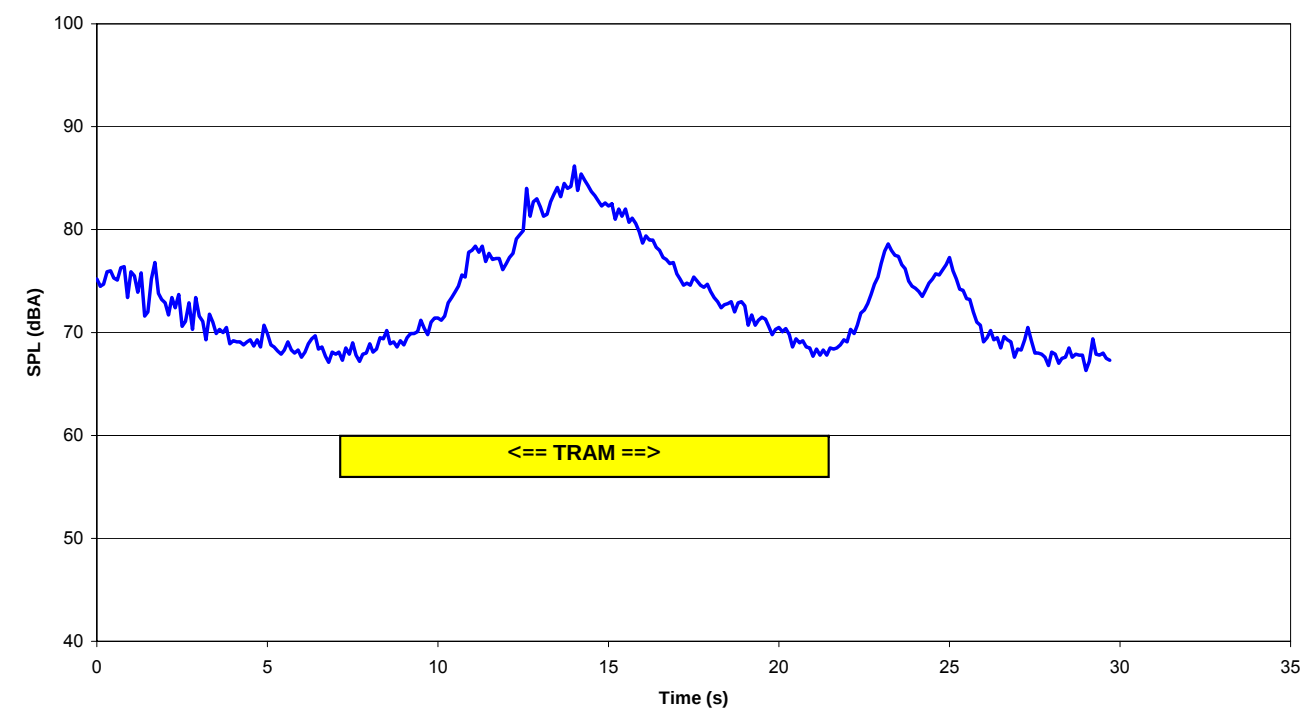
Berliner Strasse 49



Noise Profile of Tram Passage - BerlinerStrasse49 - 03-Tatra-Near



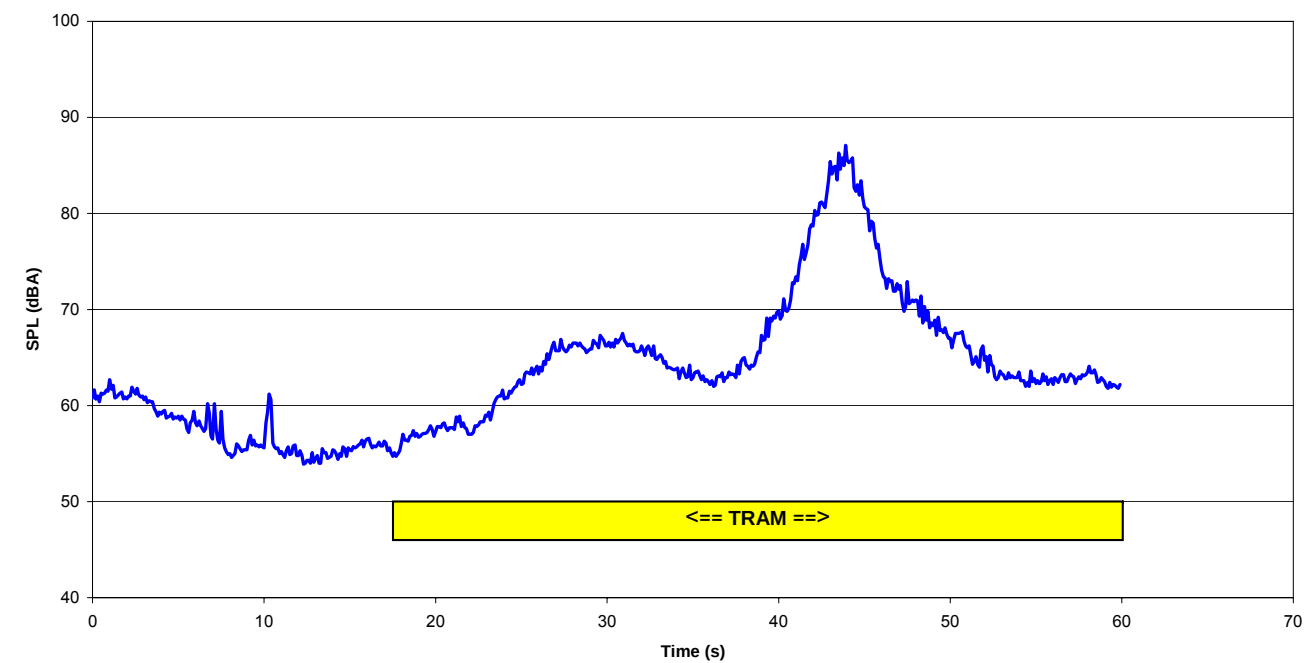
Noise Profile of Tram Passage - BerlinerStrasse49 - 12-Tatra-Far



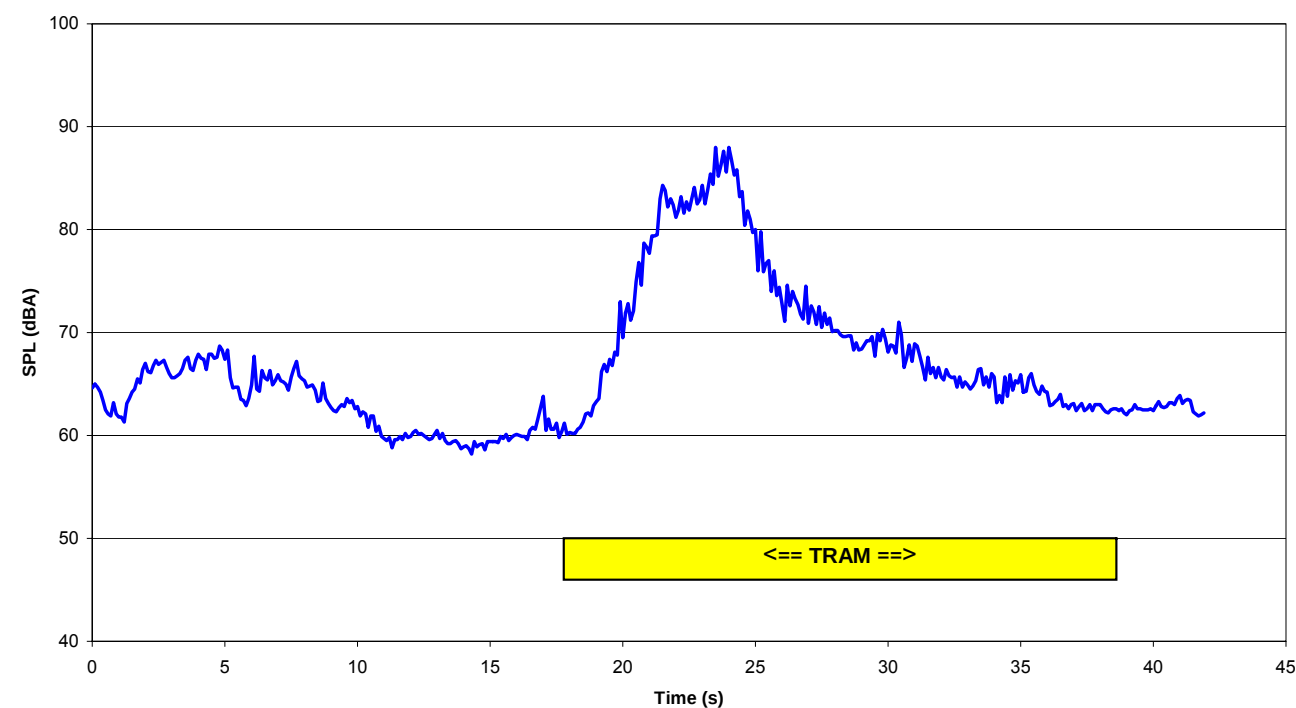
Noise Profile of Tram Passage - BerlinerStrasse49 - 08-Combino-Far



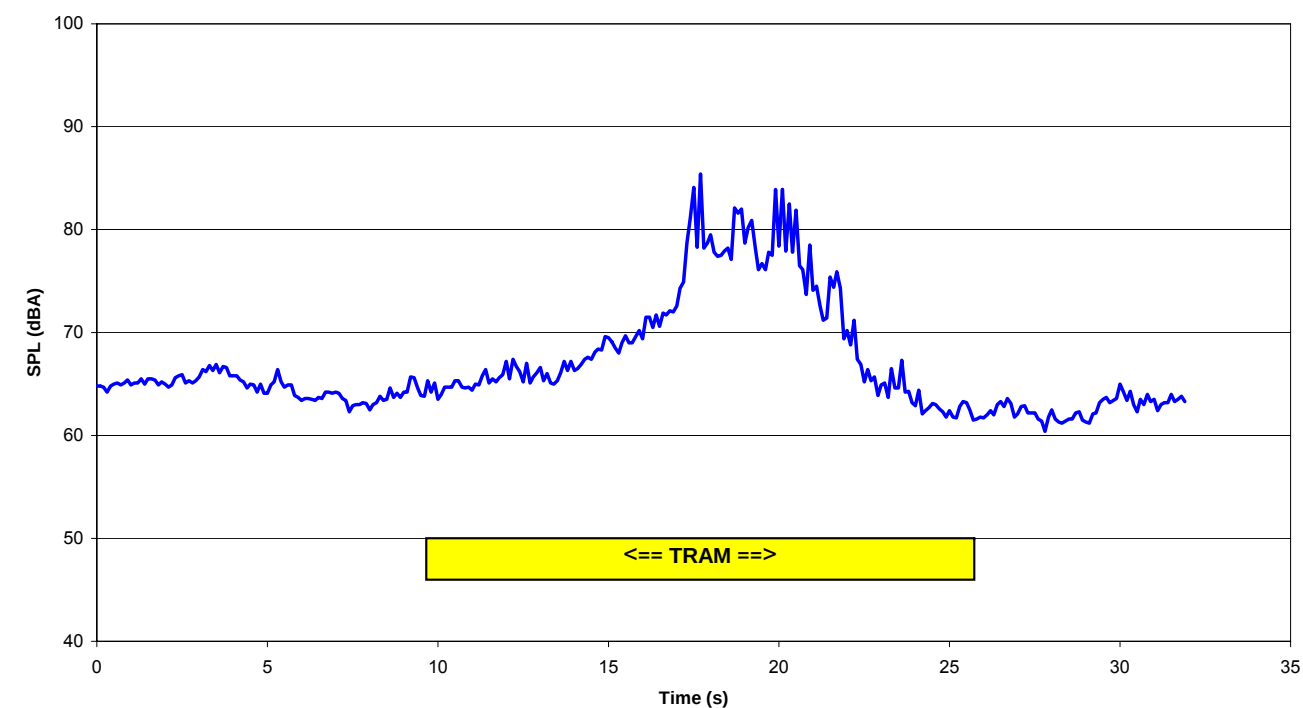
Noise Profile of Tram Passage - ZeppelinStrasse2 - 4-Tatra-Far



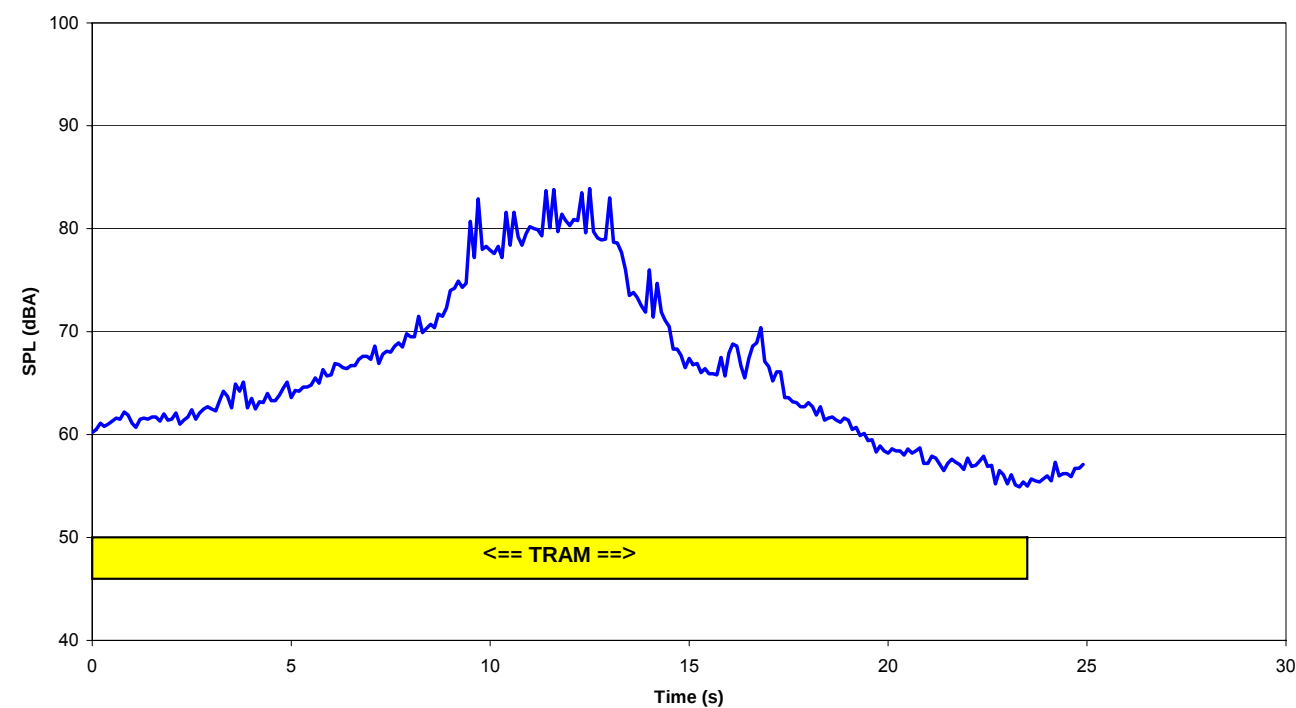
Noise Profile of Tram Passage - ZeppelinStrasse2 - 6-Combino-Far



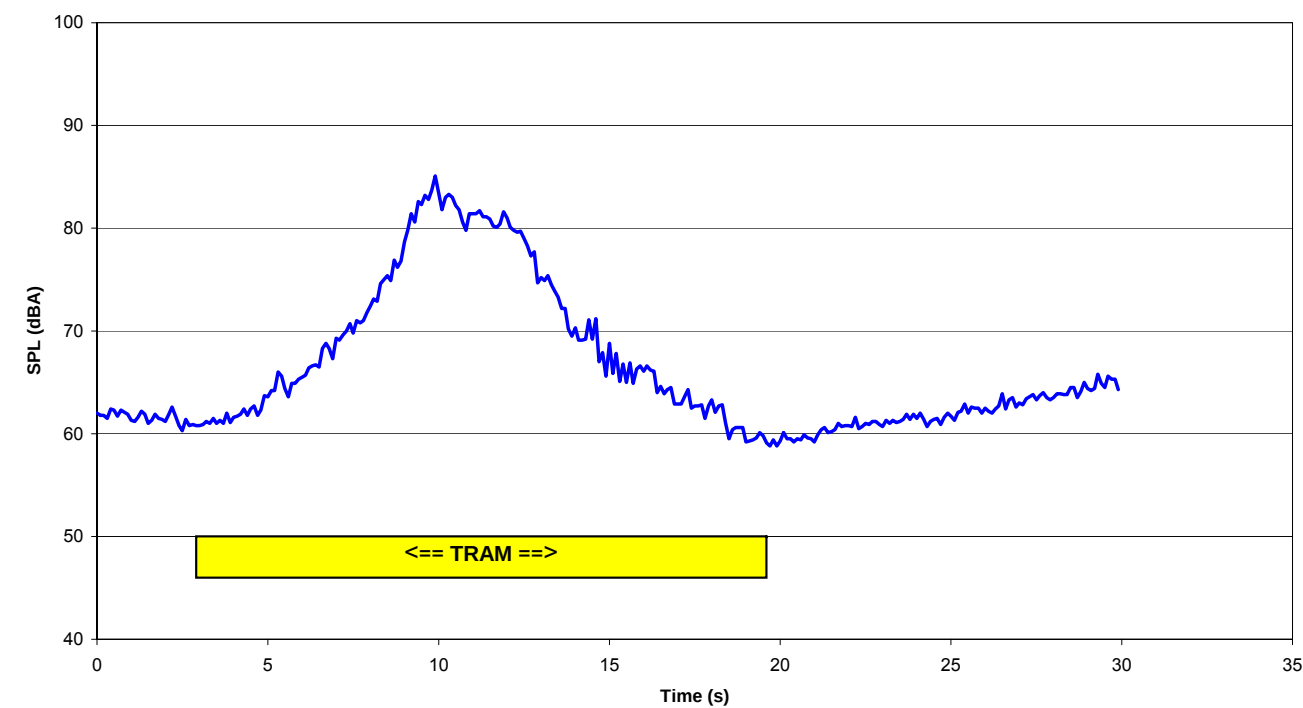
Noise Profile of Tram Passage - ZeppelinStrasse2 - 11-Combino-Near



Noise Profile of Tram Passage - ZeppelinStrasse2 - 7-Tatra-Near



Noise Profile of Tram Passage - ZeppelinStrasse4 - 15-Tatra-Near



Le precedenti figure mostravano solo una piccola parte delle tracce rilevate, a titolo di esempio.

Analizzando i valori di SEL dei singoli transiti, e valutando separatamente i valori di SEL medio riferiti alle 2 sezioni stradali (Berliner Strasse, senza guanciali in gomma, e Zeppelin Strasse, dotata invece di armamento con guanciali in gomma), ed ai due tipi di tram (Combino e Tatra), si sono ottenuti questi valori sperimentali di SEL a 7.5m:

Tipo di armamento	SEL Combino (dBA)	SEL Tatra (dBA)
BerlinerStrasse (senza guanciali)	88.4	89.6
ZeppelinStrasse (con guanciali)	85.8	87.4

Analizzando i dati suddetti, si osserva che il valore di SEL del Combino misurato a Potsdam su armamento privo di guanciali è circa 11 dB superiore al valore “nominale” indicato dal costruttore, e pertanto dà luogo ad una stima di altrettanto più elevata del livello equivalente nel periodo diurno.

La presenza dei guanciali di gomma in Zeppelin Strasse porta ad una riduzione media di rumorosità pari a 2.4 dBA, che non è da disprezzare. Grazie a tale effetto, previsto ovviamente anche a Parma, il SEL del Combino scende a 85.8 dBA, valore comunque superiore di circa 8 dB rispetto al valore teorico.

Nell'effettuare dunque la stima finale della rumorosità emessa dai convogli in transito, si è operata una ragionevole media fra i valori dichiarati da Siemens (77.7) ed Ansaldo-Breda (81.7) ed il valore sperimentale suddetto (85.8), assumendo un valore di riferimento pari a:

$$SEL_{7.5m, Parma} = 82.0 \quad dB(A)$$

Considerando poi che il programma di esercizio prevede, per ogni direzione di marcia e per le due linee, il seguente intervallo fra i passaggi:

	Intervallo transiti	N. transiti/ora
Linea A	5'	12
Linea B	8'	7.5

Si ottiene che, sempre per ogni direzione di marcia, si avranno nel periodo diurno (dalle 6 alle 22) per la Linea A 192 transiti, mentre per la Linea B 120 transiti.

Sommando i valori di SEL di tutti i transiti diurni o notturni, e diluendo tale somma sulla durata complessiva del periodo corrispondente (espressa in secondi), si ottengono così i valori del livello equivalente di emissione (a 7.5m dall'asse binario, e relativo ovviamente ad un singolo binario). La formula di calcolo è la seguente:

$$L_{eq, diurno} = SEL_{40km/h} + 10 \cdot \lg[N_{transiti, diurni}] - 10 \cdot \lg[57600]$$

Essa ha quindi fornito i seguenti risultati:

Linea	Sel (dBA)
Leq,Diurno Linea A	58.2 dB(A)
Leq,Diurno Linea B	56.2 dB(A)

I valori comunque non paiono preoccupanti, essendo equivalenti a quelli di una strada urbana secondaria, con traffico molto ridotto. Pur considerando che i valori suddetti si riferiscono al singolo binario, e dunque il valore complessivo di entrambi i binari è 3 dBA più alto, si vede che questi valori di emissione rispettano ampiamente i limiti della classe IV (65 dBA), e, lungo la linea B, anche quelli di classe 3.

1.3.4 Visualizzazione dell'impatto di rumore in condizioni di esercizio

Al fine di rappresentare graficamente la distribuzione spaziale dei livelli di rumore sul territorio che si svilupperanno a seguito della realizzazione della metrotranvia di Parma, si è fatto impiego del codice di calcolo numerico Citymap ampiamente descritto nei capitoli precedenti.

Il risultato del calcolo è salvato in un file .GRD, da cui il programma Surfer (™) costruisce poi la mappatura iso-rumore.

Sono state definite 25 aree di mappatura, ciascuna aventi dimensioni di m 784 x 484, su ciascuna delle quali è stata calcolata una griglia di recettori di dimensioni 60x40.

Nelle tavole allegate, numerate da 27 a 51, vengono visualizzate le mappature isolivello di rumore previste in fase di esercizio.

Per il tratto che si sviluppa dal Centro Torri fino alla Stazione FF. SS. è stata valutata una seconda ipotesi che considera la linea in superficie, che ha vantaggi e svantaggi complessivamente confrontabili con la soluzione in galleria superficiale.

Essa ha evidenziato alcune differenze soprattutto nella zona in cui si avrà una limitazione del traffico stradale conseguente alla riduzione della sezione utile della carreggiata.

1.4 Valutazione del rumore prodotto durante le attività di cantiere

1.4.1 Produzioni di rumori

Questa parte dello studio si propone di valutare gli effetti del rumore, sull'ambiente circostante, emesso dai macchinari impiegati per la realizzazione dell'opera in oggetto.

Trascurando la successiva fase di armamento, il cui impatto acustico è sicuramente inferiore rispetto alla fase di costruzione dell'infrastruttura, si considera che le sorgenti sonore siano sostanzialmente raggruppabili in macchine operatrici ed in mezzi adibiti al trasporto. Le prime hanno una distribuzione spaziale abbastanza prevedibile e delimitata, mentre i secondi si distribuiscono lungo l'intero percorso che collega la zona di lavorazione con i siti di origine e destinazione dei materiali trasportati (rispettivamente cave e discariche).

Per ciascuna tipologia di macchine di cantiere è stata valutata l'emissione sonora tipica (livelli di potenza sonora delle sorgenti in dBA), e da questa, tramite il modello di calcolo previsionale semplificato Citymap, è stato possibile stimare i livelli sonori cui verranno esposti gli edifici prospicienti il tratto di linea in costruzione.

Sono disponibili sulla base di rilevamenti eseguiti in altri cantieri similari copiosi dati fonometrici, relativi a diverse tipologie di macchine di cantiere.

A titolo di esempio, si riportano qui i risultati di una vasta serie di rilievi eseguiti nel 2001 su macchine della VIP.

La seguente tabella riassume tutti i risultati del rilevamento sulle 30 macchine:

N.	Sorgente	Dist. m	Ora Inizio hh:mm:ss	Durata mm:ss	MaxP dBA	MaxL dBA	MinL dBA	Leq dBA	SEL dBA	L10 dBA	L50 dBA	L90 dBA	Lw dBA
1	Escav. per pali LS108 - LinkBelt	15	10:58:16	03:07	108.9	92.0	73.7	82.0	104.7	85.0	79.0	77.0	116.5
2	Motopompa Univac	4	11:04:07	00:14	109.0	90.2	75.2	86.0	97.5	88.5	86.0	76.0	109.0
3	Autobetoniera durante il getto	4.5	11:07:59	01:27	116.0	88.6	82.7	84.9	104.4	85.5	84.5	84.0	109.0
4	Gru a cavo Ruston Bucyrus E38	9	11:12:13	02:35	104.4	87.3	71.8	75.7	97.7	76.5	75.0	72.5	105.8
5	Escav. per pali Solmec R312HD	5	11:19:42	01:47	110.8	95.2	77.1	81.2	101.5	82.5	80.0	78.0	106.2
6	Escavat. cingolato con martello Fiat Allis FE28HD	6	11:23:05	01:36	108.3	92.0	82.1	85.2	105.0	86.5	84.5	83.0	111.8
7	Motopompa Caffini	5	11:27:40	01:02	108.7	87.5	83.4	85.7	103.7	86.5	85.5	84.5	110.7
8	Escav. cingolato con benna Fiat Hitachi FH220	5	11:30:08	01:18	121.4	103.5	75.5	82.7	101.6	82.5	77.5	76.0	107.7
9	Escavat. cingolato con martello Kobelco	7	11:32:30	01:11	120.3	101.3	72.2	94.1	112.7	98.5	90.0	73.0	122.0
10	Carr.elevatore F.Ili Dieci	5	11:35:05	00:43	101.4	81.6	69.9	76.4	92.7	79.5	75.0	71.5	101.4
11	Escav. cingolato con benna Fiat Hitachi FH220.3	6	11:37:38	01:19	113.0	95.5	76.1	81.5	100.5	81.5	80.0	78.0	108.1
12	Pala cingolata Komaco	15	11:44:28	01:33	103.7	82.6	70.4	76.3	95.9	78.5	75.0	72.0	110.8
13	Autobetoniera durante il lavaggio	5	11:47:55	00:45	102.0	86.4	84.2	85.4	102.0	85.5	85.0	85.0	110.4
14	Escav. cing. con benna CAT 320B	10	11:50:55	02:10	107.9	90.6	61.6	78.1	99.2	81.5	75.5	69.0	109.1
15	Escav. per diaframmi C50 INS – Casagrande	14	11:56:10	03:23	118.0	100.5	69.7	82.5	105.6	83.5	75.0	71.5	116.4
16	Carrello a forca con rimorchio	6	12:01:58	02:08	110.6	92.7	63.4	76.7	97.8	78.0	70.0	67.0	103.3
17	Autocarro	4	12:06:48	00:26	108.2	83.2	62.9	74.1	88.2	80.0	67.5	64.0	97.1
18	Escav. con rotari per pali LS108 – LinkBelt	50	12:39:15	05:44	97.1	79.5	67.1	72.2	97.7	74.0	72.0	69.5	117.2
19	Escav. cingolato con martello Fiat Allis (Pamoter)	8	15:57:03	02:01	116.3	96.6	77.6	91.4	112.3	94.0	91.0	86.5	120.5
20	Ponteggio Mobile Errebi	8	16:00:59	00:18	103.2	84.2	72.6	82.3	94.8	83.0	82.5	80.0	111.4

21	Trivella cingolata idraulica per pali CMV	15	16:03:35	02:25	113.7	97.5	78.3	83.0	104.6	83.5	81.0	79.5	117.5
22	Escav. con rotari per pali RB	15	16:07:10	04:15	106.4	89.8	77.4	82.6	106.7	84.5	81.5	79.0	117.1
23	Autobetoniera durante il lavaggio	8	16:12:53	01:19	104.4	87.4	75.6	84.8	103.9	85.5	85.0	78.5	113.9
24	Escav. cingolato con martello Fiat Allis FE28HD	10	16:15:24	02:07	117.8	100.2	77.4	90.9	111.9	94.0	89.5	80.5	121.9
25	Gru a cavo 22-RB (a servizio trivella)	7	16:30:00	05:07	107.6	92.6	72.6	76.8	101.6	78.0	74.5	73.0	104.7
26	Escav. per pali LS108 - LinkBelt	7	16:36:09	02:36	104.7	90.2	79.1	83.0	104.9	84.5	82.5	80.5	110.9
27	Trivella cingolata idraulica per micropali	6	16:42:32	01:53	107.4	88.6	71.9	77.8	98.4	79.5	77.0	73.5	104.4
28	Escav. cing. con benna CAT 320B	10	16:45:00	01:41	102.1	80.2	70.5	73.7	93.7	74.5	73.5	72.0	104.7
29	Carrello elevatore F.Ili Dieci ET35-HVT3	5	16:48:42	00:31	100.4	87.3	74.8	78.3	93.2	80.5	76.5	75.0	103.3
30	Escav. Cingolato con martello CAT 325LN	7	16:54:02	03:06	115.7	98.2	74.0	87.2	109.9	91.5	82.5	77.5	115.1

Si nota una considerevole dispersione dei dati di potenza sonora. In particolare si va da livelli di potenza leggermente inferiori ai 100 dBA a valori che eccedono decisamente i 120 dBA.

Si rammenta che i valori suddetti sono livelli di POTENZA sonora, che non vanno confusi con i comuni livelli di pressione sonora. Se si considera una sorgente sostanzialmente omnidirezionale, avente un livello di potenza di 120 dB (cioè che emette 1 Watt acustico), il livello di pressione sonora che si avrà, in caso di propagazione in campo libero, ad una distanza di 10m, sarà pari a 31 dB in meno, quindi $L_p = 89$ dB.

Cio' significa che i valori di potenza sonora delle tipiche macchine da cantiere sono meno "spaventevoli" di quanto si sarebbe potuto pensare, ma sono comunque abbastanza elevati, e possono dar luogo facilmente a livelli superiori agli 80 dBA, soprattutto allorchè più mezzi operano contemporaneamente entro uno spazio ristretto, circondati dalle case.

Ad esempio, nel corso del cantiere per la costruzione dell'interconnessione fra la ferrovia Modena-Sassuolo e la stazione FS di Modena (con una tecnica di costruzione sostanzialmente assimilabile a quella prevista, a Parma, per le tratte in galleria superficiale), nel corso di tre estese campagne di rilievo fonometrico svoltesi nel 1999 sono stati misurati, in facciata agli edifici prospicienti la linea in costruzione siti a meno di 10m dalle macchine operatrici, livelli sonori oscillanti fra gli 81 e gli 88 dB(A), per un periodo di esposizione totale di circa 4h al giorno. Scalando questo fatto sul cantiere di Parma, è lecito attendersi livelli sostanzialmente simili, ma per una durata espositiva di circa 6 h ogni giorno.

Altri dati sono disponibili in letteratura, o derivanti da rilievi singoli eseguiti di volta in volta. A richiesta può essere esibita la scheda tecnica di ciascuno dei dati ottenuti da rilievo fonometrico o da pubblicazioni esistenti.

Sulla base dei dati suddetti, per ciascuna fase dei lavori prevista è stato possibile quantificare la potenza sonora complessiva, ed il livello sonoro "medio massimo" (definito, secondo il regolamento del comune di Parma, come il valore mediato su un tempo non inferiore a 10 minuti e relativo alle condizioni di massima rumorosità delle macchine) – tale valore viene riferito convenzionalmente alla distanza di m 7.5 dalla macchina, in campo libero, che corrisponde abbastanza bene alla distanza fra gli edifici circostanti la linea e la zona di lavoro più prossima agli stessi., e che rappresenta il dato di emissione "standard" richiesto dal programma Citymap per una linea-sorgente definita dall'utente.

1.4.2 Stima degli impatti da rumore prodotti dalle macchine di cantiere – tracciato a raso

In questo paragrafo si considerano i seguenti aspetti:

- definizione delle fasi e modalità di lavorazione;
- definizione delle caratteristiche di emissione sonora delle sorgenti;
- localizzazione spazio-temporale delle sorgenti;
- calcolo delle mappature isolivello.

Nonostante le sorgenti sonore considerate siano tutte di tipo "mobile", e pertanto per le stesse sia lecito considerare la "diluizione" del periodo di effettivo funzionamento (tipicamente 4-8 ore) sull'intera durata del periodo diurno (16 ore), in questo studio si è considerata l'emissione sonora quando tutte le sorgenti sono in funzione (valore "medio-massimo" secondo regolamento per attività temporanee del Comune di Parma).

Di ciascuna sorgente sonora, comunque, viene sempre indicata anche la durata del periodo di effettivo funzionamento.

Per quanto riguarda la determinazione delle isofoniche di emissione (basata sulla metodologia e sui modelli già descritti) si deve precisare che tale attività ha richiesto una preventiva schematizzazione delle attività relative ad un tipico cantiere di costruzione. Ciascun cantiere è suddiviso in 4 sottocantieri, all'interno dei quali si svolgono lavorazioni differenziate.

Sono state adottate le ipotesi di seguito descritte, che chiaramente, essendo riferite ancora ad un progetto preliminare di costruzione della linea, sono per forza di cose schematiche e semplificate.

a) Traiettoria di lavoro

La posizione dei macchinari varierà in modo casuale durante la giornata lavorativa e quindi non è possibile determinare in modo esatto le singole traiettorie.

Data la ristrettezza della zona in cui operano le singole macchine è stato ipotizzato che la posizione in corrispondenza della quale si ha la maggiore probabilità di trovare una macchina operatrice è quella relativa all'asse della linea tranviaria.

b) Trasporto inerti fronte di avanzamento

Oltre alle emissioni relative ai macchinari occorre considerare anche le emissioni relative al trasporto degli inerti al fronte di avanzamento lavori.

Questa attività si svolge essenzialmente lungo la viabilità urbana circostante, ed il suo effetto si disperde in modo imprevedibile. Tuttavia si è assunto che, perlomeno nelle immediate vicinanze della zona in cui sono in corso le lavorazioni, anche i mezzi adibiti al trasporto si muovano lungo l'asse della linea, facendo impiego della sede della stessa come di una corsia preferenziale di passaggio.

c) Zona sorgente di rumore

In corrispondenza dei sottocantieri di ciascun cantiere si svolgono diverse attività che possono essere considerate suddivise nelle seguenti fasi temporali:

- taglio e rimozione della pavimentazione stradale esistente, sbancamento
- stesa strati;

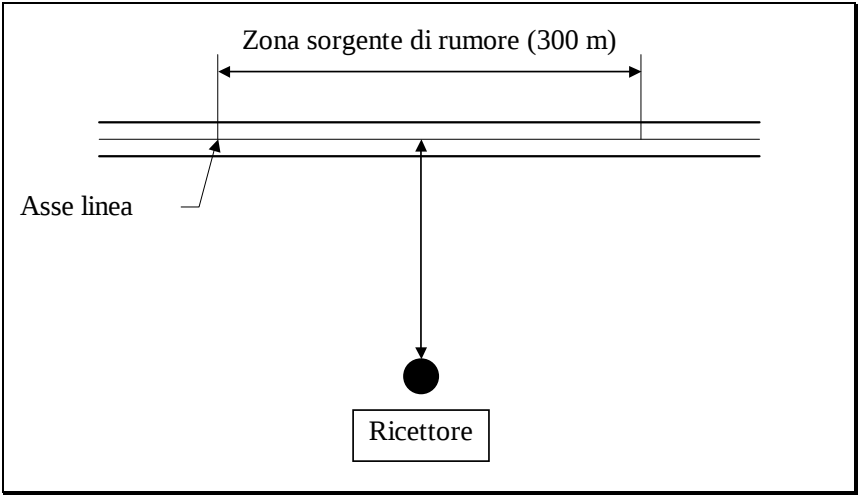
- compattazione;
- getto del sottofondo;
- posa del materiale antivibrante;
- getto della soletta in CLS armato flottante;
- collocazione delle piastre d'attacco e delle rotaie
- finitura superficiale e realizzazione della pavimentazione

Poiché la massima emissione sonora si sviluppa nel corso delle prime tre fasi, che danno luogo alla massima attività di mezzi da cantiere, l'analisi è stata effettuata solo con riferimento allo svolgimento di tali lavorazioni (fase di massima rumorosità).

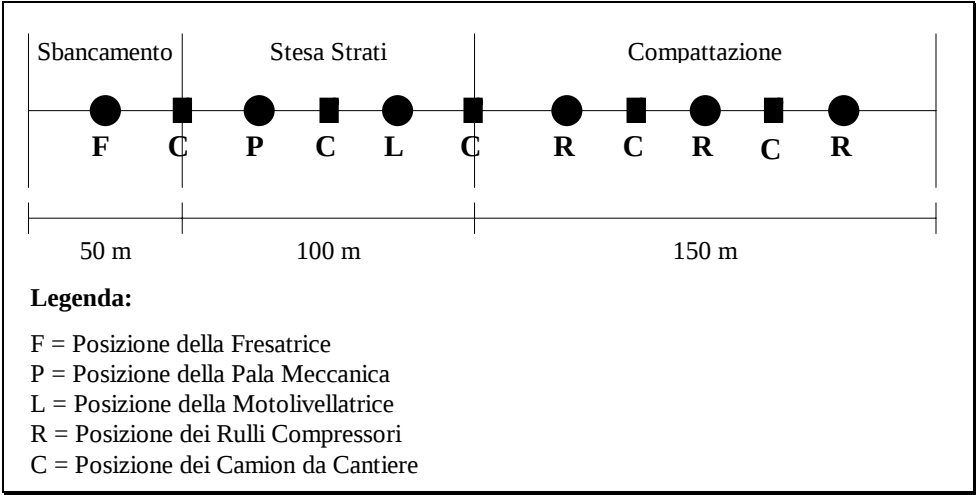
Sulla base di queste ipotesi, la zona sorgente di rumore è stata assunta cautelativamente pari ad un tratto di linea tranviaria in costruzione di 300 m (all'interno di questa tratta si suppone coesistano le attività di tre sottocantieri, ciascuno dei quali adibito rispettivamente a sbancamento, posa strati e livellazione).

Si ipotizza che, in ciascuno dei tre sottocantieri adiacenti, si svolgano le attività relative, nell'ordine, alle prime tre fasi di lavorazione previste. E' stato quindi ipotizzato di localizzare in corrispondenza del baricentro di ciascun o dei tre segmenti le sorgenti di rumore relative. A scopo esemplificativo nella successiva figura è stato riportato lo schema della localizzazione delle sorgenti di rumore considerate nel calcolo delle curve isofoniche.

Schematizzazione zona sorgente di rumore



Posizione delle sorgenti nella fase più rumorosa (realizzazione sottofondo)



d) Valori tipici di emissione

La determinazione delle emissioni sonore delle attività relative al fronte di avanzamento per la costruzione del tracciato a raso, nella configurazione di massima rumorosità corrispondente alle prime tre fasi di realizzazione dell'opera, è stata effettuata per mezzo di curve isofoniche.

Dette curve sono state calcolate prendendo come riferimento una situazione standard, caratterizzata dalla presenza contemporanea dei macchinari indicati nella tabella di seguito riportata.

Macchinari considerati contemporaneamente in funzione per le prime tre fasi della realizzazione dell'opera

MEZZI	NUMERO	LW (dBA)	TEMPO DI FUNZIONAMENTO (ORE/GIORNO)
Fresatrice	1	111.8	6
Pale meccaniche	1	110.8	6
Motolivellatrici	1	112.0	6
Rulli	3	111.6	6

Oltre alle emissioni acustiche prodotte dalle macchine operatrici sono state anche considerate quelle relative al trasporto degli inerti.

Queste ultime sono state valutate considerando la traiettoria dei camion che trasportano il materiale coincidente con l'asse della linea tranviaria, e statisticamente provenienti sia dal lato di avanzamento, sia da quello opposto del cantiere. Questa considerazione ha permesso di sommare le emissioni acustiche relative al trasporto dei materiali con quelle relative alle altre macchine operatrici.

Per l'approvvigionamento di un cantiere nel corso delle prime tre fasi di lavorazione sono previsti circa 30 camion/giorno che, tenendo conto anche dei viaggi di ritorno a vuoto equivalgono ad un rumore sostanzialmente continuo per l'intera giornata lavorativa.

Nella successiva fase di realizzazione delle opere in CLS (getto di base e massa flottante) sono invece previste circa 10 autobetoniere/giorno.

Caratterizzazione acustica dei mezzi per le attività di trasporto

ATTIVITA'	MEZZI	LW (dBA)	TEMPO DI FUNZIONAMENTO (ORE/GIORNO)
Trasporto inerti	Camion	102.0	8
Trasporto CLS	Betoniere	105.0	5

Sulla base delle assunzioni sopra descritte, è stato determinato il livello medio di emissione ad una distanza di m 7.5 dalla linea "di lavorazione" (coincidente perlopiu' con l'asse della linea metrotranviaria), che è risultato pari a 83.5 dB(A). Poichè la "linea" è in realtà rappresentata, nel programma Citymap, da due Polyline parallele (gli assi dei due binari), a ciascuna di esse è stata assegnata una emissione unitaria standard di 80.5 dB(A) a 7.5m di distanza.

1.4.3 Stima degli impatti acustici prodotti dalle macchine di cantiere – tracciato in galleria a scavo superficiale

Le macchine che vengono utilizzate in questa tecnica costruttiva sono piu' impattanti, dal punto di vista della rumorosità emessa, di quelle impiegate nella costruzione a raso.

Lo scavo della trincea viene infatti preceduta dalla realizzazione dei due diaframmi laterali, facendo impiego di:

- N. 1 scavatore cingolato con benna mordente
- N. 1 gru a cavo per il posizionamento delle gabbie
- n. 4 camion per trasporto gabbie, inerti, etc.
- N. 1 autobetoniera per il getto
- N. 1 motopompa per la movimentazione della bentonite
- N. 1 terna per i piccoli lavori stradali e lo spostamento di oggetti

Le fasi successive sono decisamente meno impattanti, innanzi tutto perchè eseguite con mezzi piu' leggeri, inoltre perchè i due diaframmi realizzati hanno una parziale funzione isolante rispetto alle attività che si svolgono all'interno di essi.

Comunque, una volta avvenuta la presa del CLS dei diaframmi, viene effettuato lo scavo e la rimozione del materiale fra i due diaframmi, sino alla profondità necessaria.

A tal fine si impiega:

- N. 1 scavatore a cucchiaio
- N. 2 camion da cantiere che fanno la spola portando via il materiale di scavo
- N. 1 pala livellatrice per la spianatura del fondo dello scavo.

Si procede poi al getto della soletta di fondo, che richiede l'impiego di:

- N. 1 autobetoniera per il getto
- N. 1 carrello sollevatore per il posizionamento delle armature
- N. 1 motopompa per la continua estrazione dell'acqua di infiltrazione

A questo punto vengono posizionati i pannelli prefabbricati di cpertura della trincea, gettando in opera la trave di correa e la caldana di rivestimento che li immobilizzano rispetto alla struttura circostante. In questa fase si fa impiego dei seguenti mezzi:

- N. 1 gru semovente per il posizionamento dei pannelli
- N. 1 autocarro per il trasporto degli stessi
- N. 1 carrello sollevatore per il posizionamento delle armature

Una volta coperta la trincea, le successive attività che si svolgono (ripristino della pavimentazione sovrastante, costruzione dell'armamento flottante) avvengono con impatti acustici e vibrazionali sostanzialmente trascurabili rispetto alle 4 fasi suddette.

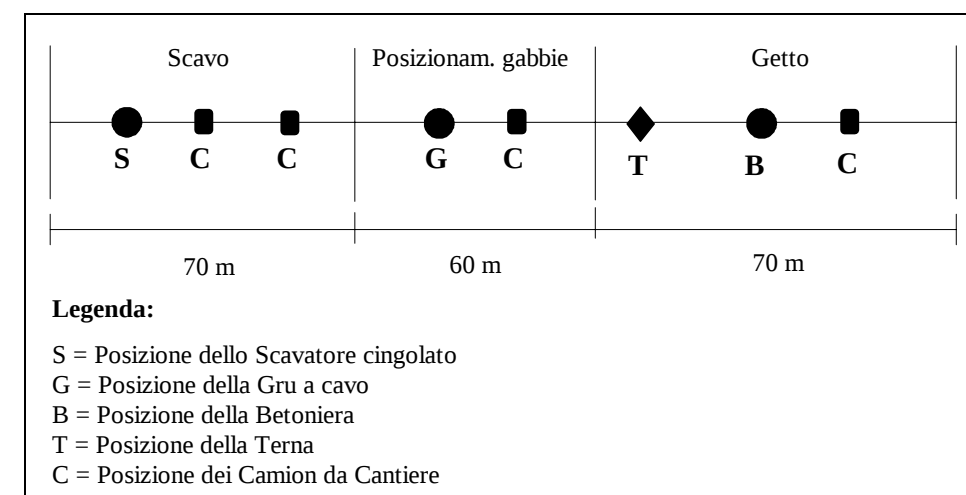
Pertanto, al fine della valutazione previsionale dell'impatto da vibrazioni, si considera solamente la fase piu' critica, che è la prima.

Sono quindi stati introdotti nel modello MAPPAVIB i dati di emissione delle vibrazioni, estratti per approssimazione ai mezzi piu' simili, rappresentati dalla seguente tabella.

MEZZI	NUMERO	LW DB(A)	TEMPO DI FUNZ. (ORE/GIORNO)
Scavatore cingolato	1	117.2	6
Gru a cavo	1	109.4	6
Betoniera	1	105.0	6
Terna	1	104.7	6
Camion da Cantiere	4	102.0	8

L'analisi delle emissioni di rumore da parte del cantiere è stata basata su di un tratto di linea di lunghezza pari a 200 m che rappresenta la dimensione standard di ciascun lotto di cantierizzazione per la costruzione della galleria superficiale.

A scopo esemplificativo nella figura sottostante è stato riportato lo schema della localizzazione delle sorgenti considerate nel calcolo.



Oltre alle emissioni di rumore prodotte dalle macchine operatrici sono state anche considerate quelle relative al trasporto degli inerti, rappresentati dai 4 camion da cantiere visibili in figura.

Sulla base delle assunzioni sopra descritte, è stato determinato il livello medio di emissione ad una distanza di m 7.5 dalla linea "di lavorazione" (coincidente perlopiu' con l'asse della linea metrotranviaria), che è risultato pari a 88.7 dB(A). Poichè la "linea" è in realtà rappresentata, nel programma Citymap, da due Polyline parallele (gli assi dei due binari), a ciascuna di esse è stata assegnata una emissione unitaria standard di 85.7 dB(A) a 7.5m di distanza.

1.4.4 Stima degli impatti acustici prodotti dalle macchine di cantiere – tracciato in galleria a foro cieco

La tecnica di scavo della galleria a foro cieco è descritta con dovizia di particolari nella relazione accompagnatoria del progetto preliminare, e nello specifico 8.4 ed 8.5.

Non è il caso di richiamare qui tali dettagli, perchè in ogni caso l'attività di scavo a foro cieco si svolge nel sottosuolo, e risulta pernta trascurabile ogni emissione sonora. Non si può ovviamente dire lo stesso per le vibrazioni, che verranno affrontate nel successivo capitolo 2.

In conseguenza della sostanziale mancanza di emissione sonora, la valutazione del rumore emesso in fase di cantiere nelle tratte di linea a foro cieco è stata ritenuta superflua, così' come già era accaduta anche per la valutazione del rumore causato dall'esercizio della metrotranvia.

1.4.5 Valutazione integrata dell'impatto in fase di cantiere

Facendo impiego del porgramma Citymap, è stata ripetuta l'elaborazione delle 25 aree di mappatura già impiegate per l'analisi dell'impatto da rumore in esercizio. In questo caso, ovviamente, i livelli di rumore sono molto piu' elevati, soprattutto nelle zone in cui è prevista la realizzazione della galleria con scavo superficiale, che, come osservato nei precedenti paragrafi, sarà caratterizzata da una emissione unitaria superiore di circa 5 dB(A) rispetto a quella relativa alla costruzione del tracciato a raso.

I risultati di tali mappature sono riportati nella allegate tavole n. 52-76.

Si può osservare che, a breve distanza dalla zona di lavorazione, verranno ampiamente superati i 65 dB(A). Sarà dunque necessario ed inevitabile che per l'esecuzione delle attività di cantiere il Comune di Parma conceda la deroga al rispetto dei limiti di rumorosità, esplicitamente prevista per le attività di cantiere e le altre attività temporanee dal D.P.C.M. 1 marzo 1991.

In particolare, poichè si prevede che, anche se per brevi periodi, si supereranno i 70 dB(A); sarà necessario per ottenere le deroghe presentare studi specifici sulle singole macchine che si intende adoperare, con una valutazione piu' accurata della effettiva emissione delle stesse di quella possibile in questa sede, basata su rilievi sperimentali effettuati sulle macchine destinate ad operare nei cantieri urbani di Parma. Tali studi specifici dovranno essere effettuati da un tecnico acustico competente, come previsto dal regolamento del Comune di Parma sulla concessione di deroghe per attività rumore temporanee.

Per ridurre al minimo le emissioni di rumori, in particolari situazioni verranno posizionate delle pannellature fonoassorbenti mobili, onde delimitare le zone ove vengono utilizzati utensili portatili molto rumorosi quali le seghe circolari o il gruppo elettrogeno, o attorno alle zone in cui si provvede alla demolizione con martelli idraulici di manufatti in CLS.

1.5 Sintesi e conclusioni dello studio di impatto da rumore

Lo studio dell'impatto da rumore si è basato su una tecnica di quantificazione del livello equivalente giornaliero che deriva dall'applicazione delle leggi ampiamente riportate nel cap.1.1.2. In sostanza, si tratta di valutare il livello equivalente giornaliero ponderato in frequenza secondo la curva A definita nella norma IEC 651 e IEC 1260.

La valutazione dello stato di fatto è stata effettuata mediante rilievi con fonometri integratori di classe 1, in 19 postazioni caratteristiche posizionate lungo il tracciato della linea, e successivamente utilizzando un modello matematico di simulazione tarato sugli stessi.

Sono stati rilevati livelli di rumore significativi, dovuto anche alle stringenti condizioni di alcune classi.

Si è poi proceduto ad analizzare i livelli di rumore che verranno emessi dal transito dei convogli sulla linea metrotranviaria di Parma, sia sulla base delle indicazioni fornite dai principali costruttori di veicoli tranviari idonei all'impiego in linee metropolitane miste (a raso ed in superficie) quale quella prevista per Parma, sia sulla base di una campagna di rilievo sperimentale eseguita nel 2002 a Potsdam. In tal modo è stato possibile definire uno spettro tipico di emissione sonora, che dà luogo, su armamento dotato di guanciali smorzanti in gomma, ad un livello di emissione del singolo binario pari a 58.2 dB(A) a 7.5m di distanza dall'asse per la linea A, ed a 56.2 dB(A) per la meno trafficata linea B.

Si è valutato che tali livelli di emissioni non possano essere causa di problemi nella maggior parte dei recettori residenziali posti a breve distanza della linea, se non quelli facente parte della classe I (scuole, ospedali, parchi ecc..), nei quali casi verranno compiute opere di mitigazione mirate all'abbattimento del livello di rumore fino al rientro nella classe di appartenenza.

Grazie alla stima di tali valori di emissione sonora dei convogli metrotramviari, è stato possibile operare il calcolo delle mappature del livello di rumore nella fase di esercizio. Essa ha evidenziato alcune differenze soprattutto nella zona in cui si avrà una limitazione del traffico stradale conseguente alla riduzione della sezione utile della carreggiata.

Si è infine operata l'analisi del rumore causato dalle attività di cantiere. Tale analisi ha evidenziato valori dei livelli di rumore decisamente superiori a quelli che si avranno durante l'esercizio, soprattutto nel caso di realizzazione delle gallerie con scavo superficiale.

In un ambito territoriale che è stato accuratamente quantificato mediante l'elaborazione delle mappature isolivello si avranno pertanto superamenti dei vigenti limiti di immissione, ma si deve considerare questa fase solo un'opera transitoria da accettare e pertanto non è ipotizzabile prendere alcun accorgimento progettuale teso a limitare i rumori in fase di cantiere, salvo i classici interventi apalliativi basati sull'utilizzo di schermature temporanee nei punti e nelle fasi più critiche.

Sono ovviamente possibili accorgimenti esecutivi, legati alla scelta delle macchine di cantiere, e soprattutto alle modalità di condotta delle stesse da parte del personale addetto. La valutazione effettuata, sotto questo profilo, è sicuramente molto prudentiale, e certamente una accorta sorveglianza e monitoraggio delle attività di cantiere consentirà di ridurre in modo significativo l'impatto da rumore.

1.6 Allegato "A"



Ministero dell'Ambiente
SERVIZIO INQUINAMENTO ATMOSFERICO E ACUSTICO
E LE INDUSTRIE A RISCHIO

Mod. 60

Parma 9 MAG 2001 19

Al Comune di Verona
Servizio ecologia
Via Pallone, 9
37121 Verona

Comune di Verona
Settore mobilità e traffico
Via Campo Marzo, 10
37100 Verona

N. 1442/2001/5141
Richiesta al Seglio del
N. 2

OGGETTO Metrotramvia moderna di superficie a guida vincolata per la città di Verona.
Normativa applicabile per valutare l'impatto acustico prodotto da una tramvia.

In riferimento Vs Prot. 110960 del 7/12/2000 si fa presente che le norme applicabili per la valutazione dell'impatto acustico prodotto da una tramvia sono:

- la legge 26/10/95 n. 447 Legge Quadro sull'inquinamento acustico;
- il D.P.C.M. 14/11/97 recante Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore;
- il D.M. 16/03/98 recante Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico;
- il D.M. 29/11/2000 recante Criteri per la predisposizione, da parte delle società e degli enti gestori dei servizi pubblici di trasporto o delle relative infrastrutture, dei piani degli interventi di contenimento e abbattimento del rumore.

Per quanto riguarda l'interpretazione di tale normativa, in riferimento alla Vs nota si osserva che:

- a) trattandosi di infrastrutture correlate al tessuto urbano ci si può riferire - in attesa dell'emanazione di regolamenti regionali e/o comunali che disciplinino la realizzazione e la gestione della specifica tipologia di infrastruttura di trasporto (incluse eventuali fasce di pertinenza) esclusa dal campo di applicazione del D.P.R. 18/11/98 n. 459, recante *Regolamento recante norme di esecuzione dell'art. 11 della legge 26 ottobre 1995 n. 447, in materia di inquinamento acustico derivante da traffico ferroviario* - a fasce di pertinenze in analogia a quelle riportate nel decreto in fase di approvazione per le strade, e cioè di 30 m per le tratte di attraversamento urbano e di 60 m per le tratte extraurbane;
- b) il D.P.C.M. 14/11/97 indica all'art. 2 i valori limite di emissione delle singole sorgenti fisse (tabella B). Per quanto riguarda i valori limite assoluti di immissione (art. 3), i limiti di cui

alla tabella C si applicano all'esterno delle fasce di pertinenza; all'interno di tali fasce di pertinenza, sempre in attesa dei citati regolamenti regionali e/o comunali, si possono riguardare come valori guida i limiti fissati dal D.P.R. 459/98 per le *infrastrutture ferroviarie esistenti e con velocità di progetto non superiore a 200 km/h* (art. 5, comma 1 per i ricettori di cui alla lettera a) e b) (scuole, ospedali, case di cura e case di riposo, e altri ricettori ricadenti all'interno della fascia "A");

- c) e d) i valori limite differenziali di immissione (art. 4, comma 3) non si applicano alla rumorosità prodotta dalle infrastrutture stradali e ferroviarie a cui è possibile assimilare le infrastrutture tramviarie;
- e) per quanto riguarda i criteri e le modalità di misura del rumore prodotto dalle infrastrutture tramviarie, può essere fatto riferimento al punto 2 dell'allegato C del D.M. 16/03/98.

Il Dirigente della Divisione 3^

Giuseppe Biondi

2. Valutazione dell'impatto da vibrazioni

2.1 Introduzione allo studio dei fenomeni vibratorii

Il presente studio si occupa del fenomeno delle vibrazioni. Si intendono con tale termine i moti delle strutture (in questo caso edili) a frequenze comprese fra 1 e 80 Hz. Normalmente la caratterizzazione viene effettuata in termini di valore medio efficace (RMS) della velocità (in mm/s) oppure della accelerazione (in mm/s²): si usa solitamente la velocità per valutare gli effetti delle vibrazioni sugli edifici, e l'accelerazione per valutare la percezione umana. Per la misurazione, si utilizzano normalmente accelerometri, che ovviamente forniscono il livello di accelerazione.

E' tuttavia agevole convertire i valori di accelerazione a nei corrispondenti valori di velocità v , nota la frequenza f , tramite la relazione:

$$v = \frac{a}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

Convenzionalmente, in analogia con le analisi del rumore, sia i valori di velocità che quelli di accelerazione vengono valutati sulla scala dei dB, tramite le relazioni:

$$L_{acc} = 20 \cdot \lg \left[\frac{a}{a_0} \right] \qquad L_{vel} = 20 \cdot \lg \left[\frac{v}{v_0} \right]$$

Nelle quali compaiono i valori di riferimento $a_0 = 0.001 \text{ mm/s}^2$ e $v_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ mm/s}$.

Va osservato che un determinato evento vibratorio dà luogo, in generale, a valori in dB di accelerazione e velocità del tutto diversi, dipendentemente dalle frequenze interessate.

Onde familiarizzare il lettore con le scale in dB dei livelli di vibrazione, si può osservare che normalmente un calibratore per accelerometri fornisce un valore di accelerazione RMS pari a 10 m/s^2 , ad una frequenza di 159.15 Hz (cosicché $2 \cdot \pi \cdot f$ risulta pari a 1000 rad/s). Tale segnale di calibrazione corrisponde dunque ad una velocità di vibrazione di 10 mm/s. Il livello di accelerazione L_{acc} risulta pari a 140 dB, ed il livello di velocità risulta pari anch'esso a 140 dB.

Si deve osservare però che la corrispondenza dei due livelli si verifica solo a questa particolare frequenza (che infatti viene usata dal calibratore proprio a tale scopo), mentre in generale, a frequenze più basse, il livello di velocità è più elevato del livello di accelerazione, visto che la frequenza si trova al denominatore nella formula di conversione: a 40 Hz, ad esempio, ad un livello di accelerazione di 100 dB corrisponde un livello di velocità di 112 dB.

In conseguenza di questa possibile fonte di confusione, nel seguito dello studio si fa unicamente riferimento ai livelli di accelerazione.

Nel seguito viene descritta succintamente la causa dei fenomeni vibratorii in campo ferro-tranviario, e le modalità di propagazione delle vibrazioni nel terreno, sia nella modalità superficiale che profonda.

2.1.1 Generazione delle vibrazioni

Il passaggio di un convoglio ferroviario o tranviario su un binario dotato di armamento tradizionale (rotaie continue saldate, traversine in CLS, ballast) è fonte di emissione di vibrazioni nel terreno circostante, che si propagano agli edifici situati entro distanze dipendenti dalla natura del terreno stesso e dai livelli di vibrazione indotti sul solido ferroviario.

L'origine fisica del fenomeno è la stessa che causa l'emissione primaria di rumore, ed in particolare il contatto ruota-rotaia: piccole imperfezioni superficiali delle superfici causano improvvise variazioni delle forze di contatto, che a loro volta causano il moto vibratorio della rotaia stessa. L'eccitazione è principalmente in senso verticale, ma nel corso della propagazione nel terreno e dell'interazione con gli edifici possono svilupparsi rilevanti componenti di movimento anche in senso orizzontale.

Lo spettro delle forze di eccitazione, costituito come visto da micro-impulsi, è tipicamente a banda larga. Esso si applica però a strutture dotate di specifiche frequenze di risonanza, per cui su una superficie orizzontale posta sotto il ballast si rileva uno spettro tipico di accelerazione che presenta normalmente due picchi, uno situato a circa 8-10 Hz, e l'altro, con livello più elevato, a circa 40-50 Hz. L'utilizzo di sistemi di armamento più moderni, con elementi elastici interposti nell'organo di attacco della rotaia, e con una struttura sottostante massiva, portano, come verrà meglio evidenziato nel seguito, ad una notevole riduzione delle vibrazioni prodotte e trasmesse.

Inoltre, il contatto "elastico" indotto da questi sistemi di armamento ed il loro elevato fattore di perdita (ottenuto con l'impiego di speciali materiali ad alto smorzamento) fanno sì che il primo picco a frequenza inferiore a 10 Hz scompaia in modo pressoché totale nelle linee metropolitane o nelle linee tranviarie dotate di armamento "flottante".

E' ovvio come l'aumento del carico sulla ruota e della velocità del convoglio causino un sistematico aumento del livello di accelerazione:

- Raddoppiando il carico sull'assale il livello di accelerazione cresce da 2 a 4 dB (mediamente 3 dB)
- Raddoppiando la velocità del convoglio il livello di accelerazione cresce da 4 a 6 dB (mediamente 5 dB)

Dal punto di vista del valore istantaneo massimo, la lunghezza del convoglio (e quindi il numero di carrozze) non ha alcuna influenza sul valore rilevato, così come il numero dei rotabili che transitano nel periodo diurno o notturno. Da questo punto di vista, dunque, non si ha alcun aggravio di impatto adottando un programma di esercizio che preveda un numero di corse molto elevato.

Con armamento nuovo ed in condizioni di finitura ideali, è ipotizzabile che il perfetto contatto ruota-rotaia porti inizialmente ad una situazione molto "rosea", quantificabile in una riduzione delle forze di eccitazione sulla rotaia di almeno 10 dB. Tuttavia tale iniziale beneficio è destinato a ridursi fortemente ed a scomparire poi definitivamente nel corso degli anni. Di esso non si terrà dunque conto in questa sede. Verranno invece impiegati dati di emissione di vibrazioni "standard", derivante da recenti campagne di rilievo sperimentale eseguite nelle città di Milano, di Torino e di Potsdam (Germania), con riferimento a rotabili di caratteristiche tecniche assimilabili a quelli previsti per la metrotranvia di Parma.

2.1.2 Propagazione delle vibrazioni

Allorché viene imposto sul terreno un prefissato livello di vibrazioni, lo stesso si propaga nel terreno circostante, subendo tuttavia una attenuazione dipendente dalla natura del terreno, dalla frequenza del segnale, e dalla distanza fra il punto di eccitazione e quello di valutazione dell'effetto.

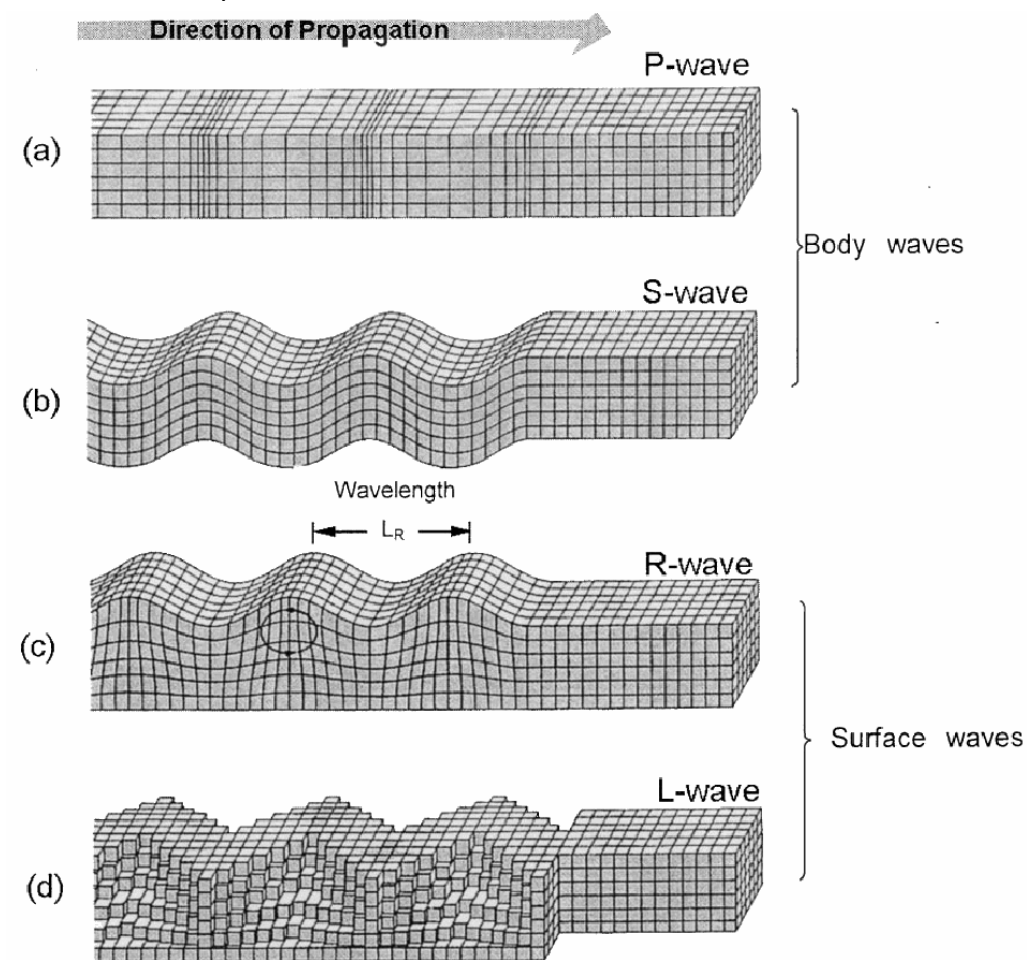
Si deve distinguere tra tre tipi principali di onde che trasportano energia vibrazionale⁷:

Onde di compressione (onda P)

Onde di taglio (onda S)

Onde di superficie (orizzontali, onde R, e verticali, onde L)

I primi due tipi sono onde di volume ("body-waves"), mentre le onde di superficie, come dice il nome, si propagano sull'interfaccia fra due strati con diverse proprietà meccaniche, principalmente quindi sulla superficie di separazione fra terreno ed aria. La seguente figura mostra schematicamente i diversi tipi di onde.

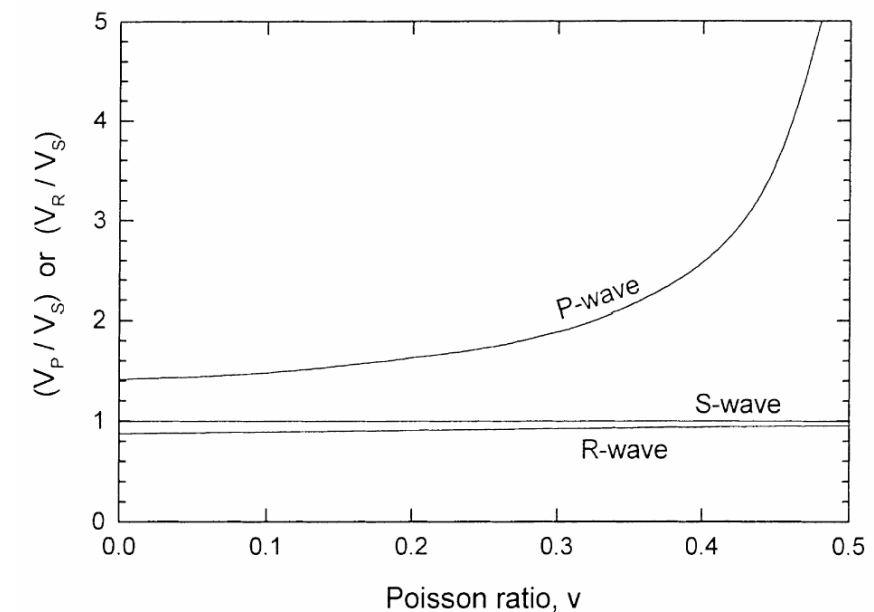


Vari tipi di onde di volume e di superficie.

Va anche osservato che il tipo d) (onde L) non viene facilmente eccitato dal transito dei tram, in quanto richiederebbe l'imposizione di moti orizzontali alla fonte delle vibrazioni. Nella pratica quindi, allorché l'armamento poggia sul piano di campagna, si può ritenere che vi sia predominio

delle onde di superficie, in particolare di tipo R che corrono sulla interfaccia suolo-aria, mentre nel caso di linee in galleria si hanno anche onde di compressione ed onde di taglio, mentre le onde di superficie tendono a correre sulle superfici di separazione fra strati diversi del terreno.

Va inoltre osservato che la velocità di propagazione dei diversi tipi di onde non è la stessa: le onde di compressione (onde P) sono le più veloci, mentre le onde di taglio e di superficie viaggiano con velocità più basse, in dipendenza del valore del modulo di Poisson del terreno. La seguente figura mostra il rapporto fra velocità di propagazione delle onde P ed R riferito alla velocità di propagazione delle onde di superficie S.



Velocità relativa delle onde P ed R rispetto alle onde S

Il modello di propagazione qui impiegato, valido per tutti tre i tipi di onde considerati (P, S, R) è basato sulla seguente formulazione⁸:

$$a(d, f) = a(d_0, f) \cdot \left(\frac{d_0}{d} \right)^n \cdot e^{-2\pi f \cdot \eta / c \cdot (d - d_0)}$$

In cui η è il fattore di perdita del terreno, c la velocità di propagazione in m/s, f la frequenza in Hz, d la distanza in m, e d_0 la distanza di riferimento a cui è noto lo spettro di emissione, qui assunta pari a 5m.

L'esponente n varia a seconda del tipo di onda e di sorgente di vibrazioni. In particolare, la seguente tabella mostra i valori di n :

⁷ G.A. Athanasopoulos, P.C. Pelekis, G.A. Anagnostopoulos – "Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from field measurements" - Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19 (2000) 277-288

⁸ Dong-Soo Kim, Jin-Sun Lee – "Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations" - Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19 (2000) 115-126

Values of attenuation coefficient due to radiation damping for various combinations of source location and type (from Ref. [9])

Source location	Source type	Induced wave	n
Surface	Point	Body wave	2.0
		Surface wave	0.5
	Infinite line	Body wave	1
		Surface wave	0
In-depth	Point	Body wave	1.0
	Infinite line		0.5

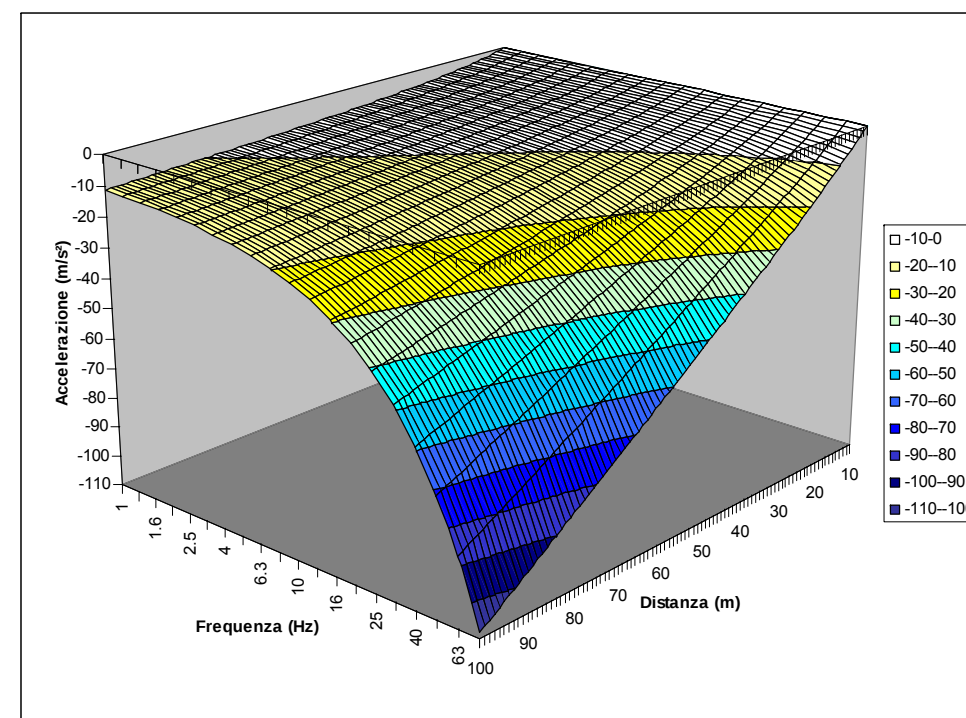
Considerando che, con riferimento all'ottenimento dei livelli massimi, si deve sempre prendere in considerazione una sorgente concentrata, si ha che l'esponente n vale 0.5 per le onde di superficie (predominanti in caso di sorgente posta in superficie), e 1 per le onde di volume (predominanti in caso di sorgente profonda, come nel caso di fondazione su pali).

Il termine esponenziale rappresenta invece i fenomeni di dissipazione di energia meccanica in calore, che come si vede va crescendo proporzionalmente alla frequenza. Ciò fa sì che le alte frequenze si estinguano dopo un breve percorso, mentre le frequenze più basse si propagano a distanze maggiori. Il rapporto η/c dipende dal particolare tipo di terreno considerato, ed assume valori elevati nel caso di terreno coltivato soffice, mentre assume valori molto modesti nel caso di pavimentazioni rigide in CLS.

Con riferimento alla propagazione di onde superficiali non si considera il caso di terreni stratificati, o della presenza di disomogeneità di vario genere che possono ostacolare o favorire la propagazione delle vibrazioni.

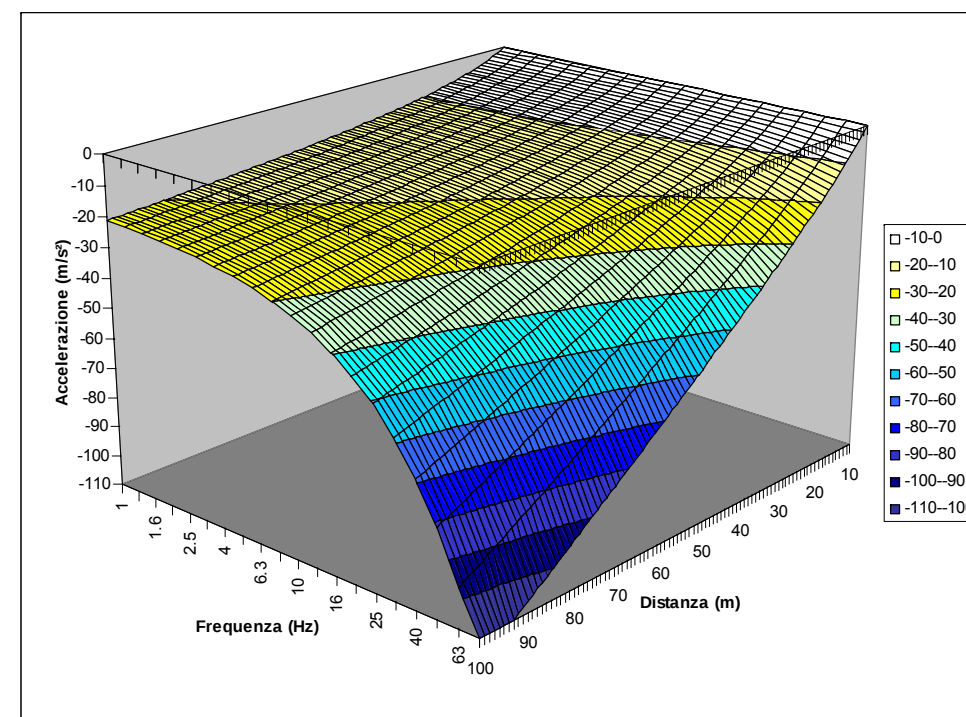
A titolo illustrativo, la seguente figura mostra l'attenuazione del livello di accelerazione in funzione della distanza dalla sorgente e della frequenza, avendo ipotizzato un valore di velocità di propagazione c pari a 400 m/s ed un fattore di smorzamento pari a 0.1. Tali valori sono abbastanza tipici della pianura padana, in zone extraurbane coltivate, per propagazione superficiale.

Dalla figura si può osservare come a bassa frequenza l'attenuazione sia modesta anche a distanze notevoli, mentre a frequenze più elevate a qualche decina di metri di distanza dalla sorgente le attenuazioni sono molto grandi.



Attenuazione in funzione della frequenza e della distanza per onde superficiali.

Nel caso invece di propagazione a partire da sorgente profonda, ipotizzando un terreno ancora omogeneo e con le stesse caratteristiche meccaniche su descritte, si ha una legge di propagazione che mostra una più rapida attenuazione con la distanza, come mostrato dalla seguente figura.



Attenuazione in funzione della frequenza e della distanza per onde di volume.

Si deve anche tenere conto che, se nel terreno si hanno superfici di separazione fra strati con diversa impedenza meccanica, una quota di energia viene riflessa da tali superfici di discontinuità e non viene quindi percepita al di là di esse. In particolare, se l'eccitazione avviene al di sotto dello strato superficiale sovraconsolidato, l'interfaccia fra esso ed il terreno incoerente sottostante riduce l'ampiezza delle vibrazioni che riescono ad attraversare tale interfaccia. Il fattore che esprime tale attenuazione, sempre minore di 1, è legato al rapporto fra le impedenze dei due strati (si rammenta che l'impedenza è data dal prodotto fra la velocità di propagazione delle onde di taglio e la densità del materiale). Esso è espresso dalla seguente relazione:

$$F_r = \frac{1 + \frac{\rho_2 \cdot c_2}{\rho_1 \cdot c_1}}{2}$$

In cui il pedice 1 si riferisce al materiale con impedenza più bassa dei due. Se ad esempio consideriamo l'interfaccia fra uno strato profondo soffice ed incoerente, con densità ρ_1 pari a 1850 kg/m³ ed una velocità di propagazione delle onde di taglio pari a 150 m/s, ed uno strato superficiale sovraconsolidato, con densità ρ_2 pari a 1900 kg/m³ e velocità di propagazione pari a 400 m/s, si ha un fattore di attenuazione per riflessione F_r pari a 0.68, cioè pari a -3.3 dB.

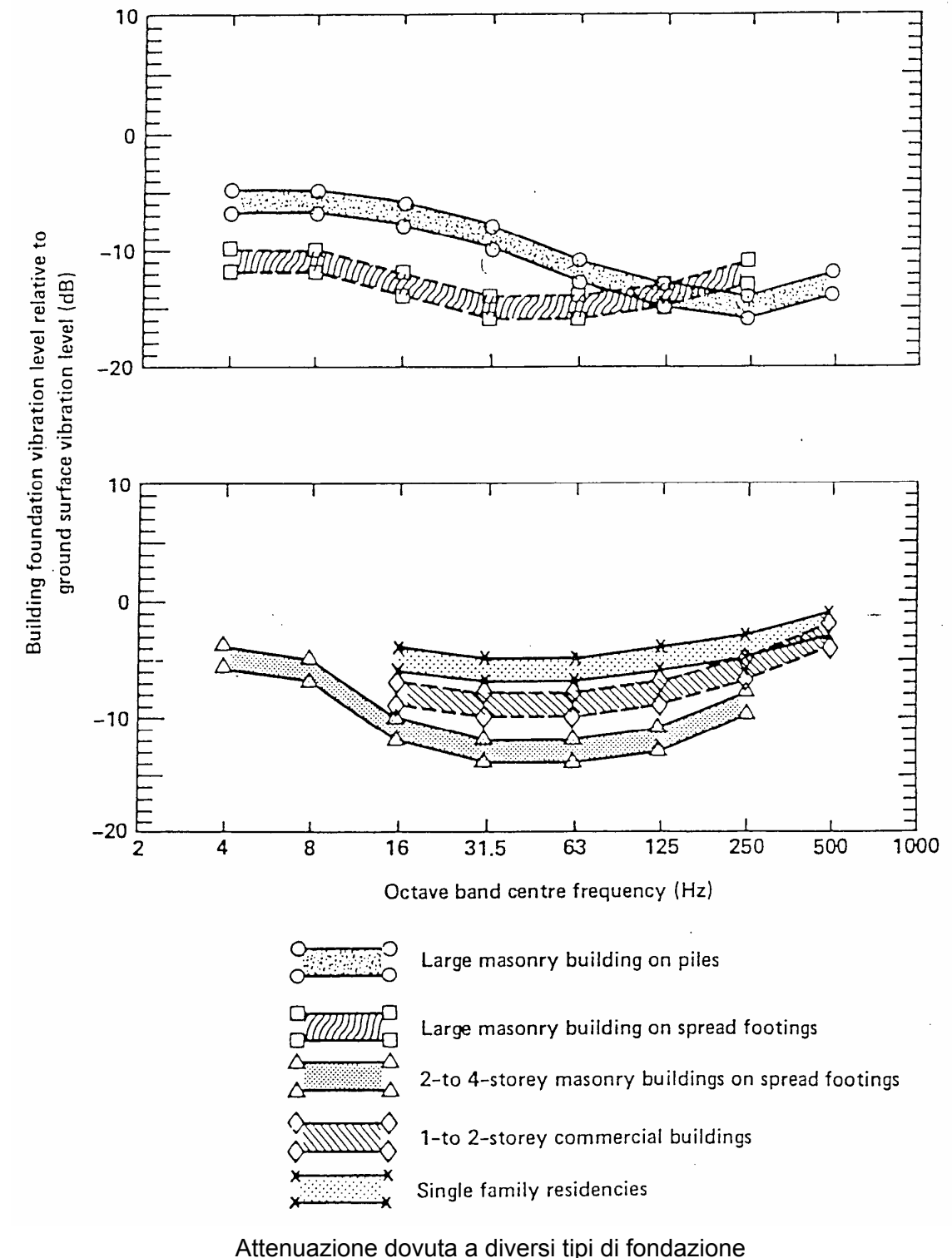
2.1.3 Attenuazioni ed amplificazioni nella struttura degli edifici

Il modello semplificato di propagazione illustrato nel precedente paragrafo si riferisce ai soli fenomeni che avvengono nel terreno, supposto omogeneo ed isotropo (perlomeno all'interno di ogni strato). In presenza di edifici dalla struttura complessa, collegati al terreno mediante sistemi di fondazione di vario genere, accade che i livelli di accelerazione riscontrabili all'interno degli edifici stessi possono presentare sia attenuazioni, sia amplificazioni rispetto ai livelli sul terreno.

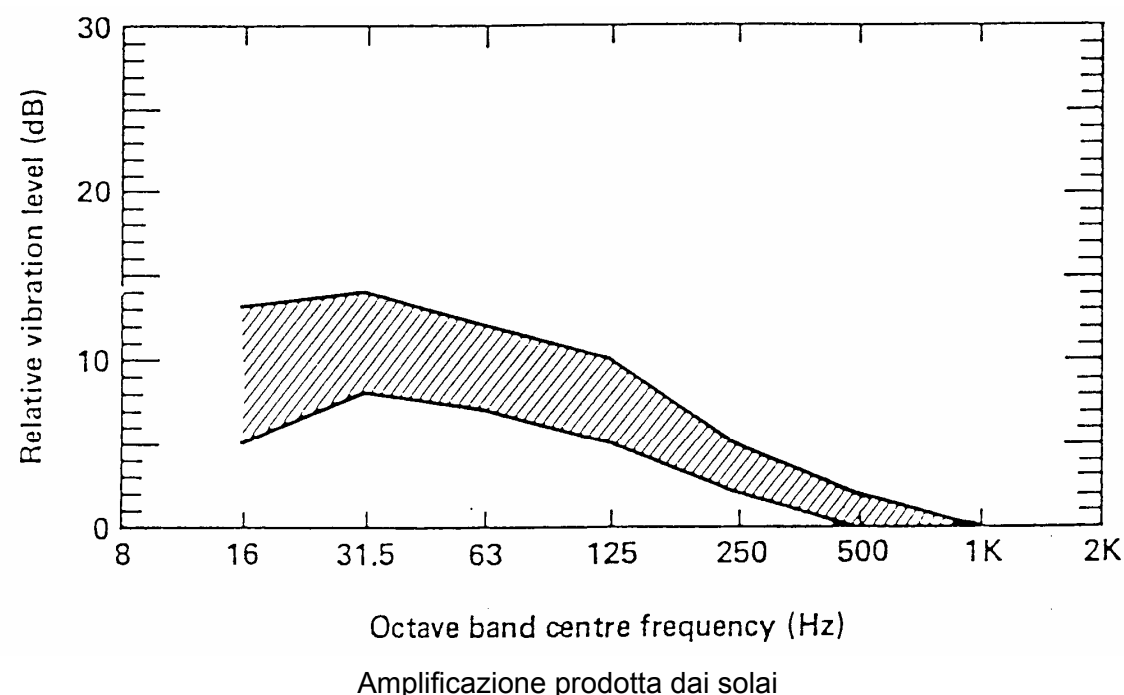
In particolare, diversi sistemi di fondazione producono una attenuazione più o meno pronunciata dei livelli di accelerazione misurabili sulla fondazione stessa rispetto a quelli nel terreno circostante; tale aspetto è legato al fatto che l'interfaccia terreno-struttura non è perfettamente solidale, e pertanto genera fenomeni dissipativi. Detto fenomeno è condizionato dalla tipologia delle fondazioni (a platea, su plinti isolati, su travi rovescie, su pali, etc.). Nel caso di fondazioni a platea la grande area di contatto con il terreno determina una perdita di accoppiamento praticamente di 0 dB alle basse frequenze, sino alla frequenza di risonanza della fondazione.

Per le altre tipologie di fondazioni possono essere utilizzate curve empiriche che consentono la stima dei livelli di vibrazione della fondazione in funzione dei livelli di vibrazione del terreno.

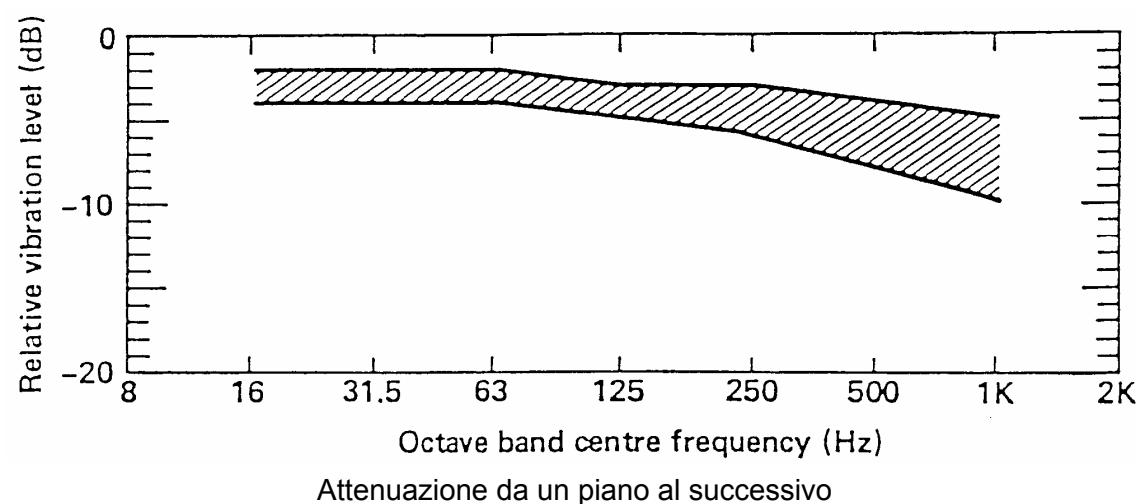
Va inoltre preso in esame il fenomeno della risonanza strutturale di elementi dei fabbricati, in particolare dei solai: allorché la frequenza di eccitazione coincide con la frequenza naturale di oscillazione libera della struttura, la stessa manifesta un rilevante aumento dei livelli di vibrazione rispetto a quelli presenti alla base della stessa.



Nella figura successiva viene evidenziato il possibile campo di amplificazione delle vibrazioni dovuto alla risonanza dei solai, che come si nota oscilla fra 5 e 12 dB nel campo di frequenze rilevanti dal punto di vista ferroviario.



Fortunatamente passando da ogni piano a quello sovrastante si verifica una progressiva riduzione dei livelli di vibrazione trasmessi. La fig. seguente mostra il campo di variabilità tipico di tale attenuazione interpiano.



Una analisi dei dati disponibili in bibliografia mostra che:

In base ai dati prodotti dalle Ferrovie Tedesche, e desumibili dalla norma DIN 4150, gli incrementi per risonanza possono essere dell'ordine di 3 – 8 volte, con rari casi fino a 15 volte

Le misure di Ishii e Tachibana mostrano una attenuazione interpiano che varia progressivamente da 3 dB ai piani bassi sino a 1 dB negli ultimi piani di di un edificio a 10 piani con struttura in CLS armato e acciaio.

Le misure effettuate dalla Ferrovie Svizzere hanno mostrato che mediamente i livelli di accelerazione misurati sui pavimenti sono superiori di circa 5 dB rispetto a quelli misurati sul terreno, in alcuni casi si può arrivare ad un incremento anche di 20 dB nel caso del pavimento del piano terra con frequenza di risonanza di circa 40 Hz.

E' ovvio quindi come l'effetto complessivo di questi fenomeni possa in genere portare ad una variazione dei livelli di vibrazione, misurati al centro dei solai, da 0 a +12 dB rispetto ai livelli sul terreno.

Una stima dell'effetto locale di riduzione/amplificazione di ciascun edificio è possibile parametrizzando gli effetti combinati secondo il seguente schema.

Innanzitutto si valuta l'attenuazione delle fondazioni. Essa viene assunta pari a 0 dB per le fondazioni a platea, a 3 dB per fondazioni su travi rovescie in CLS, ed a 5 dB nel caso di fondazioni in muratura o comunque nel caso di fondazioni che non abbiano capacità di immorsamento.

Si valuta poi l'amplificazione dovuta alla risonanza dei solai. Il valore di base assunto è una amplificazione di 5 dB per solai in laterocemento con frequenza propria di 20 Hz. A questo valore di base si aggiungono i seguenti effetti:

- Effetto della variazione della frequenza di risonanza: se la stessa è maggiore di 20 Hz e minore di 40 Hz, si incrementa linearmente il valore di base, che viene fatto variare da 5 dB a 20 Hz sino a 20 dB a 40 Hz
- Effetto dell'incastro del solaio:

Appoggio semplice	-2.0	dB
Incastro imperfetto	0.0	dB
Incastro perfetto	+5.0	dB
- Rapporto rigidezza/peso specifico del materiale

Solaio in laterocemento	0.0	dB
Volte o archi in muratura	-4.0	dB
- Spessore del solaio:

h = 40 cm	+8.0	dB
h = 30 cm	+3.0	dB
h = 24 cm	0.0	dB
h = 12 cm	-2.5	dB
- Luce del solaio

L = 10 m	-4.0	dB
L = 7 m	-3.0	dB
L = 5 m	-2.0	dB
L = 4 m	0.0	dB
L = 3.5 m	+3.0	dB
L = 3.0 m	+8.0	dB

- Attenuazione interpiano: si assume prudenzialmente una riduzione di 1 dB per ogni piano al di sopra del piano terra.

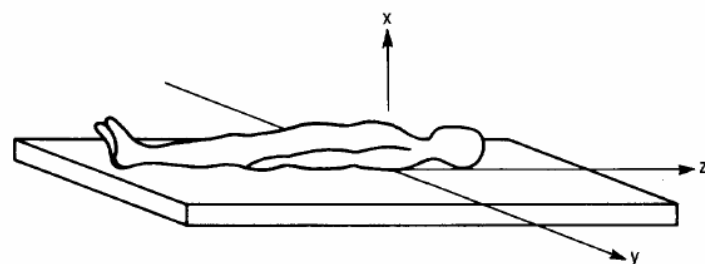
Sulla base delle parametrizzazioni suddette, diviene possibile stimare in maniera approssimata per ogni edificio, note le sue caratteristiche costruttive, l'eventuale effetto di amplificazione massima sul solaio più sfavorito.

2.1.4 Analisi delle normative tecniche in materia di valutazione delle vibrazioni

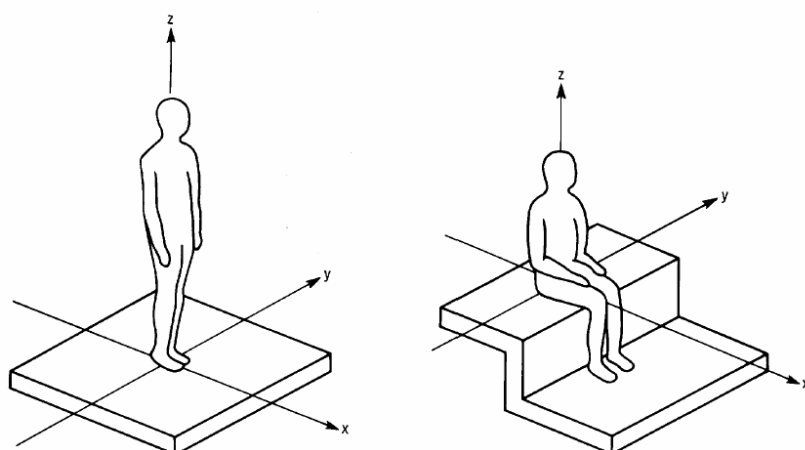
Sulla base delle considerazioni svolte al precedente paragrafo, si prende primariamente in esame il problema della percezione umana delle vibrazioni. Infatti, i limiti di danno strutturale lieve sono indicati negli allegati della norma UNI 9916⁹, e risultano più elevati di quasi 30 dB dei limiti di percezione individuati dalla norma UNI 9614¹⁰.

A questo proposito, la sensibilità umana è variabile con la frequenza, e dipende dall'asse cartesiano considerato rispetto al riferimento relativo al corpo umano.

Le curve di sensibilità umana sono codificate dalla norma tecnica UNI 9614, rispetto ai sistemi di riferimento per persone sdraiate, sedute o in piedi, riportato nelle seguenti figure:

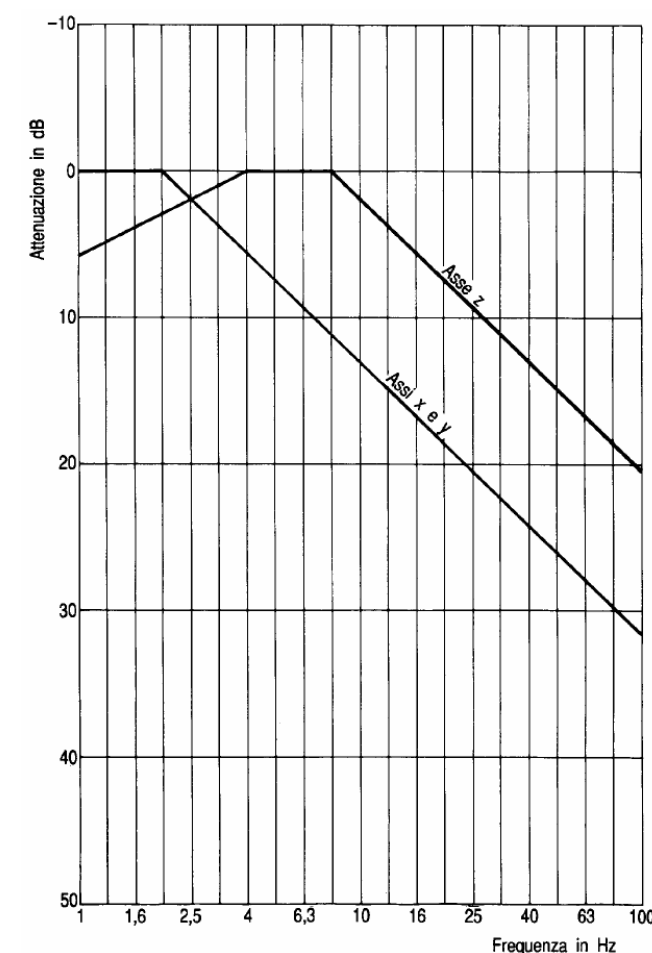


Sistema cartesiano di riferimento per persona coricata



Sistema cartesiano di riferimento per persona in piedi o seduta

La successiva figura mostra l'andamento spettrale delle curve di ponderazione da applicare al segnale di accelerazione rilevato, onde rendere equivalente la percezione umana alle varie frequenze.

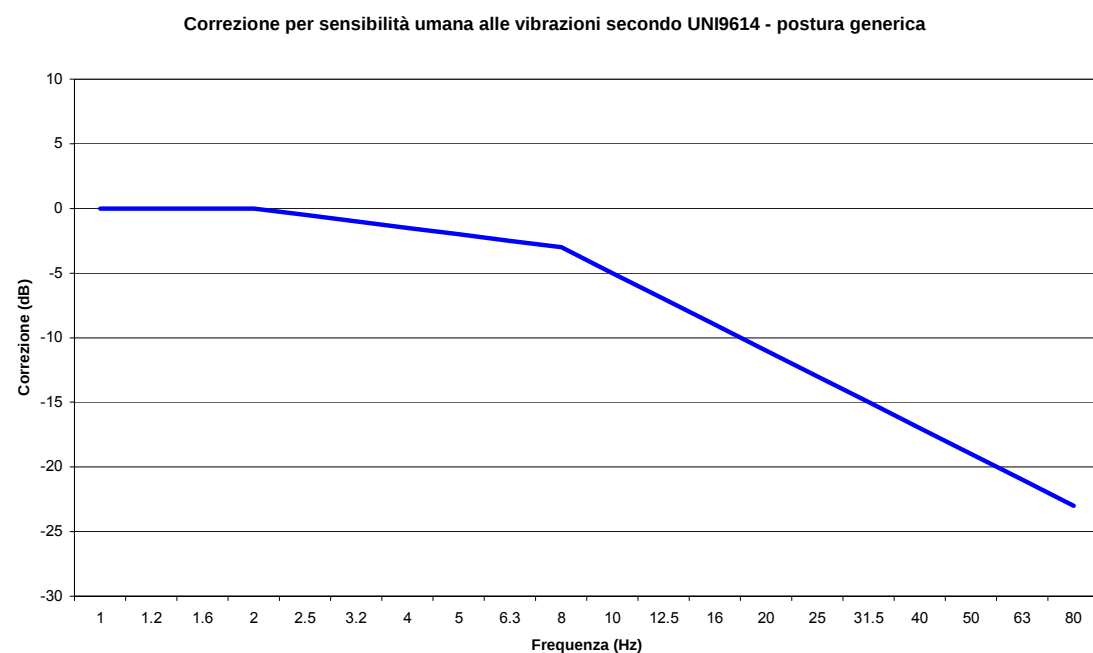


Curva di ponderazione assi X, Y e asse X

Nel caso considerato, tuttavia, la popolazione si troverà esposta indifferentemente su uno dei tre assi, a seconda della giacitura dei soggetti, che è ovviamente non predeterminale e variabile nel corso delle 24 ore. In tali casi, la norma UNI 9614 prevede l'impiego di una curva di ponderazione per asse generico (o meglio, per asse non definibile), che viene riportata nella seguente figura.

⁹ Norma UNI 9916 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici", Novembre 1991.

¹⁰ Norma UNI 9614 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo", Marzo 1990.



Curva di ponderazione asse generico

Si può notare come questa curva non introduca alcuna variazione ai livelli di accelerazione misurati da 1 a 2 Hz, per poi ridurre progressivamente i valori al crescere della frequenza. A partire dagli 8 Hz, la curva ha una pendenza di 6dB/ottava, e corrisponde dunque alla conversione fra accelerazione e velocità. Poiché lo spettro tipico di emissione di vibrazioni causate dal transito ferroviario non contiene energia significativa al di sotto degli 8 Hz, si conclude che la sensibilità umana alle vibrazioni è direttamente proporzionale alla velocità di vibrazione, e non all'accelerazione.

La norma UNI9614 prevede di valutare il livello complessivo di accelerazione ponderata nell'intervallo da 1 ad 80 Hz: se il segnale disturbante è caratterizzato da una emissione concentrata entro una singola banda di 1/3 di ottava, è sufficiente correggere il valore misurato applicando la correzione riportata in fig. 1.8 (ad esempio essa vale -17 dB a 40 Hz). Se viceversa lo spettro è continuo ed esteso a più bande, occorre anzitutto calcolare il livello di accelerazione corretto a ciascuna frequenza, indi sommare energeticamente i livelli di accelerazione alle varie frequenze onde ricavare il valore complessivo:

$$L_{acc,w,tot} = 10 \cdot \lg \left[\sum_i 10^{(L_{acc,i} + C_i)/10} \right]$$

Questa metodica rende tuttavia le cose più complicate in presenza di fenomeni di propagazione che, come abbiamo visto, producono una attenuazione con la distanza che dipende fortemente dalla frequenza.

La norma UNI9614 definisce infine il valore numerico del limite di accettabilità per edifici residenziali, corrispondente ad un valore del livello di accelerazione complessiva, ponderata secondo asse generico, pari a 74 dB per il periodo notturno e a 77 dB per il periodo diurno. Poiché lungo la metrotranvia in esame non saranno in circolazione convogli notturni, si è adottato come limite di accettabilità il valore diurno di 77 dB, ad eccezione degli edifici "particolarmente sensibili" per i quali

si adotta come limiti (sia diurno che notturno) il valore stesso della soglia di percezione, che è pari a 71 dB.

Tale limite è da intendersi riferito al livello di accelerazione (ponderata per asse generico) rilevata sul pavimento degli edifici, quindi in presenza dei fenomeni di attenuazione/amplificazione propri dell'edificio stesso, descritti al paragrafo precedente, i livelli di accelerazione al suolo tali da non indurre il superamento del valore limite all'interno degli edifici dovranno essere più bassi di alcuni dB (tipicamente 12).

La valutazione del disturbo sulle persone è anche oggetto di una nuova norma UNI, la 11048 del marzo 2003¹¹. In base a tale norma, per valutare l'impatto vibrazionale di una infrastruttura quale la metrotranvia di Parma qui analizzata, occorre impiegare sempre la curva di ponderazione per asse generico. La nuova norma specifica in maggior dettaglio le caratteristiche del filtro di ponderazione, fornendo i valori nominali e le tolleranze ammesse per lo stesso anche al di fuori dell'intervallo di frequenza "standard" da 1 ad 80 Hz.

La UNI 11048 precisa poi che, se si effettuano rilievi lungo tre assi, anziché lungo il solo asse Z (come è più usuale), occorre prendere in esame i valori rilevati lungo l'asse che dà luogo a livelli di accelerazione ponderata più alti.

Infine, nel caso di fenomeni che danno luogo ad una significativa variazione nel tempo del livello di vibrazioni, il parametro da impiegarsi per valutare il disturbo alle persone è il valore massimo misurato con costante di tempo Slow (cioè mediato con un integratore esponenziale dotato di costante di tempo pari ad 1s).

Può comunque essere utile richiamare qui anche il contenuto della norma UNI 9916, che si occupa invece di valutare gli effetti delle vibrazioni sugli edifici, al fine di prevenirne il degrado o, in casi estremi, il crollo.

Secondo la UNI 9916, la grandezza fisica che meglio rappresenta il potenziale lesivo del fenomeno vibratorio non è l'accelerazione, ma la velocità di vibrazione. E' già stato osservato però che l'applicazione al segnale di un accelerometro di un filtro di ponderazione per asse generico, come previsto dalle norme UNI 9614 e 11048, trasforma in pratica il segnale stesso in un segnale di velocità, perlomeno a frequenze maggiori o uguali di 8 Hz. Infatti, al di sopra di tale frequenza, il filtro ha una pendenza di 6 dB/ottava, che corrisponde dunque ad un integratore del primo ordine.

Siccome lo spettro tipico di emissione di vibrazione di veicoli ferroviari leggeri, quali quelli che si prevede di utilizzare per la metrotranvia di Parma, è caratterizzato da una forte emissione di energia solo a frequenze superiori ai 20 Hz, si può ritenere con ottima approssimazione che un rilievo effettuato in accordo alle citate norme UNI per la valutazione del disturbo sulle persone possa venire utilizzato, senza errori apprezzabili, anche per la valutazione dell'impatto sugli edifici.

A tal proposito occorre richiamare brevemente le informazioni che erano contenute nel precedente capitolo 3.3.1.1, in cui veniva spiegato il legame fra livelli di accelerazione e livelli di velocità.

Sapendo che alla frequenza di 40 Hz ad un livello di accelerazione (non ponderata) di 100 dB corrisponde un livello di velocità di vibrazione di 112 dB, ed osservando che il fattore di ponderazione previsto dalla norma UNI9614 alla stessa frequenza è pari a -17 dB, si ottiene un livello di

¹¹ Norma UNI 11048 "Metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo", Marzo 2003

accelerazione ponderata pari a $100-17 = 83$ dB. Si conclude quindi che il livello di velocità può essere ottenuto dal livello di accelerazione ponderata aggiungendovi un termine costante (a qualsiasi frequenza maggiore di 8 Hz) e pari a +29 dB.

Poiché la norma UNI 9916 (appendice B) indica come valori di velocità minimi per produrre danni strutturali minori (fessurazioni di intonaci, cavillature) in edifici particolarmente sensibili, il valore di velocità di vibrazione di 5 mm/s, si ottiene:

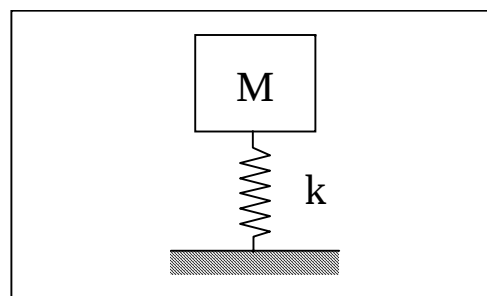
$$L_{a,w,lim} = L_{v,lim} - 29 = 20 \cdot \lg \left[\frac{5}{1 \cdot 10^{-6}} \right] - 29 = 134 - 29 = 105 \text{ dB}$$

Tale valore è decisamente più elevato dei livelli di accelerazione ponderata che è usuale riscontrare a seguito dell'esercizio di tranvie o metropolitane, che può in alcuni casi arrivare o superare di qualche dB i limiti di disturbo (77 dB nel periodo diurno per edifici residenziali), ma rimane sempre perlomeno 20 dB inferiore rispetto al suddetto limite di danno strutturale.

Qualche problema di rispetto del limite suddetto (105 dB) può aversi unicamente durante specifiche attività di cantiere, peraltro di breve durata, quali ad esempio l'infissione mediante vibratore idraulico di palancole in acciaio, oppure la vibroinfissione della camicia dei pali di fondazione, oppure ancora l'impiego in strade urbane strette di grossi rulli compattatori vibranti di tipo "autostradale". Adottando tecniche alternative alle suddette (ad esempio, trivellazione di micropali al posto dell'infissione di palancole, utilizzo di pali di fondazione tipo "Trelcon" anziché pali con camicia metallica, utilizzo di rulli compattatori non vibranti) anche le attività di cantiere rimangono comunque al di sotto dei limiti di danno strutturale, pur superando i limiti di disturbo alle persone, allorché si fa impiego di macchine movimento terra o similari.

2.1.5 Descrizione della tecnica di valutazione matematica dell'attenuazione delle vibrazioni ottenibile con sistemi di armamento antivibranti

Si fa qui riferimento alla teoria semplificata dei sistemi vibranti ad un solo grado di libertà, costituita da un sistema massa-molla semplice, come rappresentato nella seguente figura:



Sistema massa-molla semplice

Allorché alla base della molla il suolo anziché essere fermo assume un moto con una prescritta velocità di vibrazione (o accelerazione), la massa sospesa sopra la molla tende a seguire la stessa legge del moto, ma con velocità (o accelerazione) aumentata o ridotta di un fattore T, denominato fattore di Trasmissibilità, e quindi definito come:

$$T = \frac{v_{massa}}{v_{base}} = \frac{a_{massa}}{a_{base}}$$

Il fattore di trasmissibilità T rappresenta dunque l'effetto dello svincolo elastico: valori minori di 1 indicano attenuazione delle vibrazioni (quindi effetto isolante), mentre valori maggiori di 1 indicano incremento delle vibrazioni (quindi effetto amplificante).

Si definisca analogamente un Fattore di Trasmissibilità delle forze, sempre indicato come T, e definito, nel caso di vibrazioni forzate di una massa sospesa elasticamente su un suolo fermo, come il rapporto fra la forza eccitante applicata alla massa e quella trasmessa al suolo dalla sospensione elastica. Si dimostra matematicamente che il fattore di trasmissibilità delle forze è coincidente con il fattore di trasmissibilità delle velocità (o accelerazioni).

Ora, un sistema vibrante ad un solo grado di libertà, quale quello qui considerato, presenta una ben definita frequenza "naturale" di oscillazione libera, che può essere calcolata con la relazione:

$$f_{nat} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{M}}$$

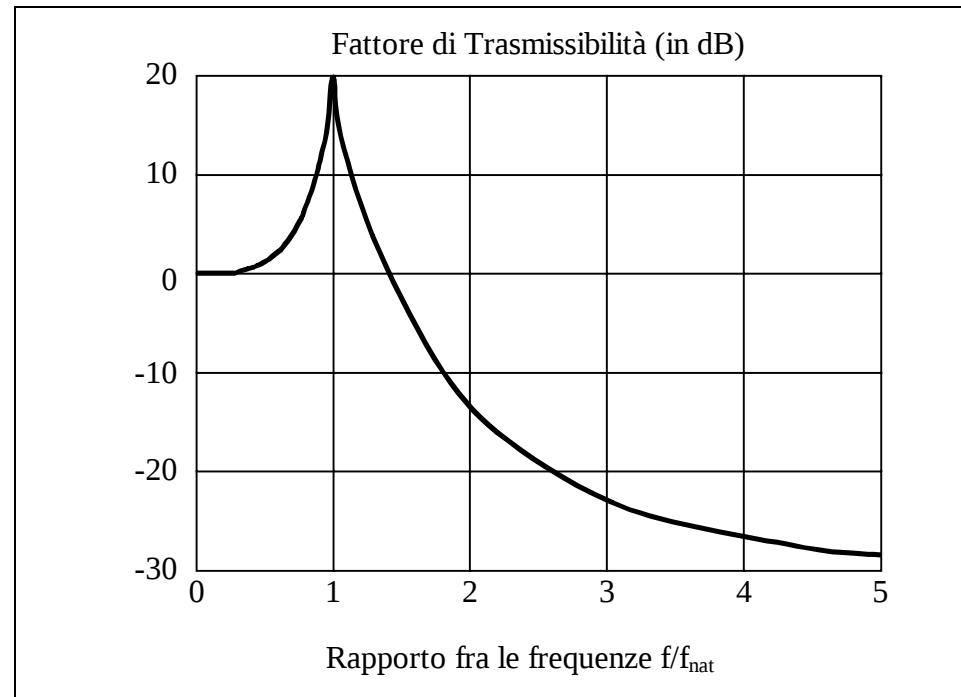
in cui k è la "costante elastica" della molla (in N/m) ed M è la massa (in kg).

Alla frequenza di risonanza, il fattore di Trasmissibilità presenta un picco molto forte (il valore massimo è limitato solo dal valore del coefficiente di smorzamento η). A valori inferiori alla frequenza di risonanza, il valore è comunque sempre maggiore o uguale ad 1, e solo al di sopra della frequenza di risonanza si manifesta l'effetto isolante. Per la precisione, il valore torna inferiore ad 1 ad una frequenza pari a $\sqrt{2}$ volte la frequenza naturale sopra definita, ed un efficace isolamento si esplica solo a frequenze perlomeno doppie di essa.

Solitamente il valore di T viene espresso in dB. L'espressione risultante è la seguente:

$$A = 20 \cdot \lg(T) = 10 \cdot \lg \left[\frac{1 + \eta^2}{\left(1 - \left(\frac{f}{f_{nat}} \right)^2 \right)^2 + \eta^2} \right]$$

Che viene riportata nel seguente grafico



Il dimensionamento di un supporto elastico costituito da una lastrina di materiale resiliente consiste dunque solitamente nella regolazione dello spessore della stessa, noti che siano il suo modulo elastico dinamico E_d , la sua area di impronta, e la massa M che grava sulla lastrina.

E' infatti agevole ricavare il valore della costante elastica della molla:

$$k = \frac{E_d \cdot A}{s}$$

E, nota la frequenza del segnale disturbante da isolare, f_{dis} , ed imponendo che la stessa sia perlomeno doppia della frequenza naturale del sistema massa-molla, si ottiene:

$$s \geq \frac{E_d \cdot A}{M \cdot (\pi \cdot f_{dis})^2}$$

Si determina in tal modo lo spessore del materassino atto a fornire la necessaria cedevolezza, onde consnetire alla massa sovrastante di esplicare il richiesto effetto "flottante".

2.2 Valutazione delle vibrazioni esistenti nello stato di fatto

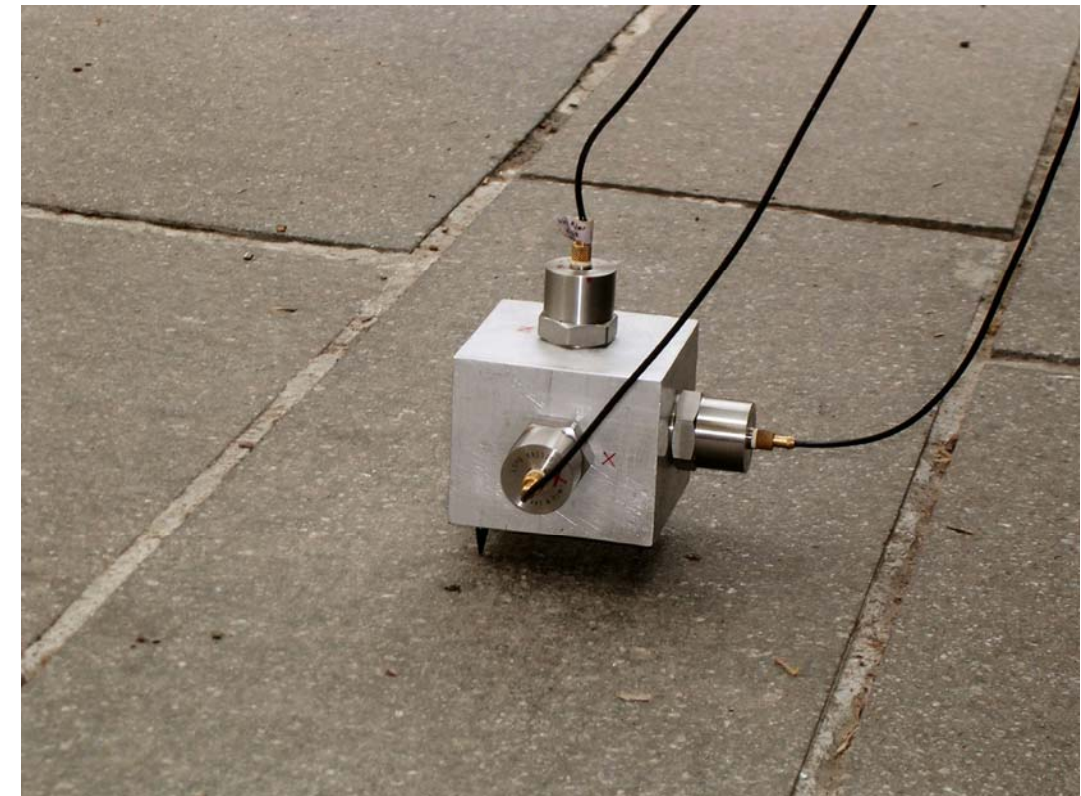
Nell'area urbana di Parma che sarà interessata dalla realizzazione della metrotranvia non esistono attualmente fonti di vibrazioni specifiche di livello potenzialmente confrontabile con l'emissione propria dei convogli metrotranviari. Tuttavia in moltissime strade si ha un intenso traffico veicolare stradale, con transito di mezzi pesanti, e pavimentazione sovente dotata di evidenti discontinuità.

Pertanto la situazione ambientale, dal punto di vista vibrazionale, è caratterizzata dai tipici livelli di accelerazione che è possibile riscontrare in qualunque realtà urbana, in presenza di pavimentazione non perfettamente livellata.

Onde valutare "a campione" i livelli di vibrazioni presenti nella situazione ante-operam, è stata condotta una campagna di rilevamento facendo impiego di idonea strumentazione accelerometrica, costituita da:

- N. 3 accelerometri ad alta sensibilità marca Bruel & Kjaer tipo 4370
- N. 1 blocchetto filettato in alluminio per montaggio triassiale
- N. 3 preamplificatori di carica Bruel & Kjaer tipo 2636
- Calibratore per accelerometri Bruel & Kjaer tipo 4291
- N. 1 scheda di campionamento PCMCIA per computer portatile, con 4 canali di ingresso e convertitori A/D a 24 bit, 48 kHz, marca Digigram mod. VX-pocket 440.
- Computer portatile Toshiba Satellite 1800
- Software di registrazione multicanale sincrona Adobe Audition
- Plugins per il filtraggio dei segnali e l'analisi dei risultati Aurora

Le seguenti foto mostrano gli strumenti suddetti





2.2.1 Localizzazione delle sezioni di misura

Come base di partenza si è deciso di analizzare anzitutto le stesse 12 posizioni che sono state oggetto dei rilievi fonometrici descritti nel precedente cap. 3.1.

Tali sezioni non interessavano però il centro di Parma, poichè dal punto di vista dell'analisi della rumorosità l'intera tratta in galleria a foro cieco risulta influente. Si sono quindi aggiunte alcune postazioni di rilievo accelerometrico. La seguente tabella elenca le 16 posizioni così ottenute.

Pos. N.	Localizzazione
1	– Via San Leonardo 68
2	– Via Trento 67
3	– Piazzale carlo Alberto Dalla Chiesa (Stazione)
4	– Piazzale della Pace
5	– Viale della Villetta (VV.UU.)
6	– Via Bramante
7	– Via Ognibene (Scuola Rodari)
8	– Quartiere Cinghio
9	– Ospedale (pediatria)
10	– Via Solferino (Scuola Laura San Vitale)
11	– Via Martiri di Cefalonia (prosiegua via Anna Frank)
12	– Via Papa Giovanni XXIII (Campo calcio S.S. Montebello)
13	– Via Dante 6 (Chiesa)
14	– Via Collegio dei Nobili (angolo via Farini)
15	– Via delle Scienze (Dipartimento di Fisica)
16	– Via delle Scienze (Dipartimento Chimico, C.I.M.)

2.2.2 Risultati delle misure di vibrazioni

In ciascuna delle posizioni di misura stabilite è stata effettuata una registrazione a tre canali del segnale proveniente dagli accelerometri, avendo posizionato la terna in posizione protetta (sotto l'autoveicolo adibito alle misurazioni). Il rilievo ha avuto una durata di circa 5 minuti in ciascuna postazione.

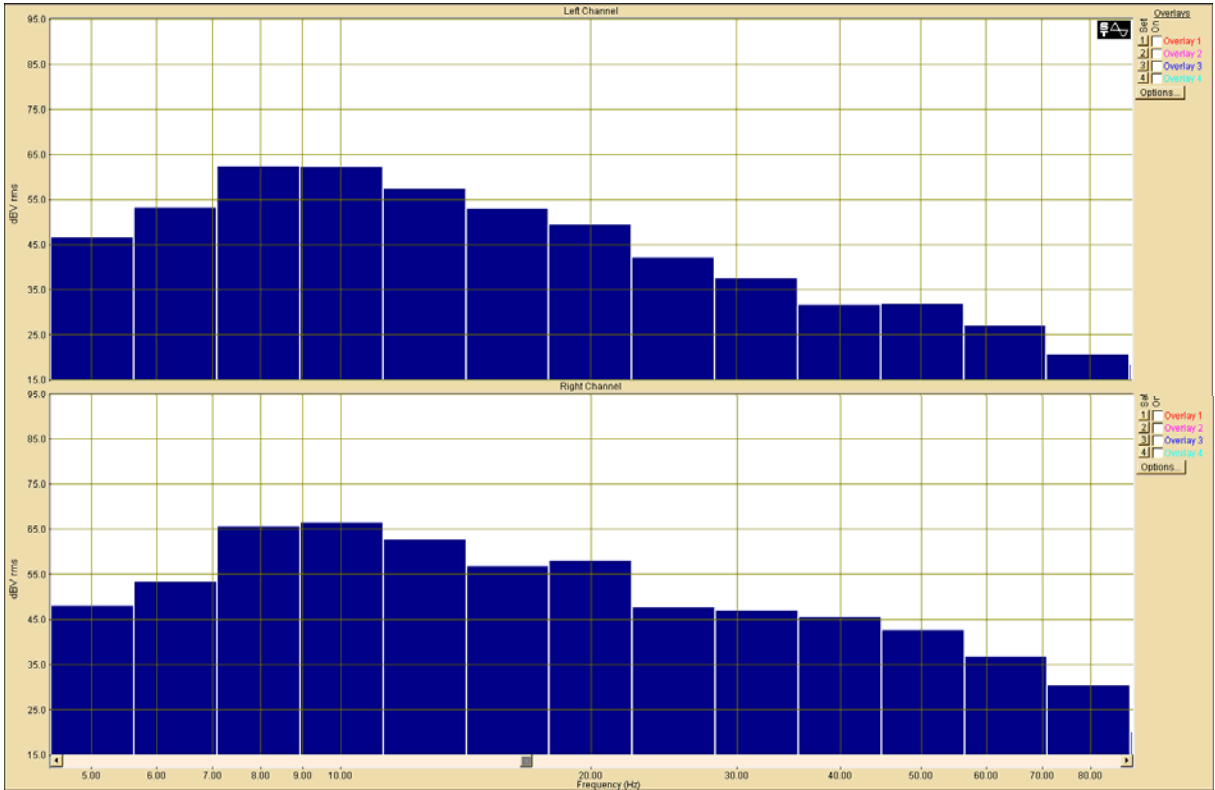
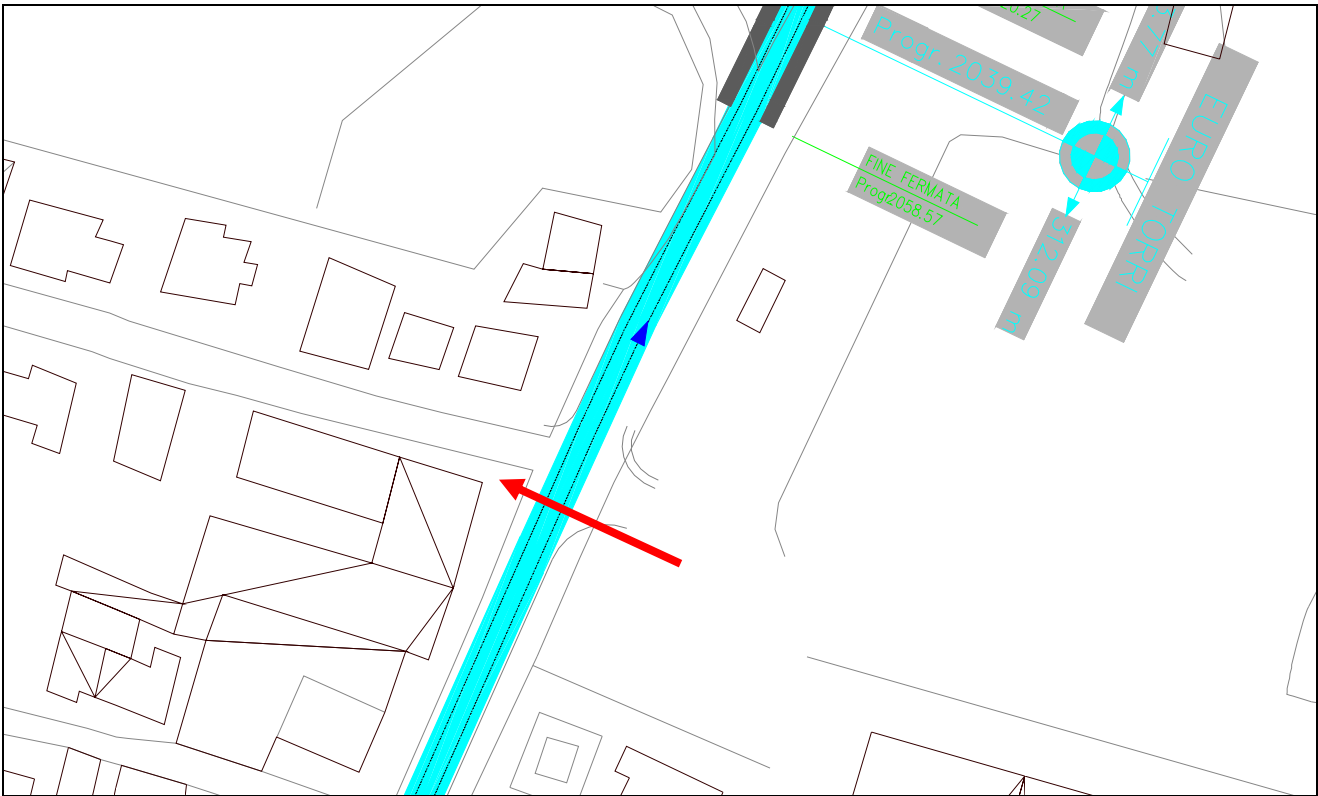
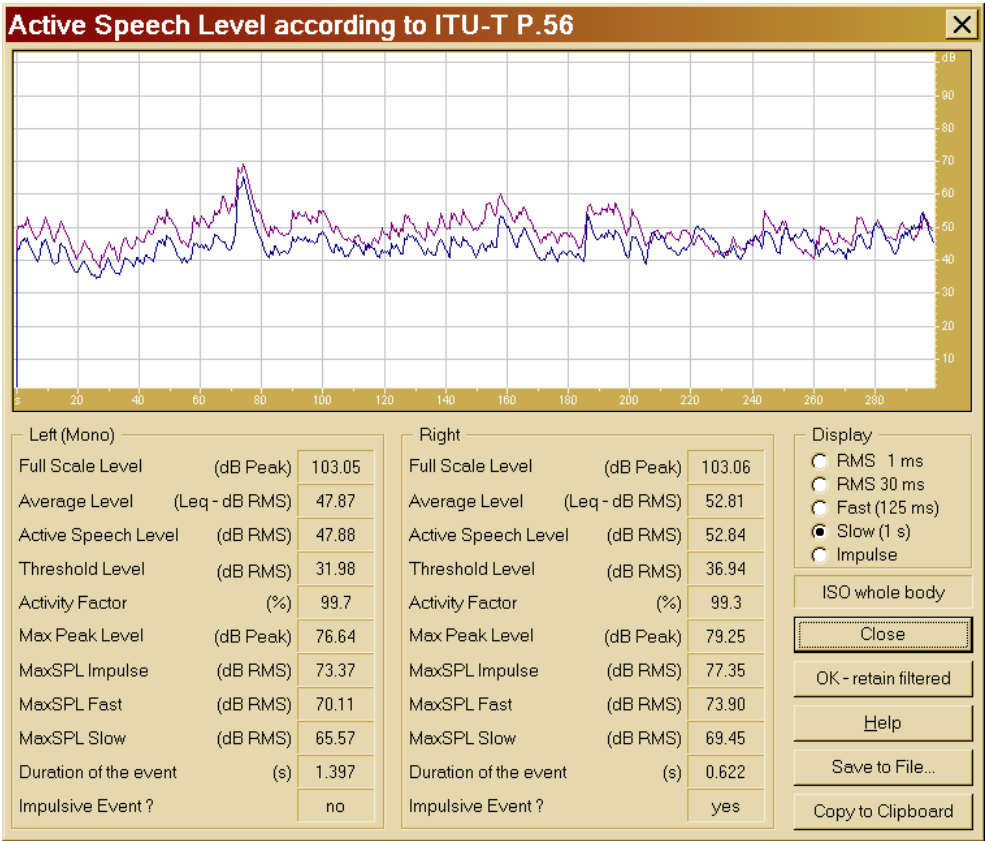
Conformemente alla vigente normativa tecnica UNI 11048, si è operato anzitutto il filtraggio in frequenza “per asse generico”, impiegando l'apposito modulo del software Aurora, indi si è analizzato il profilo temporale del livello di accelerazione ponderata così ottenuto, rilevando di ciascuna registrazione il valore massimo “Slow” che si verifica in occasione del transito dei veicoli, ed escludendo invece gli artefatti causati da passi a breve distanza dal trasduttore (che in alcuni casi è stato impossibile evitare, anche a causa della curiosità della gente, che si avvicinava per vedere).

Nel corso dell'elaborazione si è anche provveduto a selezionare il canale “orizzontale” (asse X o Y) che presentava i livelli più forti, dimodoché è stato possibile effettuare la analisi e la visualizzazione dei risultati operando con un comune segnale “stereo” a due canali.

Per ciascuna delle 16 postazioni di misura viene qui riportato una fotografia, il tracciato temporale, e lo spettro in terzi d'ottava relativo all'evento di transito veicolare che ha causato il picco più elevato di accelerazione ponderata.

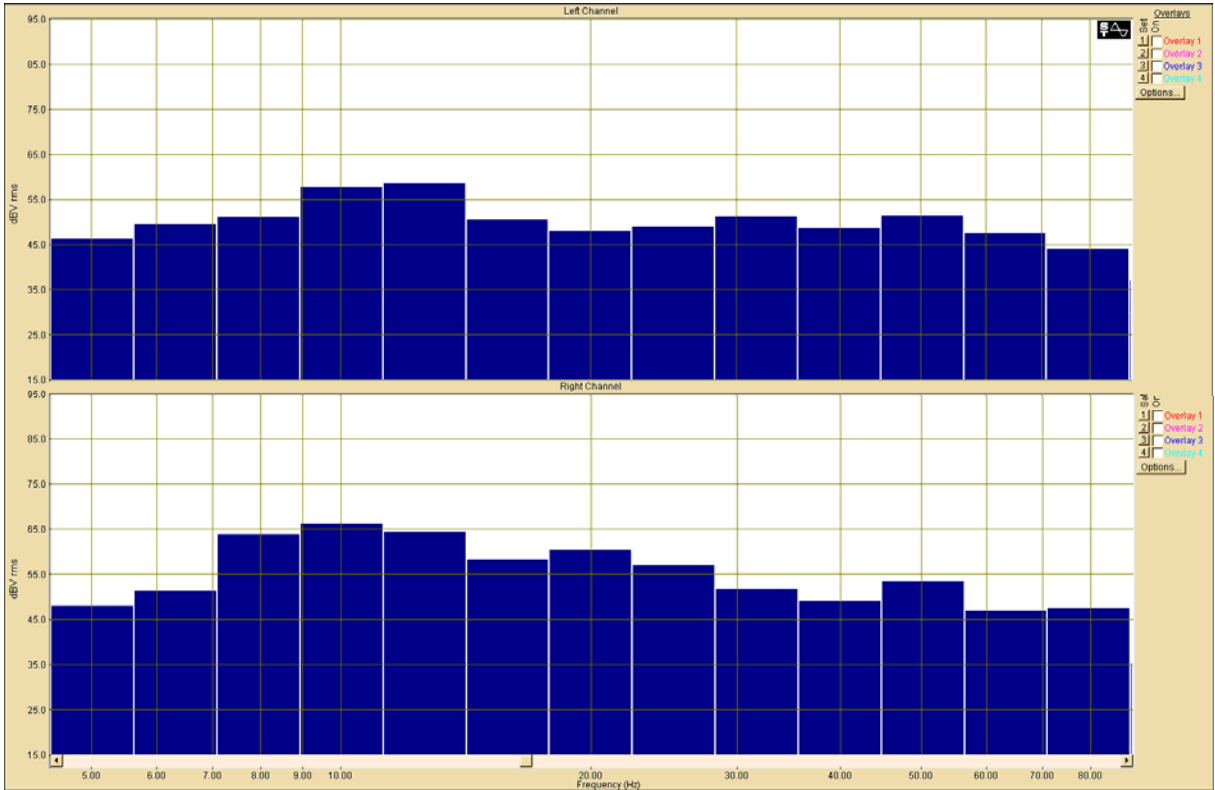
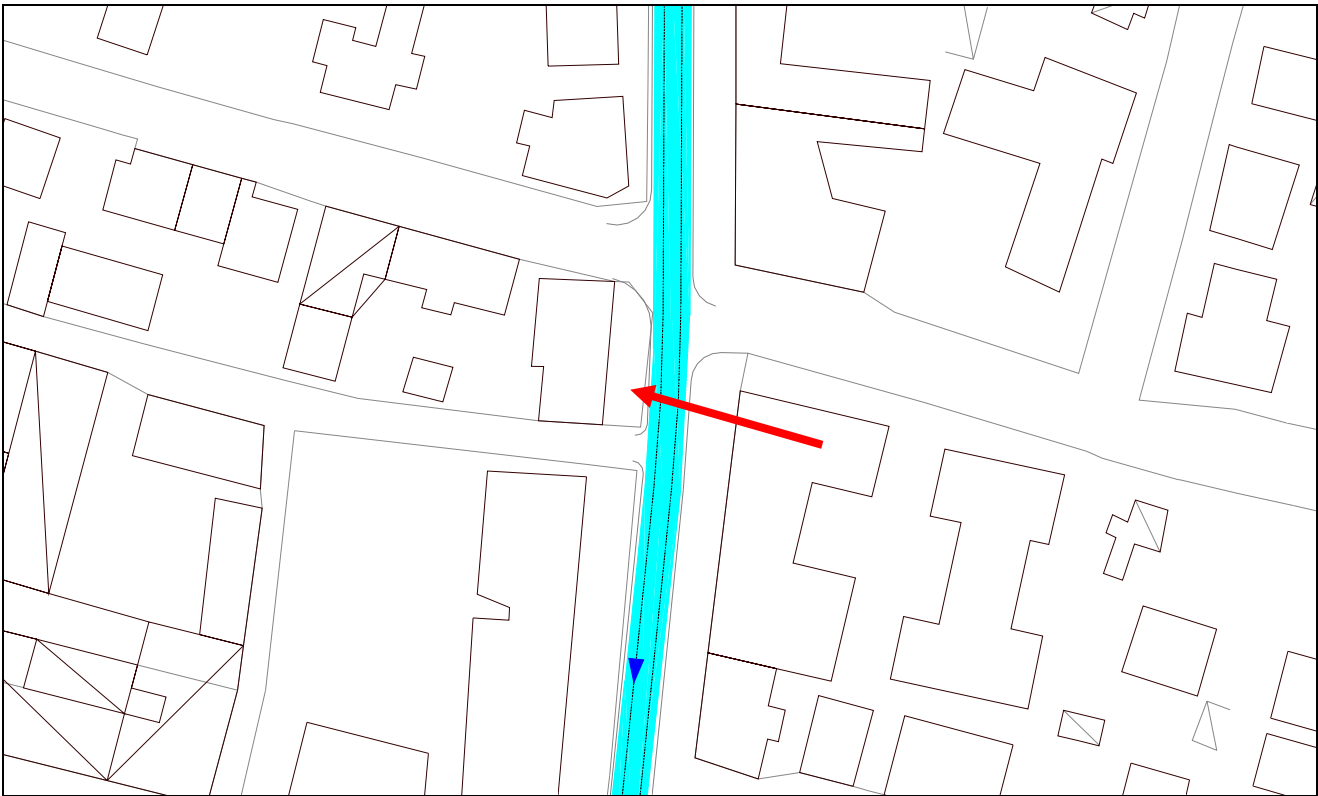
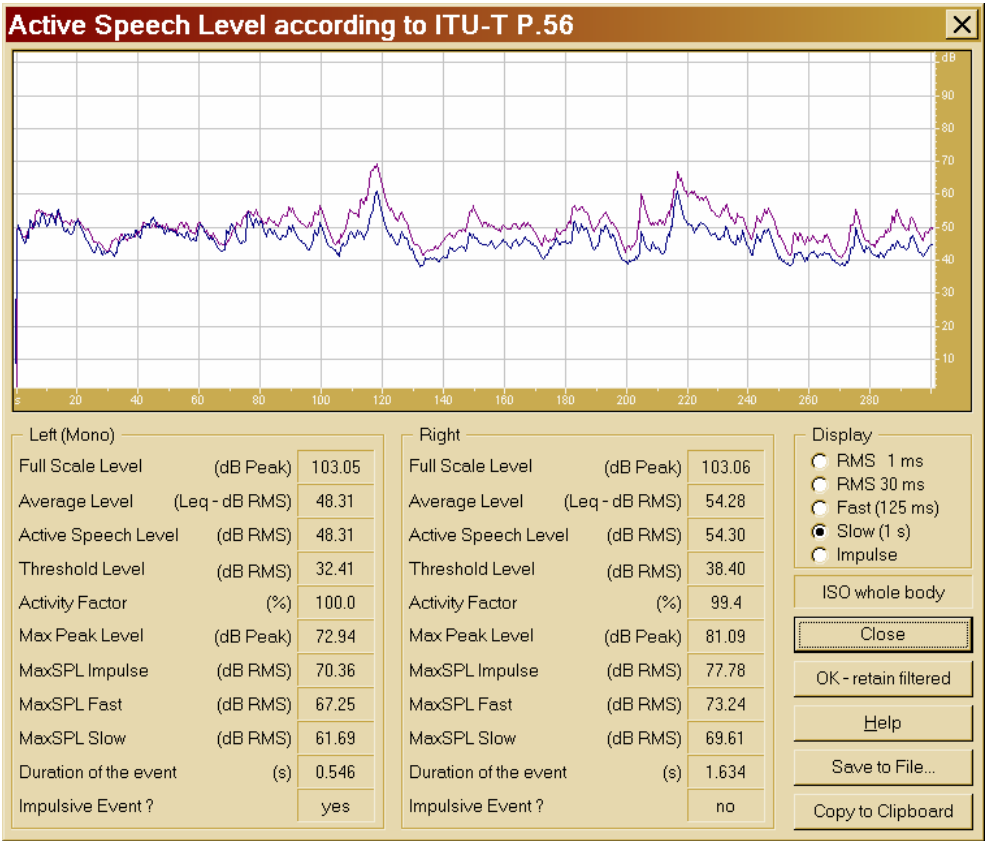


Pos. N. 1 – Via San Leonardo 68



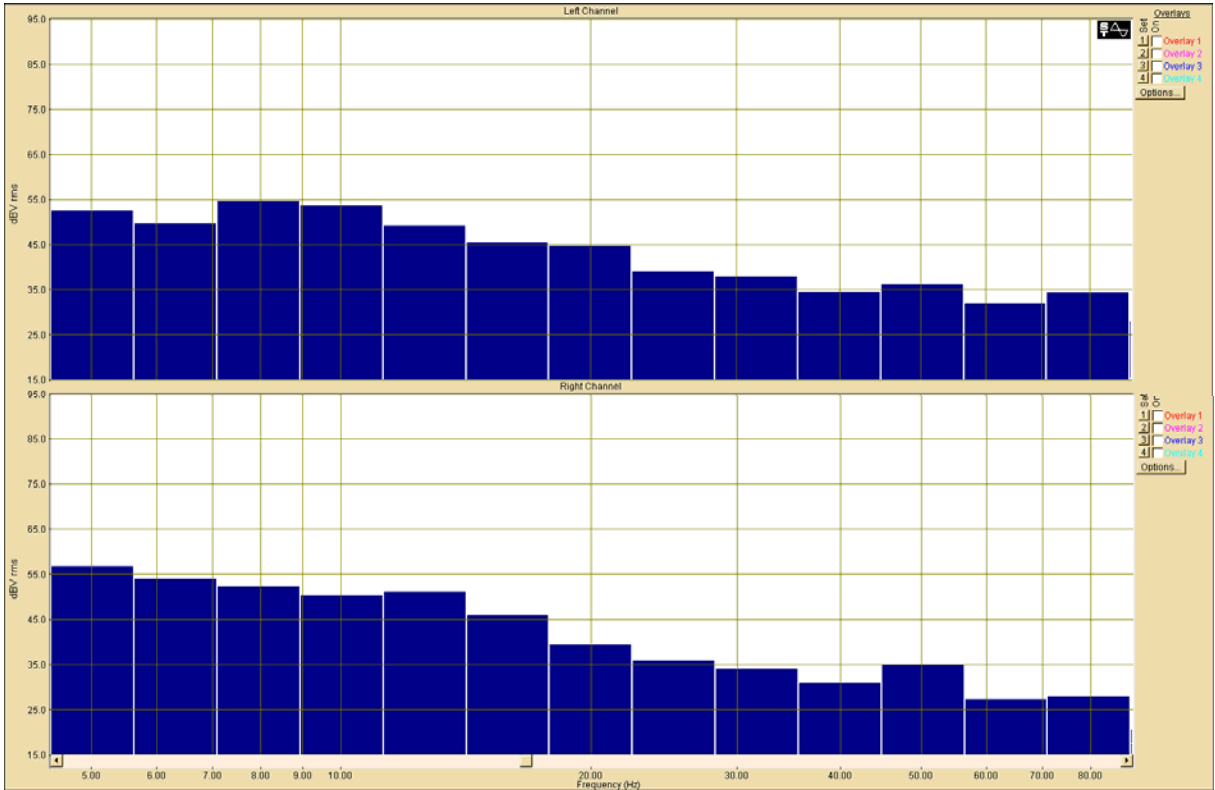
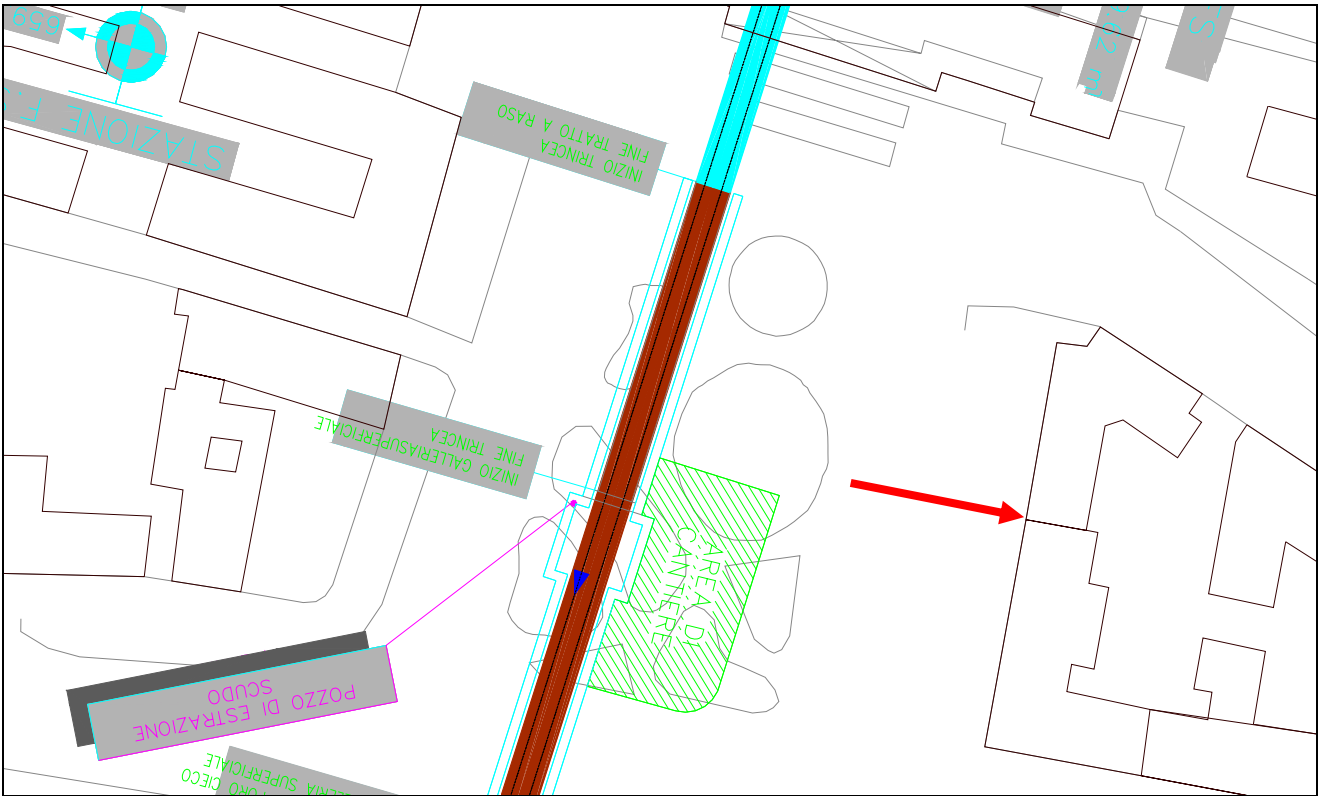
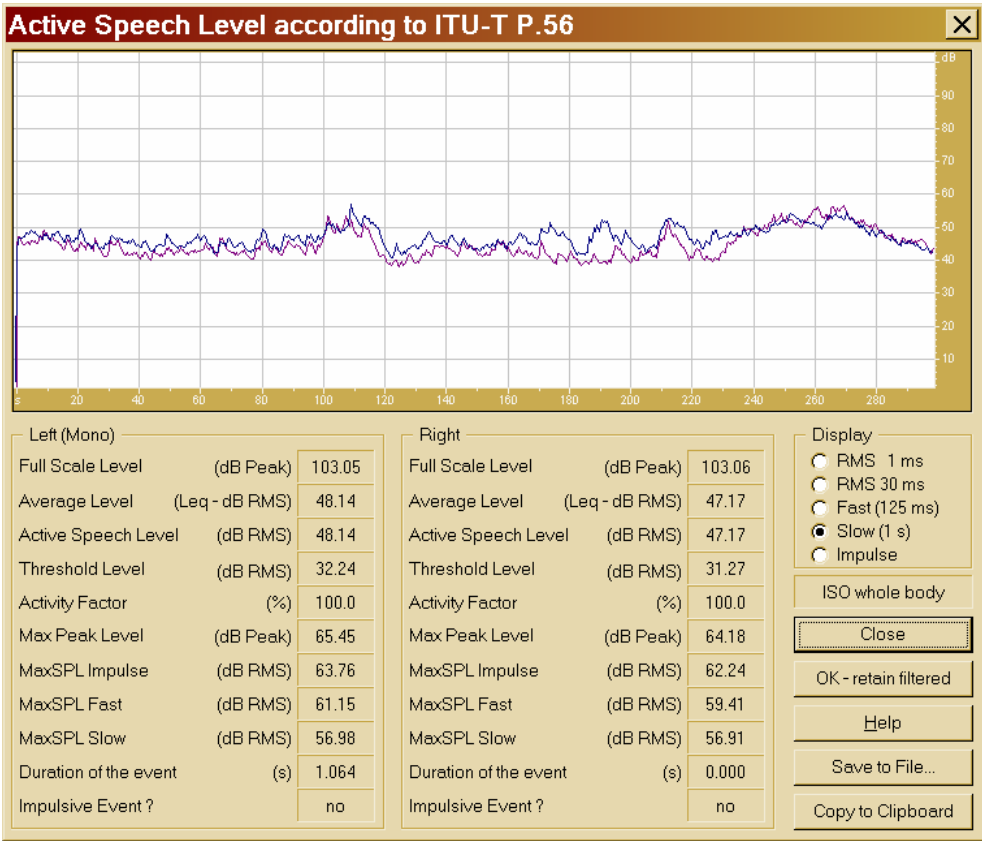


Pos. N. 2 – Via Trento 67



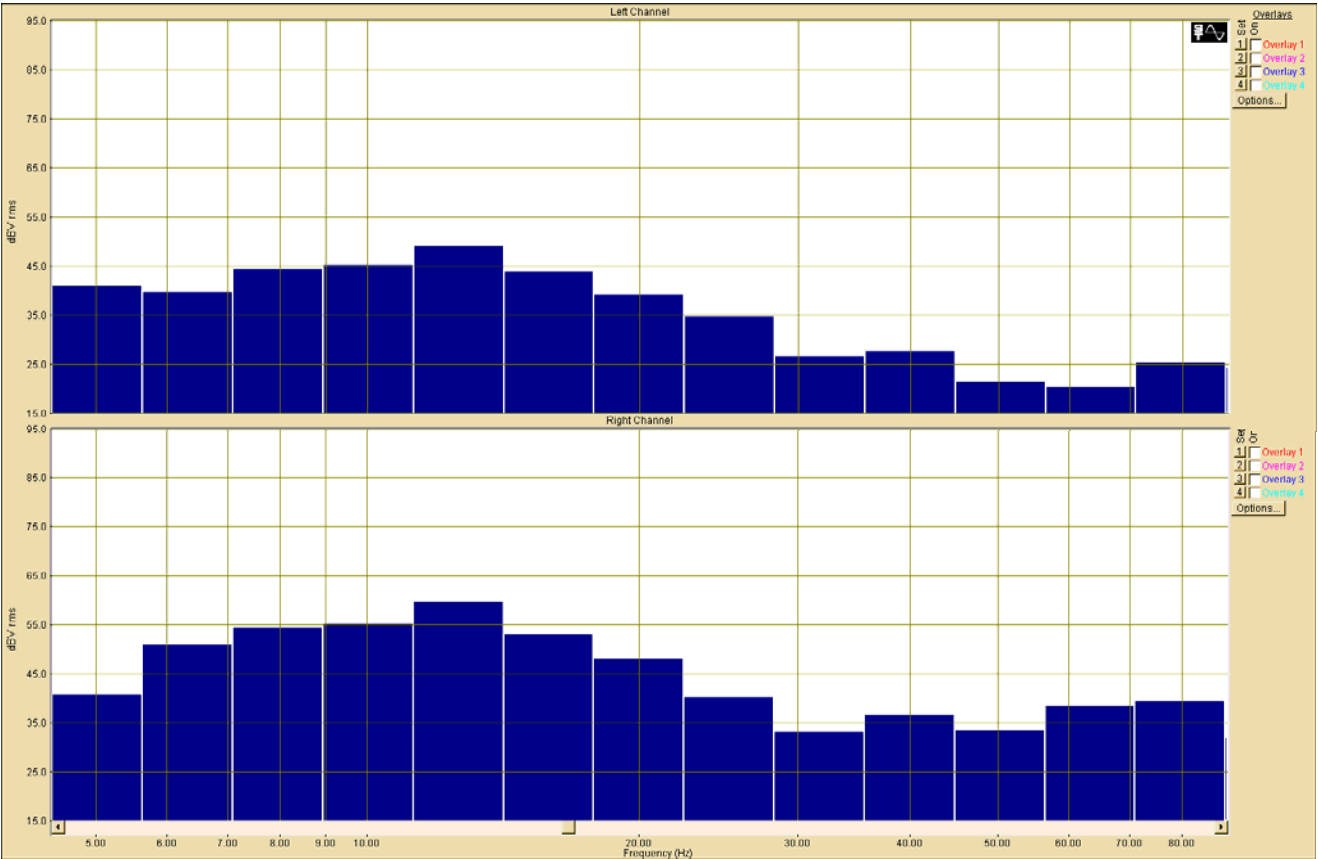
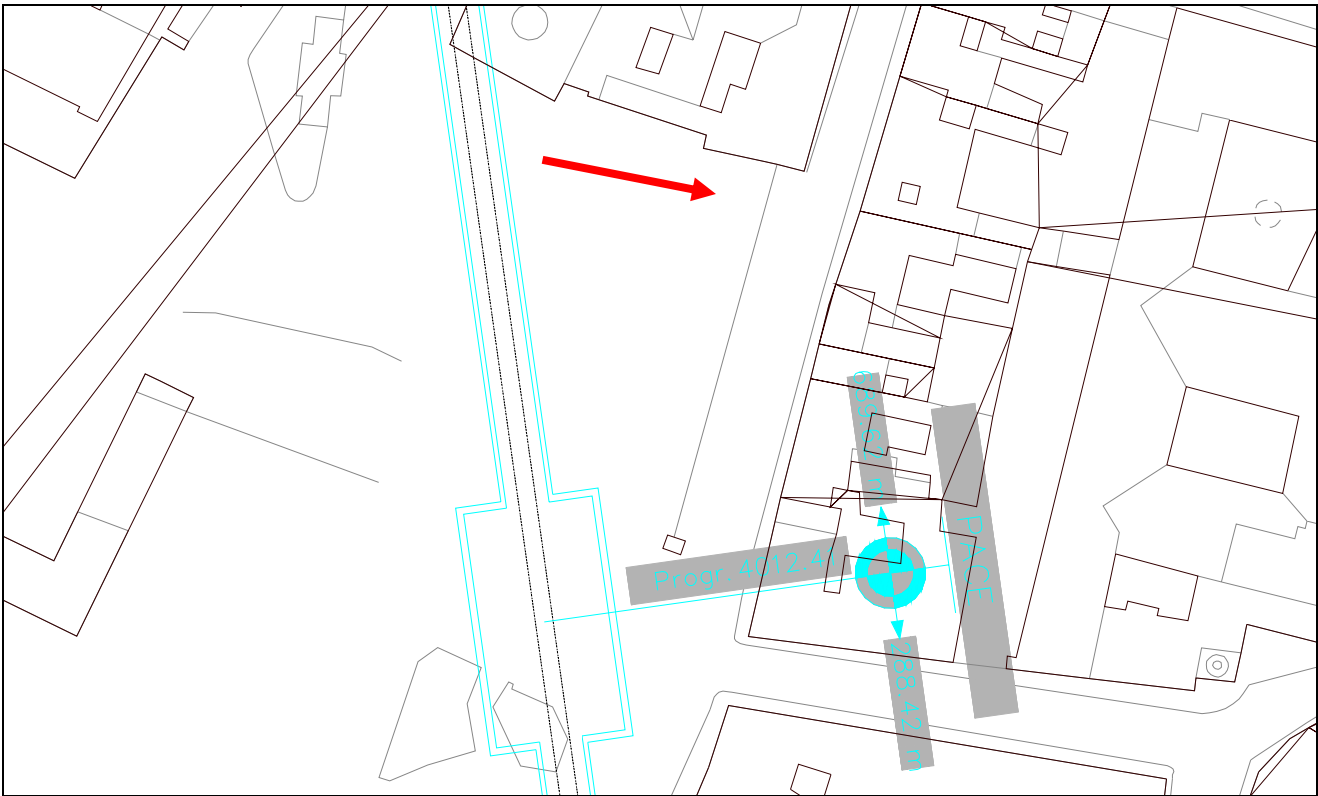
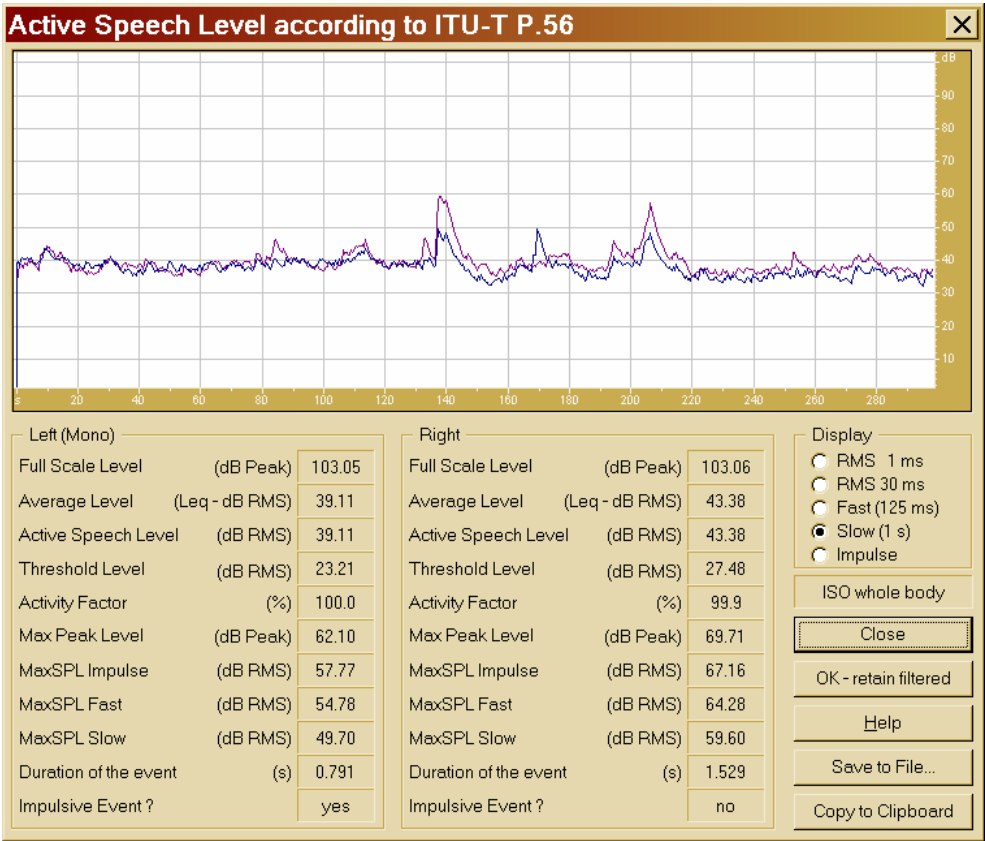


Pos. N. 3 – Piazzale carlo Alberto Dalla Chiesa (Stazione)



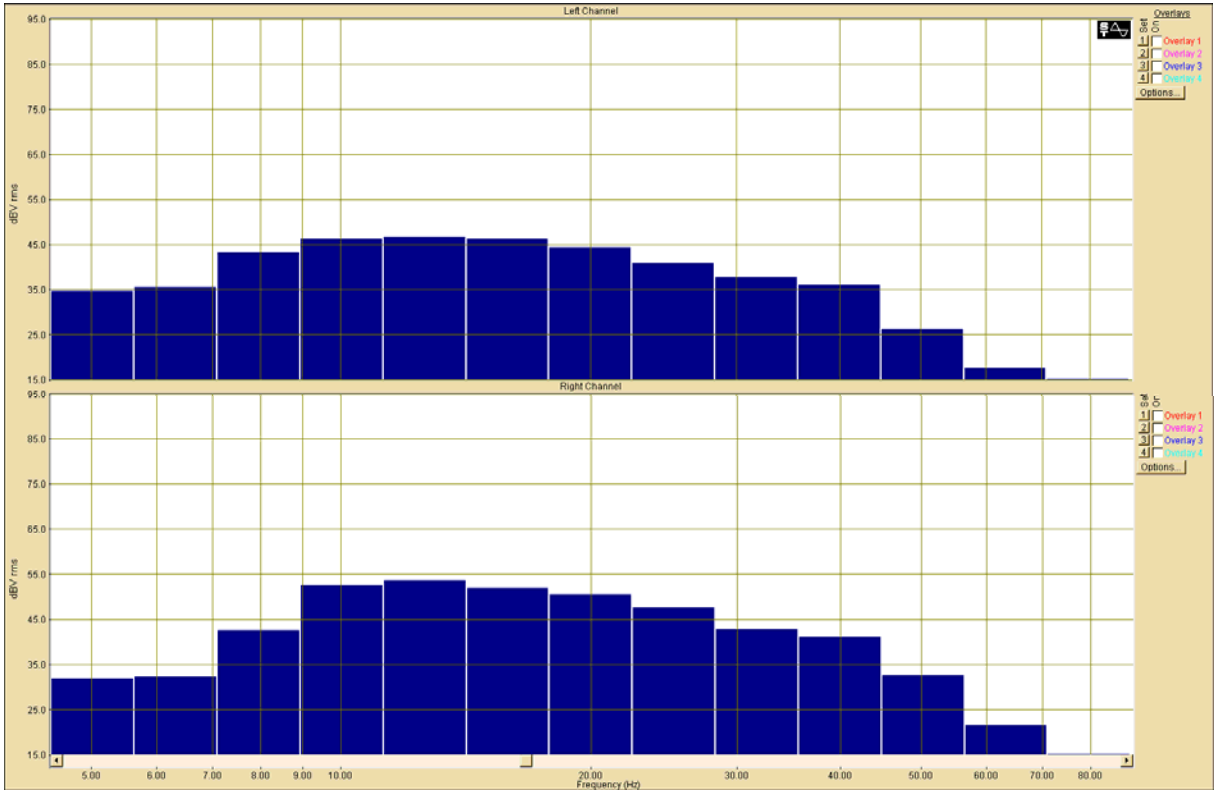
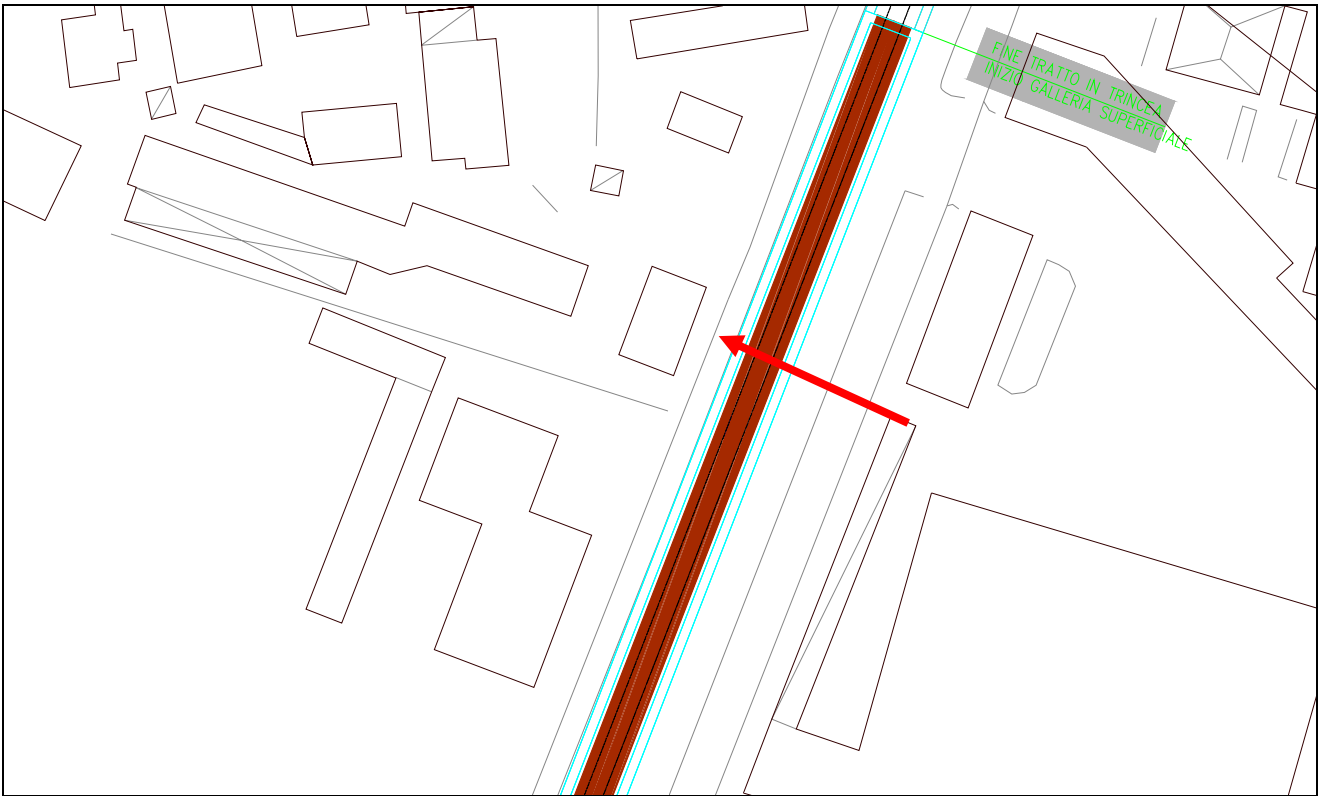
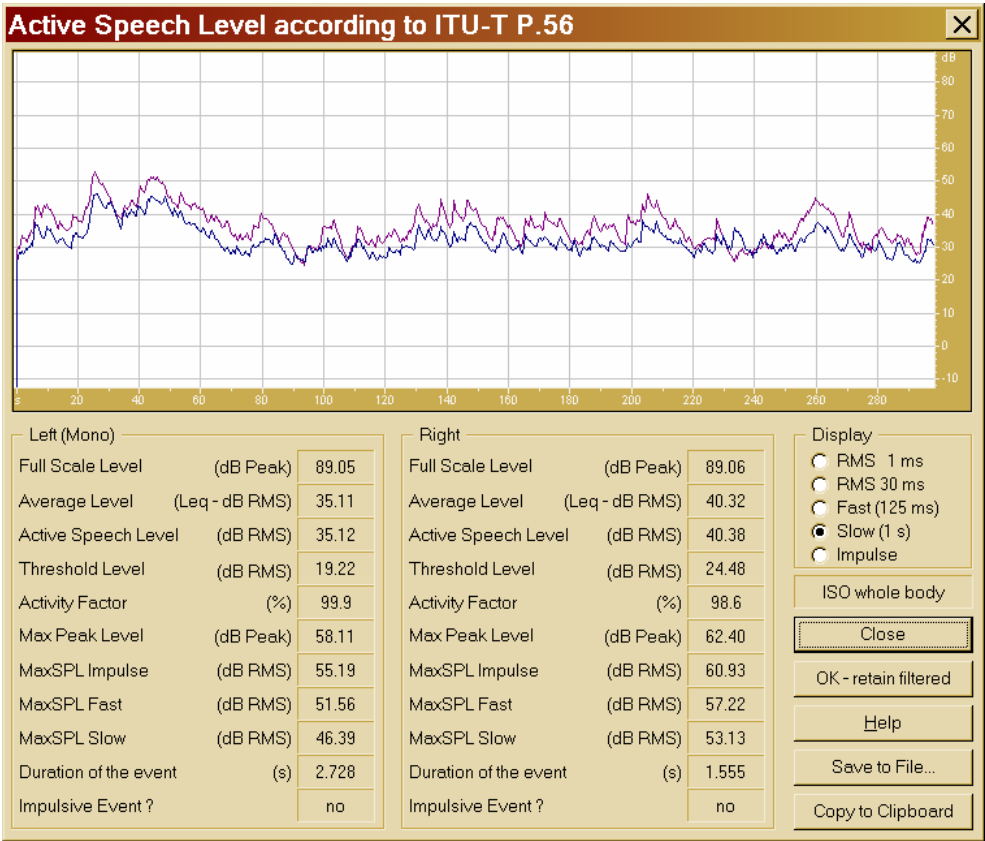


Pos. N. 4 – Piazzale della Pace



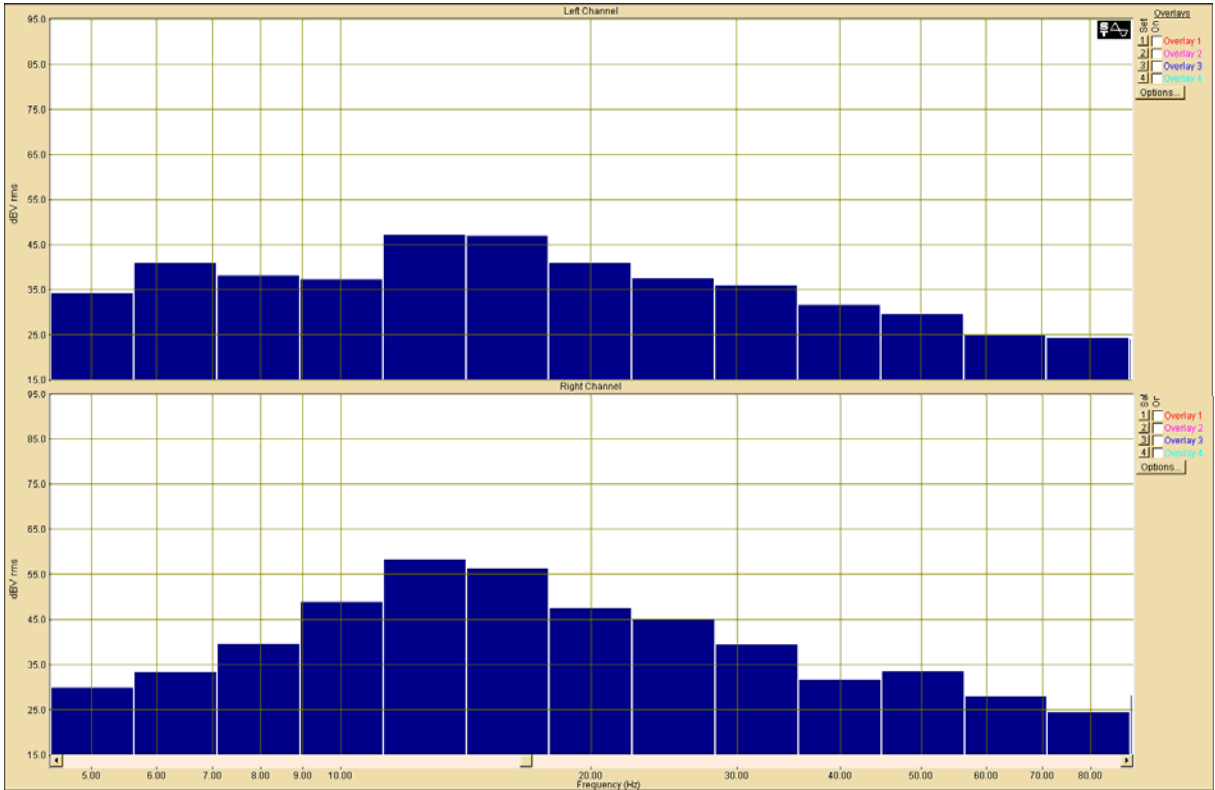
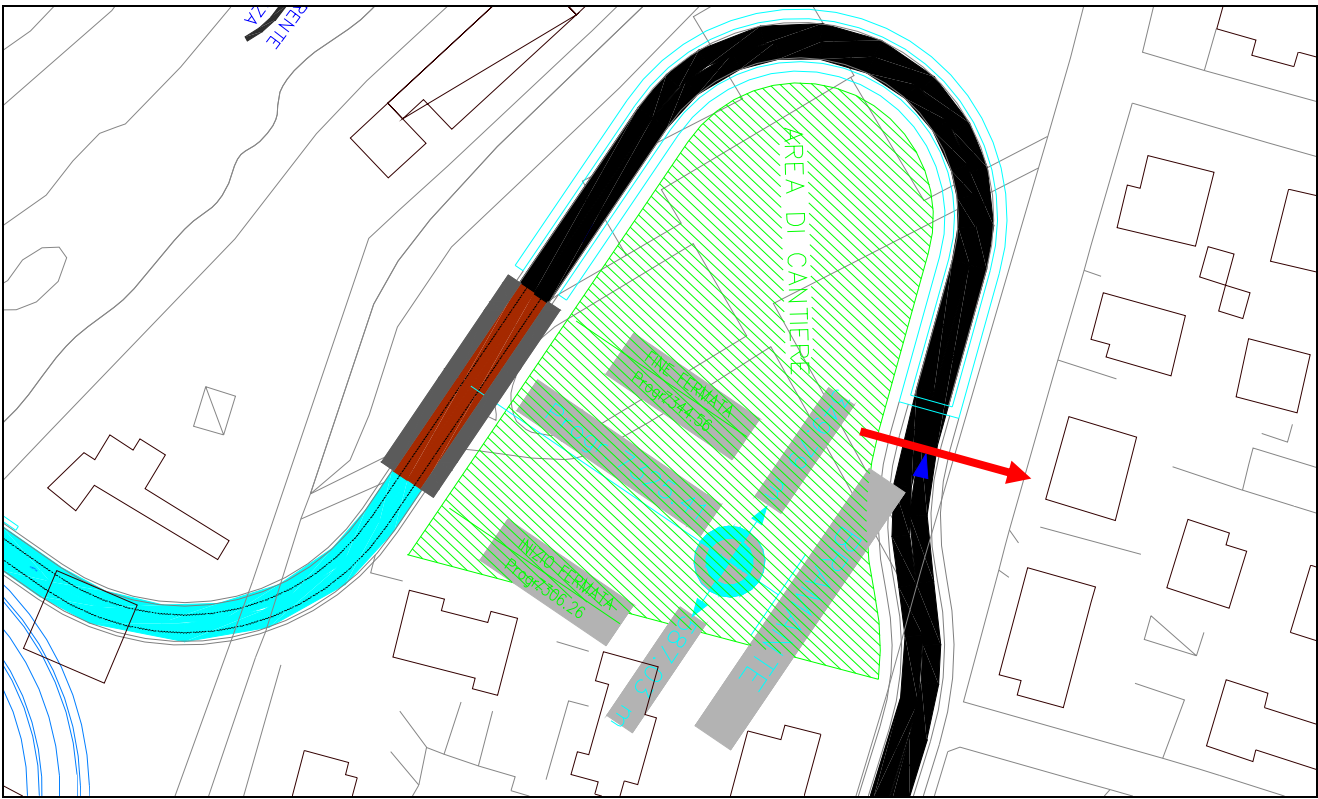
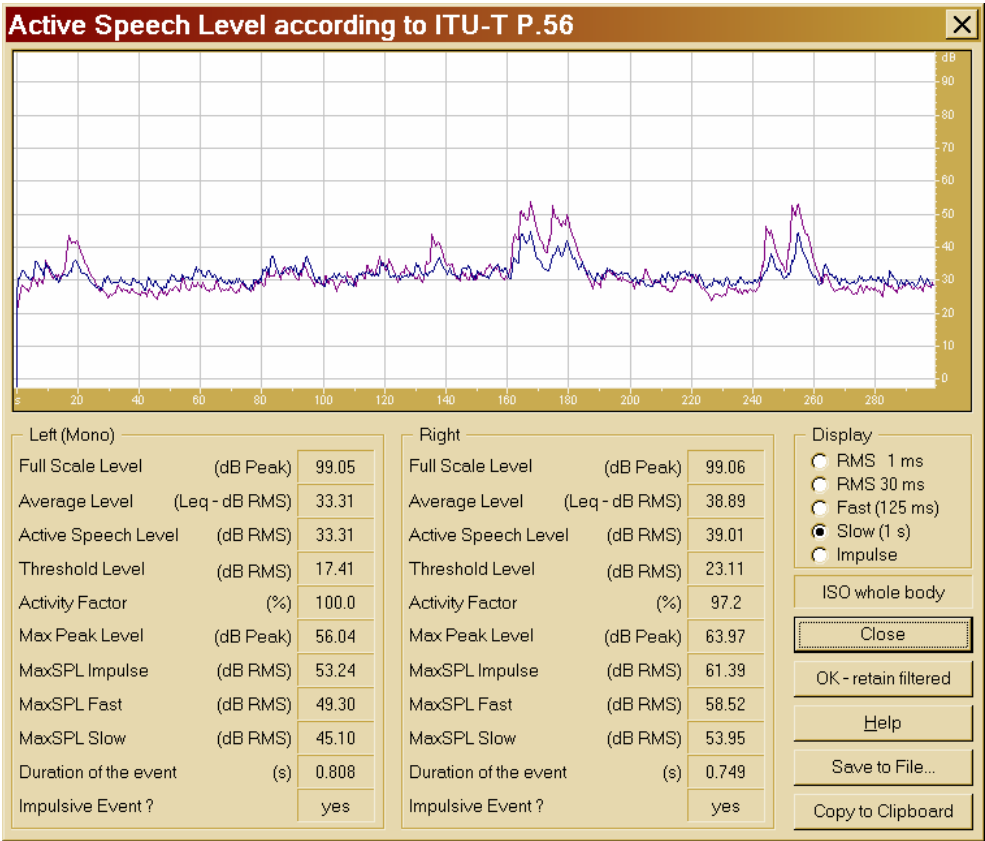


Pos. N. 5 – Viale della Villetta (VV.UU.)



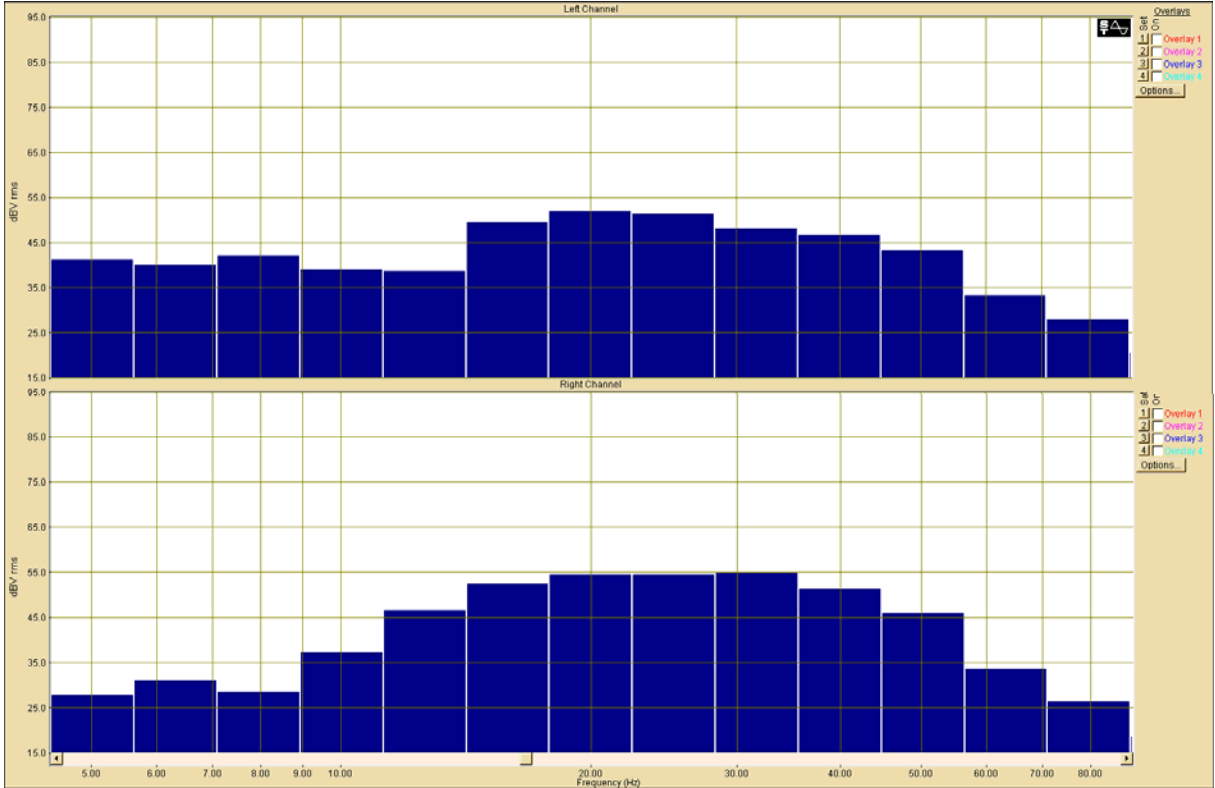
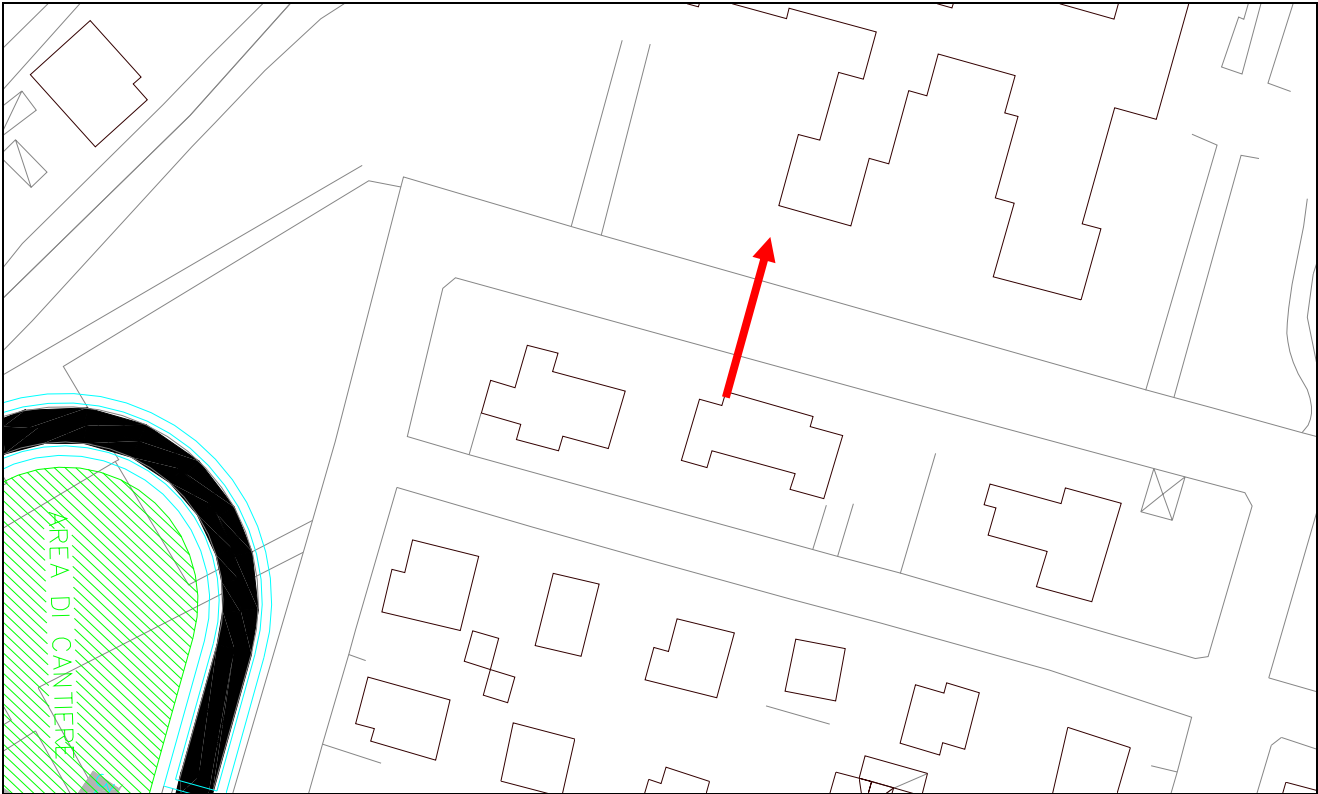
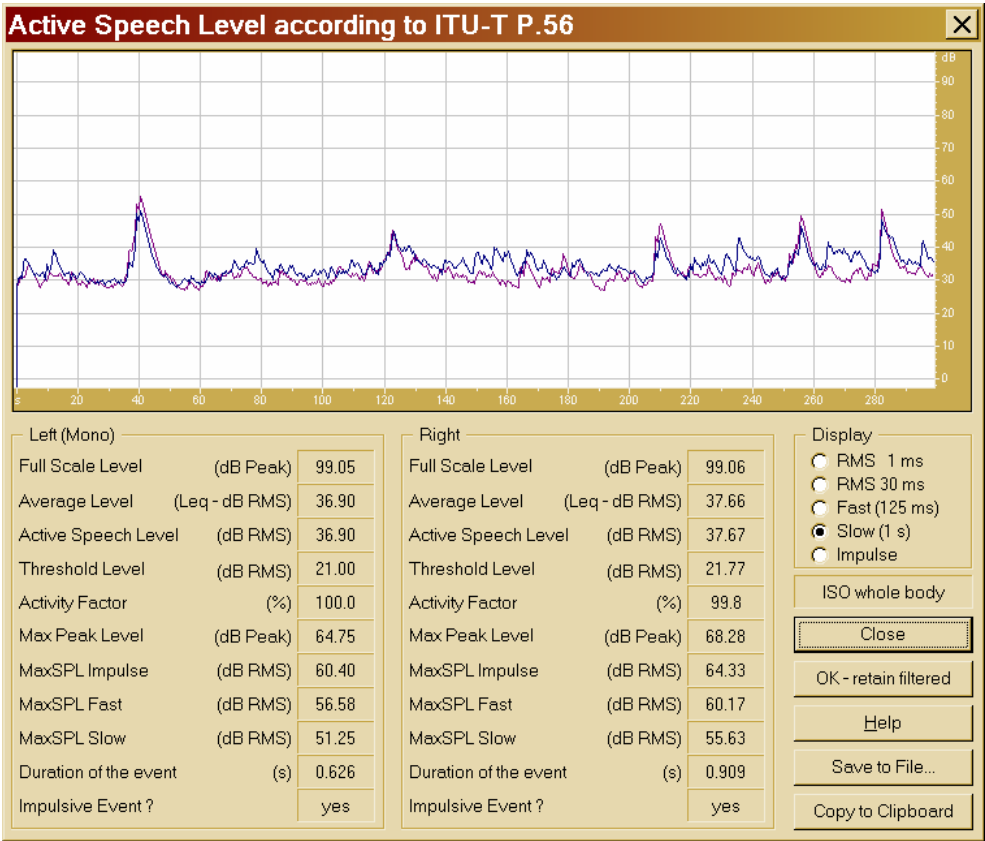


Pos. N. 6 – Via Bramante



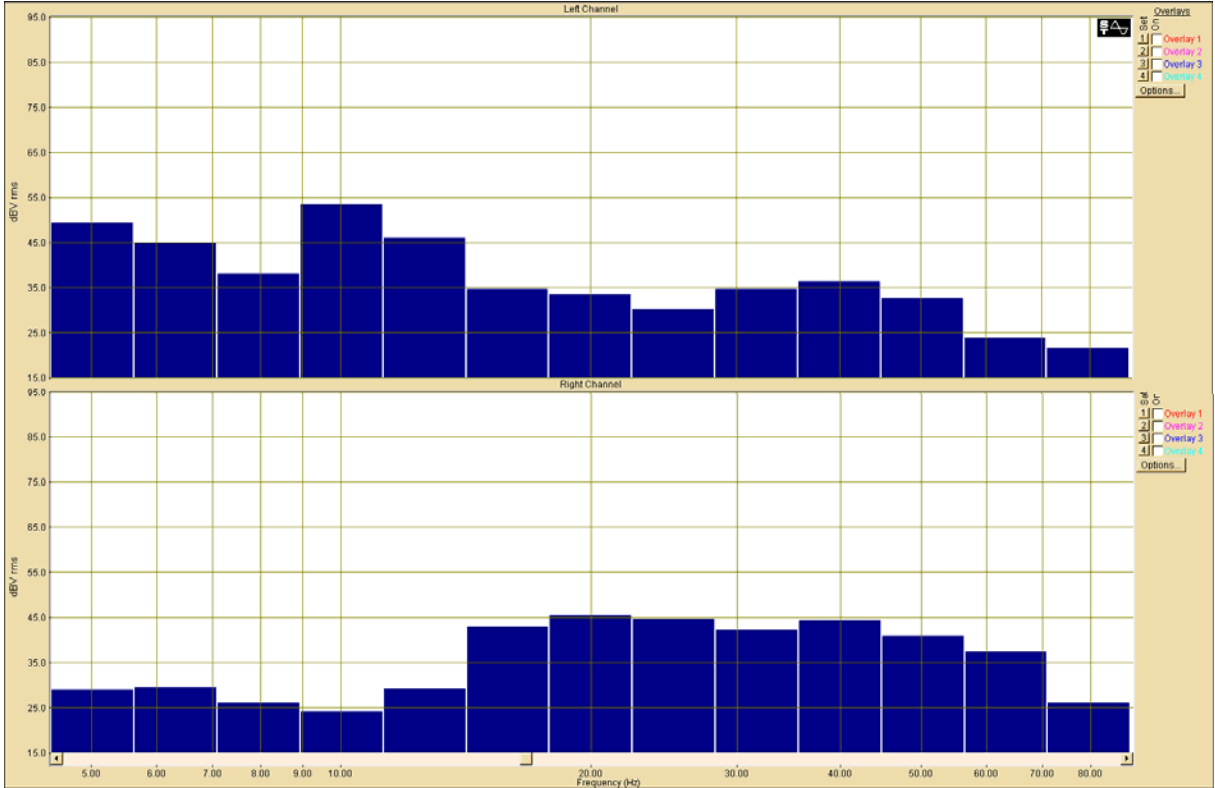
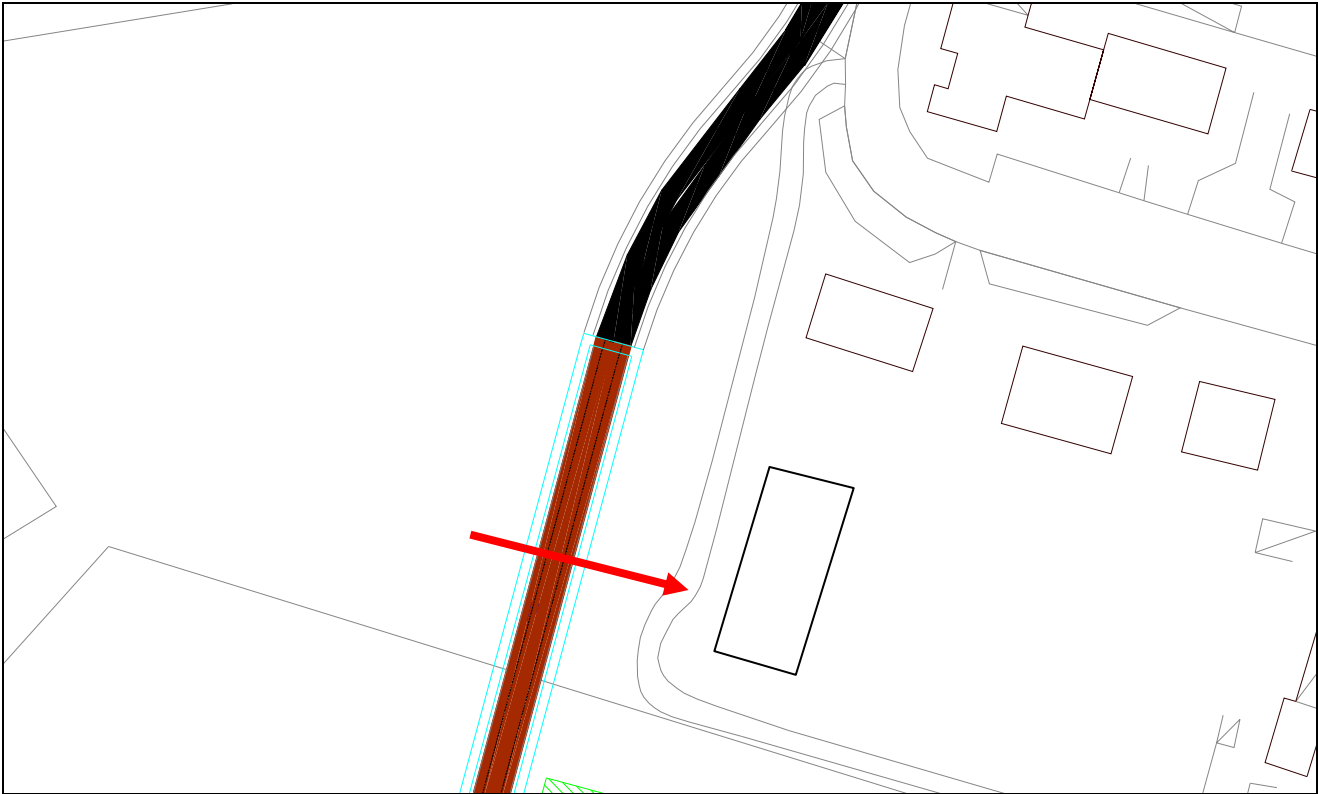
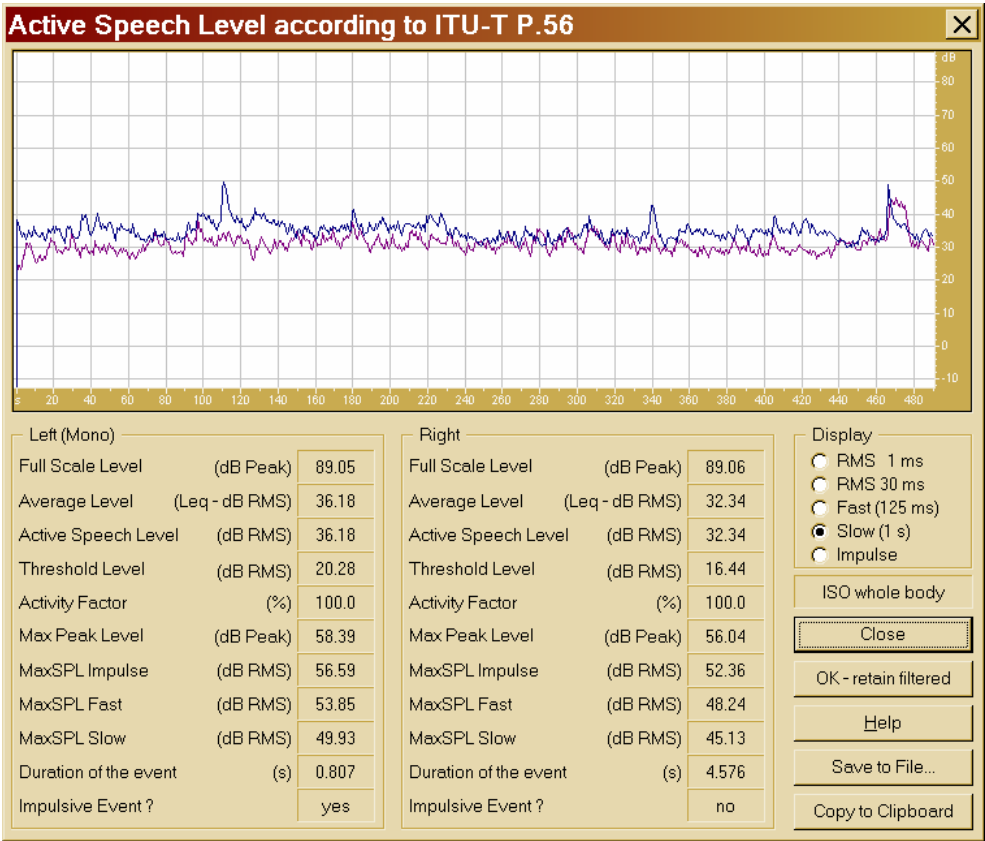


Pos. N. 7 – Via Ognibene (Scuola Rodari)



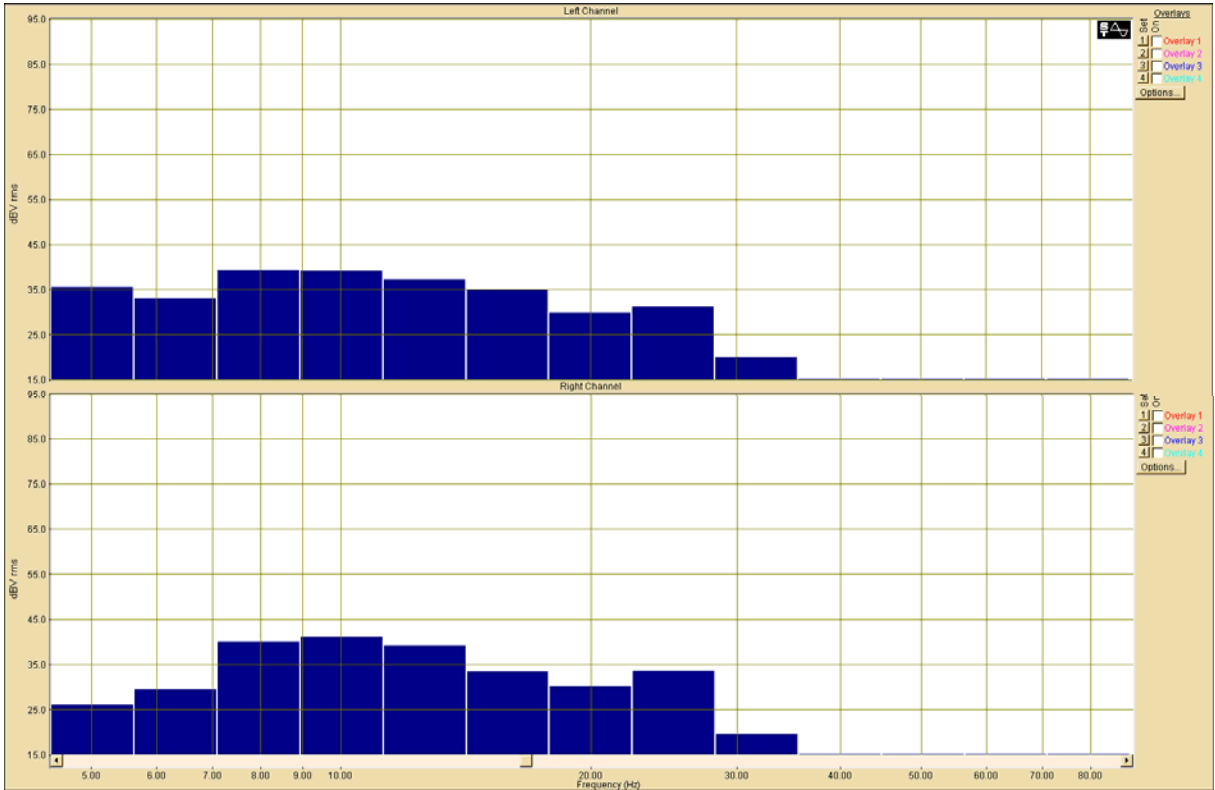
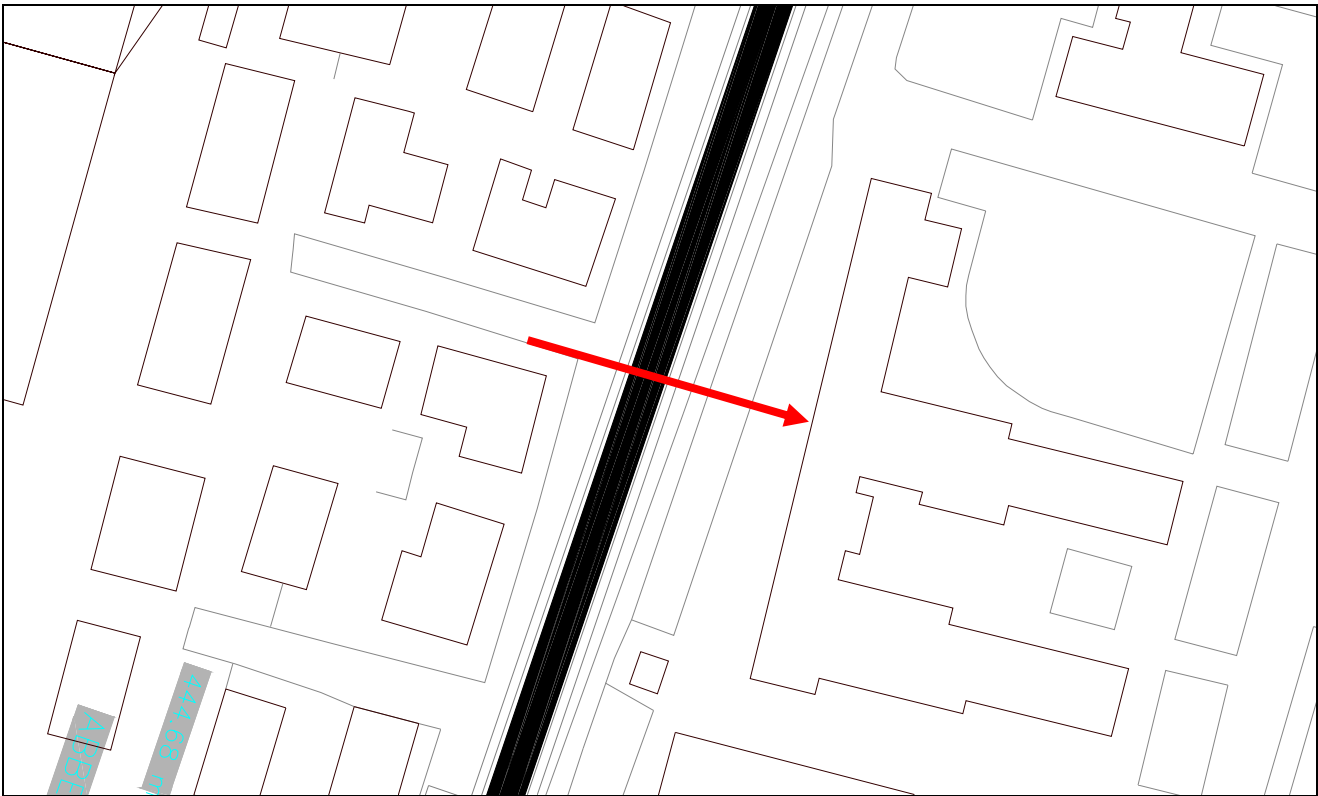
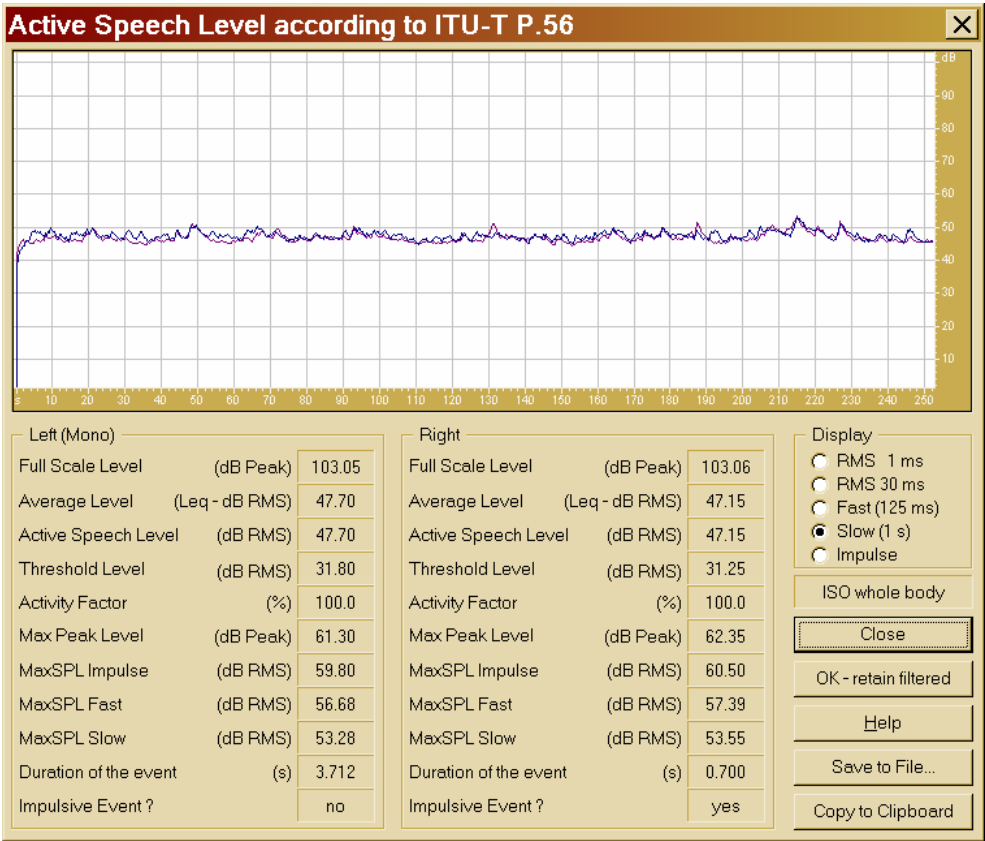


Pos. N. 8 – Quartiere Cinghio



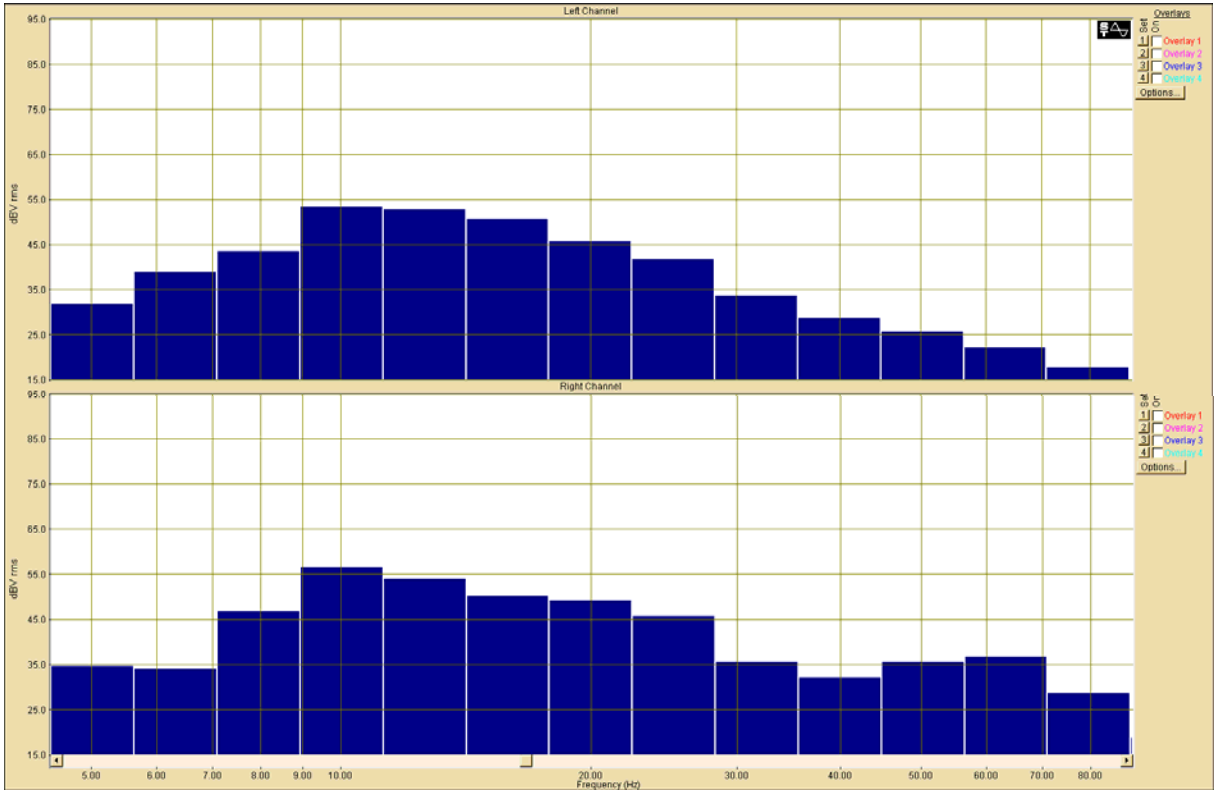
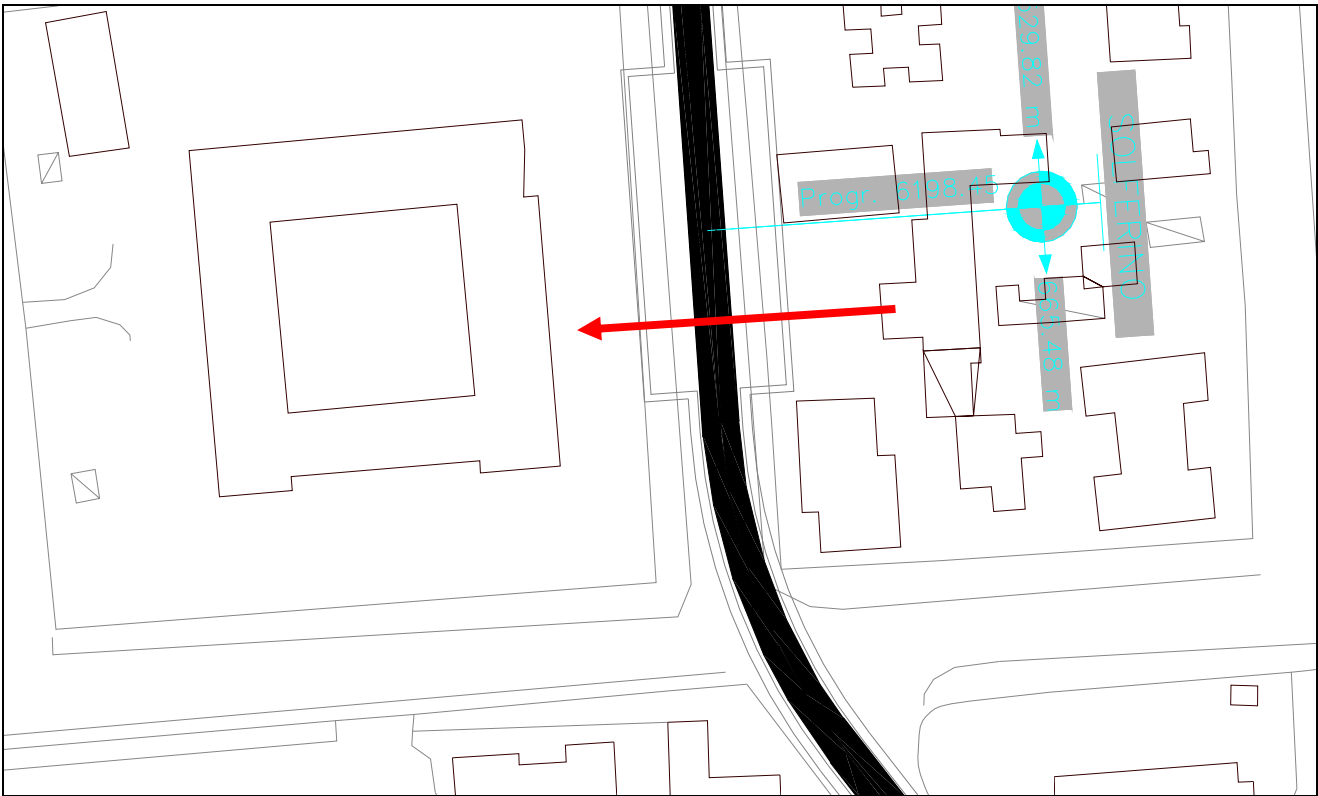
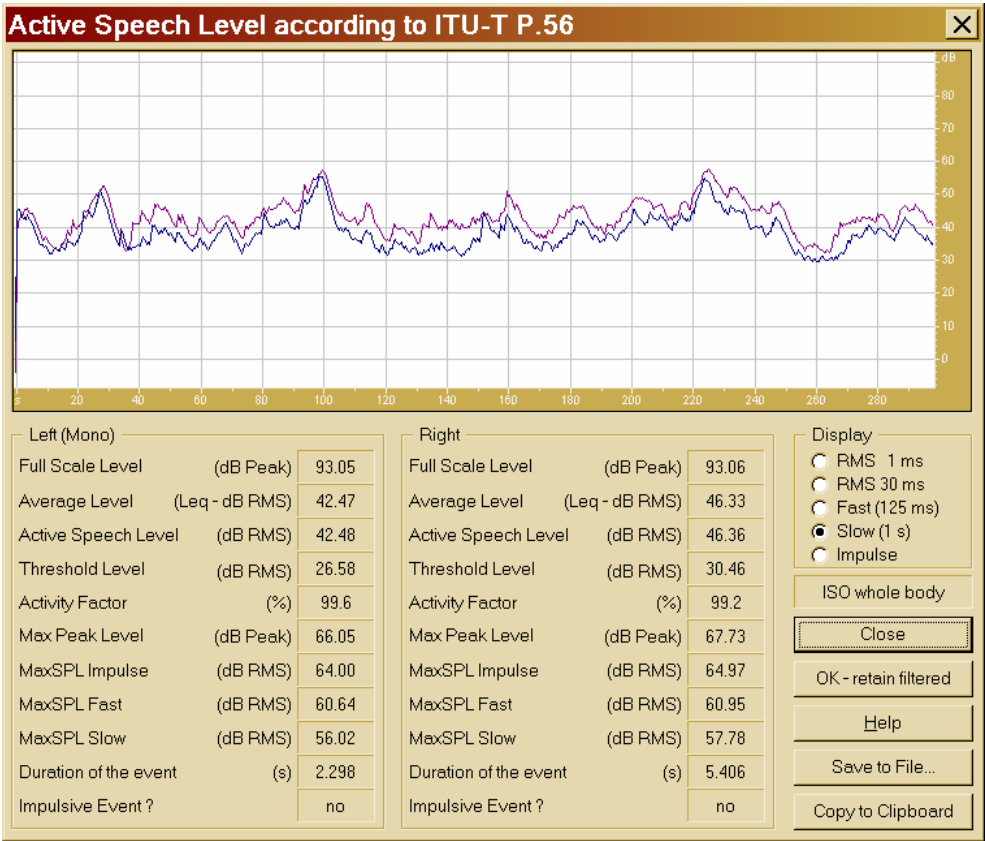


Pos. N. 9 – Ospedale (pediatria)



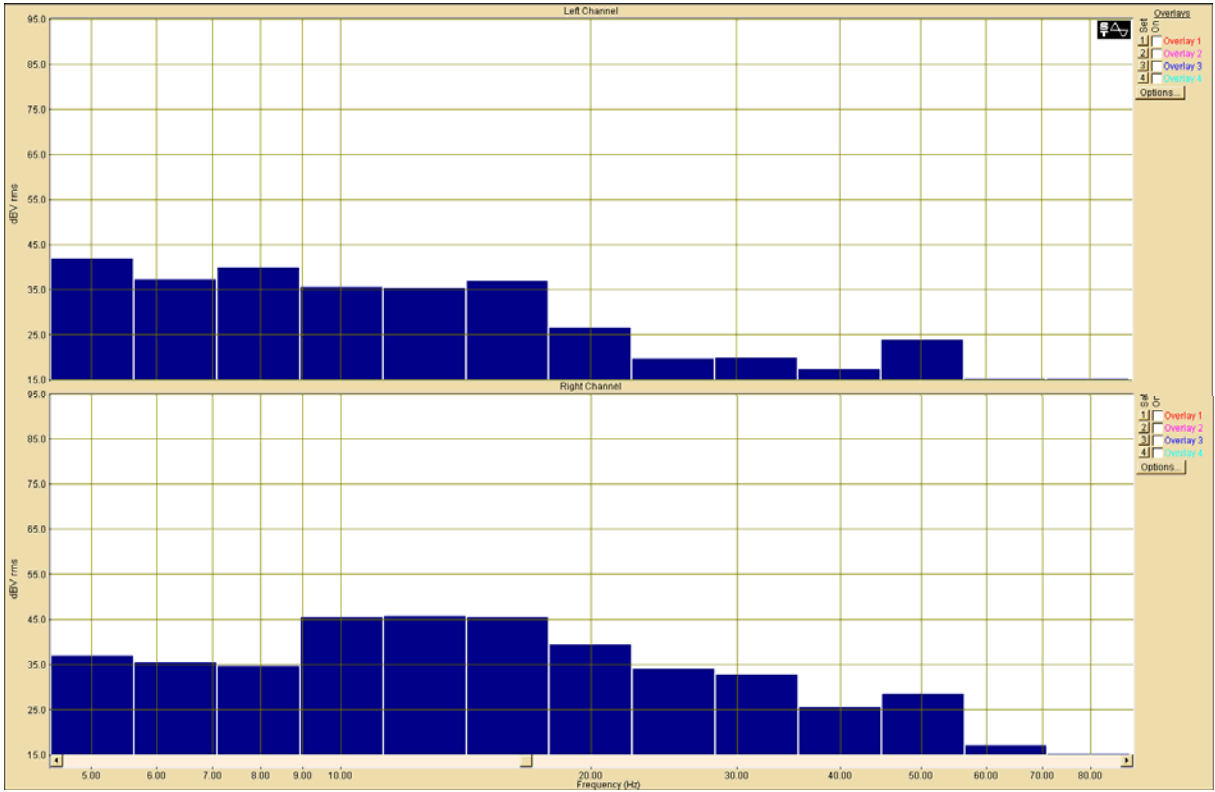
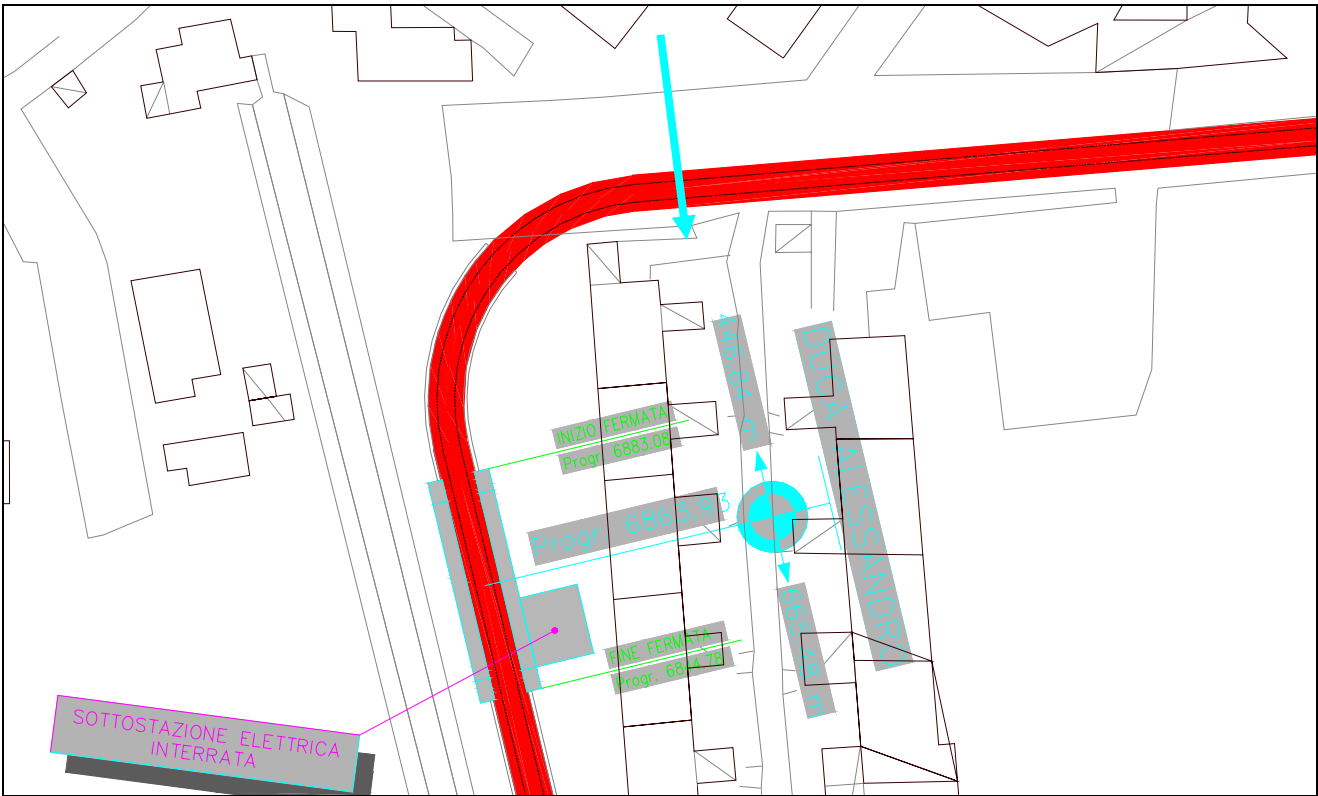
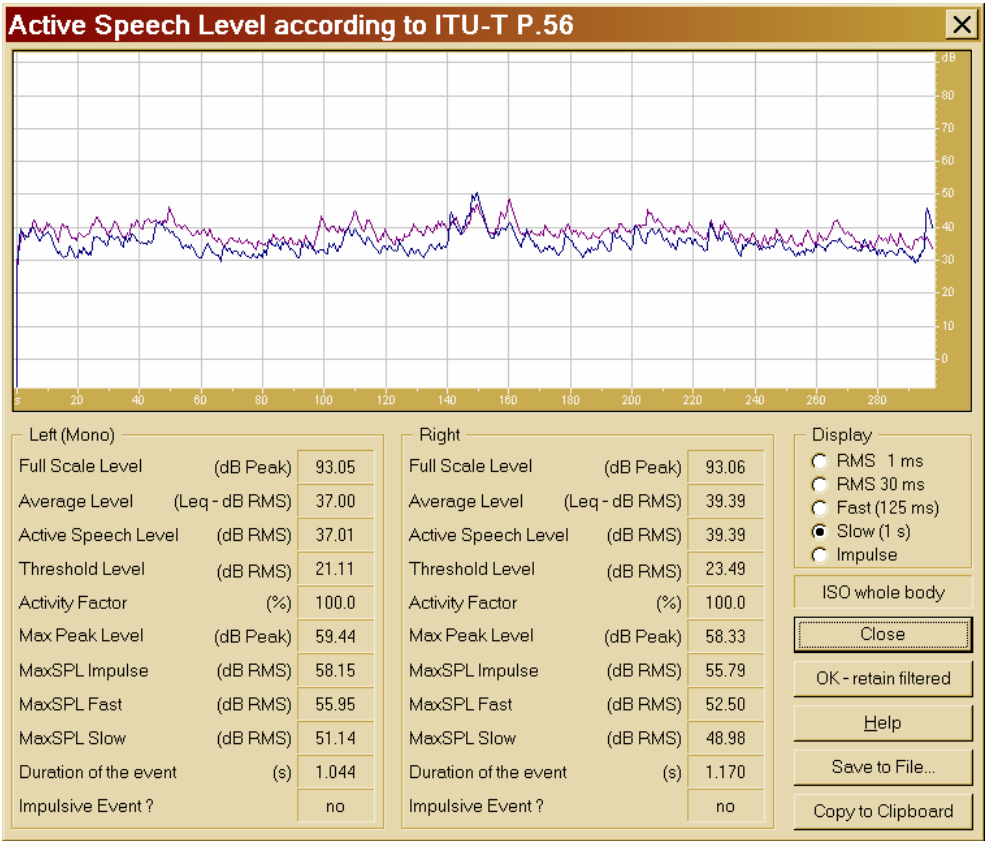


Pos. N. 10 – Via Solferino (Scuola Laura San Vitale)



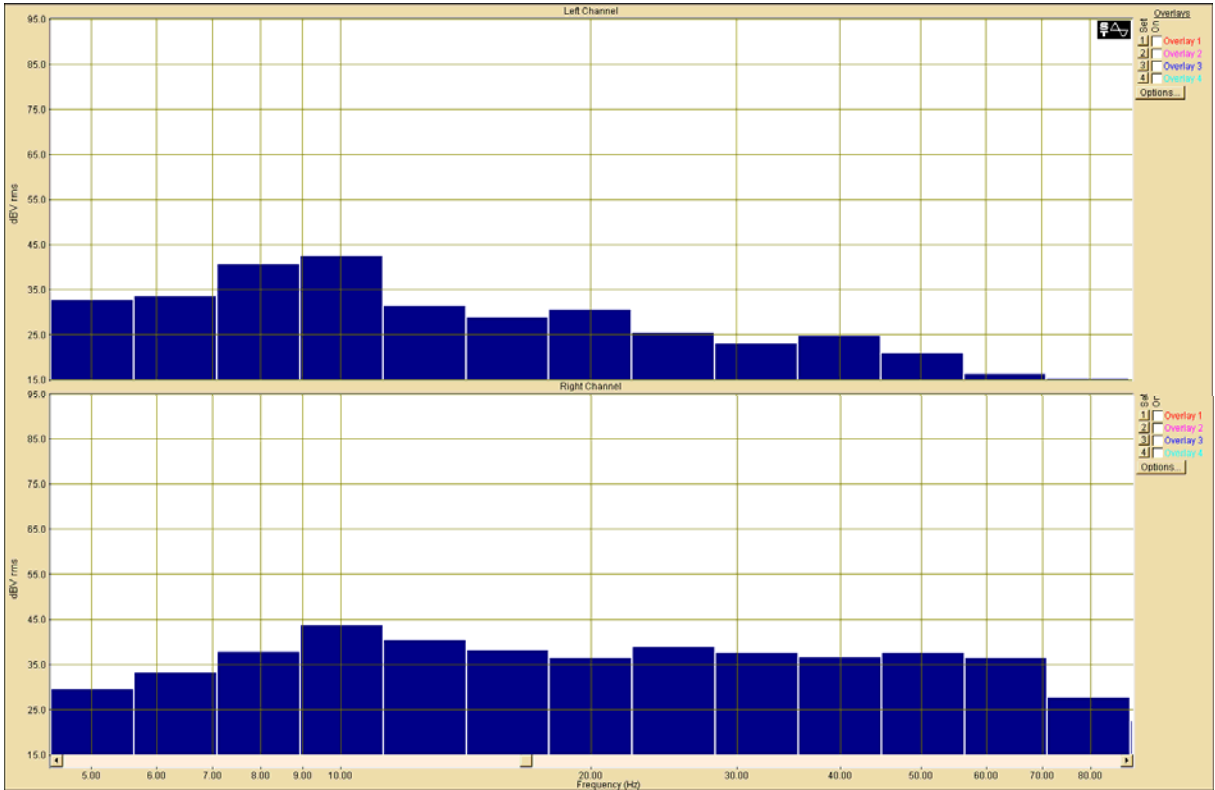
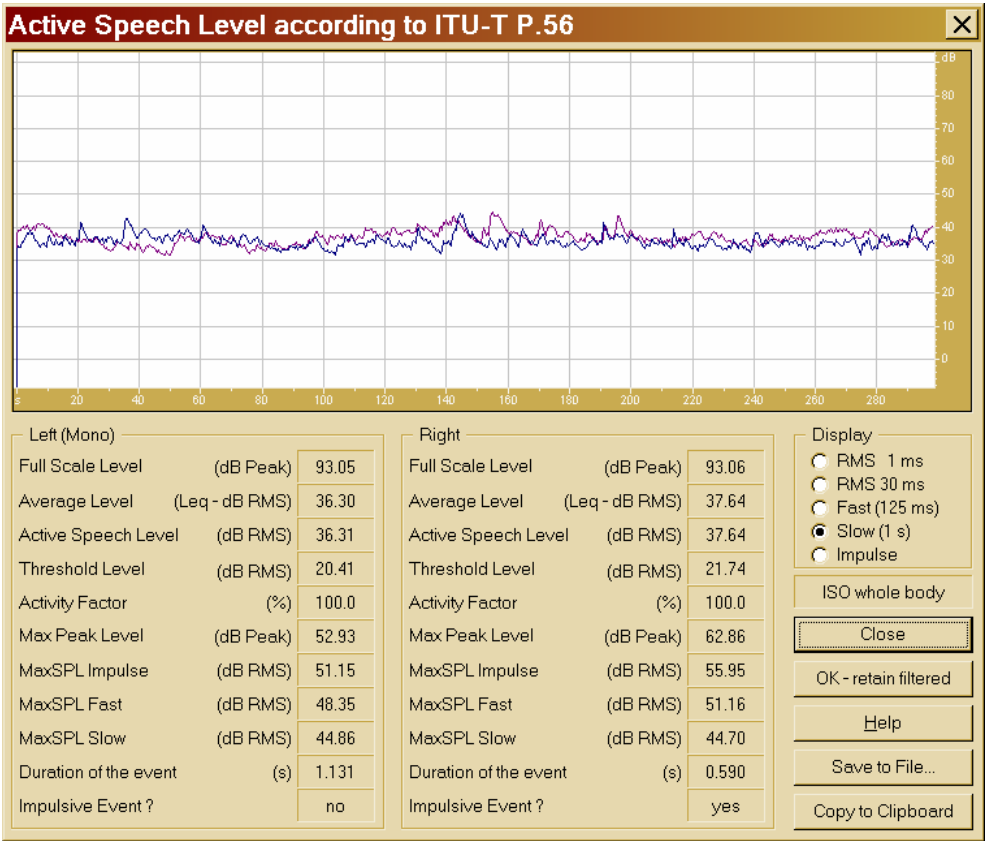


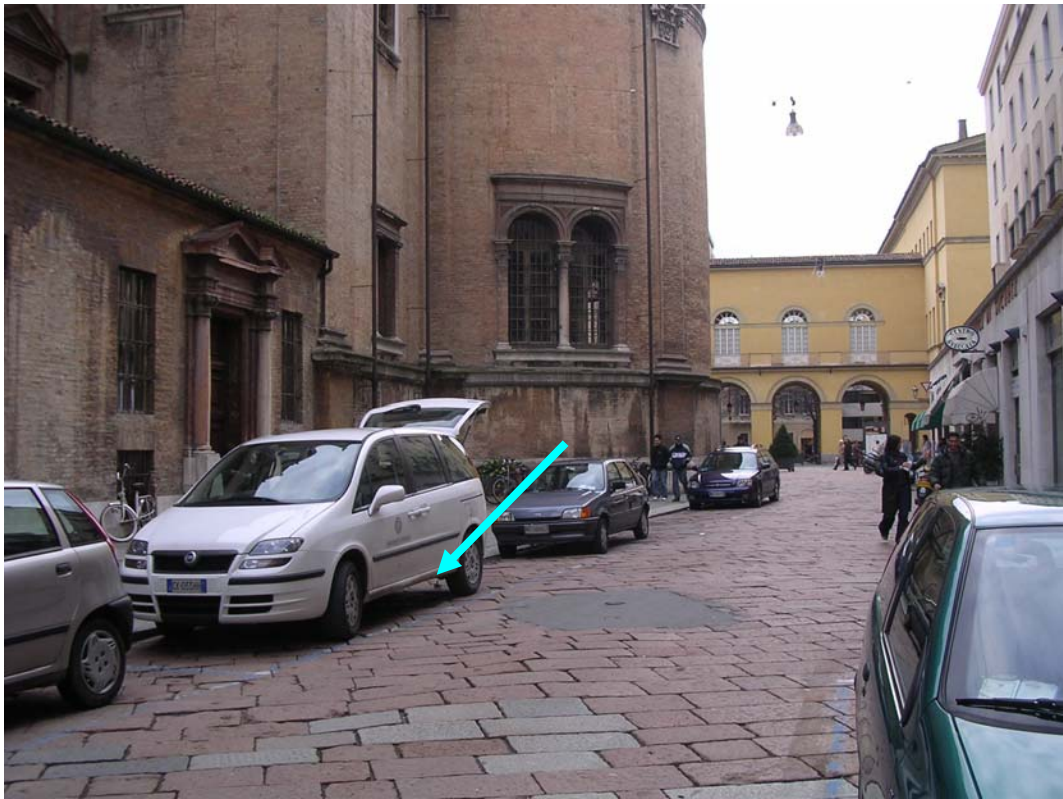
Pos. N. 11 – Via Martiri di Cefalonia (prosieguo via Anna Frank)



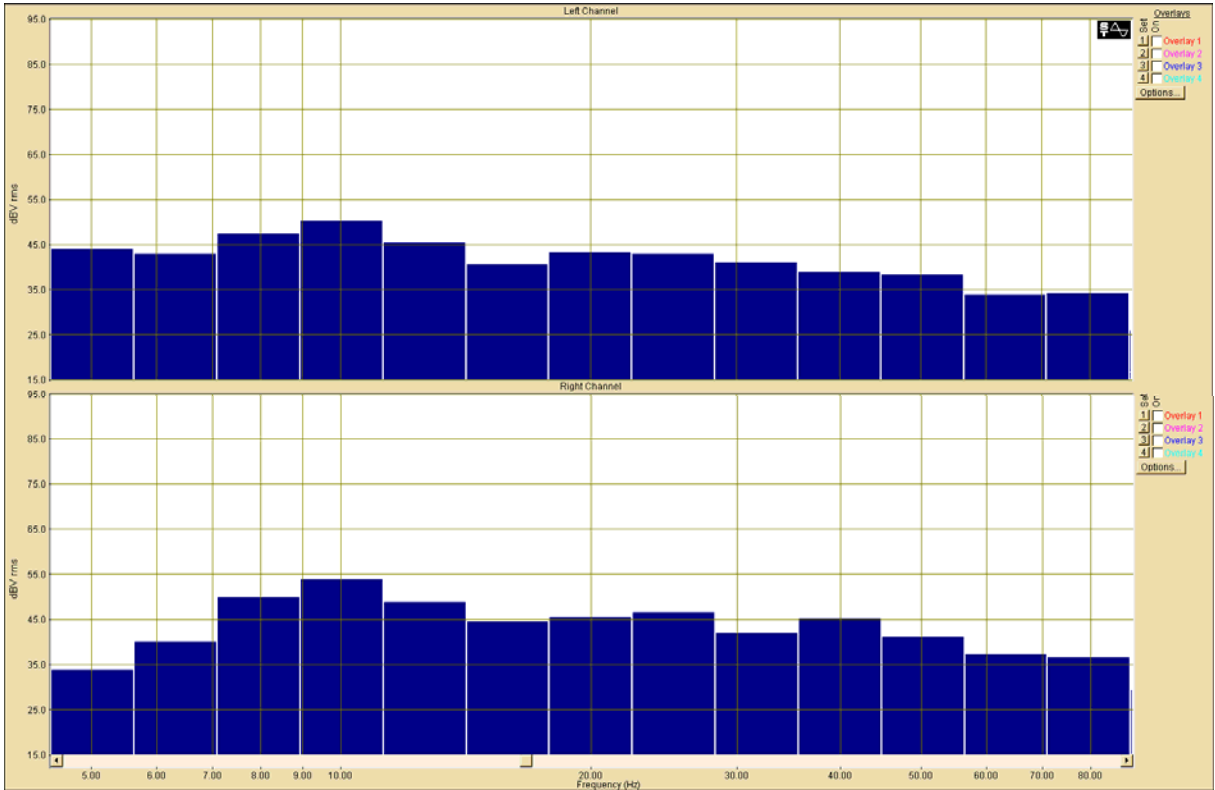
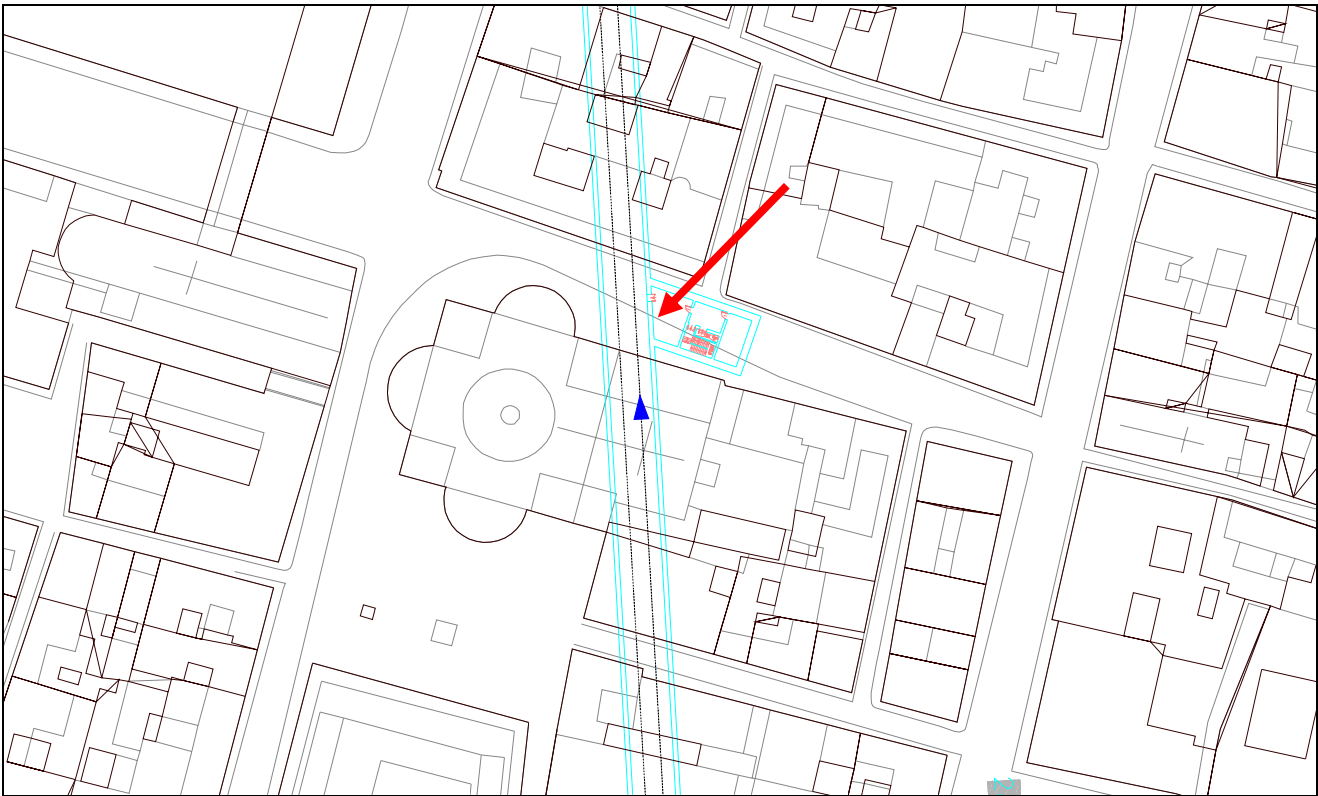
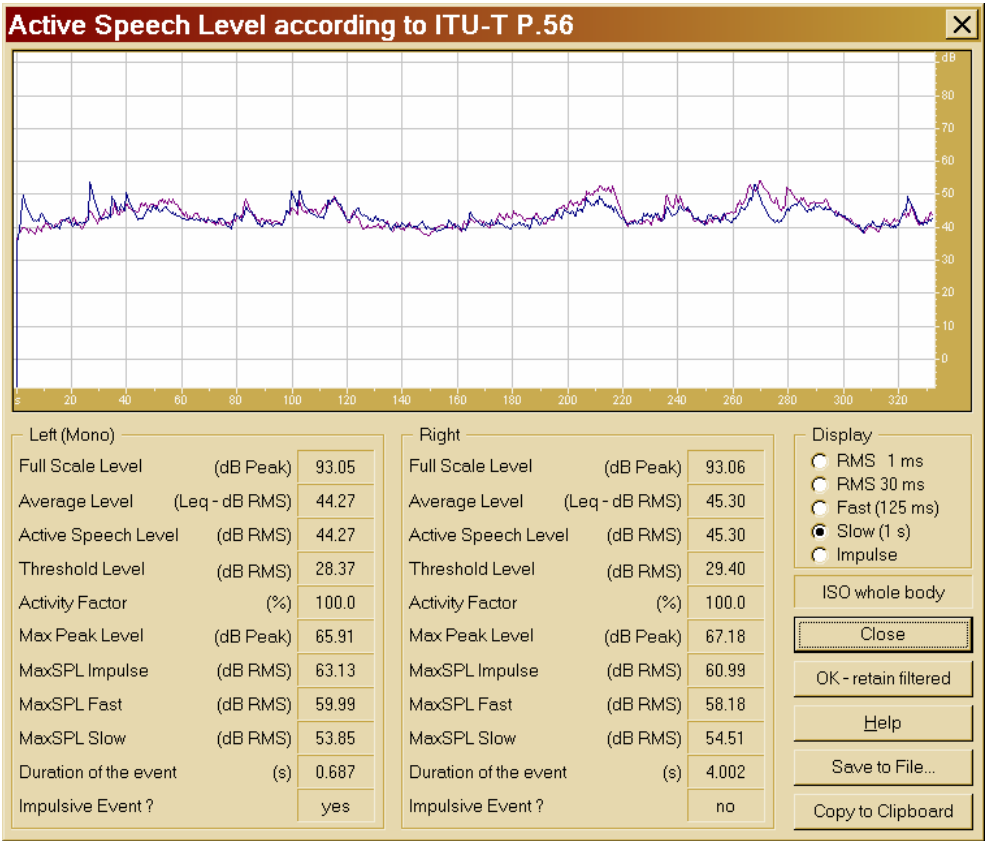


Pos. N. 12 – Via Papa Giovanni XXIII (Campo calcio S.S. Montebello)



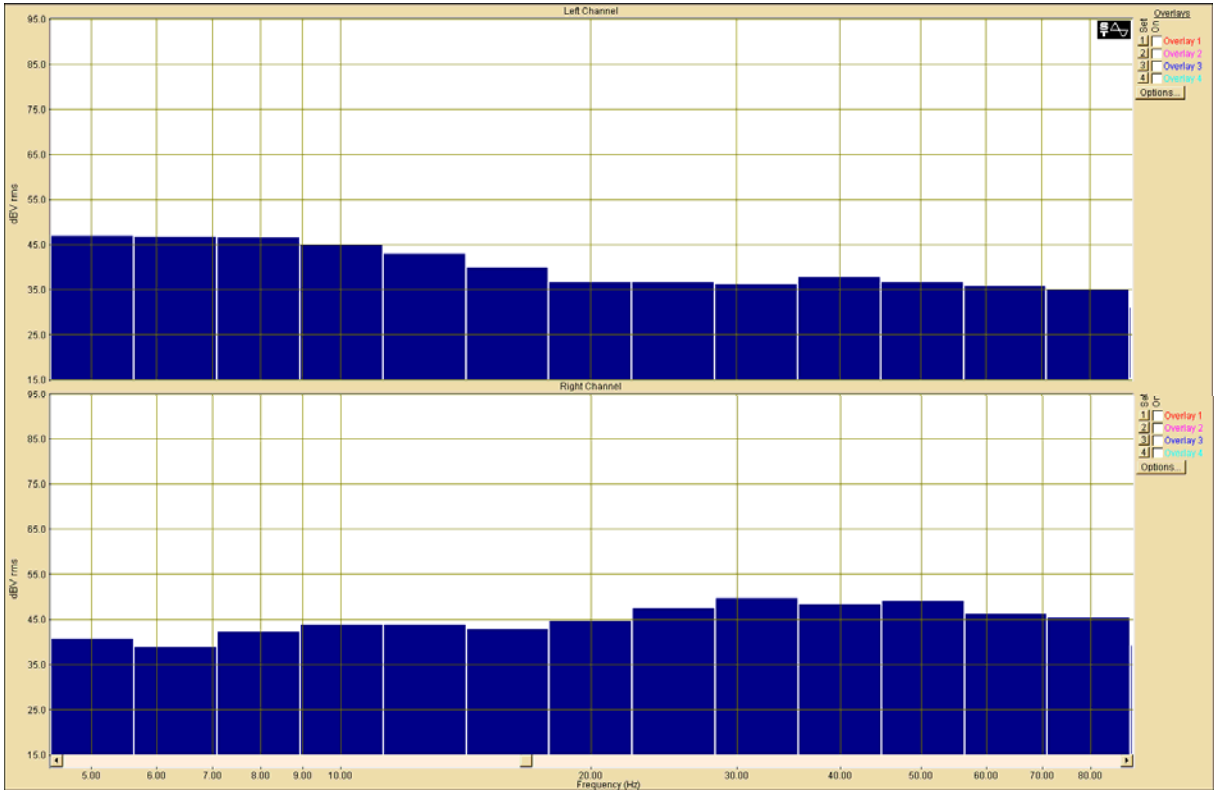
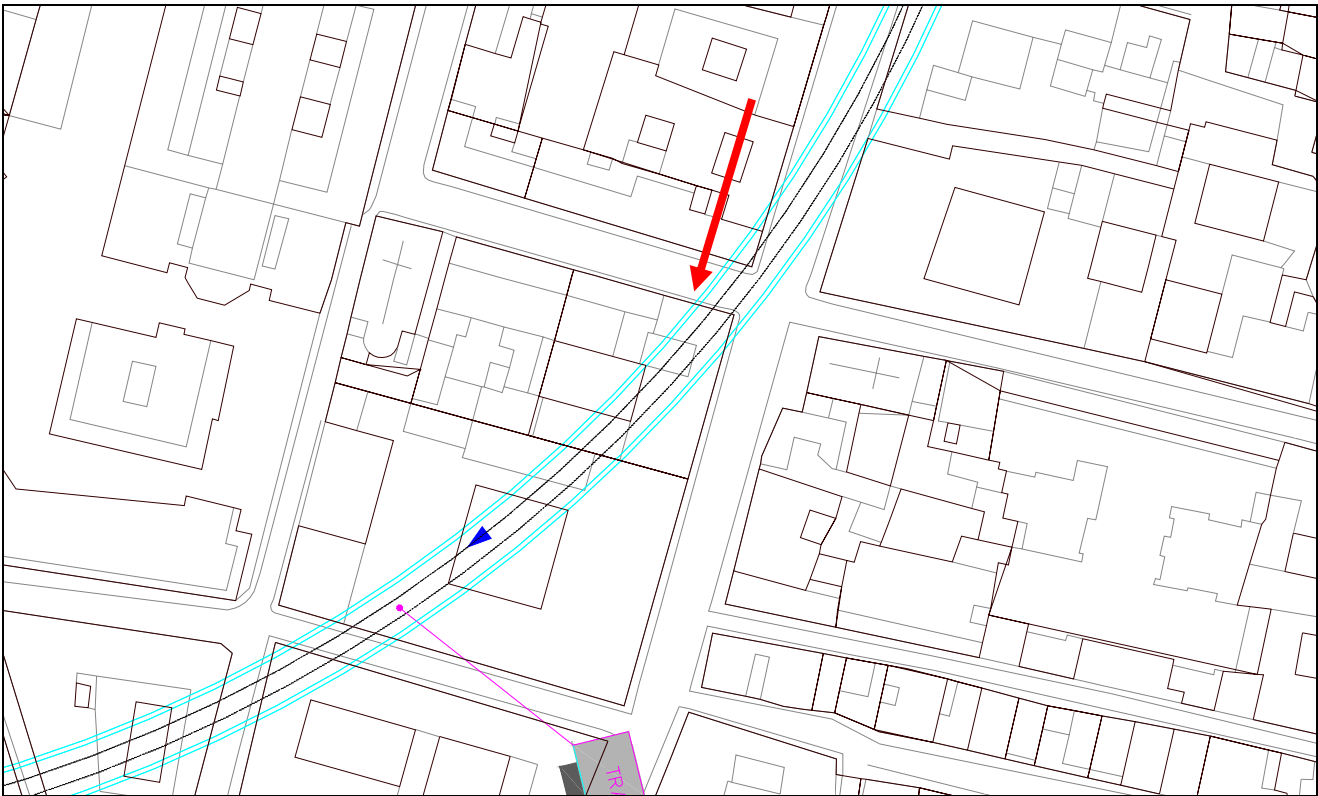
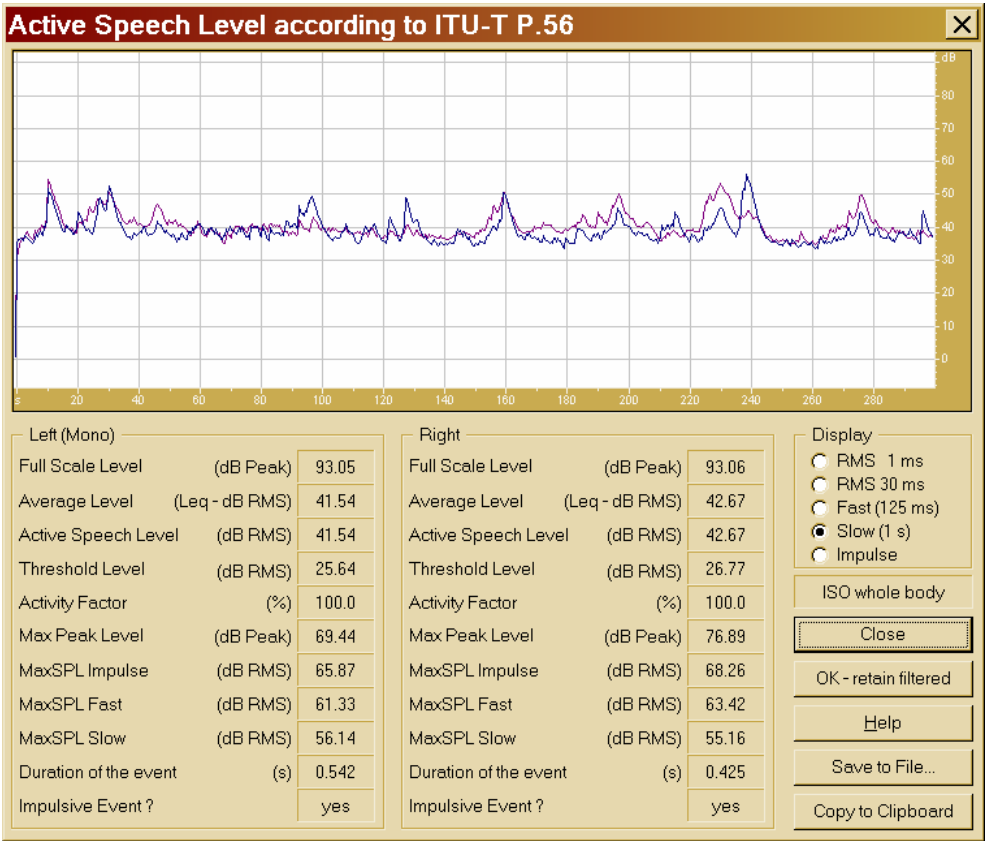


Pos. N. 13 – Via Dante 6 (Chiesa)



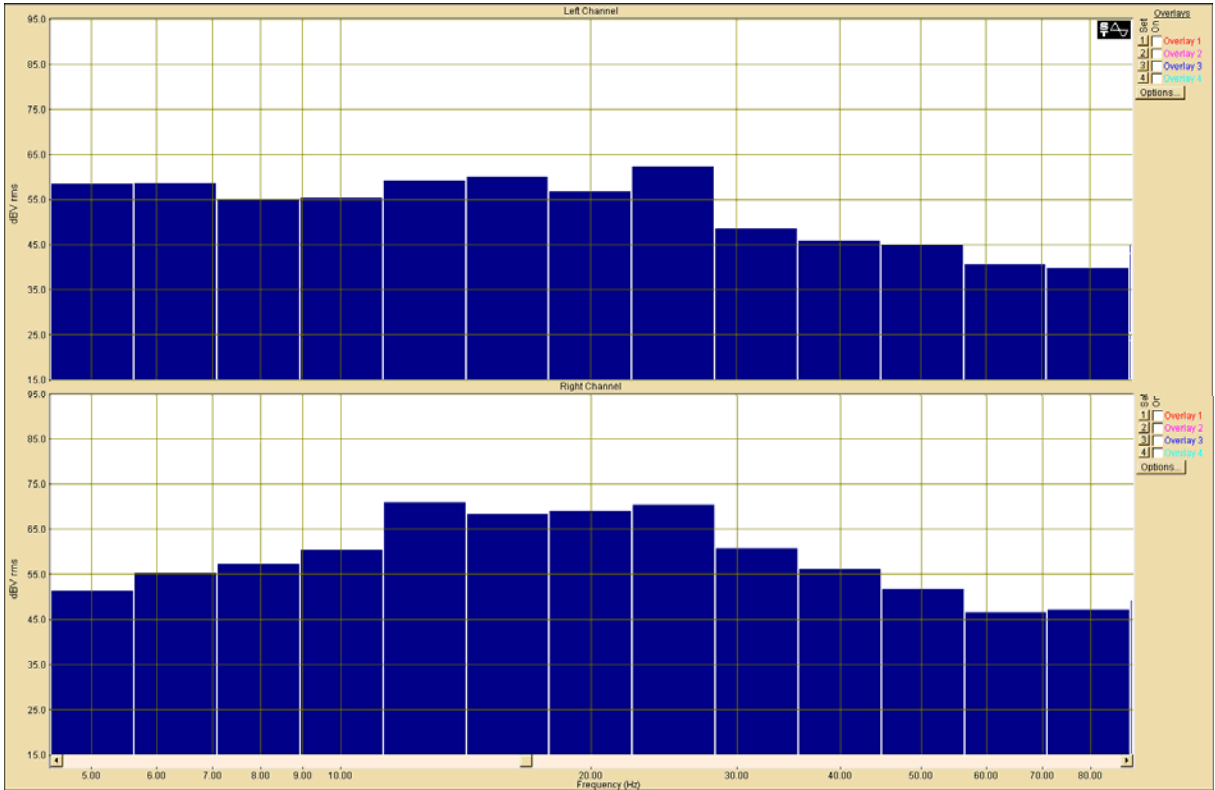
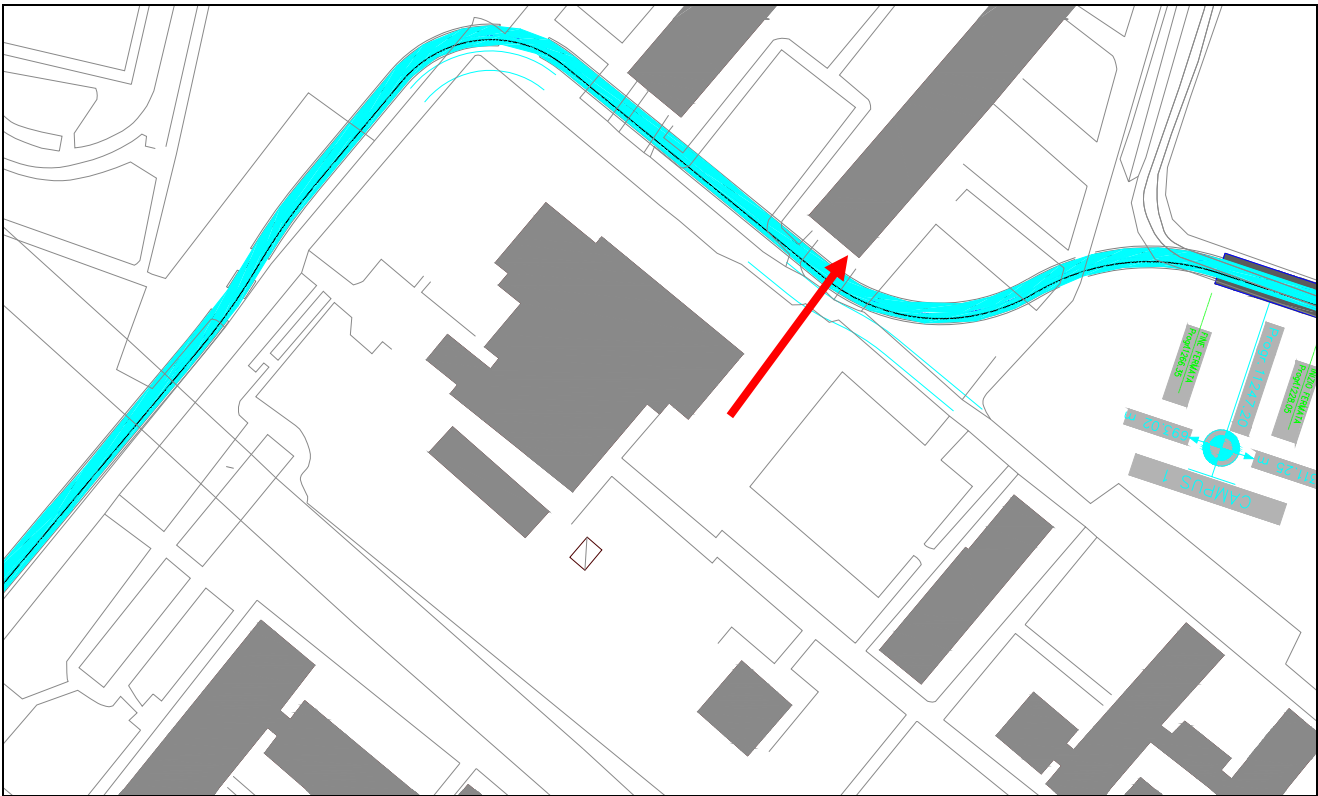
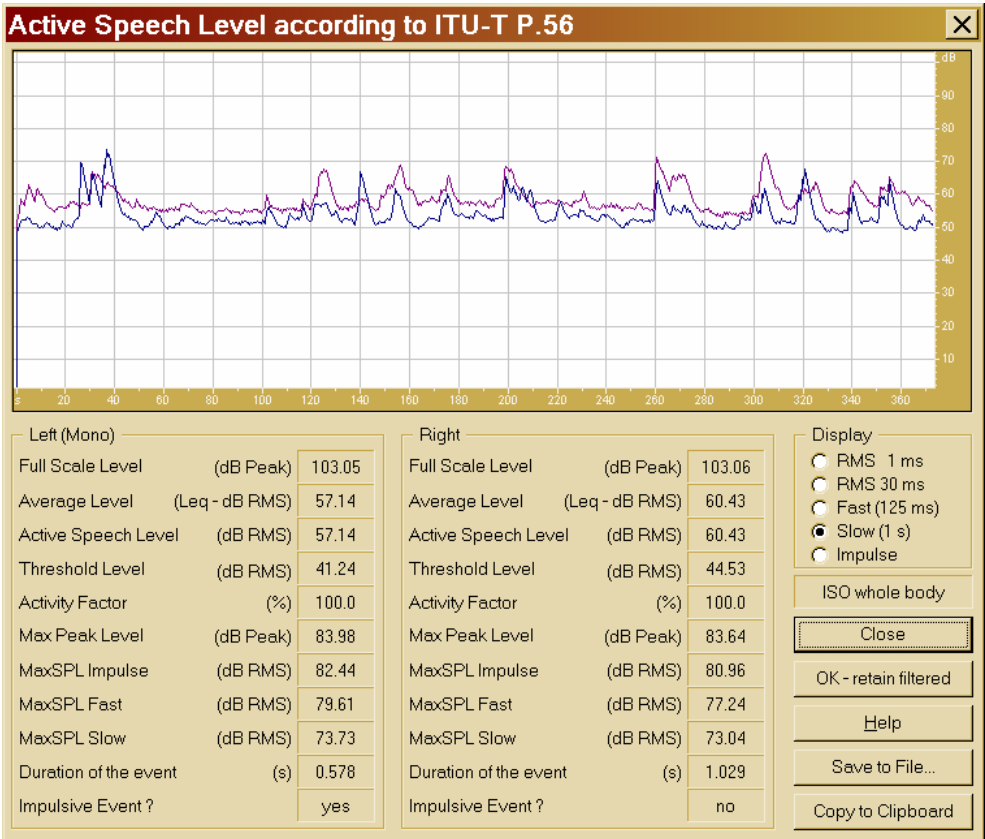


Pos. N. 14 – Via Collegio dei Nobili (angolo via Farini)



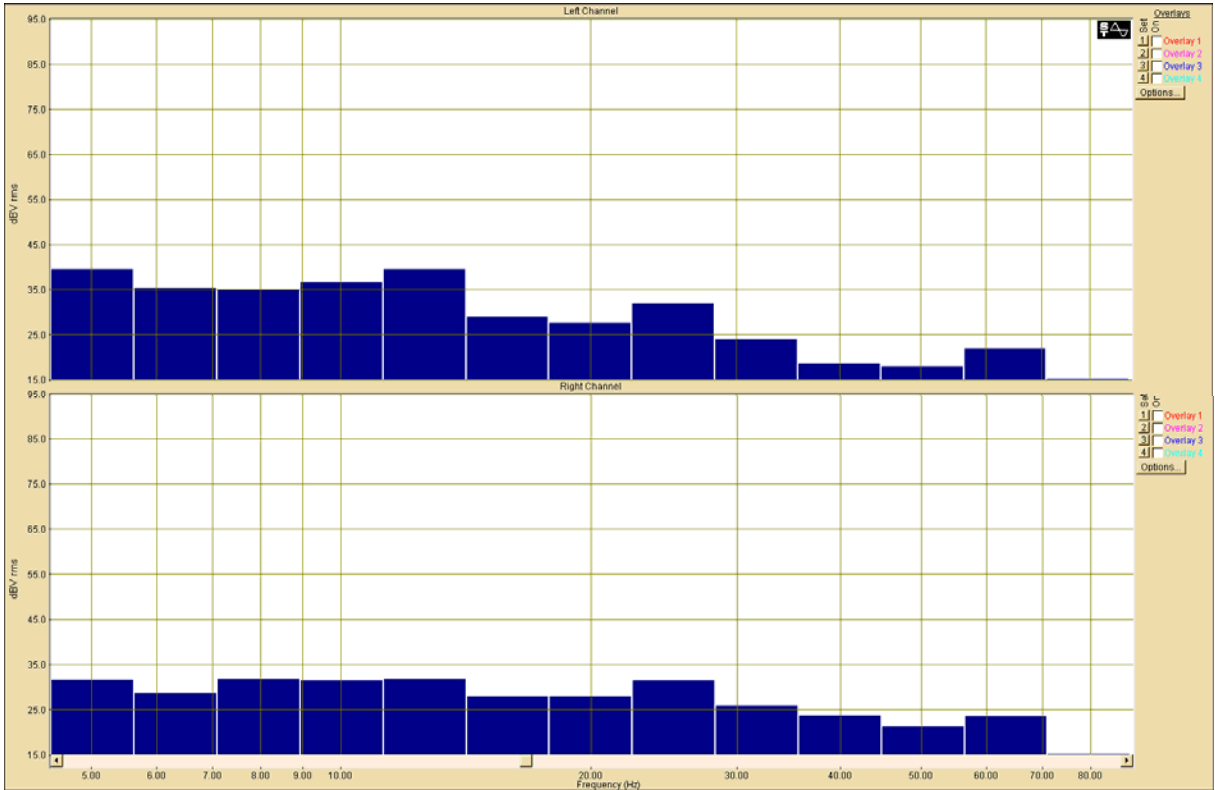
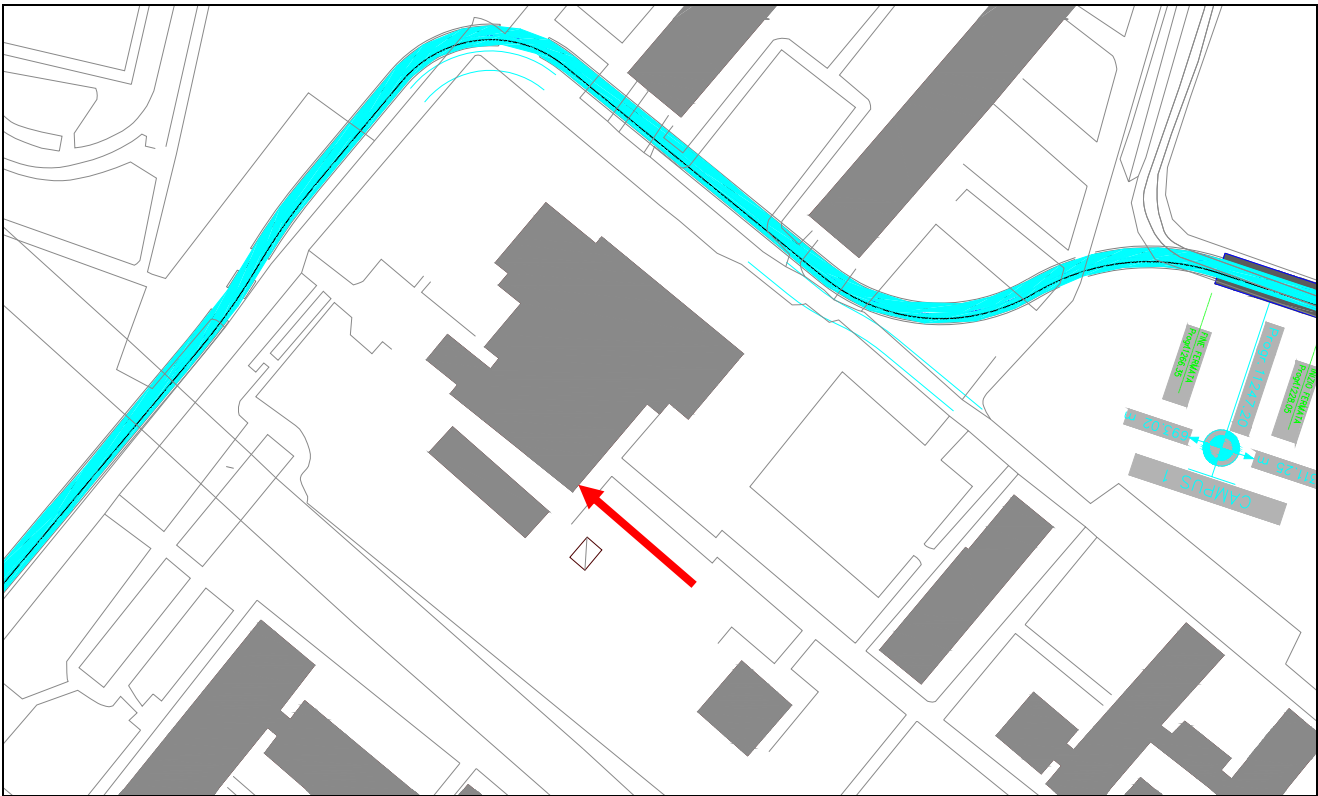
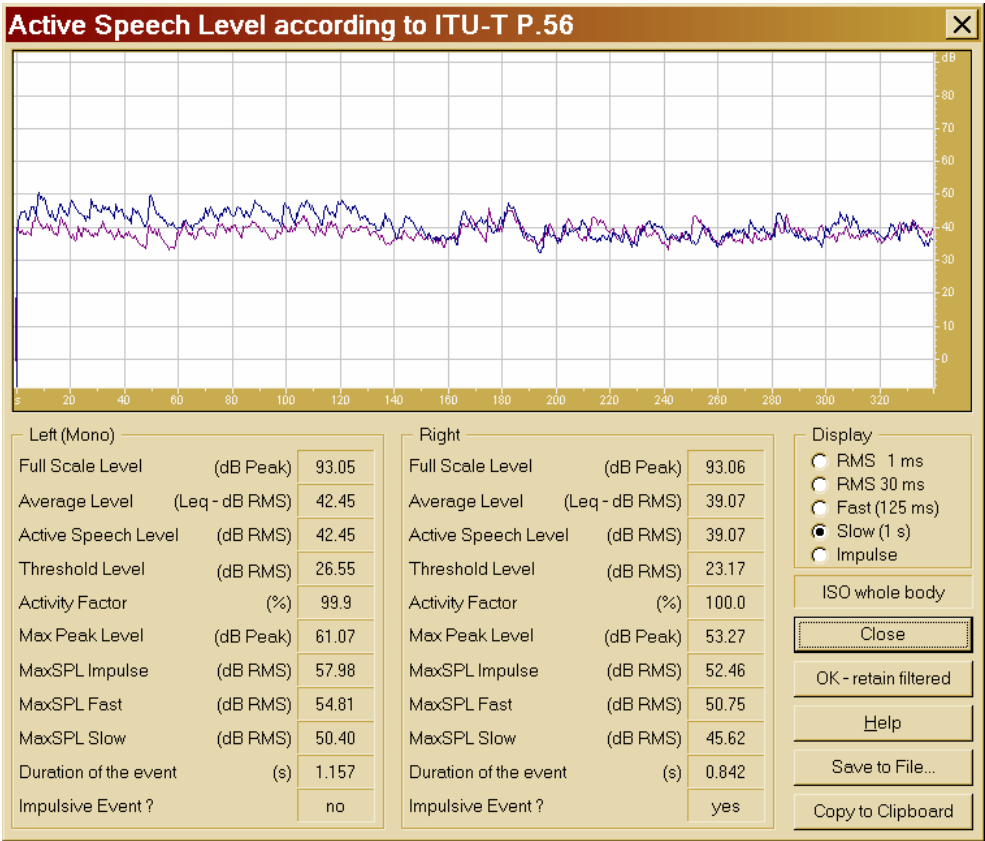


Pos. N. 15 – Via delle Scienze (Dipartimento di Fisica)





Pos. N. 16 – Via delle Scienze (Dipartimento Chimico, C.I.M.)



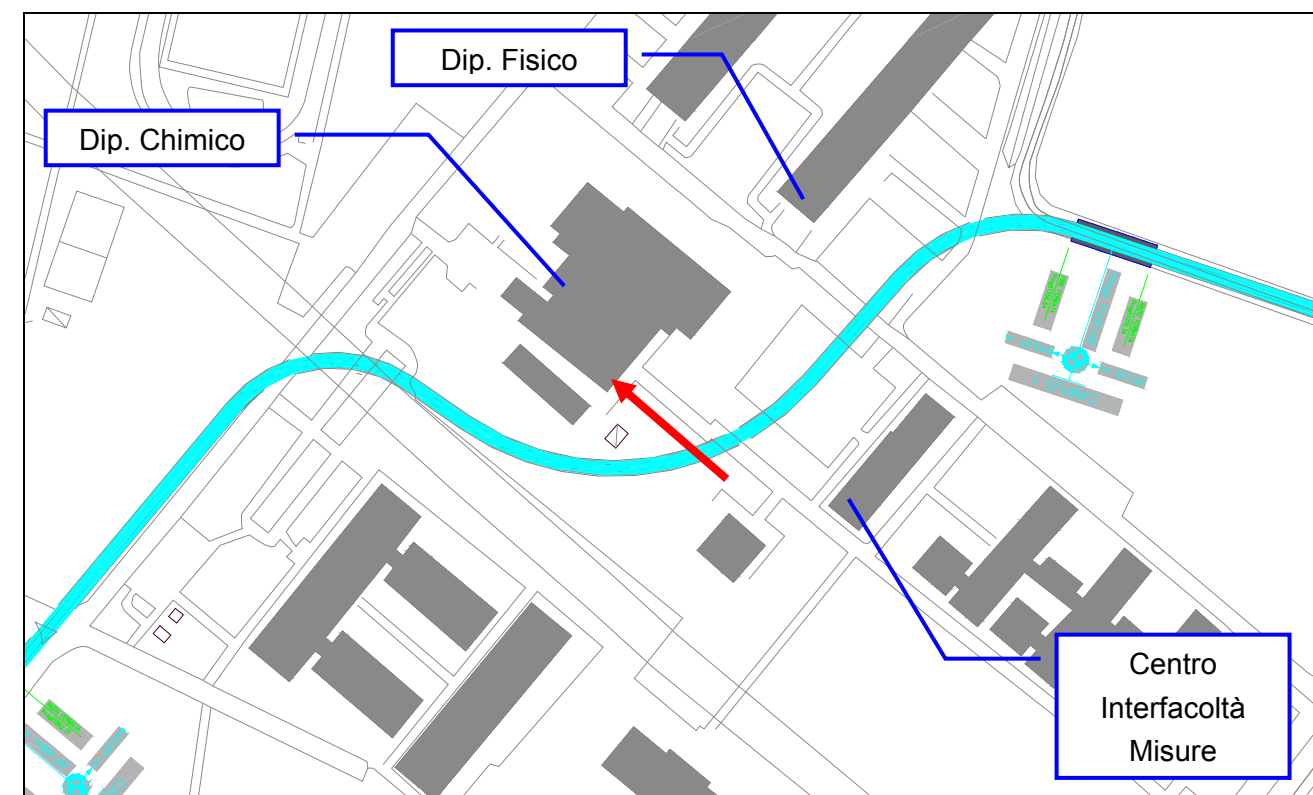
2.2.3 Analisi dei risultati relativi allo stato ante-operam

Onde riepilogare i risultati di tutti i rilevamenti suddetti, è stata compilata la seguente tabella, che riporta i valori massimi di accelerazione ponderata “slow” in direzione verticale ed orizzontale, misurati nelle 16 postazioni suindicate.

Postaz. N.	Lacc,w,max,slow (dB) - XY	Lacc,w,max,slow (dB) – Z
1	65.6	69.4
2	61.7	69.6
3	57.0	56.9
4	49.7	59.6
5	46.4	53.1
6	45.1	54.0
7	51.2	55.6
8	49.9	45.1
9	53.3	53.5
10	56.0	56.8
11	51.1	49.0
12	44.8	44.7
13	53.8	54.5
14	56.1	55.1
15	73.7	73.0
16	50.4	45.6

Si può osservare che praticamente ovunque i valori sono ampiamente al di sotto della soglia di percezione (71 dB), tranne che nella misura 15, davanti al Dipartimento di Fisica del Campus Universitario. Va però osservato che in tale postazione c'era continuo passaggio di pedoni a meno di un metro di distanza dall'accelerometro, e che essi erano costretti a transitare su una griglia metallica, che muovendosi sulla sua sede (pure metallica) produceva forti impulsi vibrazionali (destinati peraltro ad estinguersi entro breve distanza, in quanto fenomeni superficiali a frequenza elevata).

Si deve anche qui riportare che il rilievo n. 16 è stato effettuato in quanto, in una versione preliminare del tracciato, si era ipotizzato di passare fra gli edifici del Dipartimento Chimico ed il Centro Interfacoltà Misure, come mostrato dalla figura seguente.



Presso quest'ultimo centro, sono collocate sofisticate attrezzature scientifiche, alcune delle quali molto sensibili al problema delle vibrazioni: ad esempio sono in funzione 3 apparecchi NMR (risonanza magnetica nucleare), che, pur se installati con le dovute cautele e speciali fondazioni antivibranti, temono molto il propagarsi di vibrazioni esterne.

A seguito della suddetta problematica, avendo rilevato nel punto 16 livelli di vibrazioni ante-operam molto bassi, che sicuramente non sarebbe stato possibile mantenere in esercizio, si è preferito modificare il tracciato della metrotranvia, portandolo a seguire la strada di fronte al Dipartimento di Fisica, ove viceversa i livelli di vibrazione attuale sono molto più elevati, e quindi non c'è da temere alcun aggravamento a seguito dell'entrata in esercizio dell'opera.

Si conclude dunque l'analisi ante-operam rilevando che attualmente lungo il tracciato previsto per la metrotranvia di Parma non si ravvisano preesistenze di fonti di vibrazioni degne di nota, e che pertanto la situazione ante-operam è di sostanziale assenza di fenomeni vibratorii percepibili dalle persone.

2.3 Valutazione delle vibrazioni prodotte dall'esercizio del servizio metropolitano

2.3.1 Caratterizzazione teorica delle emissioni di vibrazioni da parte del materiale rotabile

La caratterizzazione delle emissioni di vibrazioni da parte di veicoli non è soggetta alle stringenti normative e disposizioni legislative che normano invece l'emissione del rumore.

Pertanto in questo caso non si ha una caratterizzazione dell'emissione in condizioni standardizzate, ed una garanzia del costruttore del materiale rotabile a non superare un preciso valore dichiarato.

Pertanto, non si hanno nemmeno valori limite da rispettare per quanto riguarda i livelli di accelerazione comunicati ai recettori, e quindi ovviamente non è possibile specificare la produzione di vibrazioni con lo stesso livello di dettaglio con cui si è potuto operare per il rumore.

Va inoltre detto che la produzione di vibrazioni non è funzione primaria del materiale rotabile, ma dipende in maniera predominante dal sistema di armamento adottato. Conseguentemente, l'analisi delle emissioni di vibrazioni va fatta con riferimento al sistema di trasporto nel suo insieme, con ciò intendendo sia il materiale rotabile, sia l'armamento, sia la sottostruttura dello stesso.

In questa sede non sono ancora disponibili dati di origine sperimentale sulla effettiva emissione di vibrazioni da parte della specifica marca e modello di tram che verrà impiegato per la metrotranvia di Parma, ma se ne conoscono già le principali caratteristiche geometriche e meccaniche: bidirezionale, larghezza massima casse 2400mm, scartamento 1435mm, sistema di condizionamento, configurazione bidirezionale, lunghezza del convoglio circa 32m. Pertanto l'emissione di vibrazioni da parte dei convogli di progetto viene anzitutto analizzata per via teorica, indi convalidata sulla base di rilievi sperimentali eseguiti lungo metrotranvie che impiegano veicoli e sistemi di armamento simili a quelli previsti per Parma.

L'origine fisica del fenomeno è la stessa che causa l'emissione primaria di rumore, ed in particolare il contatto ruota-rotaia: piccole imperfezioni superficiali delle superfici causano improvvise variazioni delle forze di contatto, che a loro volta causano il moto vibratorio della rotaia stessa. L'eccitazione è principalmente in senso verticale, ma nel corso della propagazione nel terreno e dell'interazione con gli edifici possono svilupparsi rilevanti componenti di movimento anche in senso orizzontale.

Lo spettro delle forze di eccitazione, costituito come visto da micro-impulsi, è tipicamente a banda larga. Esso si applica però a strutture dotate di specifiche frequenze di risonanza, per cui alla base della struttura della tramvia si rileva uno spettro tipico di accelerazione che presenta normalmente un picco abbastanza pronunciato a circa 50 Hz. Nonostante la bassa velocità, i tram tipicamente non danno luogo ad importanti emissioni di vibrazioni a frequenze inferiori ai 20 Hz, ovvero alle frequenze ove la sensibilità umana è maggiore: questo spiega il fatto per cui le linee metrotranviarie insistono sovente a brevissima distanza da edifici, pur in assenza di alcun sistema antivibrante; la stessa cosa sarebbe del tutto inaccettabile per linee ferroviarie, soprattutto se percorse da convogli merci dotati di freni a ceppi.

Dal punto di vista del valore istantaneo massimo, la lunghezza del convoglio (e quindi il numero di carrozze, ovvero la sua composizione) non ha alcuna influenza sul valore rilevato, così

come il numero dei tram che transitano nel periodo diurno o notturno. Da questo punto di vista, dunque, il programma di esercizio non sposta i termini del problema.

Infatti attualmente, in assenza di una legislazione quale quella vigente per il rumore, la valutazione dell'impatto vibrazionale viene fatta valutando unicamente il valore efficace istantaneo massimo (con costante di tempo Slow) dell'accelerazione, operando una opportuna ponderazione spettrale sulla base delle norme tecniche applicabili, come descritto al cap. 2.1.4.

Vengono a tal fine presentati nei successivi capitoli alcuni dati sperimentali di raffronto, ottenuti da campagne di rilevamento recentemente eseguite su linee metrotranviarie in esercizio nelle città di Torino, di Milano e di Potsdam, in cui sono stati confrontati gli spettri di accelerazione indotti in presenza ed in assenza di sistemi di armamento antivibranti. Tali dati consentono da un lato di convalidare con ragionevole approssimazione i dati dello spettro teorico qui assunto per l'emissione dei veicoli previsti per la metrotranvia di Parma, e dall'altro indicano quale sia l'attenuazione delle vibrazioni che è lecito attendere dall'impiego dei due diversi sistemi antivibranti previsti dal progetto. Va a questo proposito specificato che nel sistema antivibrante previsto per Parma verranno impiegate le migliori tecnologie oggi disponibili, costituite dall'utilizzo di guancialini in materiale elastomerico posti attorno alle rotaie, dall'impiego di attacchi elastici indiretti (con doppio strato elastomerico, sia sopra che sotto la piastra di attacco) e nella realizzazione di un sistema flottante su materassino elastico mediante una soletta portante in CLS altamente massiva.

Una valutazione teorica delle accelerazioni indotte dal transito di un rotabile su un sistema di armamento a rotaie con attacchi puntiformi equidistanti (con o senza traversine) è possibile facendo impiego del modello matematico di Krylov, che è stato recentemente perfezionato da Degrande e Lombaert¹². Tale modello considera una serie di carichi concentrati (gli assali), mobili con velocità v sul binario. Quest'ultimo è costituito da una coppia di travi snelle (le rotaie), cui sono agganciate delle masse concentrate (gli organi di attacco), ed il tutto appoggia su un suolo elastico alla Winkler.

La seguente figura mostra la geometria di una tale schematizzazione.

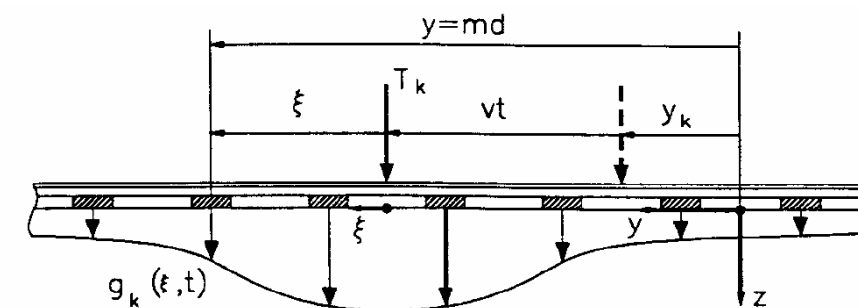


FIG. 1. Vertical deflection curve of the track.

Si osserva come la rotaia ripartisca il carico concentrato su numerosi attacchi, cosicché la forza applicata da ciascuna di esse alla struttura sottostante (che ovviamente deve avere una adeguata elasticità) diviene pari solo ad una frazione del carico concentrato applicato.

¹² Geert Degrande and Geert Lombaert – "An efficient formulation of Krylov's prediction model for train induced vibrations based on the dynamic reciprocity theorem" - J. Acoust. Soc. Am. 110 (3), Pt. 1, Sep. 2001, pag 1379

Considerando un punto situato nel terreno ad una certa distanza dal binario, esso riceverà, nel corso del transito di un convoglio, la sovrapposizione dei treni d'onda vibrazionale prodotti dall'eccitazione di ciascuna traversina, ognuno con un ritardo dipendente dalla distanza di ciascuna traversina dal punto di osservazione. I fenomeni dissipativi nella propagazione nel terreno, che sono stati meglio descritti nel cap. 2.1.2, fanno sì che si debba tenere in considerazione solo il contributo di un numero limitato di attacchi.

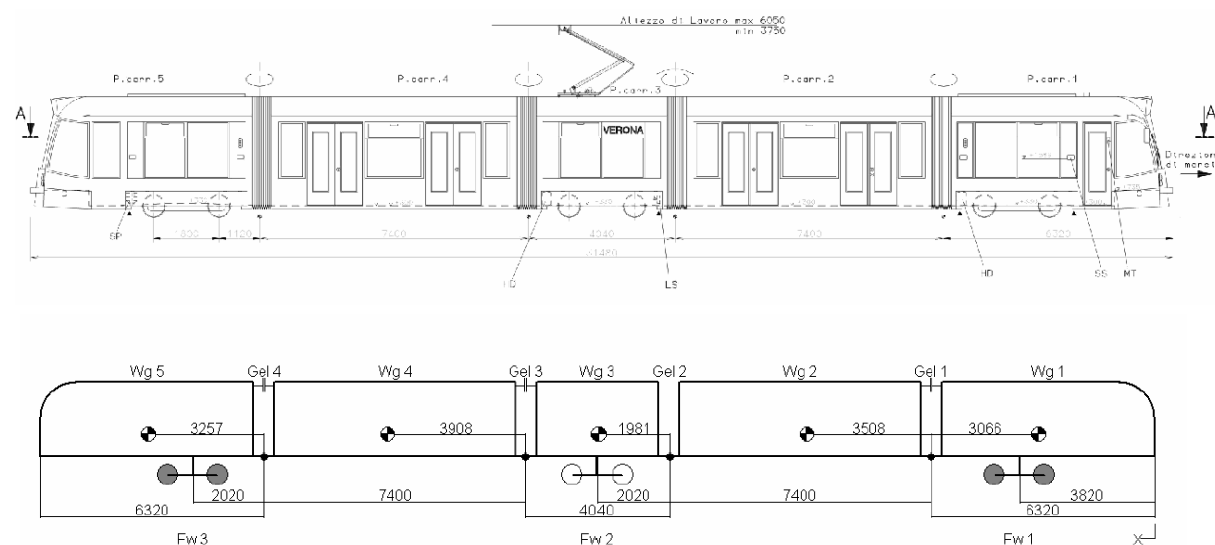
E' chiaro che, tanto più le rotaie sono rigide (prodotto EI elevato), e tanto più invece è cedevole il sottofondo, tanto migliore sarà la redistribuzione longitudinale del carico concentrato, con conseguente drastica riduzione dello sforzo massimo trasmesso da ciascun attacco al sottofondo.

Una tale configurazione porta alla nascita di tre principali frequenze di eccitazione, che sono costituite dalla frequenza di passaggio dei carrelli, dalla frequenza di passaggio delle ruote, e dalla frequenza di "battuta" (pitch) costituita dal n. di attacchi caricati in successione da una ruota ogni secondo.

Tutte tre queste frequenze dipendono con proporzionalità lineare dalla velocità del tram, e da alcune variabili geometriche del sistema metrotranviario adottato.

La valutazione del profilo temporale di carico applicato ad un singolo attacco rotaia-traversina può essere fatto considerando il transito di un singolo assale. Il profilo complessivo è poi costituito dalla ripetizione nel tempo del profilo di passaggio di ciascun assale, con un cadenzamento che dipende dalla distanza fra gli assali stessi.

Con riferimento ai dati del tram Combino della Siemens, che è stato qui assunto come modello teorico per effettuare i calcoli, si osserva che i principali parametri che influenzano la produzione di vibrazioni sono deducibili dalla seguente figura, tratta dal documento denominato 09409393-02.pdf e fornito dalla Siemens AG:



Massa complessiva del Combino a pieno carico: 52093 kg

Massa gravante su ogni assale nella condizione più gravosa (tram a pieno carico): da 8127 kg (carrello di coda Fw3) a 9622 kg (carrello centrale Fw2) .

Distanza fra i centri di rotazione dei carrelli: 11440 mm

Distanza fra i due assali di ciascun carrello: 1800 mm

Passo longitudinale degli organi di attacco: 700 mm

Va precisato che i dati suddetti si riferiscono ad un Combino nell'allestimento "lungo" da 5 moduli (L = 31.4 m circa).

Sulla base dell'approccio di Krylov, e considerando condizioni quasi statiche (quindi senza tener conto di eventuali risonanze nel sistema di armamento o nella sospensione dei tram), si ha che le tre frequenze di eccitazione, ad una velocità di 40 km/h ($v=11.11$ m/s), sono pari rispettivamente a:

$$f_{\text{carr}} = \frac{v}{L_{\text{carr}}} = 0.971 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{asse}} = \frac{v}{L_{\text{asse}}} = 6.173 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{trav}} = \frac{v}{L_{\text{trav}}} = 15.87 \text{ Hz}$$

La prima delle tre frequenze di eccitazione non ha alcuna rilevanza pratica, in quanto è così bassa da non dar luogo a significativa percezione umana. Inoltre essa è eccitata dal passaggio di soli tre carrelli in totale, quindi non si può parlare di un fenomeno ripetitivo, come invece accade per un lungo convoglio ferroviario ove i carrelli sono parecchie decine.

Le altre due frequenze di eccitazione risultano invece potenzialmente impattanti, in quanto la prima si sviluppa ad una frequenza di notevole sensibilità percettiva, ed a cui l'estinzione causata dalla propagazione nel terreno risulta relativamente contenuta. L'ultima infine, pur verificandosi ad una frequenza più elevata, alla quale la sensibilità umana è più bassa, ed alla quale l'attenuazione del terreno comincia a diventare rilevante, porta però con sé la massima energia, in quanto la stessa viene alimentata da ogni passaggio di un assale su un attacco, e quindi tipicamente è rappresentata da un "treno di impulsi" che, per l'intero transito di un tram a 6 assali, può facilmente dar luogo ad oltre 100 impulsi percepiti al recettore.

Si comprende meglio tale concetto con riferimento alla seguente figura:

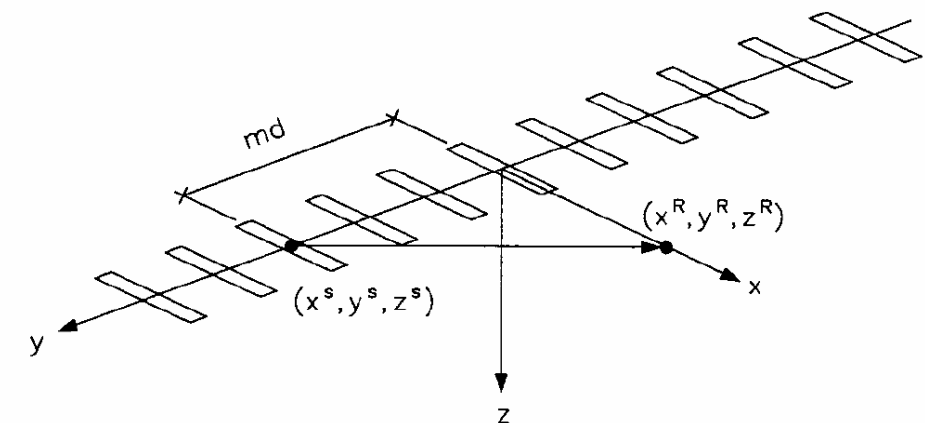


FIG. 2. Location of the source and the receiver.

Ogni volta che il carico mobile (l'assale) passa sopra un attacco, esso trasmette un impulso al terreno sottostante, che si propaga sino al recettore.

In termini energetici, dunque, al recettore si somma il contributo di un centinaio di impulsi, che va invece a confrontarsi con i due o i 4 impulsi costituiti dal passaggio dei carrelli (f_{carr}) oppure degli assali (f_{asse}).

Va però detto che il valore della forza corrispondente a ciascun impulso non è la stessa nei tre casi: infatti alla frequenza di passaggio degli assi si associa una forza pari al carico complessivo su un asse (circa 90.000 N), mentre alla frequenza di battimento degli attacchi si associa una forza pari alla differenza fra il carico applicato su un attacco e quello redistribuito dalla rotaia sugli attacchi adiacenti.

Tale redistribuzione dipende anzitutto dalla rigidità della rotaia, che è nota:

$$I = 29.285 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4 \text{ (momento di inerzia di 1 rotaia RI 60)}$$

$$2 \cdot E \cdot I = 1.23 \cdot 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \text{ (momento di rigidità del binario - 2 rotaie)}$$

Essa dipende anche dalla cedevolezza degli appoggi in corrispondenza degli attacchi, che invece non è altrettanto facilmente definibile in questa sede. Si ipotizza tuttavia un cedimento massimo del punto di contatto ruota-rotaia, sotto carico, pari a 4 mm sotto un carico di 90.000 N, cosa che si traduce in una costante elastica k pari a 22.500.000 N/m.

Con questi dati, la soluzione del modello di Krylov porta al calcolo della deformata in condizioni quasi statiche della rotaia, e conseguentemente della ripartizione del carico fra gli appoggi consecutivi. Tale calcolo fornisce i seguenti valori approssimati del carico sulla successione di 7 appoggi (quando il carico concentrato è sull'appoggio centrale):

N.	1	2	3	4	5	6	7
F (N)	4500	8500	17000	27000	17000	8500	4500

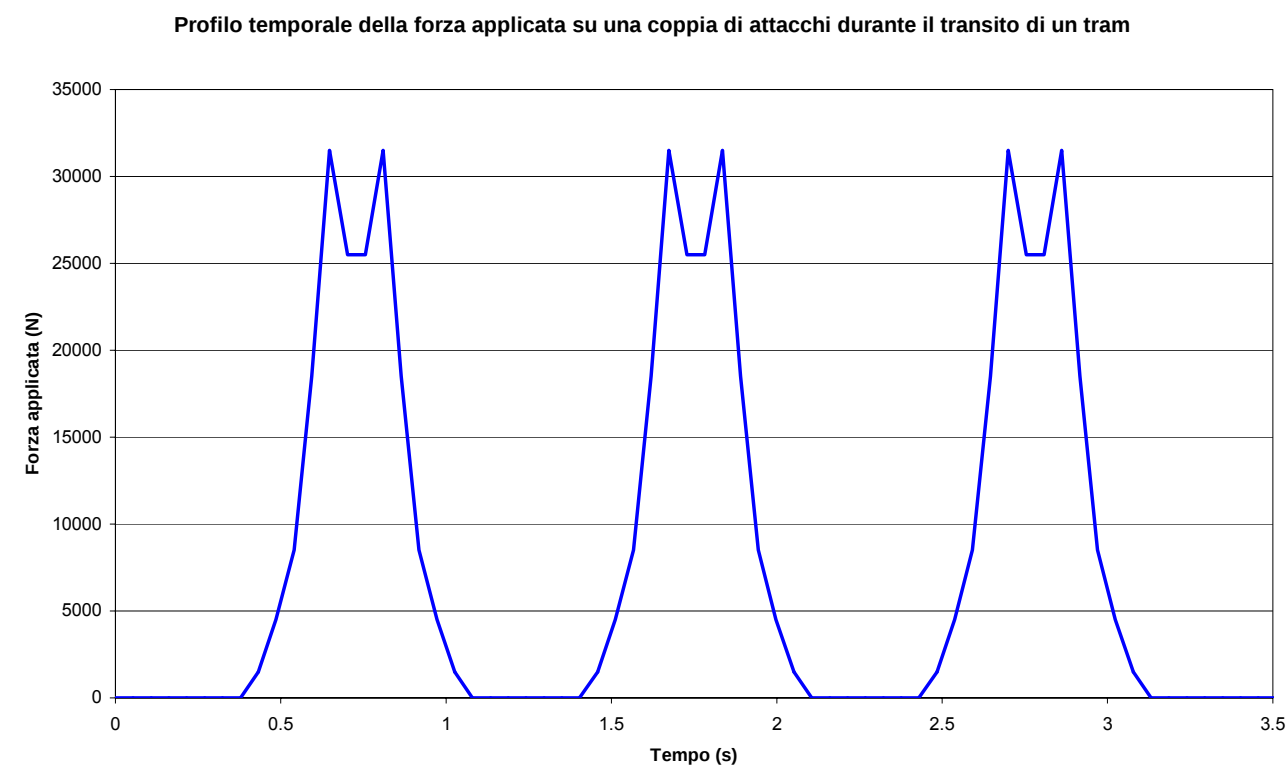
L'impulso di forza è dunque dato dal passaggio da 17000 a 27000 N, e dunque risulta pari a 10000 N, quindi è circa 1/10 dell'impulso che si ha alla frequenza di passaggio degli assali. Tuttavia, poichè si ha un centinaio di impulsi di questo tipo, e solo 6 impulsi dati dall'assale come assieme, l'energia vibrazionale comunicata al suolo alla frequenza di 18.5 Hz risulta circa 12 volte superiore a quella comunicata a 6.5 Hz. Come previsto, dunque, il picco di eccitazione con massima energia è quello a frequenza più alta.

Non va dimenticato che esiste anche il meccanismo di eccitazione causato dalle asperità del contatto ruota rotaia. Questa fonte di vibrazioni è caratterizzata da emissione su un ampio spettro continuo, ma, per effetto della esistenza di fenomeni di risonanza nel sistema di armamento, dà luogo tipicamente ad una emissione caratterizzata da curva "a campana" centrata su una frequenza che può oscillare dai 40 ai 63 Hz.

Su rotaie nuove e con materiale rotabile nuovo, la nascita di fenomeni di vibrazione dovuti alle asperità del contatto ruota-rotaia è trascurabile. Viceversa, dopo anni di esercizio, è questo il fenomeno che tende a diventare dominante, come dimostrato dai risultati dei rilievi sperimentali eseguiti sulle tramvie di Torino, Milano e Potsdam, e discussi nel cap.2.3.2.

Utilizzando il principio di sovrapposizione degli effetti, è possibile sommare le forze trasmesse all'appoggio in corrispondenza di un'attacco, tenendo così conto dell'effetto cumulativo cui il passaggio dei due assali di un carrello, situati a breve distanza l'uno dall'altro, dà luogo.

Si conclude dunque quantificando l'emissione delle vibrazioni da parte del transito di un convoglio metrotranviario, alla velocità di 40 km/h e dotato di tre carrelli, con 6 picchi di carico variabile nel tempo, aventi ampiezza massima pari a circa 31500 N, e profilo temporale come illustrato nella seguente figura.



2.3.2 Valutazione sperimentale degli spettri tipici di vibrazioni di convogli metrotranviari

I dati che vengono qui presentati sono il risultato di tre campagne di rilevamento delle vibrazioni indotte da tram su linee urbane già in esercizio, con materiale rotabile non nuovo.

In ciascuna campagna si è acquisito un significativo numero di passaggi di convogli di tipo metrotramviario, su due sezioni caratterizzate la prima da un armamento "standard" tradizionale e rigido (non antivibrante), la seconda da un armamento dotato di alcuni accorgimenti antivibranti: nella prima delle tre campagne, si trattava di un vero sistema antivibrante a massa flottante, dotato di caratteristiche meccaniche (massa, rigidità) confrontabili con la soluzione antivibrante proposta per Parma; nelle altre due campagne il sistema valutato era invece "di primo livello", costituito cioè da elementi in gomma a diretto contatto con la rotaia, che hanno principalmente funzioni riduttive del rumore, ed effetti molto limitati sul controllo delle vibrazioni.

2.3.2.1 Rilievi eseguiti presso la rete metrotranviaria di Torino

La prima campagna di rilevamento è stata eseguita dall'ing. Raffaele Pisani in via Nicola Fabrizi, a Torino, il giorno 26/1/2001.

La strumentazione impiegata comprendeva:

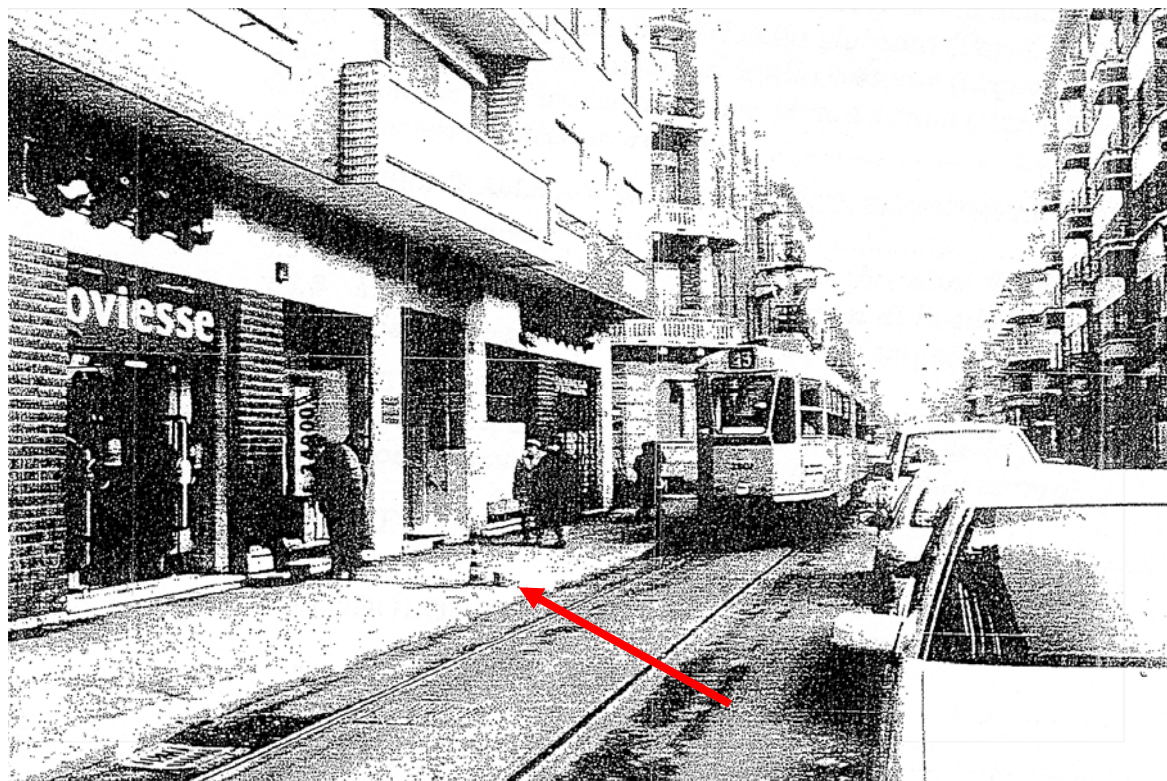
N. 2 accelerometri B&K tipo 4370

N. 2 amplificatori di carica B&K tipo 2635

N. 1 registratore DAT Sony mod. TCD-D3

N. 1 analizzatore di spettro bicanale Larson-Davis mod. LD2900

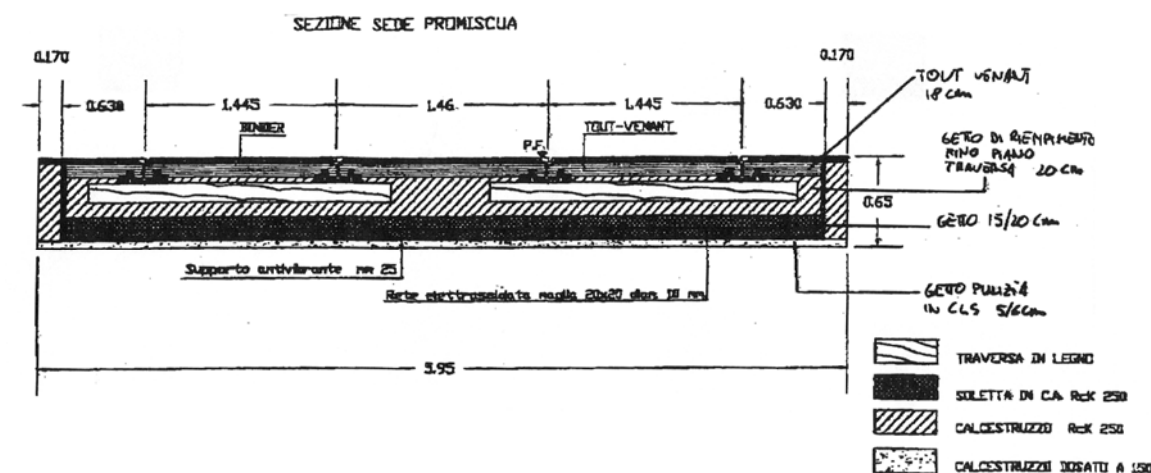
L'accelerometro è stato posto sul marciapiede, a breve distanza dalla rotaia più vicina (meno di 1m), come mostrato nella seguente figura.



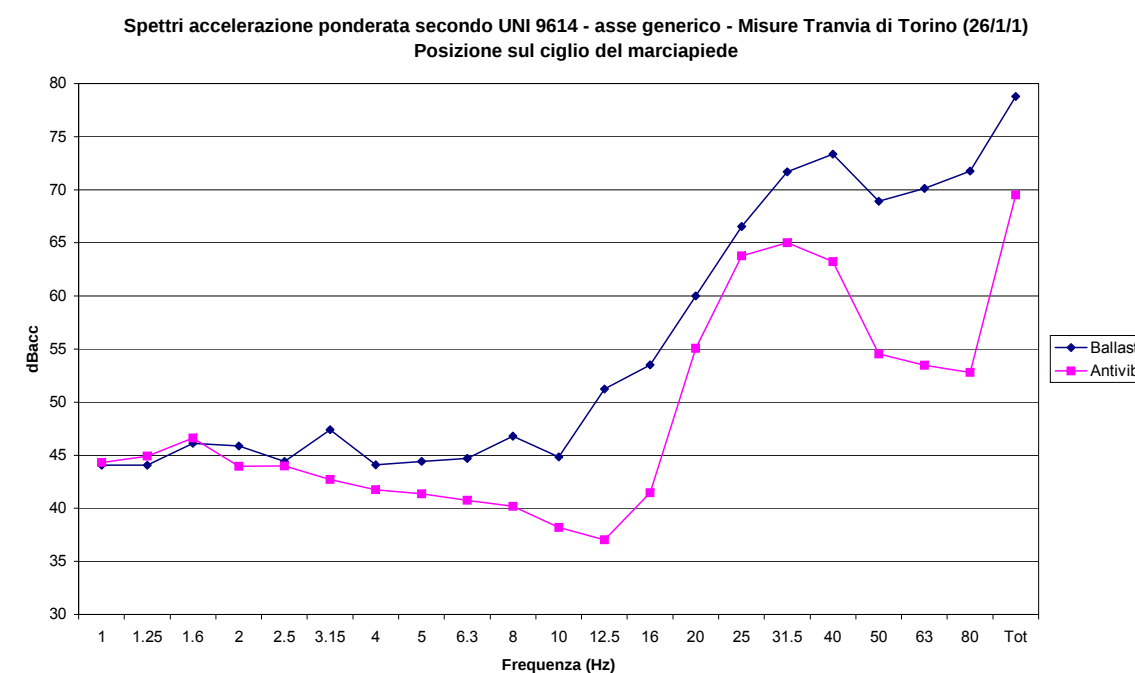
Il sistema antivibrante oggetto della prova era costituito da una soluzione a massa flottante, realizzata mediante un getto in CLS che ingloba le traversine, con successiva pavimentazione di tipo stradale in conglomerato bituminoso. La massa flottante è isolata dal basamento mediante l'interposizione di un materassino resiliente spesso 25 mm, caratterizzato dalla seguenti costanti:

rigidezza dinamica	$k_d: 0.02 \text{ N/mm}^3$
modulo elastico dinamico	$E_d: 0.5 \text{ N/mm}^2$
loss factor:	$\eta=15\%$ circa
densità:	$\rho=170 \text{ kg/m}^3$
spessore:	$s=25 \text{ mm}$

La seguente figura mostra una sezione schematica del sistema di armamento antivibrante utilizzato dalla metrotranvia di Torino.



Nel corso delle misurazioni è stato possibile campionare il passaggio di n. 11 tram nella sezione dotata di armamento tradizionale, e n. 6 tram nella sezione dotata di armamento antivibrante. La seguente figura pone a confronto gli spettri ponderati (con curva di ponderazione per asse generico secondo UNI 9614) ottenuti dalla media dei valori massimi di tutti i passaggi rilevati.



Si può notare come, nel punto di rilievo posto a brevissima distanza dal binario, in assenza di sistema antivibrante i livelli di accelerazione ponderata massimi risultino ampiamente superiori alla soglia di percezione (71 dB), con un valore complessivo di accelerazione ponderata pari a 78.8 dB, che eccede, se pur di poco, anche il limite di accettabilità diurno previsto dalla norma UNI 9614.

Viceversa, il sistema antivibrante impiegato si è rivelato molto efficace, in quanto ha causato una drastica riduzione dei livelli alle frequenze più elevate, e conseguentemente il valore complessivo di accelerazione ponderata si è ridotto a 69.5 dB, ben al di sotto della soglia di percezione.

E' anche interessante notare come lo spettro tipico del tram di Torino presenti un massimo alla frequenza di 40 Hz.

2.3.2.2 Rilievi eseguiti presso la rete metrotranviaria di Milano

La seconda campagna di rilevamento è stata eseguita dagli ing. Angelo Farina e Fabio Bozzoli in via Giambellino, incrocio con via Bruzzesi, a Milano, il giorno 7/2/2002.

E' stata utilizzata la seguente strumentazione:

Accelerometro B&K tipo 4370V no. 2137945

Accelerometro B&K tipo 4370V no. 2137946

Preamplificatore B&K Nexus type 2692 S/N 2099170

Calibratore B&K tipo 4294 S/N 1688374

Scheda acquisizione bicanale Digigram VX-Pocket V2 (24 bit, 48 kHz)

Computer portatile Dell Inspiron 8000 (P-III 1 GHz, 384 Mb RAM)

Software di analisi spettrale SpectraLab v. 4.32.16c

L'accelerometro è stato posto sul cordolo che separa la sede metrotranviaria dal viale stradale circostante, come mostrato nella seguente figura.



In questo caso l'accelerometro è stato posto ad una distanza di m 2.88 dalla rotaia più vicina.

La distanza media dall'asse dei due binari era pertanto pari a 4 ed a 7m rispettivamente.

Inoltre esiste una striscia di circa 2m, piantumata, che separa il cordolo su cui è stato installato l'accelerometro e la sede stessa della metrotranvia. E' ovvio come la maggior distanza e la

manca di una pavimentazione rigida continua portino, nel caso dei rilievi eseguiti a Milano, ad ottenere livelli di accelerazione più bassi di quelli indicati nel precedente capitolo.

Il sistema antivibrante oggetto della prova era costituito da un binario incassato in un letto artificiale drenante, e dotato di guanciali in materiale gonfiabile smorzante che circondano completamente le rotaie (materiale prodotto dalla ditta tedesca SEDRA), consentendo così un estradosso pressoché piano e percorribile. Le seguenti fotografie mostrano l'armamento suddetto e due diversi tipi di tram che percorrono la linea (n. 14).

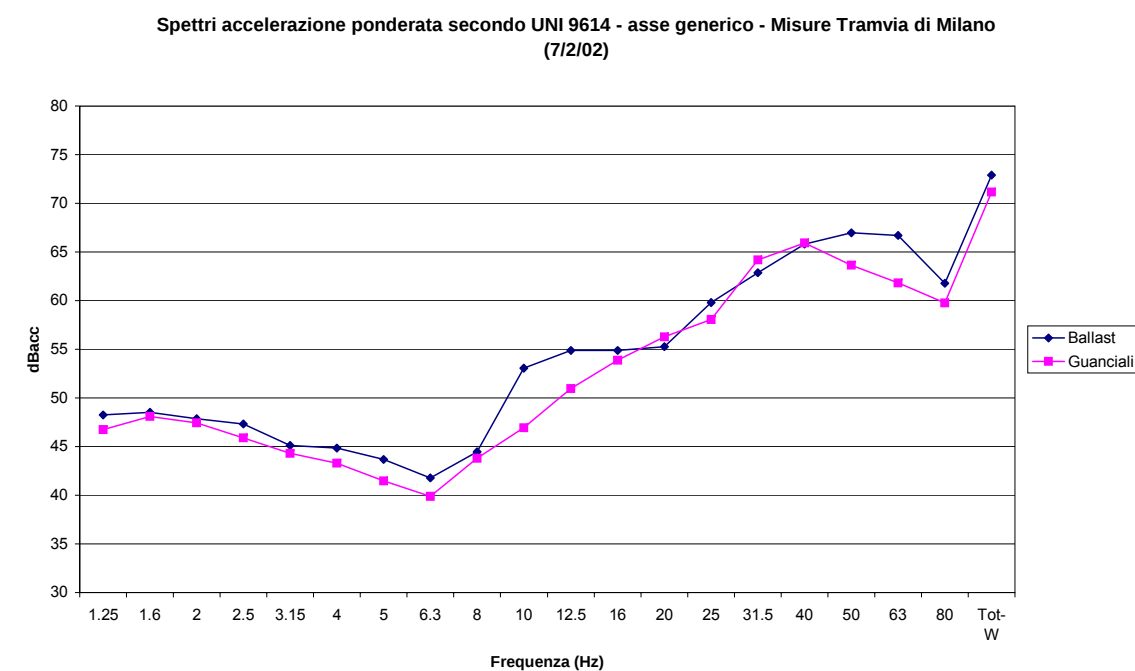




Lo scopo principale dell'utilizzo dei guanciali in gomma non è la riduzione delle vibrazioni trasmesse per via solida a bassa frequenza, ma piuttosto l'attenuazione della rumorosità irradiata per via aerea dalla rotaia, a frequenze molto più elevate di quelle prese in considerazione dalla norma UNI 9614.

Nel corso del rilevamento sono transitati in complesso n. 18 tram. 9 passaggi sono stati registrati nella sezione dotata di armamento tradizionale con ballast, mentre altri 9 sono transitati nella sezione dotata di sistema di armamento con guanciali antivibranti.

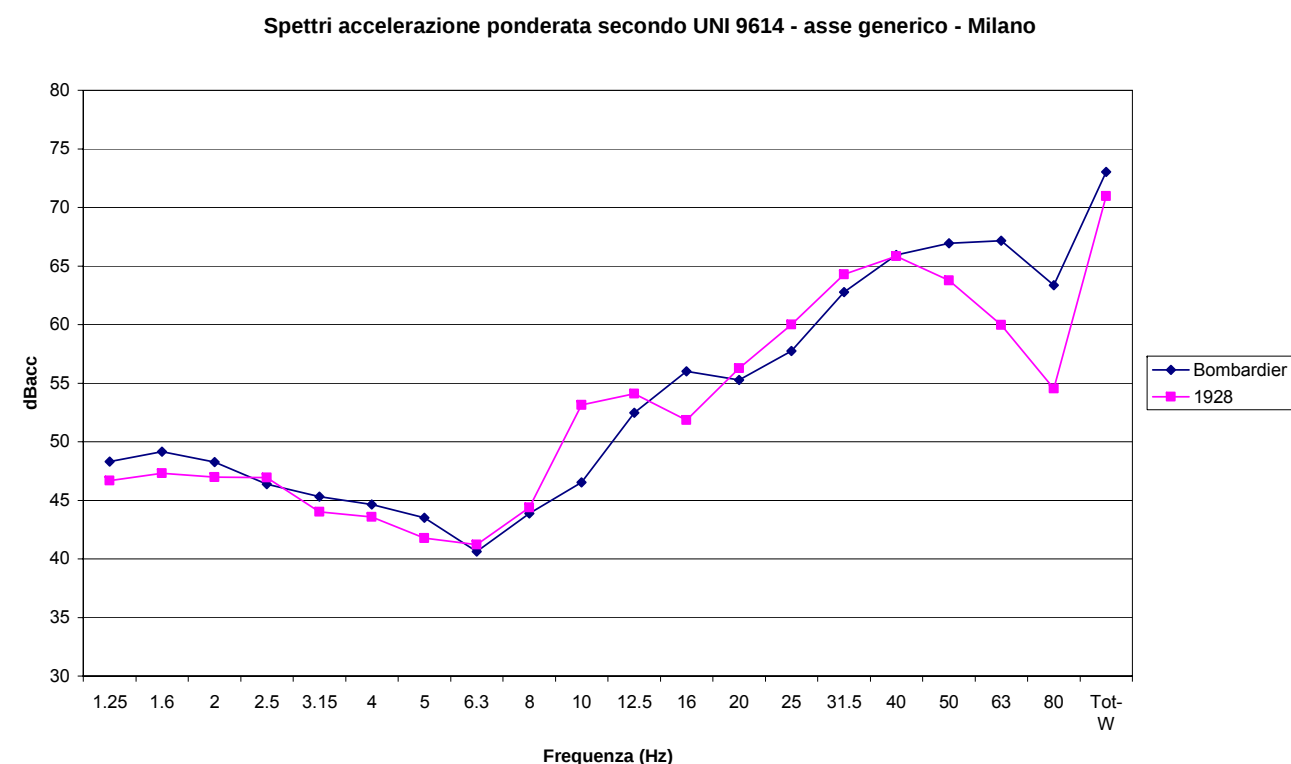
La seguente figura pone a confronto gli spettri ponderati (con curva di ponderazione per asse generico secondo UNI 9614) ottenuti dalla media dei valori massimi di tutti i passaggi rilevati.



Si può notare come in questo caso la riduzione di accelerazione indotta dal sistema antivibrante sia abbastanza modesta, dando luogo ad una variazione, sul valore complessivo di accelerazione ponderata, da 72.9 a 71.0 dB.

Come era prevedibile, i valori di accelerazione con armamento normale sono più bassi di quelli rilevati a Torino, causa la maggior distanza dell'accelerometro e la presenza della fascia non pavimentata: è interessante notare, tuttavia, come lo spettro sia complessivamente molto simile, e come il valore massimo sia alla frequenza di 50 Hz.

E' inoltre risultato che i tram di nuovo tipo (Bombardier) producono leggermente meno vibrazioni di quelli piu' vecchi (tipo 1928). La seguente figura mostra il confronto fra gli spettri medi prodotti dai due tipi di tram.



Puo' essere interessante notare che i modernissimi tram Bombardier danno luogo in realtà praticamente allo stesso spettro vibrazionale dei vecchi "tipo 1928", i quali addirittura, in virtù della maggiore massa e della minor velocità, fanno registrare un valore di accelerazione complessiva ponderata pari a 71 dB anziché 73.

2.3.2.3 Rilievi eseguiti presso la rete metrotranviaria di Potsdam

La terza campagna di rilevamento è stata eseguita dall' ing. Angelo Farina a Potsdam (Germania) in BerlinerStrasse 49 il giorno 12/2/2002, ed in ZeppelinStrasse 2/4 il giorno 13/2/2004.

E' stata utilizzata la seguente strumentazione:

Accelerometro B&K tipo 4370V no. 2137945

Accelerometro B&K tipo 4370V no. 2137946

Preamplificatore B&K Nexus type 2692 S/N 2099170

Calibratore B&K tipo 4294 S/N 1688374

Scheda acquisizione bicanale Digigram VX-Pocket V2 (24 bit, 48 kHz)

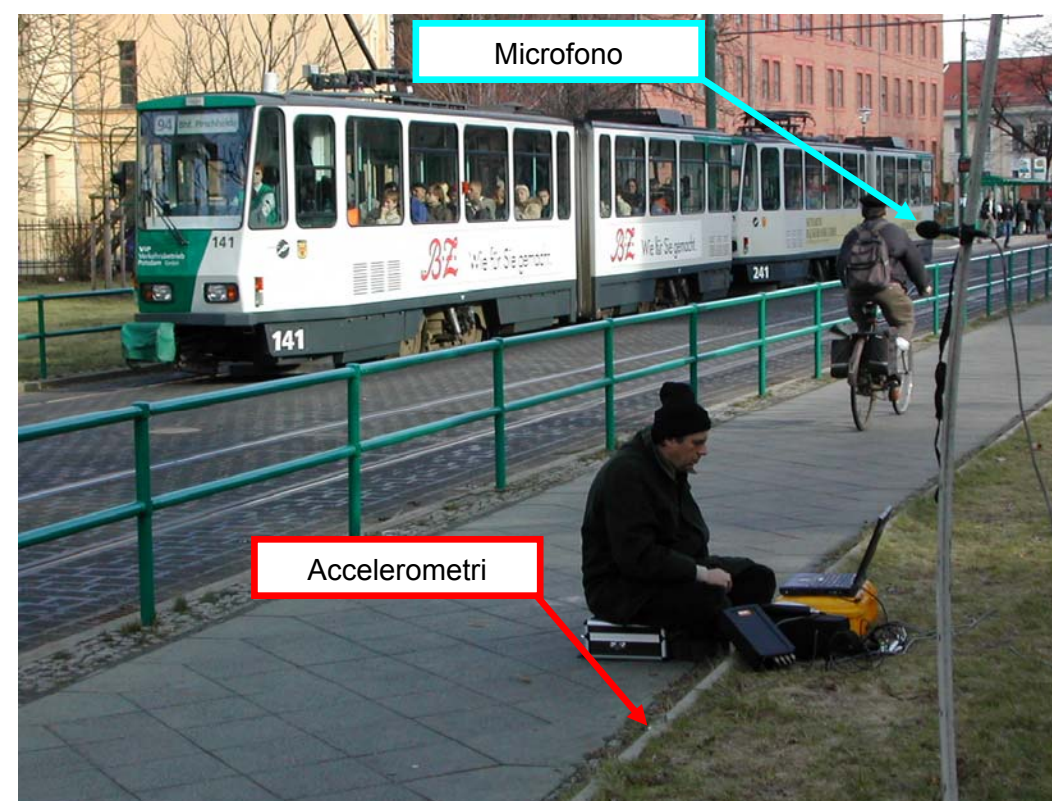
Computer portatile Dell Inspiron 8000 (P-III 1 GHz, 384 Mb RAM)

Software di analisi spettrale SpectraLab v. 4.32.16c

L'accelerometro è stato posto sul cordolo del marciapiede, come mostrato nella seguente figura.



Berliner Strasse 49



Zeppelin Strasse 4

La seguente foto mostra un particolare del fissaggio degli accelerometri sul cordolo, realizzato applicando placchette filettate mediante adesivo cianoacrilico.



Fissaggio accelerometri sul cordolo.

Nella città di Potsdam sono in circolazione due diversi tipi di tram: il Tatra (più vecchio) ed il Combino della Siemens (più recente, e leggermente meno impattante dal punto di vista acustico e vibrazionale). Il primo è visibile nella foto di Zeppelin Strasse, il secondo nella foto di Berliner Strasse.

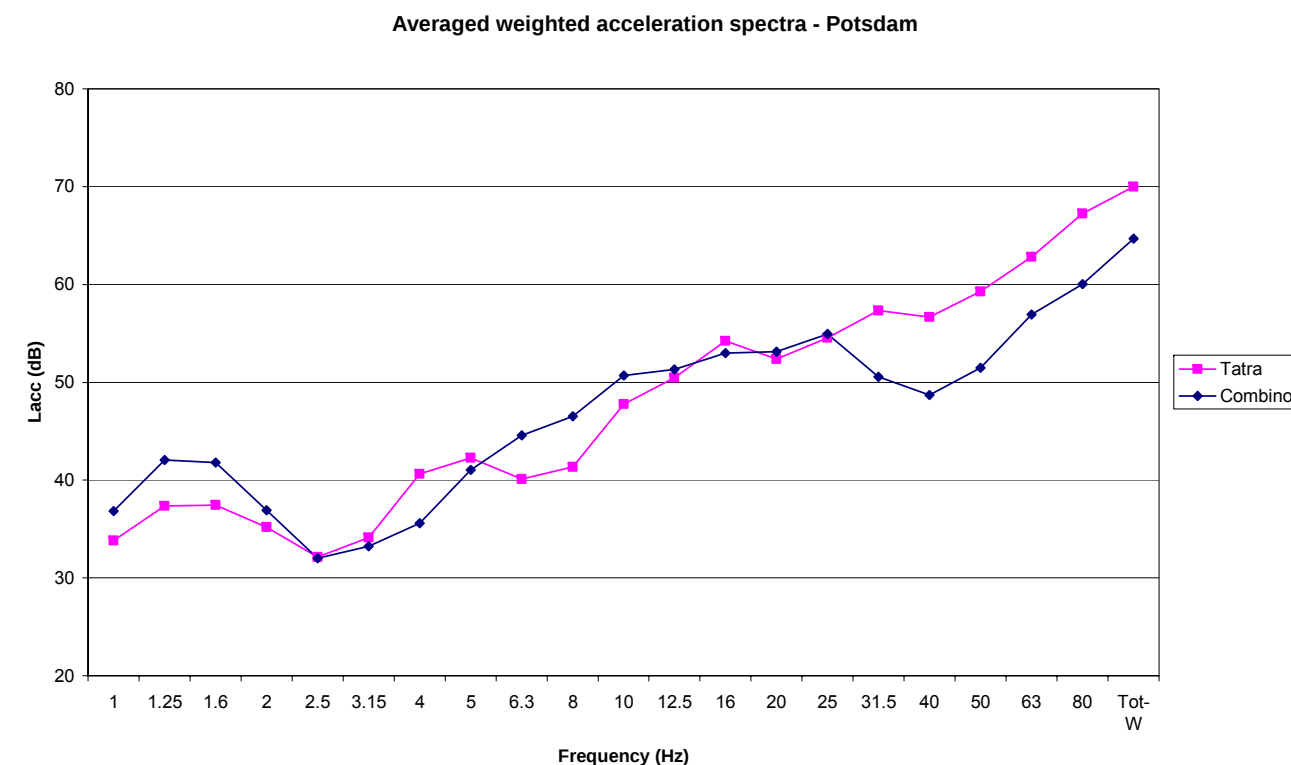
Nella sezione di Zeppelin Strasse, oltre al rilievo di accelerazione, è stato effettuato anche un rilievo fonometrico simultaneo.

La distanza degli accelerometri era, in entrambe le sezioni, di circa 6m dall'asse del binario più vicino e di circa 9m dall'asse del binario più lontano.

Nel corso dei rilevamenti sono transitati in complesso n. 37 tram. 12 passaggi sono stati registrati nella sezione su Berliner Strasse 49 (sede promiscua, armamento non antivibrante, senza guanciali in gomma) e 25 passaggi sono stati registrati nella sezione dotata di sistema di armamento con guanciali antivibranti (in sede propria, ma pur sempre non flottante) di Zeppelin Strasse.

Anche in questo caso si è ripetuto quanto già rilevato a Milano: la sola presenza dei guanciali in gomma, senza realizzare un vero sistema a massa flottante, dà luogo ad attenuazioni del fenomeno vibratorio estremamente modeste (circa 1 dB), che risulta di fatto mascherato dalla diverse condizioni geometriche delle due sezioni di rilievo (a Potsdam, al contrario di Milano, il rilievo sui due sistemi di armamento non è stato realizzato in simultanea, in occasione del passaggio dello stesso veicolo).

La seguente figura pone a confronto gli spettri ponderati (con curva di ponderazione per asse generico secondo UNI 9614) ottenuti dalla media dei valori massimi di tutti i passaggi rilevati dei tram Tatra e Combino.



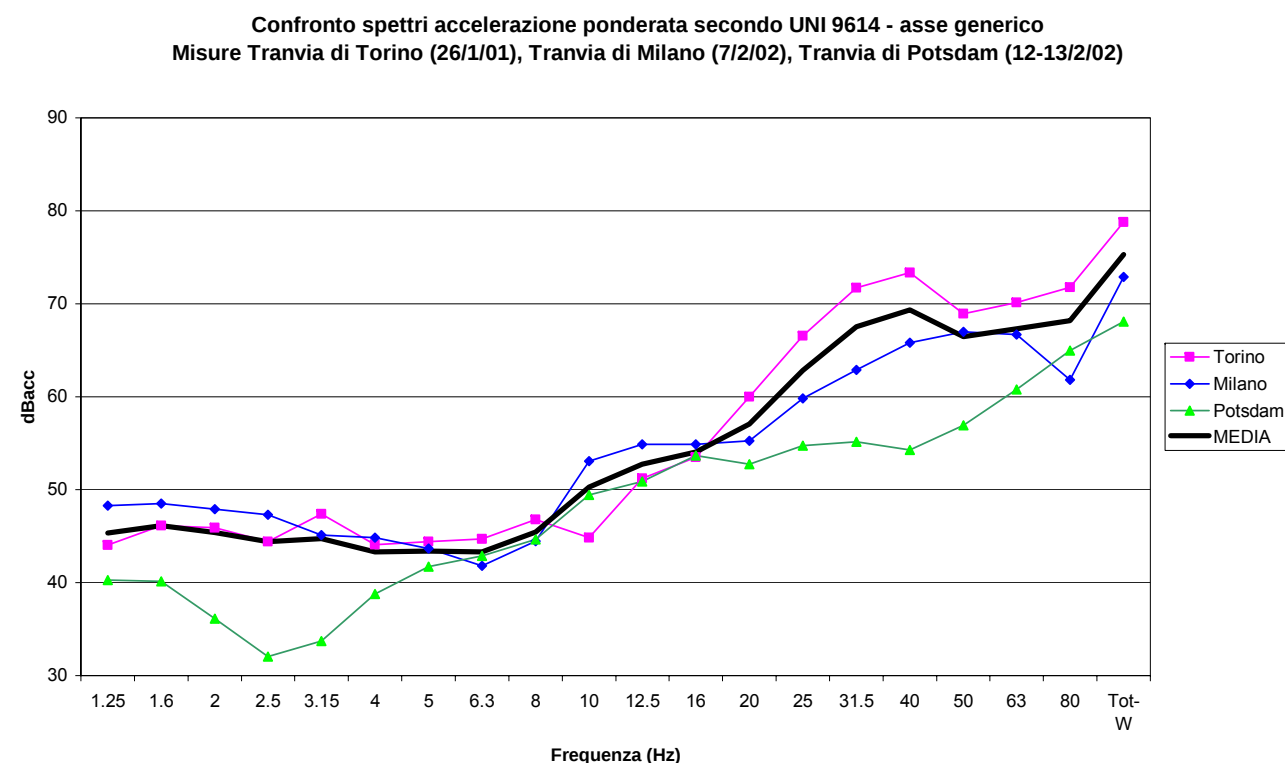
I valori complessivi ponderati sono risultati in questo caso pari rispettivamente a 70.0 dB per il tram Tatra e 64.7 dB per il tram Combino. La differenza in questo caso è significativa, e segnala un comportamento particolarmente scadente dei tram Tatra (in realtà, questi dati sono pesantemente affetti dal fatto che uno dei veicoli, passato ripetutamente avanti ed indietro dalle postazioni di rilievo, aveva in modo molto evidente una ruota difettosa). Viceversa il Combino, tram moderno e dotato di buone soluzioni ingegneristiche per la riduzione alla fonte dei fenomeni vibratorii (ruote elastiche con inserto in gomma, basse masse non ammortizzate, etc.) ha dato luogo a valori perfettamente congrui con quelli misurati a TO ed a MI, considerando che nei rilievi di Potsdam la distanza media dall'asse del binario era di circa 7.5m, mentre a Milano era di circa 5 m ed a Torino ancora inferiore, di circa 2.5 m dall'asse del binario.

2.3.3 Definizione dello spettro tipico di accelerazione

Sulla base dei risultati delle tre campagne di rilevamento, è stato definito un opportuno spettro medio tipico, riferito ad una distanza di m 5 dalla rotaia più vicina (valore intermedio fra quelli impiegati nelle tre campagne suddette, e rappresentativo della distanza fra i recettori e la rotaia nelle sezioni più critiche della metrotranvia di Parma).

Ciò è stato possibile interpolando fra gli spettri medi ottenuti dalle campagne di rilevamento, ed utilizzando per l'interpolazione la funzione di propagazione definita al par. 2.1.2.

La seguente figura mostra gli spettri rilevati, in assenza di sistemi antivibranti, a Torino, a Milano e a Potsdam, e la stima dello spettro di emissione ritenuta valida per il caso di Parma (media dei tre).



Il valore complessivo di accelerazione ponderata dello spettro stimato, come media di tutte le misure, è pari a 73.5 dB alla distanza di m 5 dall'asse del binario, in assenza di interventi antivibranti sull'armamento (ipotizzando quindi un sistema di armamento perfettamente rigido, quali un attacco diretto su soletta in CLS non flottante). Esso è dunque inferiore di circa 3 dB il limite di accettabilità diurno per edifici residenziali. Tuttavia, ipotizzando in media una amplificazione strutturale di 12 dB nei solai degli edifici particolarmente suscettibili al fenomeno, si manifesta l'esigenza di ottenere una attenuazione delle vibrazioni mediante sistema antivibrante pari a circa 9 dB.

Considerando poi i particolari casi di edifici particolarmente sensibili, quale l'ospedale o alcuni dipartimenti del Campus Universitario, presso i quali occorre garantire un valore inferiore alla soglia di percezione (71 dB), si conclude che è necessario ottenere una ulteriore attenuazione di almeno altri 7-8 dB, cosa che richiede che, anche in presenza dell'armamento antivibrante, la distanza della linea da tali edifici sensibili sia perlomeno pari a 4 volte quella di riferimento, cioè sia maggiore di 20 m.

2.3.4 Descrizione dei sistemi di armamento antivibrante

Dal punto di vista dell'identificazione delle tipologie di armamento da adottare lungo le linee del sistema di trasporto su ferro di Parma, possono essere considerate fondamentalmente tre zone :

- la tratta di linea in galleria dove viene adottata la soluzione di armamento denominata "Milano modificato" con rotaie posate su piastra in c.a.;
- la tratta di linea a raso nelle aree aperte o esterne all'abitato e nelle aree interne al deposito dove è possibile ricorrere all'utilizzo di rotaie a gola posate su ballast;
- la tratta di linea a raso dove considerazioni di compatibilità con il contesto urbano (ambiente, carrabilità, pedonalità e arredo urbano) consigliano di adottare soluzioni di armamento di tipo tranviario, ovvero binari con rotaie a gola e scambi tranviari.

Le soluzioni di armamento individuate intendono soddisfare i seguenti requisiti fondamentali:

- a) contenimento delle emissioni sonore e delle vibrazioni;
- b) gradevolezza estetica della sovrastruttura e sua compatibilità con l'ambiente urbano in cui si inserisce;
- c) stabilità geometrica del binario e durabilità delle pavimentazioni;
- d) facilità ed economicità di manutenzione, grazie anche all'impiego del minor numero possibile di componenti;
- e) elevato isolamento elettrico del binario, così da contenere le correnti disperse e la corrosione elettrolitica delle tubazioni presenti nel sottosuolo.

Per soddisfare queste esigenze, è stato studiato un articolato sistema di sovrastruttura tranviaria che, grazie a un criterio modulare di progettazione, consente di adattarsi alle diverse situazioni che possono ricorrere in un territorio urbanizzato.

Per la tratta di linea in galleria ed in promiscuo con la viabilità, è stato adottato un sistema di sovrastruttura basato su un binario di tipo "massivo", ovvero su piastra in c.a.. In tali tratte, caratterizzate dalla posa dei binari vicino agli edifici, l'armamento viene realizzato nella versione a massa flottante, con interposizione di uno strato resiliente tra la fondazione e la piastra in c.a., dando così luogo a un sistema "massa-molla".

I seguenti due tre sottoparagrafi mostrano in dettaglio i tre sistemi di armamento previsti, con indicazioni tecniche sulle soluzioni antivibranti impiegate.

2.3.4.1 BINARIO SU PLATEA IN C.A. IN GALLERIA

L'armamento "Milano modificato" rappresenta l'evoluzione del classico armamento Milano della Metropolitane di Milano, dotato rotaie del tipo 50 Uni.

Si tratta di un binario su platea in c.a.; l'attacco è di tipo indiretto:

- le piastre sono fissate alla platea tramite ancoranti in acciaio ad alta resistenza a fissaggio chimico, previa foratura del cls. per mezzo di carotatrice. In rettilineo ciascuna piastra è fissata tramite due ancoranti, mentre nelle curve si adottano quattro ancoranti;
- gli organi di attacco di primo livello sono costituiti da chiavarde A 50-60 UNI 3557 e da ramponi elastici tipo Skl 3.

Fra la suola delle rotaie e le piastre di attacco sono interposte piastre sottorotaia in Noene (materiale elastomerico caratterizzato da elevatissimo smorzamento) dello spessore di 5 mm.

Fra il piano del ferro e l'estradosso della platea viene tenuto un dislivello tale che al di sotto delle piastre di attacco resti uno spazio di altezza attorno ai 4 cm. Dopo aver realizzato allineamento e livello del binario, in questo spazio viene formato un massello costituito da una speciale malta di sabbia di quarzo e resina epossidica; in questo modo vengono recuperate le tolleranze costruttive della platea.

Nella versione "modificata", al di sotto della piastra di attacco è collocata una sottopiastra elastomerica in polierutano cellulare, dello spessore di 12 mm. Tale sottopiastra è incollata alla superficie inferiore della piastra, in modo da consentire la rinalzatura della suddetta malta di riempimento dello spazio residuo rispetto all'estradosso della platea.

L'elasticità conferita al binario dalle suddette sottopiastre elastomeriche ha due finalità:

- tagliare le vibrazioni trasmesse alle strutture circostanti e all'ambiente;
- ridurre la propensione alla formazione dell'usura ondulatoria.

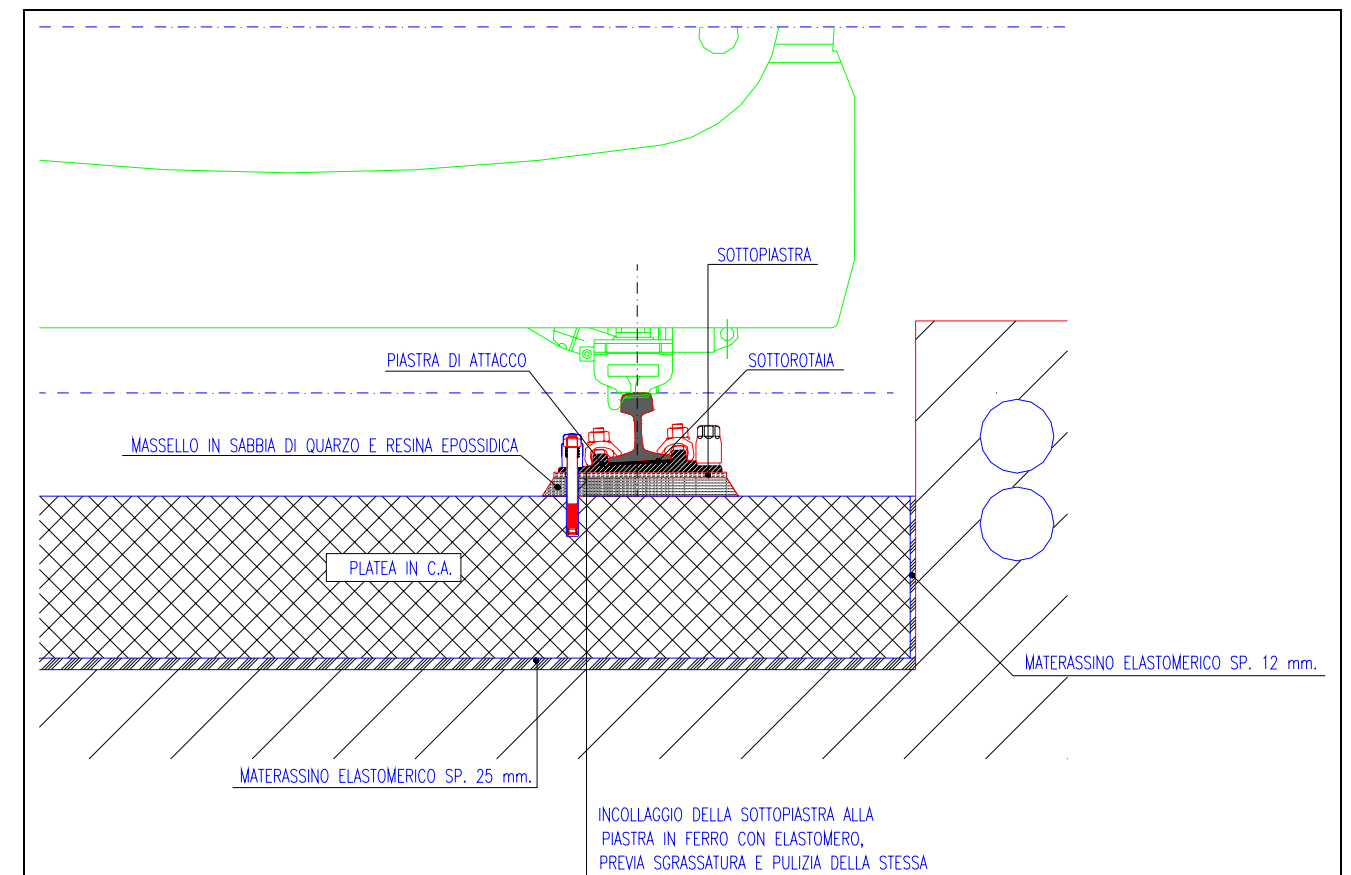
Inoltre per aumentare l'effetto smorzante è stata prevista la posa, al di sotto ed ai lati della platea in c.a., di un materassino elastomerico dello spessore di 12 mm ai lati e di 25 mm alla base.

L'elastomero del materassino antivibrante possiede le seguenti caratteristiche:

- elevata resistenza agli agenti chimici e biologici;
- piccola deformazione permanente ("compression set");
- modulo di elasticità dinamico il più possibile vicino a quello statico, con rigidità dinamica bassa in valore assoluto;

- elevato smorzamento;
- elevata resistenza ai carichi dinamici e ai picchi di sollecitazione.

La seguente figura mostra una particolare del sistema di armamento antivibrante che verrà impiegato nelle gallerie.



2.3.4.2 BINARIO SU PLATEA IN C.A. CON ROTAIE A GOLA

Le rotaie a gola in rettilineo sono del tipo Ri 60 ed il passo tra gli appoggi è di 0,75 m; in curva le rotaie sono del tipo Ic ed il passo fra gli appoggi è di 0,67 m.

Le rotaie sono connesse a una platea in c.a. gettata in opera (solettone di regolamento) tramite attacchi elastici, comprendenti piastre in acciaio, ramponi tipo SKL3 e sottosuola in materiale resiliente. Ciascuna piastra di attacco è vincolata al solettone di regolamento tramite due bulloni in acciaio.

Fra le piastre di attacco e il solettone è interposto un massello di sabbia di quarzo e resina epossidica, dello spessore di circa 30 mm (di fatto questo spessore varia nei limiti della tolleranza della quota di getto del solettone di regolamento).

Questo tipo di armamento realizza un funzionamento del tipo cosiddetto “a massa flottante”. Questa è costituita dalla piastra in c.a. gettata in opera (solettone di regolamento); lo stadio elastico è costituito da un materassino elastomerico, interposto fra la piastra e la fondazione. La piastra è totalmente isolata dal supporto cementizio di base; l'appropriata flessibilità del materassino e l'assenza di qualunque ente di collegamento rigido garantiscono un efficace taglio delle vibrazioni.

L'elastomero del materassino antivibrante possiede le seguenti caratteristiche:

- elevata resistenza agli agenti chimici e biologici;
- piccola deformazione permanente (“compression set”);
- modulo di elasticità dinamico il più possibile vicino a quello statico, con rigidità dinamica bassa in valore assoluto;
- elevato smorzamento;
- elevata resistenza ai carichi dinamici e ai picchi di sollecitazione.

Il sistema armamento si completa con profili estrusi in gomma, disposti sui fianchi delle rotaie a gola e interposti fra le rotaie stesse e la pavimentazione. Tali profili assolvono a una molteplicità di funzioni.

1) Prevengono l'ammaloramento delle pavimentazioni stradali a ridosso delle rotaie a gola, che è causato dalla concomitanza di una serie di ragioni:

- la disuniformità del fondo;
- i movimenti del binario al transito dei rotabili; tali movimenti generano un effetto “pompa” che svelle le pavimentazioni, tanto più quanto maggiore è l'elasticità del binario;
- nel caso di pavimentazione in conglomerato bituminoso, la difficoltà di costipare adeguatamente il conglomerato stesso lungo le rotaie.

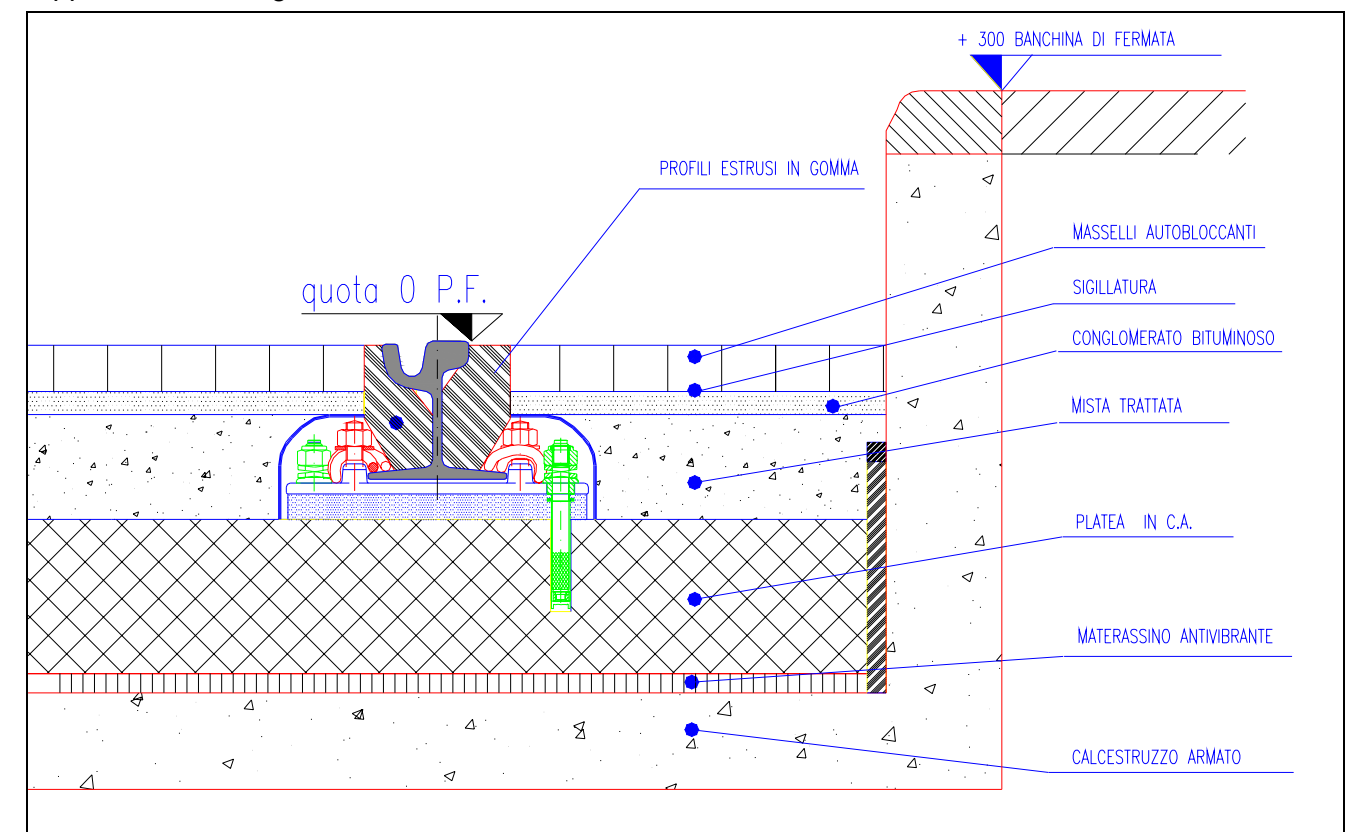
2) Prevengono il contatto fra i cerchioni dei rotabili e la pavimentazione; questa funzione è particolarmente importante quando i rotabili sono dotati di cerchioni larghi. Coerentemente con questa funzione, il profilo collocato all'esterno delle rotaie (rispetto allo scartamento) è più largo di quello all'interno.

3) Forniscono un non trascurabile contributo al contenimento delle emissioni vibro-acustiche. L'importanza di questa funzione deriva anche dal fatto che le rotaie a gola in generale, e quelle della famiglia Ri 60/Ri 59 in particolare, sono piuttosto rumorose a causa della loro forma.

4) Migliorano l'isolamento elettrico del binario, con beneficio nei riguardi della protezione contro le correnti disperse.

Si prevede l'applicazione dei profili estrusi anche nel caso di realizzazioni con binario inerbito, onde prevenire i potenziali problemi di questo tipo di armamento: i profili, mantenendo il manto erboso discosto dalle superfici di rotolamento, evita il possibile degrado dell'aderenza e assicura un adeguato isolamento elettrico.

La seguente figura mostra un particolare del binario a massa flottante, nella versione con pavimentazione stradale. Quella con rivestimento inerbito differisce solo per lo strato di finitura superficiale, e presenta le stesse caratteristiche antivibranti derivanti dalla massa flottante rappresentata in figura.



2.3.4.3 ARMAMENTO SU BALLAST CON ROTAIE A GOLA

Il binario su ballast presenta le seguenti caratteristiche:

- rotaie a gola;
- traverse biblocco;
- attacchi tipo Nablà;
- sottorotaie in gomma neoprenica;
- spessore di ballast di 24 cm sotto traversa.

Rispetto agli altri tipi di traverse, il principale vantaggio della traversa biblocco, grazie alle quattro facce laterali di ciascun blocco, è la più elevata stabilità trasversale. Questa maggiore stabilità permette, tra l'altro, l'impiego delle traverse biblocco in curve di raggio anche molto piccolo.

Le traverse sono poste a passo di 75 cm in rettilineo, di 67 cm in curva.

Il sistema di attacco riduce al minimo il materiale minuto di armamento. Non vi è piastra di attacco; l'inclinazione 1/20 è conferita grazie alla forma della traversa.

Il ballast è costituito da pietrisco ottenuto per frantumazione di rocce tenaci, cioè dure senza essere fragili. Sono adeguate rocce di origine endogena: basalti, porfidi, graniti. Come granulometria, il pietrisco ha pezzatura passante al vaglio a fori circolari di 6 cm, ma non passante al vaglio a fori circolari di 3 cm.

La soluzione del binario su ballast inerbito viene adottata sulla tratta della linea di trasporto in progetto al di fuori dell'ambito urbano fatta eccezione per le tratte di sottopasso alla viabilità esistente e futura dove si farà ricorso alla soluzione su ballast con superficie carrabile ai mezzi di soccorso/servizio (masselli autobloccanti o piastre in cls).

Nella soluzione con ballast inerbito vengono utilizzate rotaie a gola Ri60.

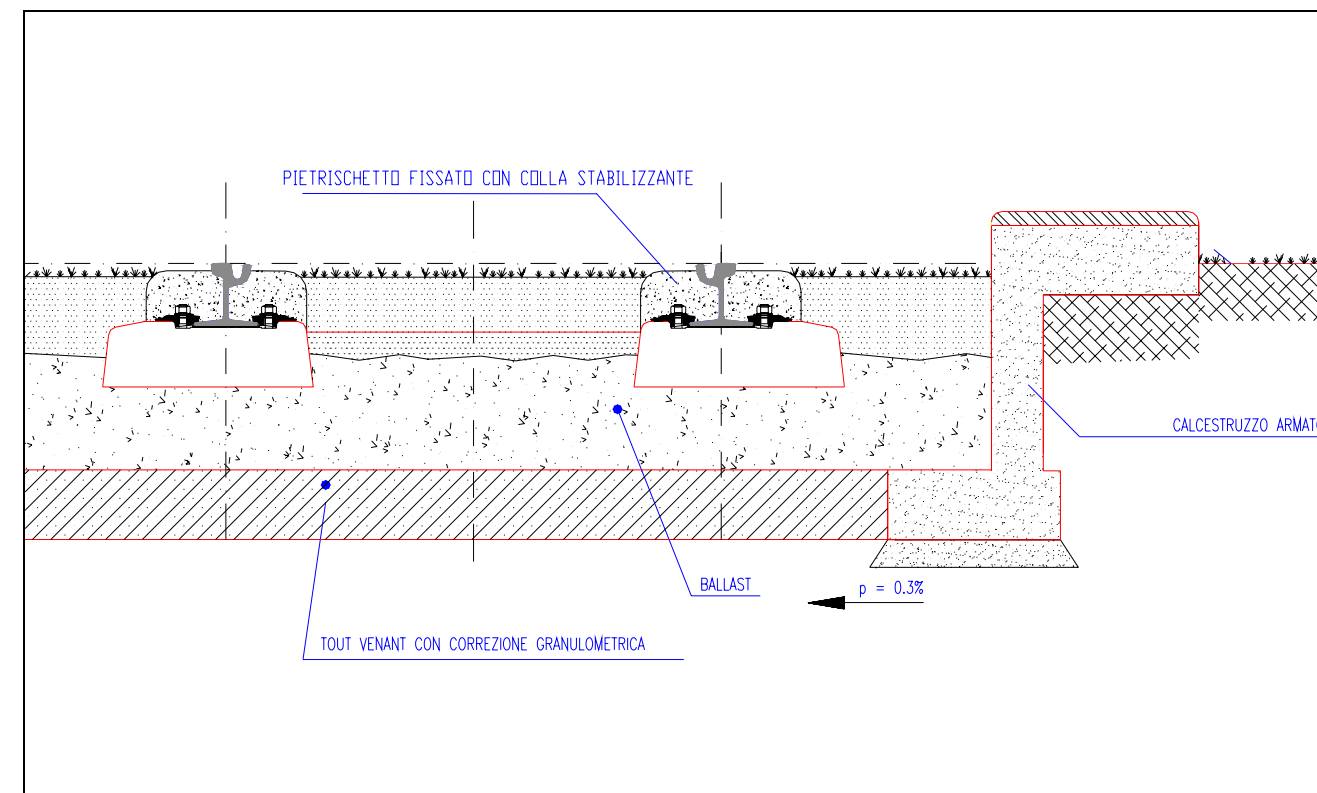
Su entrambi i lati di ciascuna rotaia sono collocati grossi profili in gomma, che mantengono il manto erboso discosto dalle superfici di rotolamento. Per il binario inerbito con rotaie Ic, che ricorre in tratte relativamente brevi, si è ritenuto opportuno di evitare di realizzare altri profili, di dimensioni diverse rispetto a quelli per le Ri60, e di ottenere lo stesso risultato tramite "cordoli" di pietrischetto fissati con colla stabilizzante (del tipo usato per la stabilizzazione del ballast).

La soluzione del binario inerbito ha i seguenti vantaggi:

- la resa estetica e ambientale è eccellente, grazie al manto erboso tutto allo stesso livello del piano del ferro;
- la contaminazione delle superfici di rotolamento da parte di terra o erba è prevenuta grazie ai grossi profili in gomma che vengono interposti fra il manto vegetale e le rotaie.

Va comunque chiarito che la soluzione qui prevista di binario inerbito non ha particolari prestazioni antivibranti (come peraltro le prove eseguite a Milano e riportate nel cap. 2.3.2.2 hanno mostrato con chiarezza).

La seguente figura mostra un particolare costruttivo del binario su ballast inerbito. E' ovvio che all'interno del deposito e nelle zone comunque non accessibili al pubblico, è supefluo operare l'inerbimento, e si lascia il solo ballast ad affiorare.



2.3.5 Valutazione dell'attenuazione delle vibrazioni ottenuto grazie all'armamento antivibrante

Vengono qui forniti gli elementi che hanno costituito la base del dimensionamento del materassino antivibrante continuo impiegato per la tecnica di mitigazione a masa flottante, il cui impiego è previsto in galleria, e nelle tratte a raso realizzate in aree in cui la distanza dagli edifici risulta inferiore a 50m.

Innanzitutto lo spessore complessivo della zattera flottante è pari all'incirca a 350 mm., nella soluzione di armamento per galleria, rivo di sovrastuttura di pavimentazione a filo del piano del ferro. La soluzione a raso, invece, dà luogo ad uno spessore complessivo della massa flottante pari a ben 420 mm, e quindi avrà sicuramente prestazioni antivibranti ancora superiori.

Assumendo una densità media della soletta di CLS pari a 2400 kg/m^3 , ciò corrisponde ad una massa per metro quadrato di 840 kg/m^2 . La pressione di contatto scaricata sullo strato antivibrante, nell'ipotesi B (strato uniforme), è quindi pari a circa 8240 Pa.

L'altro parametro fondamentale onde definire la cedevolezza massima dello strato antivibrante è costituita dall'abbassamento massimo sotto carico della rotaia. Si assume qui un valore limite di 4 mm, che è un ragionevole compromesso fra il garantire una sufficiente precisione geometrica del sistema e consentire una adeguata attenuazione delle vibrazioni. Tale valore è un po' più elevato del valore specificato normalmente per le linee ferroviarie ad alta velocità (2mm) e per quelle normali (3 mm), in considerazione del fatto che una linea metrotranviaria urbana è comunque caratterizzata da basse velocità, e che il maggior consumo energetico indotto dal cedimento sotto carico è comunque marginale rispetto al consumo energetico totale.

La determinazione del cedimento statico sotto il carico costituito dagli assali in transito richiede di ipotizzare una “area di influenza” su cui il carico concentrato viene distribuito. Ciò è relativamente facile nell’ipotesi di piastra su suolo elastico alla Winkler.

Il carico concentrato è costituito da un singolo assale, che esercita una forza pari a circa 31.500 N (come argomentato nel cap. 2.3.1) alla base della traversina. Tale carico si diffonde poi nella piastra, e si suppone che, in caso di appoggio uniforme della stessa, dia luogo ad una pressione uniforme su una striscia lunga 1m e larga m 2.50. La sovrappressione causata dal carico del treno risulta dunque pari a 12600 Pa, ed è dunque leggermente superiore alla pressione statica.

Ciò porta alla scelta di un materassino antivibrante avente le seguenti caratteristiche tipiche:

Spessore: 25 mm

Densità: 100-200 kg/m³

carico statico permanente massimo: 10.000 Pa

carico statico+dinamico max in transitorio: 50.000 Pa

Modulo di elasticità dinamico (40 Hz): < 350.000 Pa

Modulo di taglio dinamico: < 100.000 Pa

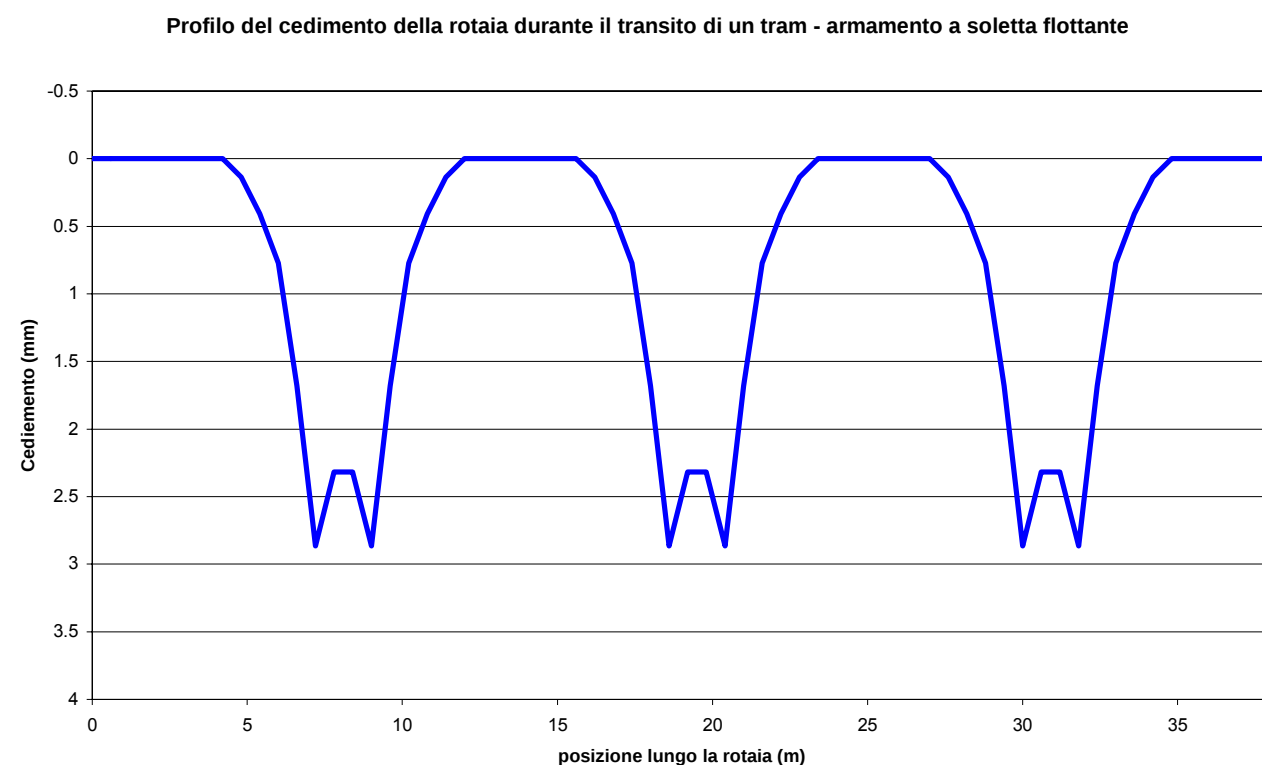
Fattore di perdita meccanico: > 0.2

Frequenza naturale del sistema massa-molla (sotto un carico statico di 8240 Pa): 20 Hz

Frequenza effettiva di risonanza sotto il carico del treno (8240+12600 Pa): 13 Hz

Esistono sul mercato numerosi prodotti con caratteristiche meccaniche idonee all’ottenimento delle prestazioni suddette, sia a base di neoprene espanso, sia a base di poliuretano espanso.

La valutazione del cedimento sotto carico di un sistema con tali prestazioni meccaniche porta all’ottenimento del seguente grafico:

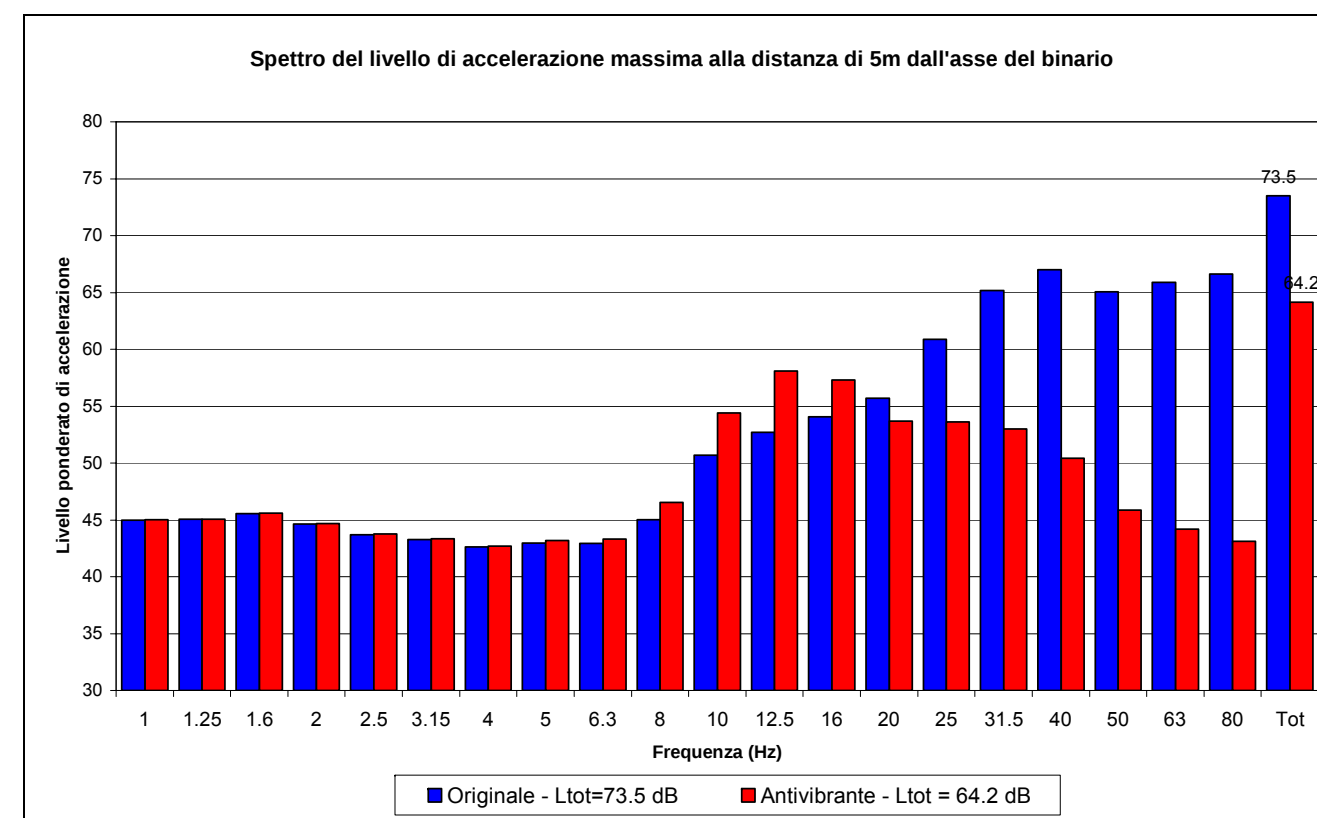


Si osserva che il cedimento è sempre inferiore ai 3 mm, e quindi non produce inconvenienti di sorta dal punto di vista del mantenimento della geometria del piano del ferro.

E’ dunque possibile, partendo dallo spettro tipico di accelerazione dei sistemi di armamento privi di massa flottante riportati al cap.2.3.3, ed introducendo l’attenuazione calcolata sulla base della teoria illustrata nel precedente cap.2.1.5, determinare lo spettro di accelerazione che si avrà ad una distanza di m 5 dall’asse del binario.

Sulla base di tale calcolo, si è evidenziata una attenuazione del livello complessivo di accelerazione ponderata pari a 9.3 dB (da 73.5 a 64.2 dB), che è esattamente il valore richiesto per il sistema antivibrante secondo le valutazioni riportate al cap. 2.3.3.

La seguente figura mostra il risultato di tale calcolo.



2.3.6 Valutazione dell'impatto vibrazionale in condizioni di esercizio

Al fine di rappresentare graficamente la distribuzione spaziale dei livelli di vibrazioni sul territorio che si svilupperanno a seguito della realizzazione della metrotranvia di Parma, si è fatto impiego del codice di calcolo numerico MAPPAVIB, che opera in accordo alla formulazione analitica presentata nel cap. 2.1.2.

Si tratta di un insieme di programmi di calcolo per PC, in grado di eseguire la mappatura del livello complessivo di accelerazione ponderata in un'area pianeggiante, considerando sorgenti di vibrazioni caratterizzate da uno spettro noto ad una distanza di riferimento d_0 dal punto di emissione compresa fra 10 m e 25 m.

Introducendo le caratteristiche di propagazione del terreno considerato, costituite dal fattore di perdita η e dalla velocità di propagazione c , un primo programma calcola la legge di propagazione con la distanza d a ciascuna frequenza f mediante la relazione:

$$a(d, f) = a(d_0, f) \cdot \sqrt{\frac{d_0}{d}} \cdot e^{-2 \cdot \pi \cdot \eta \cdot f / c}$$

Viene quindi calcolato, applicando la curva di ponderazione in frequenza prevista dalla norma UNI 9614 (asse generico), il valore complessivo ponderato $a_w(d)$, mediante la relazione:

$$a_w(d) = \sqrt{\sum_f [a(d, f) \cdot w(f)]^2}$$

Viene quindi creato un file che contiene, per ciascuna sorgente, il valore dell'accelerazione complessiva ponderata ad ogni distanza compresa fra d_0 e 100 m, con passo di 1 m.

Un secondo programma consente poi la combinazione delle emissioni vibrazionali di più sorgenti sonore: si introducono infatti le coordinate planimetriche e la profondità nel sottosuolo di ciascuna sorgente sonora, le coordinate estreme dell'area da studiare, nonché il numero di suddivisioni secondo X ed Y dell'area stessa. Il programma provvede quindi al calcolo, in ciascun punto della griglia così definita, del livello complessivo ponderato di accelerazione, tenendo conto del contributo di tutte le sorgenti mediante somma energetica delle accelerazioni prodotte da ciascuna di esse:

$$L_{a,w} = 10 \cdot \lg \left[\frac{\sum_{i=1}^{N_s} [a(d_i)]^2}{a_{rif}^2} \right]$$

Il risultato del calcolo è salvato in un file .GRD, da cui il programma Surfer (™) costruisce poi la mappatura iso-accelerazione.

Nel caso di un convoglio in transito lungo una linea, si considera una sola sorgente di vibrazioni (al fine di determinare in ciascun punto ricettore il valore massimo istantaneo), che viene sempre posizionata, per il calcolo del livello in ciascun nodo della griglia, nel punto della linea più vicino ad esso.

Per quanto riguarda le costanti di propagazione, l'analisi geologica effettuata mostra che il terreno su cui le macchine andranno ad operare è costituito da una alternanza di strati di due

materiali con proprietà meccaniche diverse: i due materiali sono denominati G1 e G2, e sono costituiti il primo da sabbia, limo o altri materiali incoerenti, ed il secondo da terreno argilloso compatto. Le costanti di propagazione utilizzate nel presente studio per caratterizzare tali due tipi geolitologici sono le seguenti:

Tipo Geolitologico	Fattore di Perdita η	Velocità di propagazione c (m/s)
G1	0.1	400
G2	0.2	1200

Al fine della valutazione di impatto vibrazionale risulta più critica la condizione di propagazione in terreno di tipo G2, pertanto tali valori delle costanti di propagazione sono stati impiegati nel calcolo della mappature dei livelli di vibrazioni.

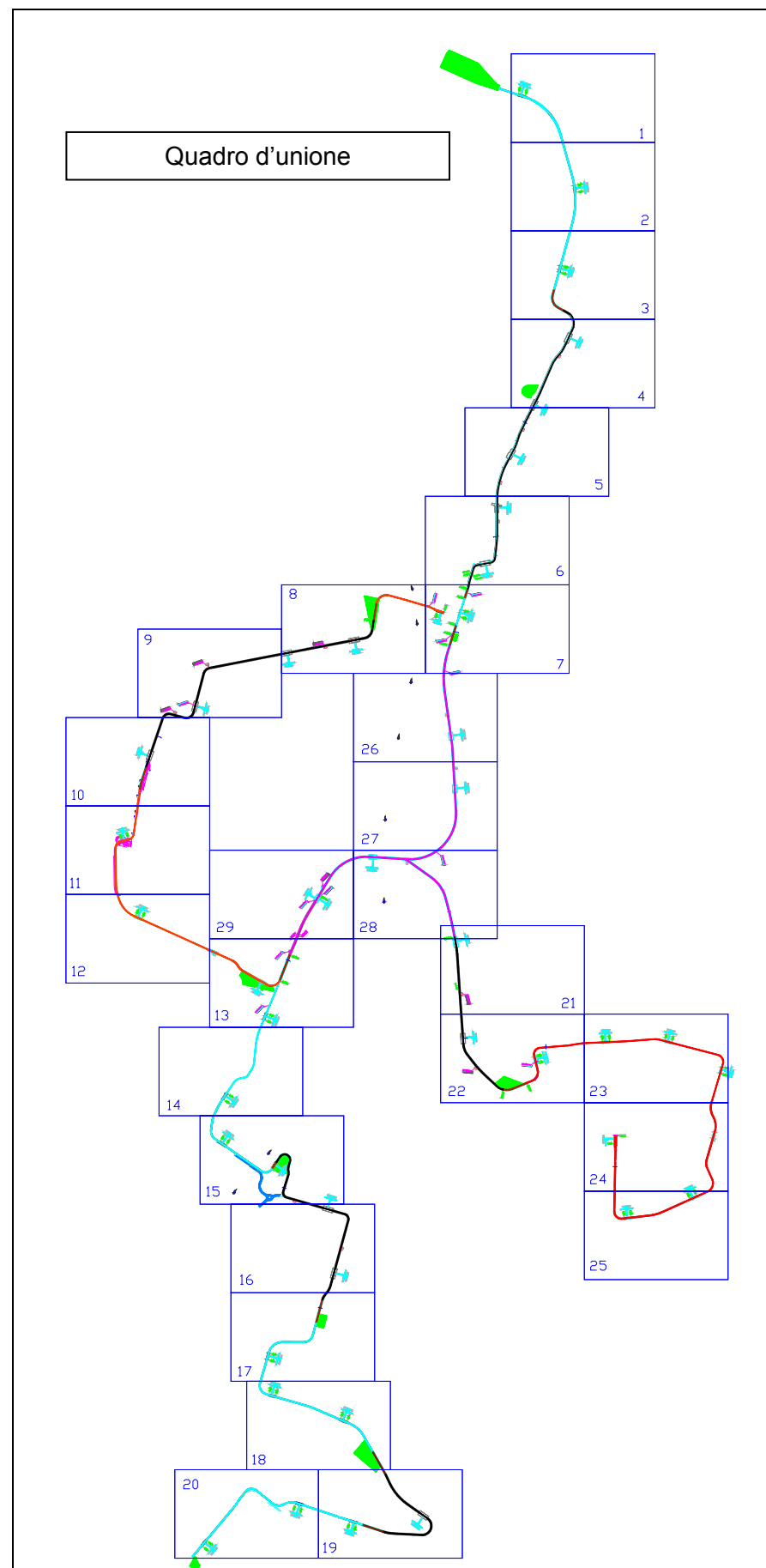
Occorre qui precisare che il calcolo eseguito dal programma Mappavib è semplificato, in quanto:

- Non tiene conto della composizione del terreno in strati con proprietà meccaniche diverse
- Non considera la presenza di una "crosta" superficiale di rivestimento del terreno, che invece in ambito urbano è sovente presente, e che può dare luogo sia ad un aumento delle sollecitazioni che viaggiano superficialmente, sia ad una attenuazione delle onde "di volume" che viaggiano nel sottosuolo.
- Considera il terreno omogeneo, quindi non sono considerati manufatti, fondazioni, tubi, cavidotti, ed ogni altra anomalia che potrebbe rendere anisotropa la propagazione
- Il modello stima infine il livello di accelerazione ponderata sulla superficie terrestre, ipotizzata pianeggiante e consolidata.
- I livelli di vibrazione che si sviluppano al centro dei solai di edifici sono in generale significativamente più alti dei livelli al suolo, allorché la frequenza di eccitazione si accoppia con la frequenza di risonanza strutturale degli stessi.
- Poiché le vibrazioni generate da veicoli di tipo tranviari presentano la massima energia attorno ai 40 Hz, si possono effettivamente verificare fenomeni di risonanza, con amplificazioni sino a + 12 dB rispetto ai livelli al suolo.

A seguito dei motivi di incertezza suddetti, ed avendo compreso che non è possibile valutare per via previsionale la peculiare risposta strutturale di ciascun edificio, si può ritenere che i risultati della simulazione effettuata siano affetti da una incertezza crescente con la distanza dalla sorgente di vibrazioni. Si può indicare una incertezza complessiva (intervallo di confidenza al 90%) di circa 2 dB a breve distanza (da 5 a 20 m), crescente poi di circa 1 dB ogni 10m di propagazione. A 100m di distanza si raggiunge quindi una incertezza di 10 dB.

Sono state definite 29 aree di mappatura, ciascuna aventi dimensioni di m 784 x 484, su ciascuna delle quali è stata calcolata una griglia di recettori di dimensioni 60x40.

La figura seguente contiene il quadro d'unione delle suddette 30 aree.



Nelle allegate 29 tavole, numerate da 82 a 110, vengono visualizzate le mappature isolivello di vibrazioni previste in fase di esercizio.

2.4 Valutazione delle vibrazioni prodotte durante la attività di cantiere

Questo capitolo si propone di valutare gli effetti sull'ambiente circostante delle vibrazioni emesse dai macchinari impiegati per la realizzazione dell'opera in oggetto.

Trascurando la successiva fase di armamento, il cui impatto vibrazionale è sicuramente inferiore rispetto alla fase di costruzione dell'infrastruttura, si considera che le sorgenti sono sostanzialmente raggruppabili in macchine operatrici ed in mezzi adibiti al trasporto.

Le prime hanno una distribuzione spaziale abbastanza prevedibile e delimitata, mentre i secondi si distribuiscono lungo l'intero percorso che collega il fronte di avanzamento lavori ai luoghi di approvvigionamento o di scarica. In sostanza le vibrazioni emesse dai mezzi di trasporto durante il tragitto (non durante le operazioni di cantiere, quali lo scarico o il ribaltamento del cassone) sono le stesse emesse dai normali veicoli stradali, e pertanto non meritano particolari attenzioni, in quanto il loro impatto è analogo a quello prodotto dal traffico già esistente sulla rete viaria adiacente, che è già stato rilevato sperimentalmente nella valutazione ante-operam, e che non risulta dare problemi di alcun tipo.

2.4.1 Caratterizzazione delle emissioni di vibrazioni da parte delle macchine ed attrezzature di cantiere

Il calcolo con il programma Mappavib, illustrato nel precedente capitolo, è possibile anche per la valutazione dell'impatto vibrazionale delle attività di cantiere. Esso tuttavia si basa sulla disponibilità degli spettri di emissione di vibrazioni delle macchine impiegate nel cantiere.

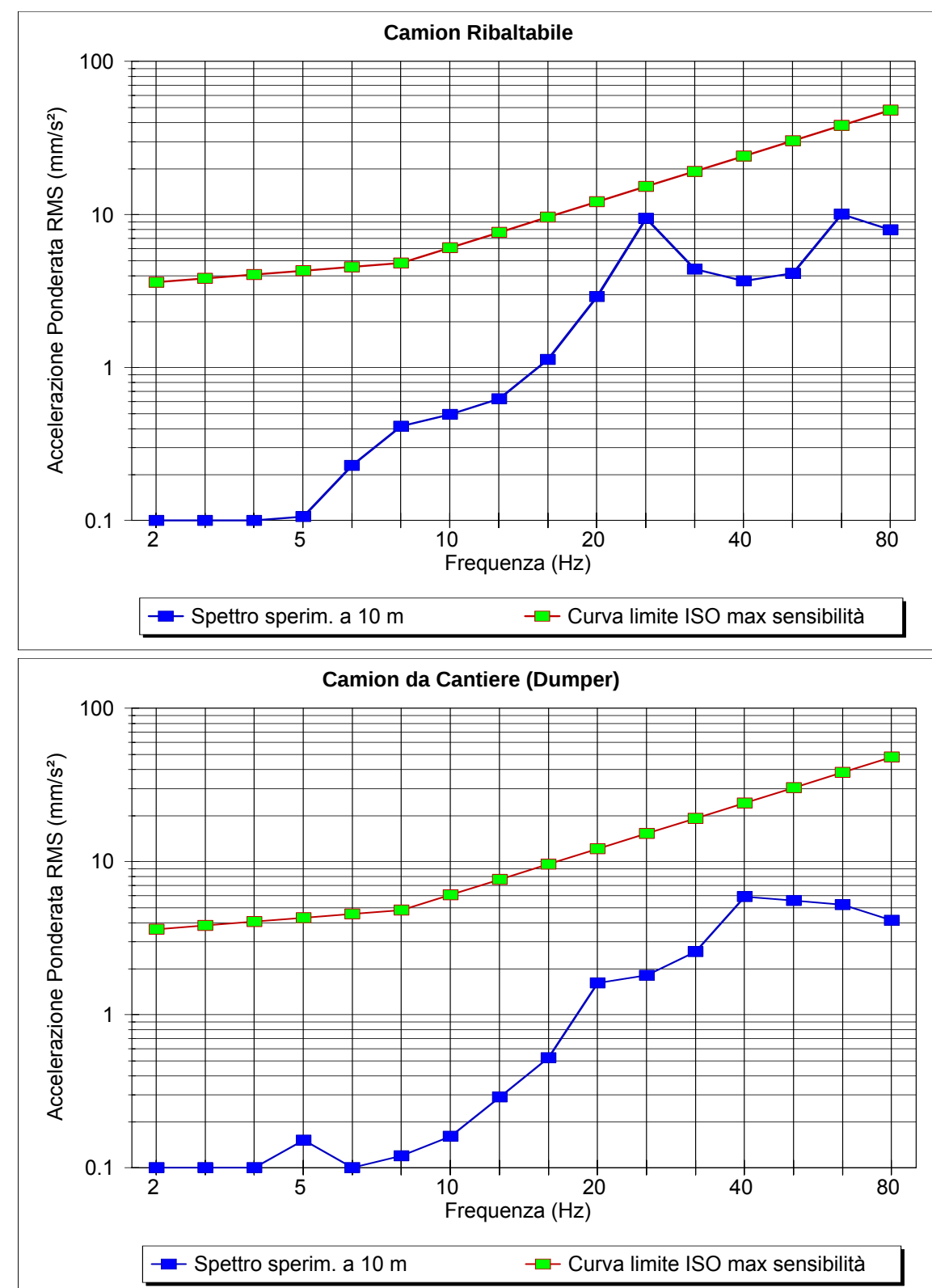
Tali dati sono stati reperiti mediante ricerca bibliografica, in particolare è stato utilizzato il volume *L.H. Watkins - "Environmental impact of roads and traffic" - Appl. Science Publ.*, che alle pagine 231-241 riporta una serie di dati sperimentali sull'emissione di vibrazioni da parte di svariati tipi di macchine da cantiere, utilizzate nelle costruzioni stradali e ferroviarie. Da tale raccolta di dati sono stati estratti gli spettri di emissione delle macchine riportate nella seguente tabella.

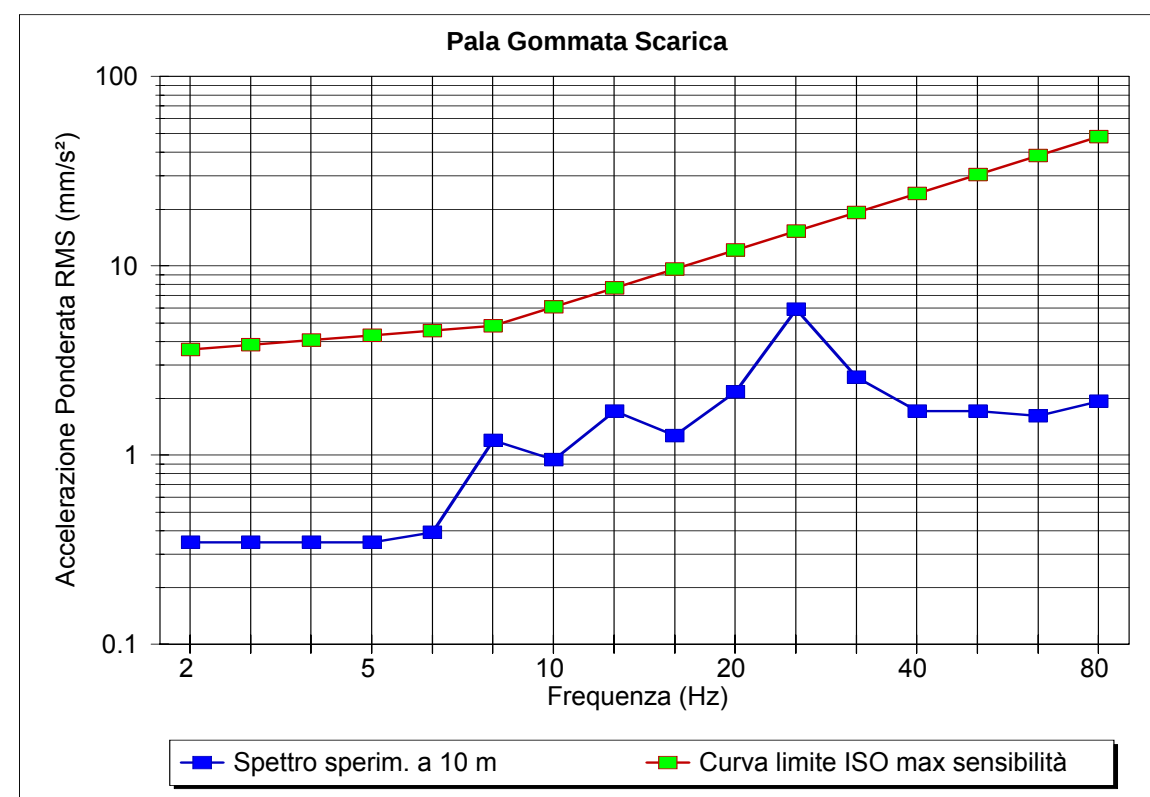
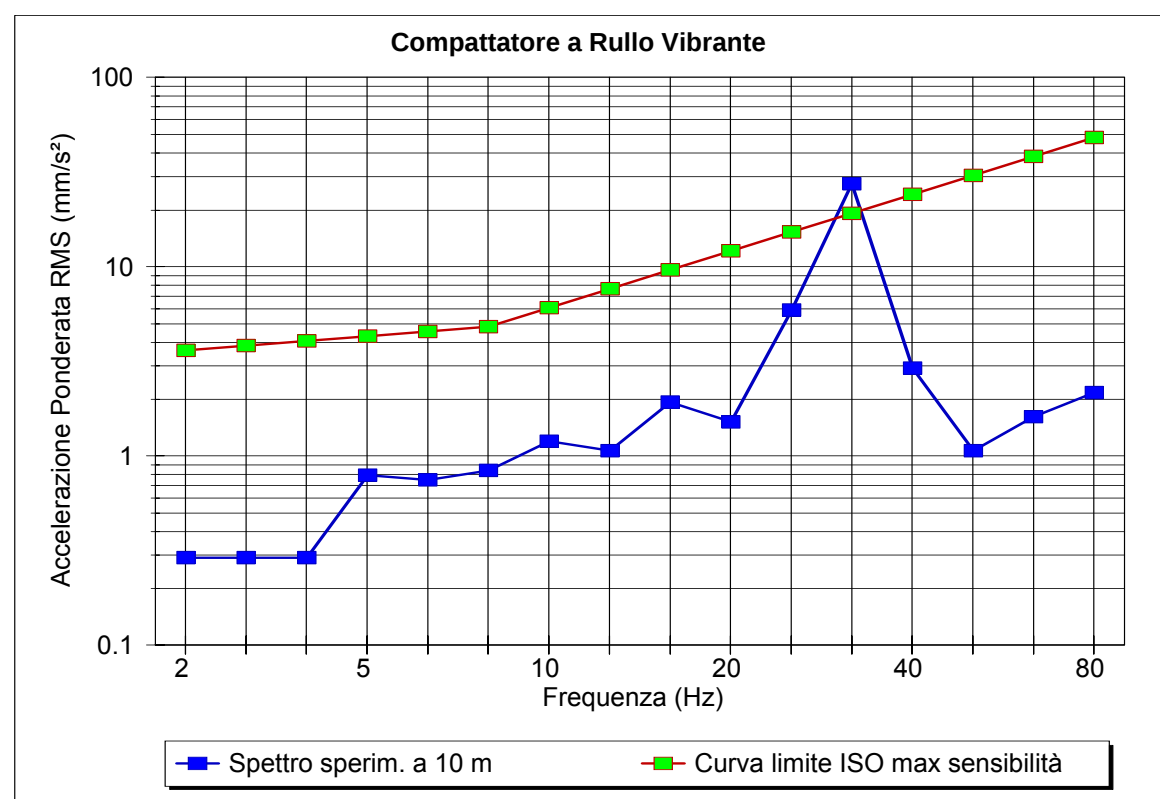
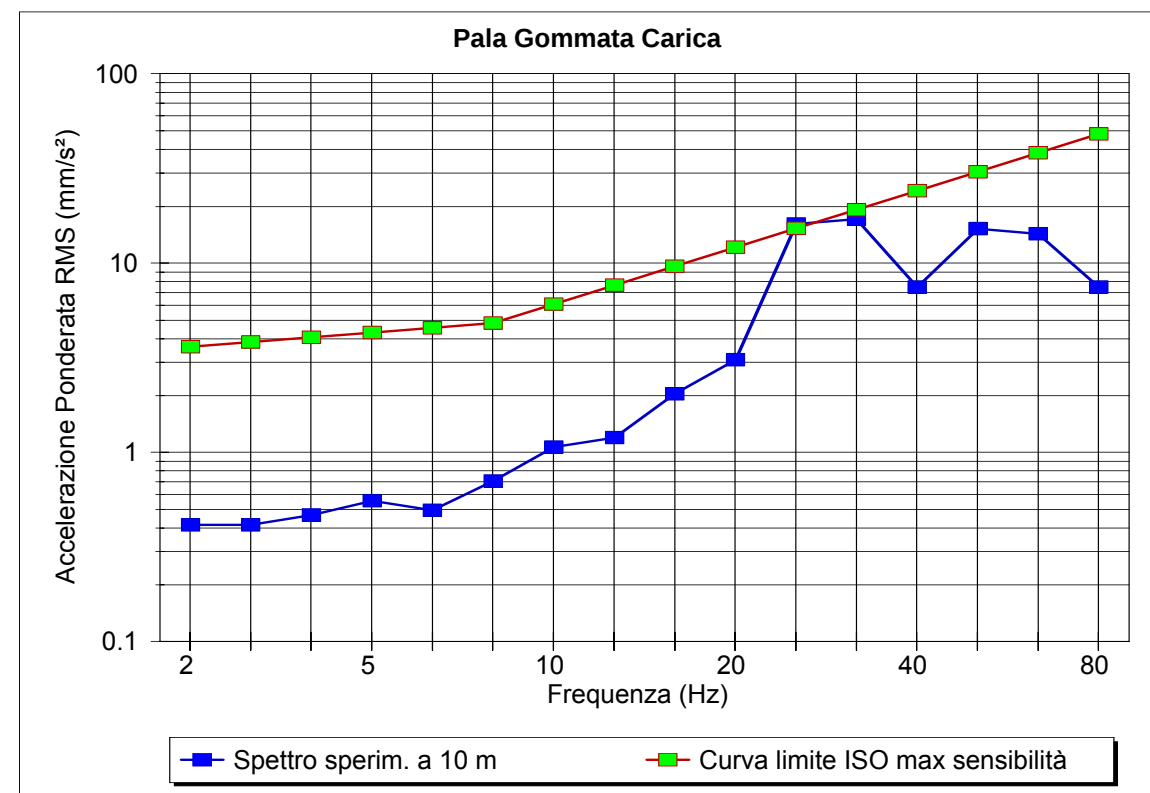
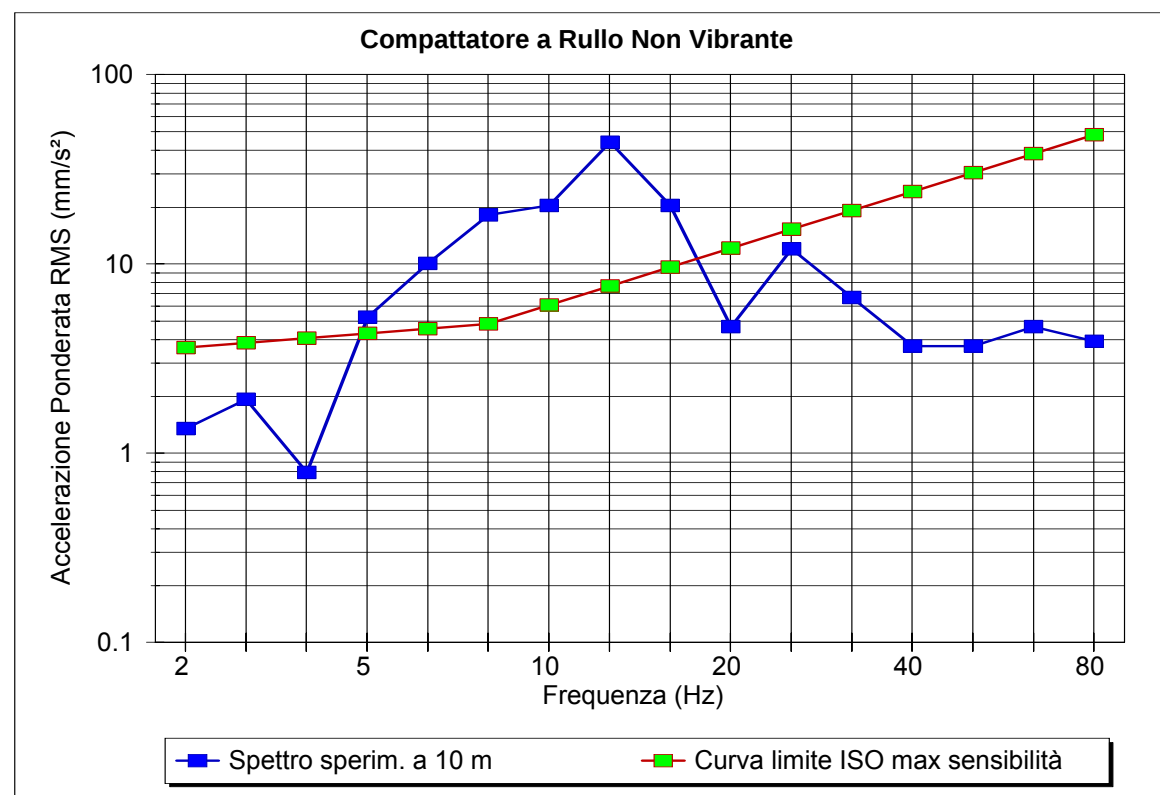
TIPO MACCHINA	SIGLA
Camion Ribaltabile	RIB
Camion da Cantiere (Dumper)	DUM
Compattatore a rullo non vibrante	NVIB
Compattatore a Rullo Vibrante	VIB
Pala Gommata Carica	PGC
Pala Gommata Scarica	PGS
Ruspa Cingolata Grande	RCG
Ruspa Cingolata Piccola	RCP

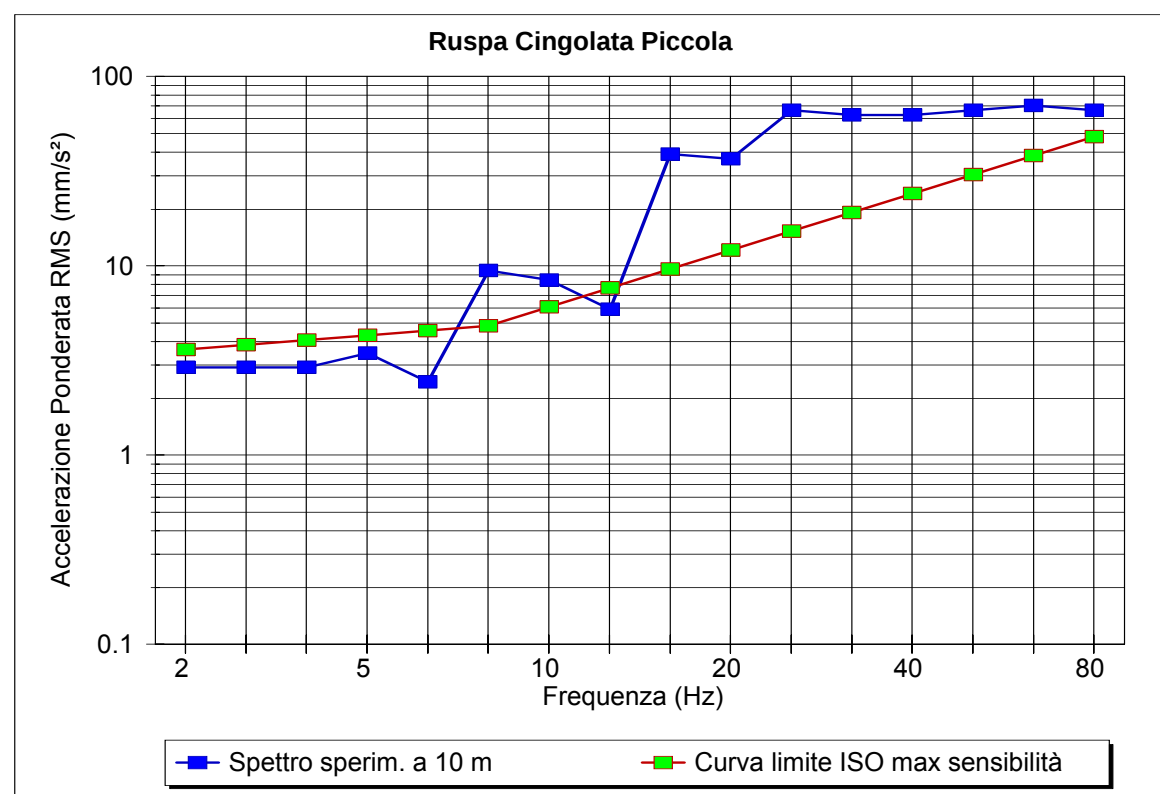
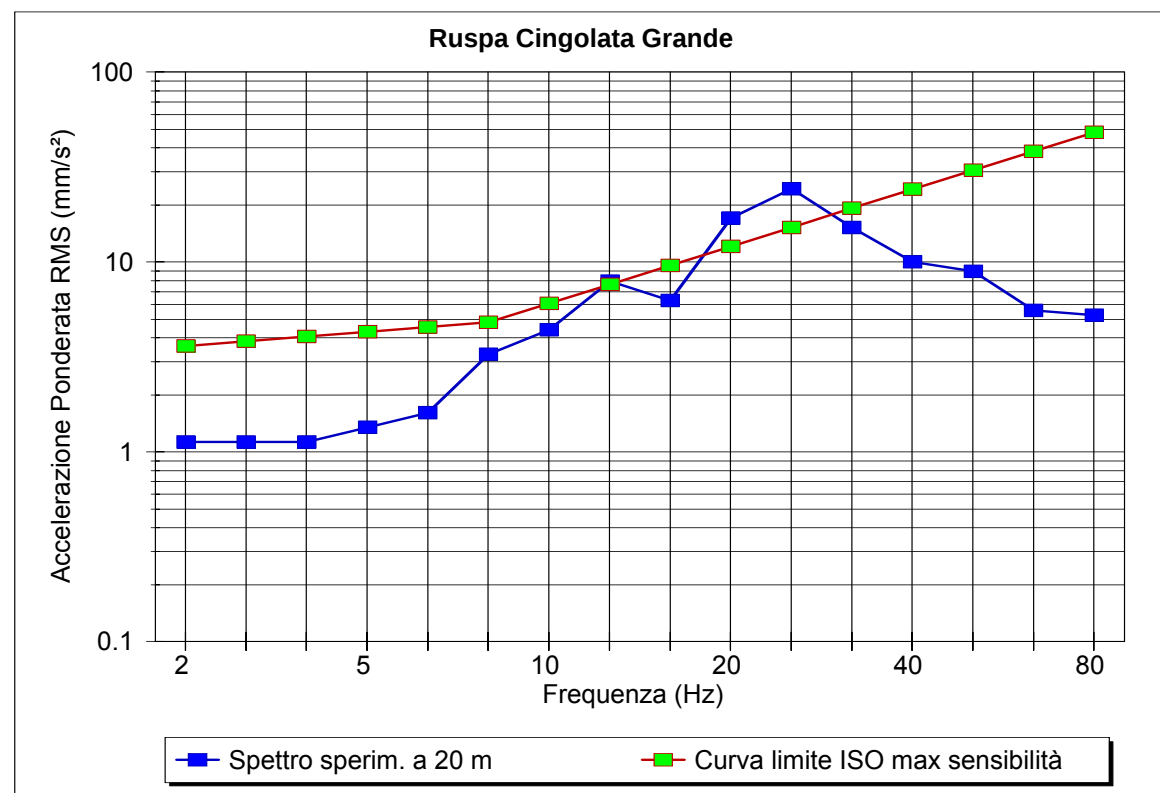
Chiaramente nel caso in esame verranno impiegati macchinari non esattamente corrispondenti a quelli oggetto dei rilievi sperimentali di cui sopra.

Si è dunque assunto, ad esempio, che l'emissione di vibrazioni da parte di uno scavatore cingolato oppure di una trivella sia uguale a quella di una ruspa cingolata piccola, e che le

lavorazioni che erano in atto al momento del rilievo sperimentale fossero sufficientemente simili a quelle che verranno realizzate nel corso della presente opera. Le seguenti figure riportano gli spettri di emissione delle sorgenti di cui sopra (misurati a 10 o 20 m dalla sorgente, come indicato), con sovrapposta la curva limite di perceibilità secondo UNI 9614.



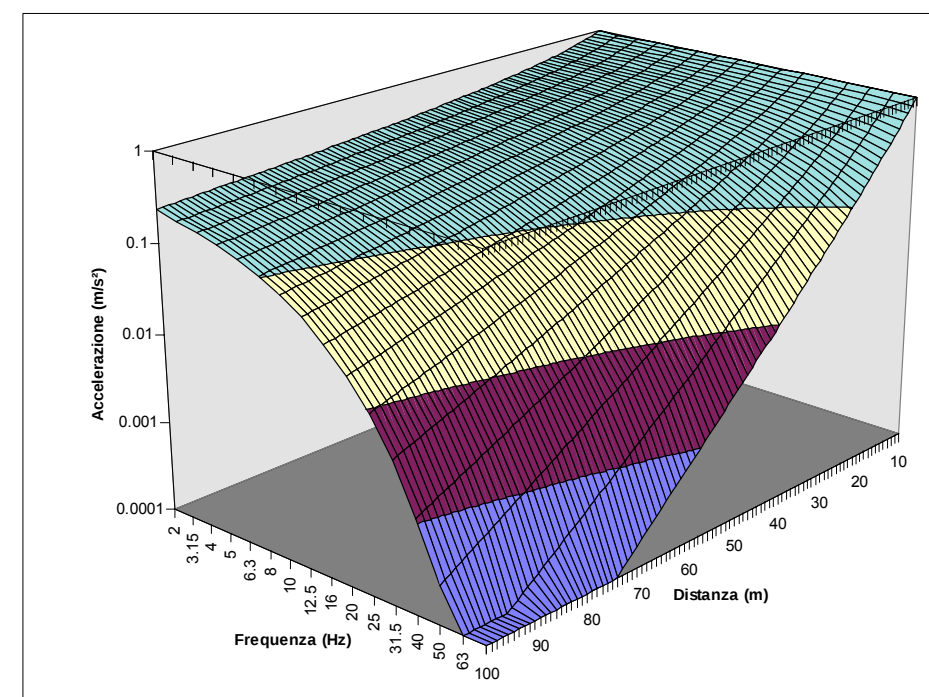




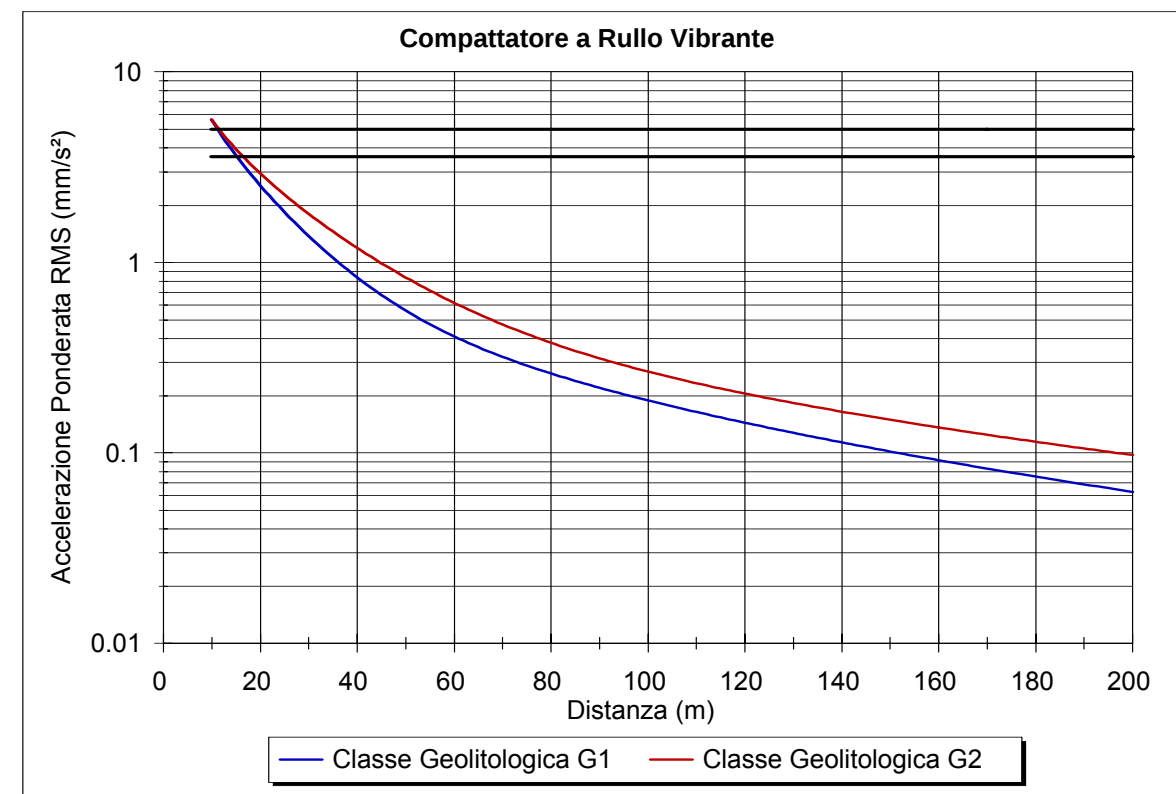
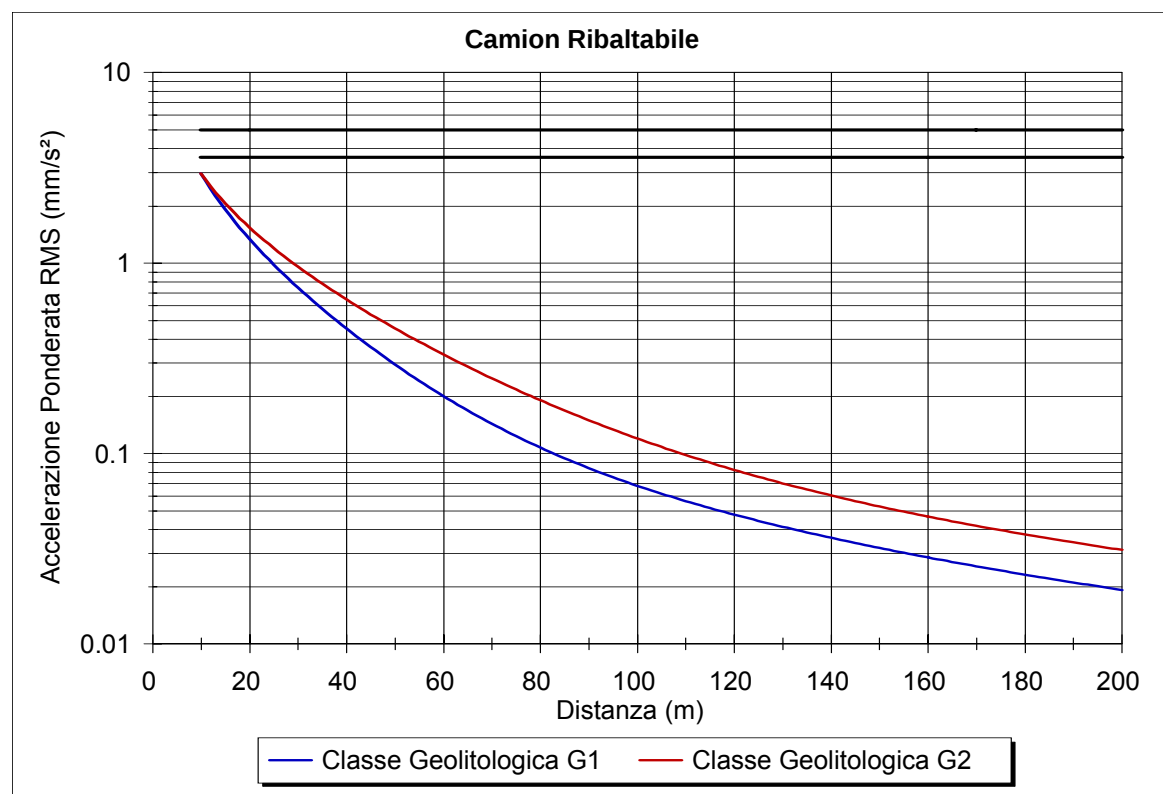
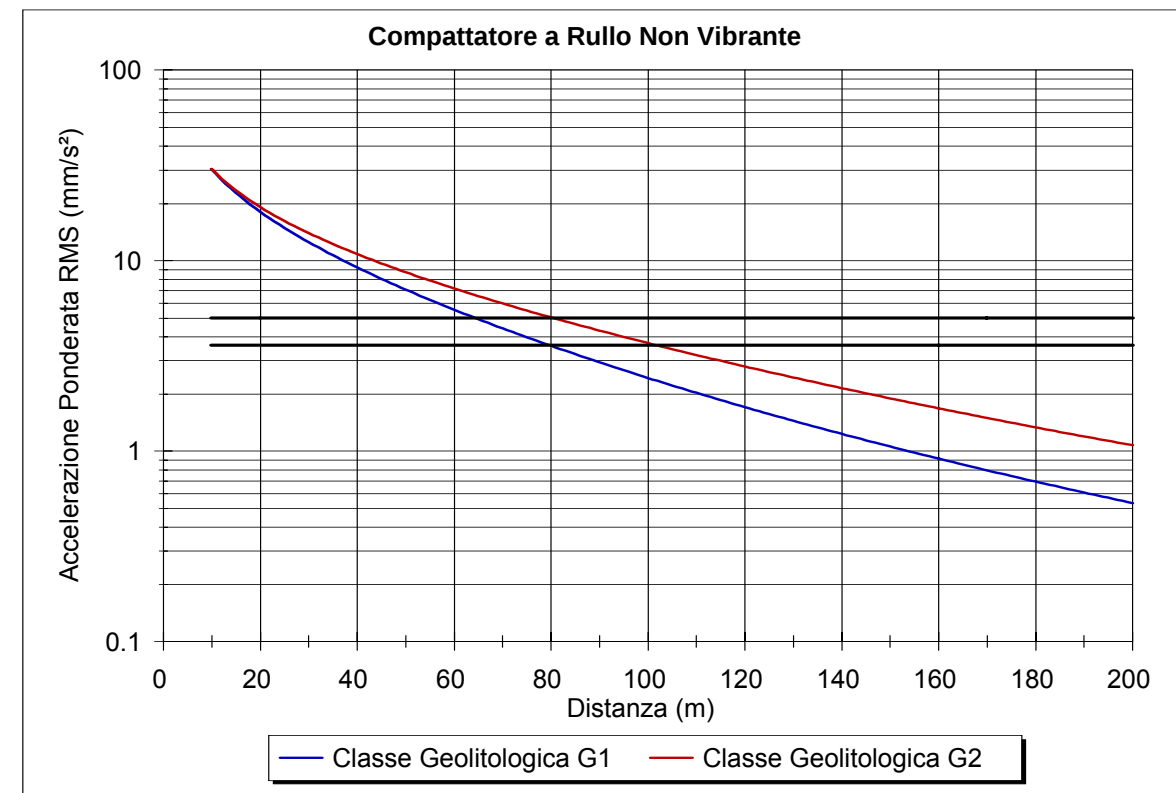
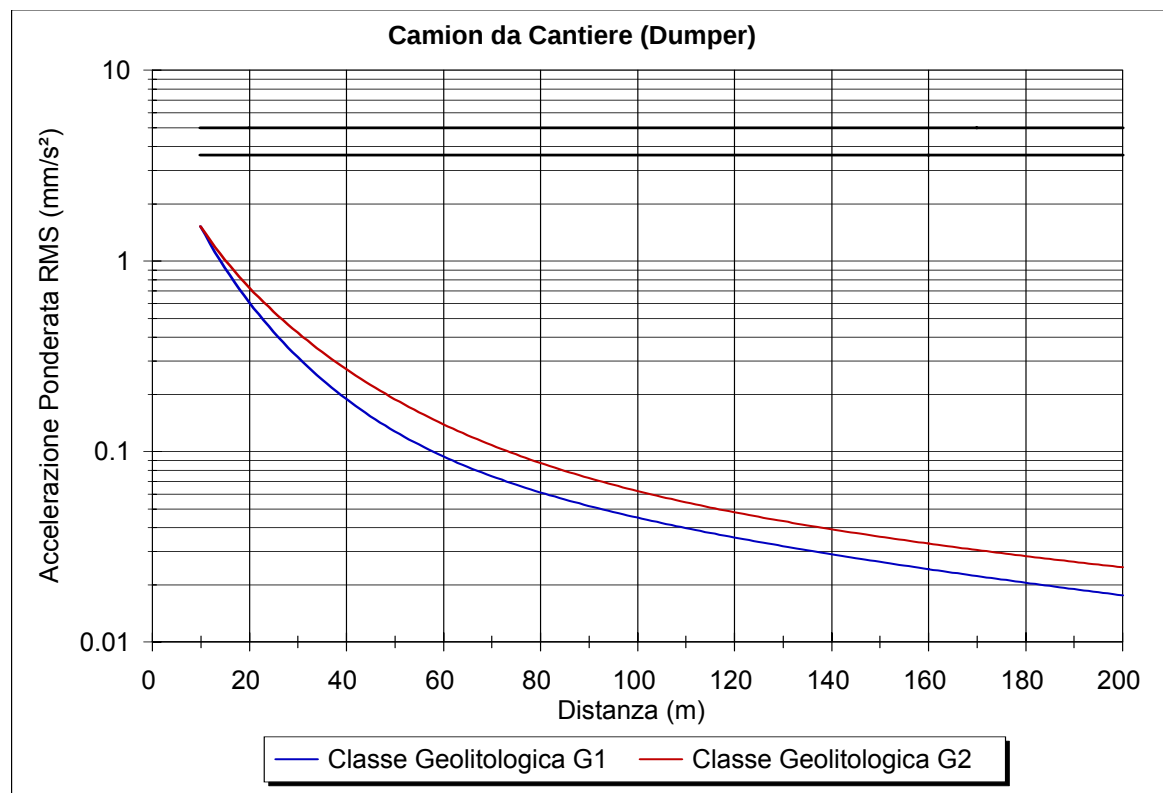
2.4.2 Valutazione della propagazione delle vibrazioni nel terreno

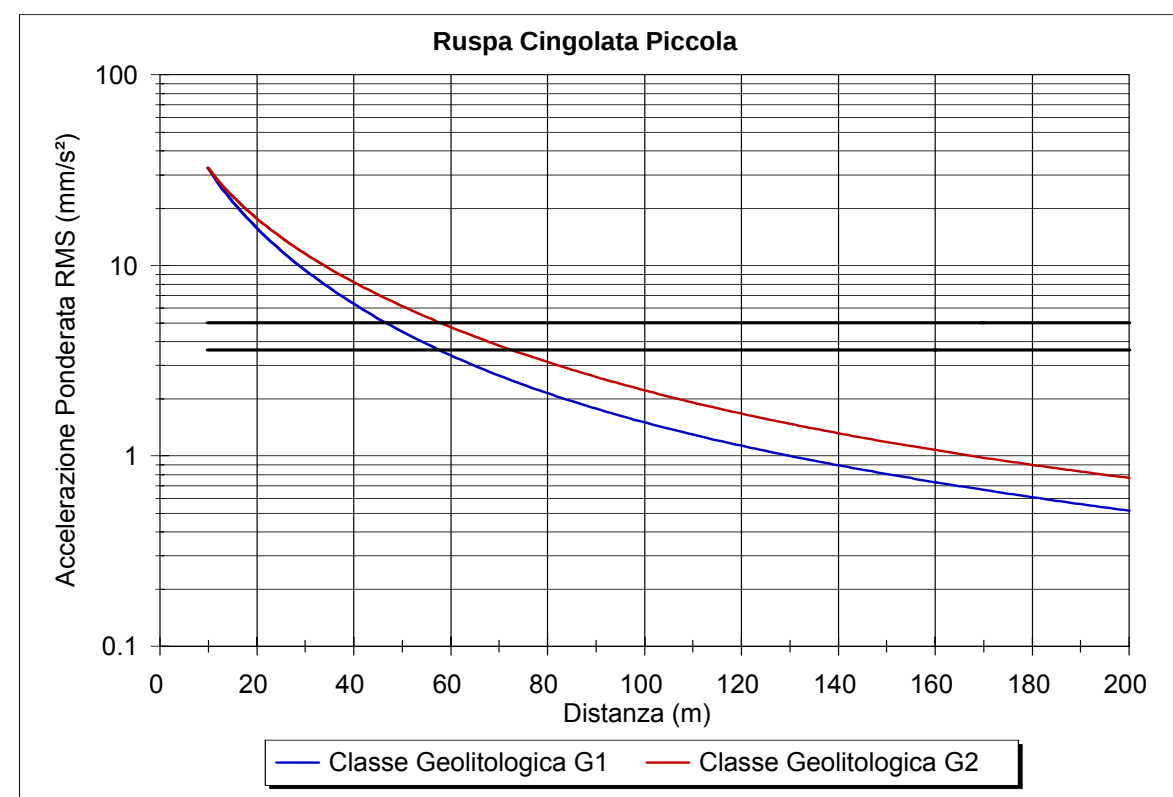
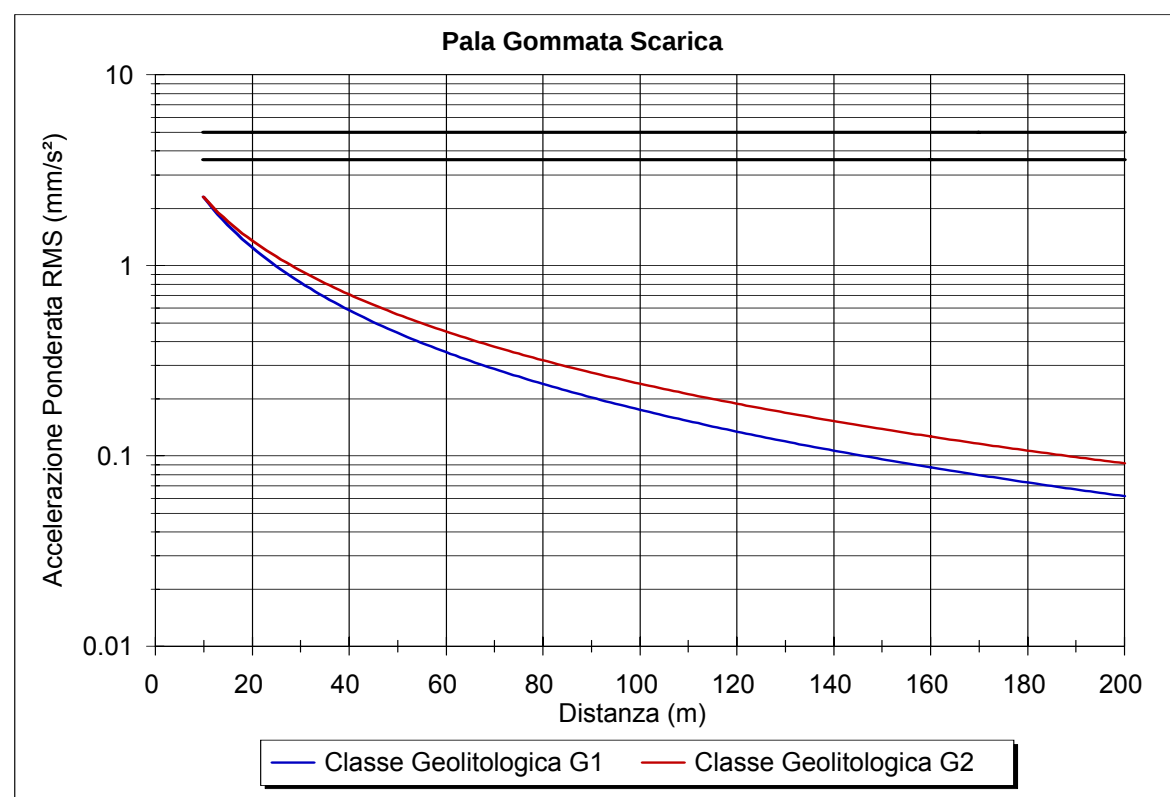
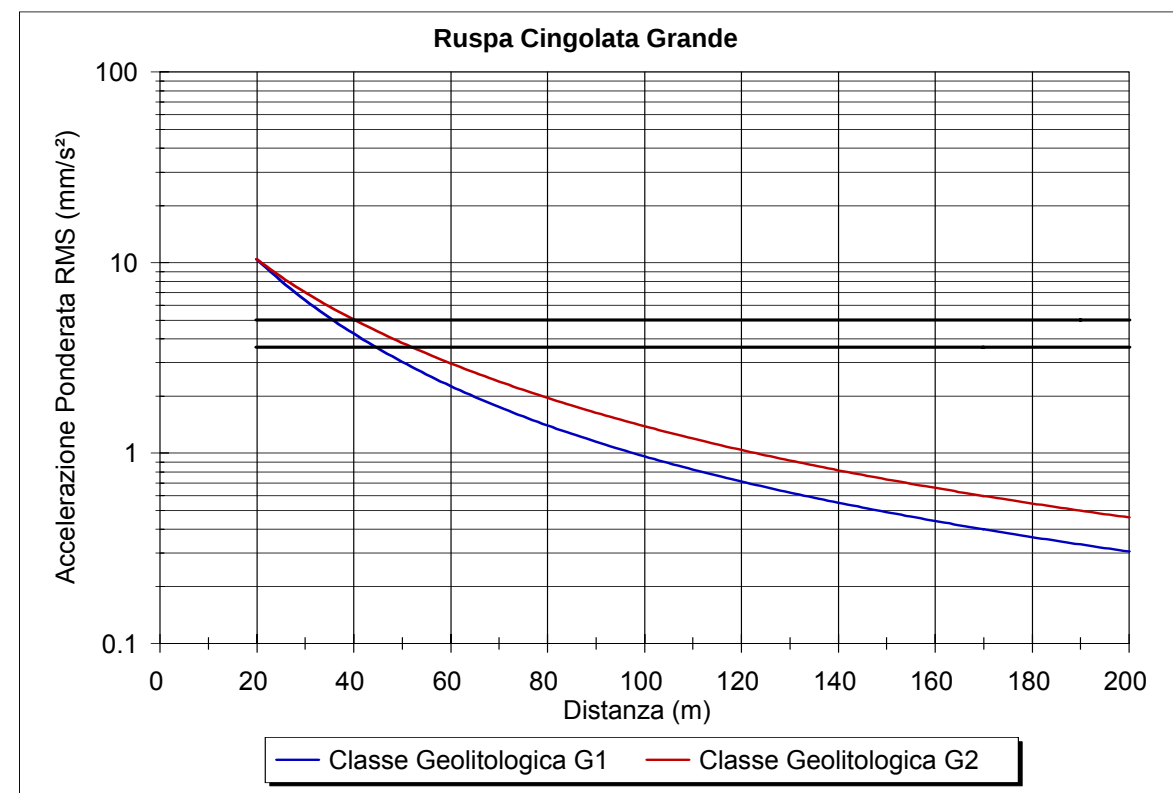
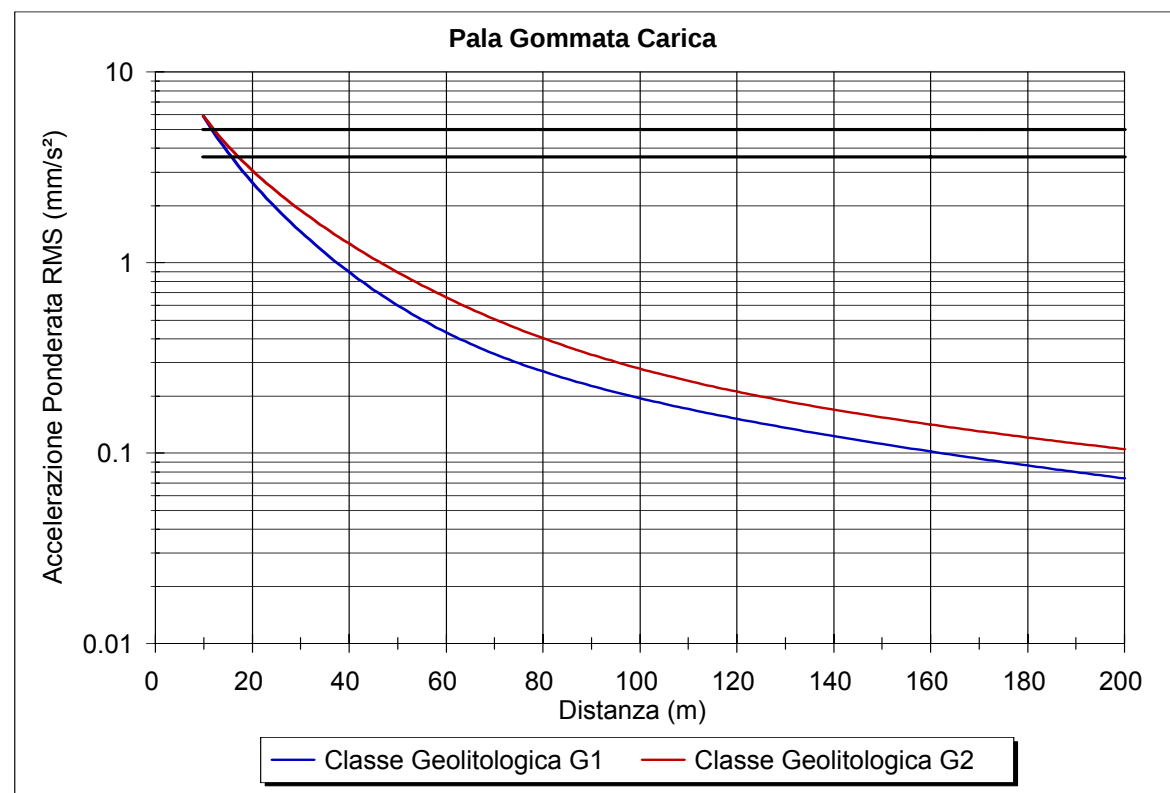
Sulla base dei valori suddetti, che danno luogo ad una attenuazione delle vibrazioni con la distanza diversa in funzione della frequenza, è stato operato per ciascuna delle otto sorgenti tipiche di vibrazioni identificate al precedente paragrafo il calcolo della propagazione delle vibrazioni stesse con la distanza, tenendo conto appunto del diverso spettro di emissione di ciascuna sorgente.

Come mostra la seguente figura, le diverse frequenze subiscono attenuazione differenziata, in particolare le frequenze alte vengono ad estinguersi dopo breve tragitto, mentre le più basse (che sono anche quelle cui corrisponde la massima sensibilità degli individui) percorrono distanze maggiori.



Le seguenti figure riportano la legge di variazione spaziale del valore complessivo ponderato dell'accelerazione, nei due diversi tipi di terreno, per le otto sorgenti di vibrazioni individuate in precedenza.





2.4.3 Stima degli impatti vibrazionali prodotti dalle macchine di cantiere – tracciato a raso

In questo paragrafo si considerano i seguenti aspetti:

- definizione delle fasi e modalità di lavorazione;
- definizione delle caratteristiche di emissione vibrazionale delle sorgenti;
- localizzazione spazio-temporale delle sorgenti;
- calcolo delle mappature iso-accelerazione.

Per quanto riguarda la determinazione delle immissioni di vibrazioni (basata sulla metodologia e sui modelli già descritti) si deve precisare che tale attività ha richiesto una preventiva schematizzazione delle attività relative alla realizzazione della struttura a raso.

Le ipotesi in merito adottate per quanto riguarda traiettoria di lavoro, trasporto di inerti alla zona di lavorazione, estensione della zona sorgente di vibrazioni, corrispondono a quelle già descritte per la valutazione del rumore.

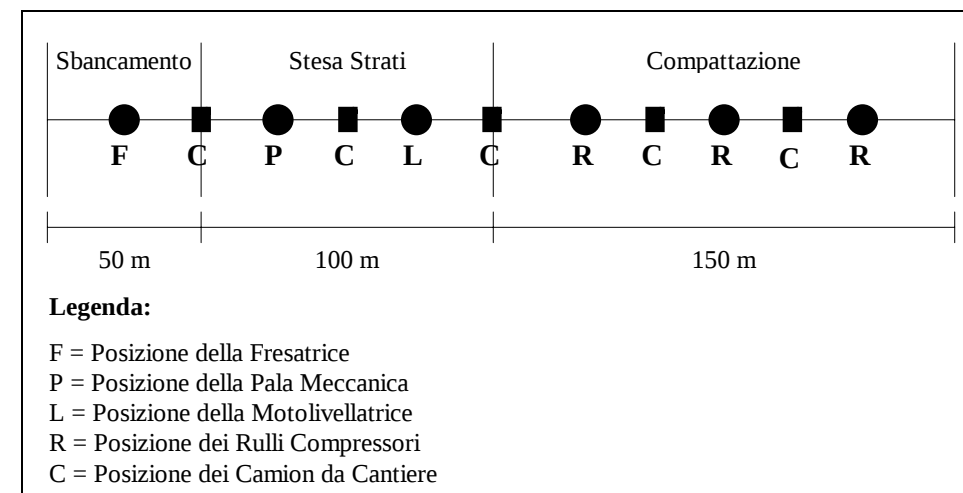
La determinazione delle immissioni di vibrazioni delle attività relative al cantiere viene effettuata per mezzo di curve iso-accelerazione ottenute per mezzo del modello di calcolo descritto al precedente paragrafo e sulla base delle richiamate ipotesi.

Dette curve iso-accelerazione sono state calcolate prendendo come riferimento una situazione standard caratterizzata dalla presenza contemporanea dei macchinari indicati nella seguente tabella, cui sono state fatte corrispondere le sorgenti tipiche di vibrazioni di cui al paragrafo precedente.

MEZZI	NUMERO	SIGLA	TEMPO DI FUNZ. (ORE/GIORNO)	LIVELLO DI ACCELER. POND. A 20M DI DISTANZA
Fresatrice	1	RCG	6	80.4
Pale meccaniche	1	PGC	6	75.4
Motolivellatrici	1	PGS	6	67.2
Rulli	3	VIB	6	75.0
Camion da Cantiere	5	DUM	8	63.4

L'analisi delle emissioni di vibrazioni da parte del cantiere è stata basata su di un tratto di linea di lunghezza pari a 300 m che rappresenta la dimensione standard di ciascun lotto di cantierizzazione.

Questo tratto può essere considerato composto da tre segmenti, ciascuno dei quali relativo ad una delle fasi di esecuzione previste. E' stato quindi ipotizzato di localizzare in corrispondenza del baricentro di ciascun segmento le sorgenti di vibrazioni relative. A scopo esemplificativo nella figura sottostante è stato riportato lo schema della localizzazione delle sorgenti considerate nel calcolo.



Oltre alle emissioni di vibrazioni prodotte dalle macchine operatrici sono state anche considerate quelle relative al trasporto degli inerti, rappresentati dai 5 camion da cantiere visibili in figura.

I dati suddetti sono stati introdotti nel programma MAPPAVIB con riferimento alle tratte di tracciato a raso.

2.4.4 Stima degli impatti vibrazionali prodotti dalle macchine di cantiere – tracciato in galleria a scavo superficiale

Le macchine che vengono utilizzate in questa tecnica costruttiva sono piu' impattanti, dal punto di vista vibrazionale, di quelle impiegate nella costruzione a raso.

Lo scavo della trincea viene infatti preceduta dalla realizzazione dei due diaframmi laterali, facendo impiego di:

- N. 1 scavatore cingolato con benna mordente
- N. 1 gru a cavo per il posizionamento delle gabbie
- n. 4 camion per trasporto gabbie, inerti, etc.
- N. 1 autobetoniera per il getto
- N. 1 motopompa per la movimentazione della bentonite
- N. 1 terna per i piccoli lavori stradali e lo spostamento di oggetti

Le fasi successive sono decisamente meno impattanti, innanzi tutto perchè eseguite con mezzi piu' leggeri, inoltre perchè i due diaframmi realizzati hanno una parziale funzione isolante rispetto alle attività che si svolgono all'interno di essi.

Comunque, una volta avvenuta la presa del CLS dei diaframmi, viene effettuato lo scavo e la rimozione del materiale fra i due diaframmi, sino alla profondità necessaria.

A tal fine si impiega:

- N. 1 scavatore a cucchiaio
- N. 2 camion da cantiere che fanno la spola portando via il materiale di scavo
- N. 1 pala livellatrice per la spianatura del fondo dello scavo.

Si procede poi al getto della soletta di fondo, che richiede l'impiego di:

- N. 1 autobetoniera per il getto
- N. 1 carrello sollevatore per il posizionamento delle armature
- N. 1 motopompa per la continua estrazione dell'acqua di infiltrazione

A questo punto vengono posizionati i pannelli prefabbricati di copertura della trincea, gettando in opera la trave di correa e la caldana di rivestimento che li immobilizzano rispetto alla struttura circostante. In questa fase si fa impiego dei seguenti mezzi:

- N. 1 gru semovente per il posizionamento dei pannelli
- N. 1 autocarro per il trasporto degli stessi
- N. 1 carrello sollevatore per il posizionamento delle armature

Una volta coperta la trincea, le successive attività che si svolgono (ripristino della pavimentazione sovrastante, costruzione dell'armamento flottante) avvengono con impatti acustici e vibrazionali sostanzialmente trascurabili rispetto alle 4 fasi suddette.

Pertanto, al fine della valutazione previsionale dell'impatto da vibrazioni, si considera solamente la fase piu' critica, che è la prima.

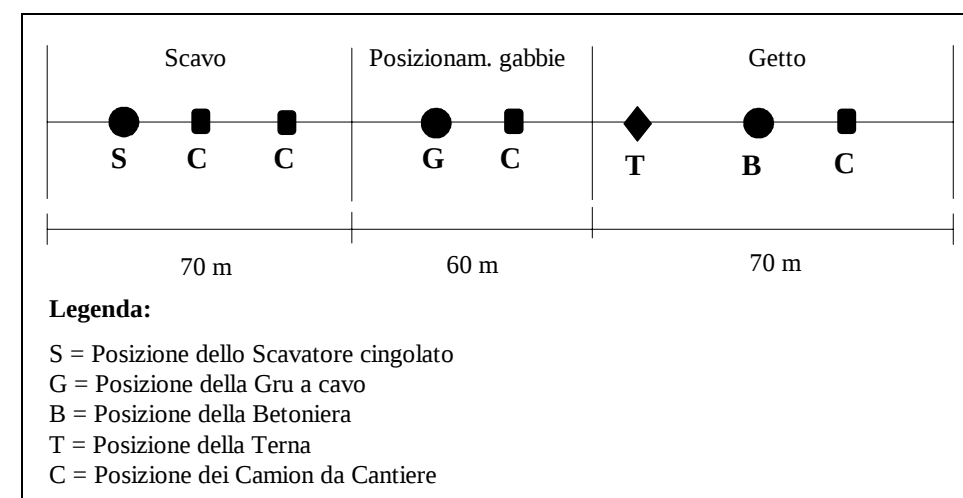
Sono quindi stati introdotti nel modello MAPPAVIB i dati di emissione delle vibrazioni, estratti per approssimazione ai mezzi piu' simili, rappresentati dalla seguente tabella.

MEZZI	NUMERO	SIGLA	TEMPO DI FUNZ. (ORE/GIORNO)	LIVELLO DI ACCELER. POND. A 10M DI DISTANZA
Scavatore cingolato	1	RCP	6	90.2
Gru a cavo	1	NVIB	6	89.6
Betoniera	1	RIB	6	69.4
Terna	1	RCG	6	80.4
Camion da Cantiere	4	DUM	8	63.4

Si noti che l'emissione di vibrazioni della motopompa per la bentonite è stata considerata trascurabile rispetto alle altre sorgenti suddette.

L'analisi delle emissioni di vibrazioni da parte del cantiere è stata basata su di un tratto di linea di lunghezza pari a 200 m che rappresenta la dimensione standard di ciascun lotto di cantierizzazione per la costruzione della galleria superficiale.

A scopo esemplificativo nella figura sottostante è stato riportato lo schema della localizzazione delle sorgenti considerate nel calcolo.



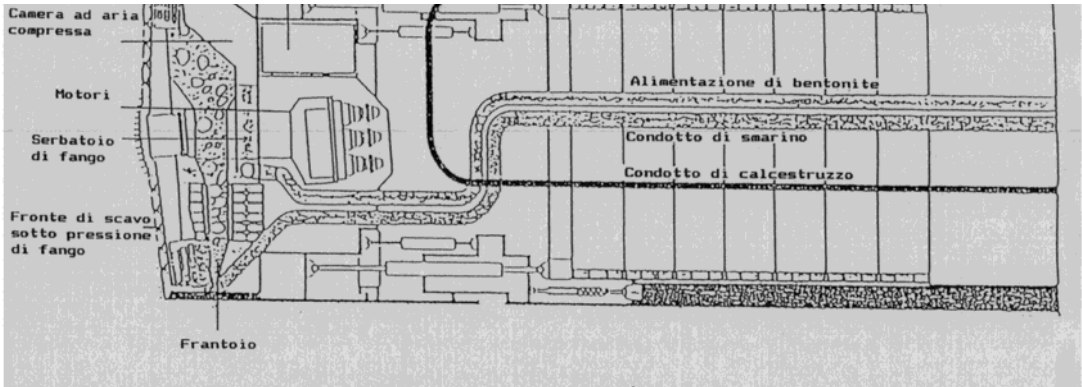
Oltre alle emissioni di vibrazioni prodotte dalle macchine operatrici sono state anche considerate quelle relative al trasporto degli inerti, rappresentati dai 4 camion da cantiere visibili in figura.

I dati suddetti sono stati introdotti nel programma MAPPAVIB con riferimento alle tratte di tracciato in galleria con scavo dalla superficie.

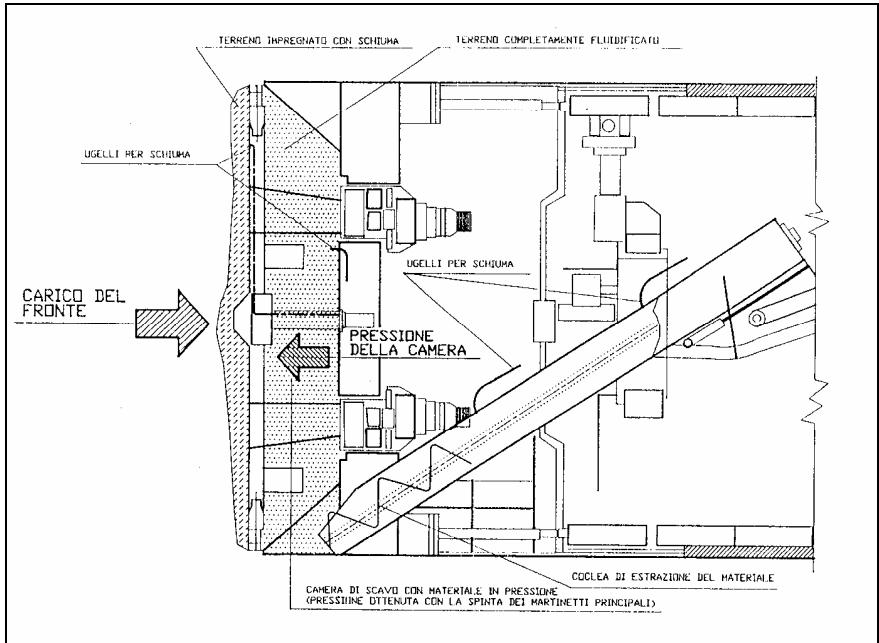
2.4.5 Stima degli impatti vibrazionali prodotti dalle macchine di cantiere – tracciato in galleria a foro cieco

La tecnica di scavo della galleria a foro cieco è descritta con dovizia di particolari nella relazione accompagnatoria del progetto preliminare, e nello specifico 8.4 ed 8.5.

Si tratta in ogni caso di una tecnica di scavo mediante macchina scudata, della quale sono idonee all'impiego nel suono di Parma due diverse tipologie: SLURRY ed EPB, che corrispondono alle seguenti due figure illustrative delle due diverse tipologie di macchina.



Schema macchina tipo Slurry



Schema macchina tipo EPB

Le differenze, i pregi e gli svantaggi di ciascuna delle due macchine suddette sono pure discusse ampiamente nella relazione generale di progetto, nei paragrafi 8.5.9 ed 8.5.10. In tale sede non viene tuttavia fornita alcuna indicazione sui livelli di vibrazione prodotti.

La caratterizzazione sperimentale dei livelli di vibrazione per una testa fresante scudata in funzione della distanza e dei vari tipi di terreno, è contenuta nella tabella seguente. I dati sono

espressi mediante valori di velocità massima di picco in mm/s a varie distanze, dato sufficiente per una valutazione previsionale del livello di vibrazione.

Tabella 6.2.1/1 – Velocità massima di picco [mm/s]

TIPO DI TERRENO	Distanza 5 m	Distanza 10 m	Distanza 25 m
Sabbia e ghiaia	6.0	1.1	0.6
Depositi morenici fratturati	1.0	0.2	-
Calcare	6.0	1.2	0.7
Argilla	1.1	0.06	-
Ghiaia	-	1.1	-

Vista la configurazione degli orizzonti litostratigrafici caratterizzanti il tracciato della Metropolitana di Parma, considerando presenza frequente di strati argillosi, e la casuale presenza di lenti di sabbia e ghiaia o di sola ghiaia, è ragionevole assumere come livello di riferimento una velocità di picco pari a 1.0 mm/s a 10 m.

Si presuppone che l'esecuzione dello scavo venga realizzata a regola d'arte, con i dovuti presidi e interventi di consolidamento resi necessari dalle specifiche aree attraversate, in assenza di cedimenti o assestamenti rilevanti per la stabilità, la creazione di lesioni o sistemi fessurativi. Non si pone quindi il problema di verificare le vibrazioni che possono determinare danni ai beni immobili ma bensì le vibrazioni e i fenomeni vibroacustici che possono originare disturbi alla popolazione.

La caratterizzazione del disturbo viene di norma eseguita mediante valori r.m.s. il cui legame dipende dalla forma d'onda delle vibrazioni nel tempo.

Assumendo prudenzialmente che la vibrazione sia di tipo armonico, il fattore di cresta è pari a $\sqrt{2}$ e, di conseguenza:

$$v_{RMS} = \frac{v_{picco}}{\sqrt{2}}$$

Pertanto è stato assunto un valore di riferimento a 10 m pari a 0.7 mm/s, cioè 116.9 dB di velocità r.m.s. di vibrazione. Il massimo contributo energetico della fresa è localizzato tipicamente a 40 Hz, con distribuzione spettrale decrescente tra 1-40 Hz e tra 40-80 Hz.

Da tale valore si ricava subito il corrispondente livello di accelerazione ponderata, che è pari a:

$$L_{a,w} = L_v - 29 = 116.9 - 29 = 87.9 \text{ dB a } 10 \text{ m}$$

E quindi, ipotizzando propagazione volumica, anche:

$$L_{a,w} = 89.0 \text{ dB a } 7.5 \text{ m}$$

Per un migliore inquadramento delle problematiche può essere utilizzato un caso studio eseguito a Parigi in un edificio fondato su terreno alluvionale dove sono stati rilevati i livelli di picco

delle velocità causati dal funzionamento, ad una profondità di 30 m, dalla macchina di perforazione ("Controle en temps reel des vibrations provoques par le fonctionnement du tunnelier du project Eole, 6 Rue Saint-Quentin, 75010 Paris" – Centre d'études et Recherches Seismologiques, Etude n. 402 DG Constructions). Le conclusioni dello studio sono:

- il valore di picco massimo della velocità è pari a 0.1 mm/sec in direzione verticale
- i valori nelle altre direzioni orizzontali sono assai più bassi e precisamente non superiori a 0.05 mm/sec
- il campo di frequenze di interesse è compreso tra 10 Hz e 80 Hz con il picco in corrispondenza a 40 Hz
- i livelli di vibrazione, misurati nello stesso edificio, derivanti dal passaggio di autobus presentano un picco pari 0.06 mm/s

Dai dati precedentemente esposti consegue che i livelli di vibrazione sono modesti e prossimi alla soglia di sensibilità umana. La frequenza alla quale si verifica il massimo deve essere analizzata con una certa accuratezza perché essa è prossima alla risonanza media verticale dei solai.

2.4.6 Valutazione integrata dell'impatto in fase di cantiere

Facendo impiego del programma Mappavib, è stata ripetuta l'elaborazione delle 30 aree di mappatura già impiegate per l'analisi dell'impatto vibrazionale in esercizio. In questo caso, ovviamente, i livelli di vibrazione sono molto più elevati, soprattutto nelle zone in cui è prevista la realizzazione della galleria con scavo superficiale.

Ad una distanza di m 7.5 dall'asse della metrotranvia, infatti, ci si debbono attendere all'incirca questi livelli di accelerazione ponderata:

- sezione a raso: 85 dB
- galleria superficiale, rampe: 95 dB
- galleria in foro cieco: 89 dB

Poiché però la galleria in foro cieco viene effettuata con scavo profondo, in media, 25m, i livelli di vibrazione prodotti da quest'ultima tecnica di lavorazione, a livello del suolo, sono al massimo pari a 84 dB. Questa tecnica risulta dunque la meno impattante delle tre.

Sebbene i valori numerici suddetti posano sembrare alti, si deve ricordare che questi sono livelli di vibrazione: la soglia di percezione è 71 dB, ed il limite di disturbo è pari, per edilizia residenziale, a 77 dB. Quindi livelli poco superiori agli 80 dB sono accettabili per brevi periodi.

In ogni caso, anche nelle zone più impattate, con livelli di vibrazione di 95 dB, siamo ancora 10 dB al di sotto del limite per danno strutturale iniziale (distacchi di intonaci, etc.), che è pari a 105 dB.

Si conclude dunque che le attività di cantiere, al contrario della situazione di esercizio, daranno luogo a livelli di vibrazione disturbanti per la popolazione in un certo ambito territoriale, ben evidenziato dalla mappatura dei livelli di cantiere, riportate nelle allegate tavole n. 111-139.

Si tratta comunque solo di un disturbo temporaneo, peraltro non facilmente mitigabile, ma solo sopportabile. Comunque i livelli di vibrazione prodotti resteranno ampiamente all'interno dei limiti di danno strutturale lieve, e quindi non si prevedono problemi di indennizzi o ripristini a seguito delle attività di costruzione della infrastruttura metrotranviaria.

2.5 Sintesi e conclusioni dello studio di impatto vibrazionale

Lo studio dell'impatto vibrazionale si è basato su una tecnica di quantificazione delle vibrazioni e della loro percezione da parte dell'uomo che deriva pedissequamente dall'applicazione delle norme tecniche italiane UNI 9614 (Valutazione del disturbo alle persone), UNI 9916 (Valutazione del danno alle strutture edilizie) e UNI 11048 (Tecniche di misurazione).

In sostanza, si tratta di valutare il livello istantaneo massimo, facendo impiego di un tempo di integrazione "slow" (1 secondo) e di una ponderazione in frequenza conforme al filtro "per asse generico" definito nella norma ISO 2731.

Le norme identificano tre soglie per la valutazione:

- 71 dB (soglia di percezione umana)
- 77 dB (limite di accettabilità per il disturbo in edifici residenziali, periodo diurno)
- 105 dB (corrispondente ad una velocità di vibrazione pari a 5 mm/s, valore minimo per l'instaurarsi di danno strutturale lieve)

La valutazione dello stato di fatto è stata effettuata mediante rilievi con terna triassiale di accelerometri, in 16 postazioni caratteristiche posizionate lungo il tracciato della linea.

Non sono stati rilevati livelli di vibrazioni significativi, grazie alla sostanziale assenza di significative sorgenti di vibrazioni ed alla natura poco propagativa del suolo di Parma.

Si è poi proceduto ad analizzare i livelli di vibrazione che verranno emessi dal transito dei convogli sulla linea metropolitane di Parma.

Sulla base di tre campagne di rilievo sperimentale eseguite nel 1991 a Torino, Milano e Potsdam, è stato possibile definire uno spettro tipico di emissione, che dà luogo, su armamento non antivibrante, ad un livello di emissione del singolo binario pari a 73.5 dB a 5m di distanza dall'asse.

Si è valutato che tale livello di emissione potesse essere causa di problemi in caso di recettori sensibili posti a breve distanza delle linee, per cui è stata valutata, mediante modellazione matematica semplificata (sistema ad 1 solo grado di libertà) l'attenuazione ottenibile mediante il sistema di armamento antivibrante, previsto in gran parte della linea (tutte le gallerie, sia a foro cieco che a scavo superficiale, e tutte le tratte urbane in sede propria o promiscua, allorché si hanno edifici entro una distanza limite di 30m dal binario più vicino).

L'attenuazione prevista per il sistema antivibrante è superiore ai 9 dB, e porta dunque il livello di emissione del singolo binario al valore di circa 64.2 dB a 5m di distanza.

Grazie alla stima di tali valori di emissione, è stato possibile operare il calcolo delle mappature del livello di vibrazione nella situazione di esercizio. Esso non ha evidenziato particolari criticità dal punto di vista del rispetto dei limiti di normativa.

Si è infine operata l'analisi delle vibrazioni causate dalle attività di cantiere. Tale analisi ha evidenziato valori dei livelli vibrazionali decisamente superiori a quelli che si avranno durante l'esercizio, soprattutto nel caso di realizzazione delle gallerie con scavo superficiale.

In un ambito territoriale che è stato accuratamente quantificato mediante l'elaborazione delle mappature isolivello si avranno pertanto superamenti sia della soglia di percezione, sia, in alcuni casi, della soglia di disturbo alle persone. In nessun caso, comunque, si avrà superamento del limite di danno strutturale.

Non è peraltro ipotizzabile prendere alcun accorgimento progettuale teso a limitare le vibrazioni in fase di cantiere.

Sono ovviamente possibili accorgimenti esecutivi, legati alla scelta delle macchine di cantiere, e soprattutto alle modalità di condotta delle stesse da parte del personale addetto. La valutazione effettuata, sotto questo profilo, è sicuramente molto prudente, e certamente una accorta sorveglianza e monitoraggio delle attività di cantiere consentirà di ridurre in modo significativo l'impatto vibrazionale.

3. VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI DA CAMPI ELETTRICI, CAMPI MAGNETICI, CORRENTI VAGANTI

3.1 Introduzione metodologica e normativa di riferimento

3.1.1 Analisi degli effetti sull'uomo dei campi elettromagnetici a basse frequenze (ELF)

Le sorgenti naturali ed artificiali generano energia elettromagnetica sotto forma di onde. Queste onde consistono di campi elettrici e magnetici oscillanti che interagiscono in vari modi con i sistemi biologici, come cellule, piante, animali o l'uomo. Per comprendere meglio queste interazioni, è essenziale avere familiarità con le proprietà fisiche delle onde che compongono lo spettro elettromagnetico.

Le onde elettromagnetiche possono essere caratterizzate attraverso la loro lunghezza d'onda, la loro frequenza o la loro energia. I tre parametri sono legati tra loro. Ognuno influenza l'effetto che il campo può avere su un sistema biologico.

Un'onda elettromagnetica consiste di piccolissimi pacchetti di energia chiamati fotoni. L'energia di ogni pacchetto, o fotone, è direttamente proporzionale alla frequenza dell'onda: più alta è la frequenza, maggiore è la quantità di energia di ogni fotone.

Il modo in cui le onde elettromagnetiche influenzano i sistemi biologici è determinato in parte dall'intensità del campo ed in parte dalla quantità di energia di ogni fotone.

Le onde elettromagnetiche di bassa frequenza sono indicate come "campi elettromagnetici" e quelle a frequenza molto alta come "radiazioni elettromagnetiche". Inoltre in base alla loro frequenza ed energia, le onde elettromagnetiche possono essere ulteriormente classificate come "radiazioni ionizzanti" o "radiazioni non ionizzanti" (NIR). Inoltre a bassa frequenza si può trattare il campo elettrico in condizioni quasi-stazionarie, e quindi si possono separare gli effetti di campo elettrico e magnetico, che verranno in seguito studiati indipendentemente.

Le radiazioni ionizzanti sono onde elettromagnetiche di frequenza estremamente alta (raggi X e raggi gamma), che possiedono un'energia fotonica sufficiente per produrre la ionizzazione (cioè per creare atomi o parti di molecole elettricamente carichi positivamente e negativamente), rompendo i legami atomici che tengono unite le molecole nelle cellule.

La definizione radiazioni non ionizzanti (NIR) è un termine generale che indica quella parte dello spettro elettromagnetico in cui l'energia fotonica è troppo bassa per rompere i legami atomici. Le NIR comprendono la radiazione ultravioletta (UV), la luce visibile, la radiazione infrarossa, i campi a radiofrequenze e microonde, i campi a frequenza estremamente bassa (ELF) ed i campi elettrici e magnetici statici, questi ultimi di interesse per il presente studio.

Le NIR, anche di alta intensità, non possono provocare la ionizzazione in un sistema biologico. Si è tuttavia dimostrato che le NIR producono altri effetti biologici, per esempio riscaldando i tessuti, alterando le reazioni chimiche o inducendo correnti elettriche nei tessuti e nelle cellule.

Le onde elettromagnetiche possono produrre effetti biologici che talvolta, ma non sempre, possono portare ad effetti di danno alla salute. È importante comprendere la differenza tra i due effetti.

Un effetto biologico si verifica quando l'esposizione alle onde elettromagnetiche provoca qualche variazione fisiologica notevole o rilevabile in un sistema biologico.

Un effetto di danno alla salute si verifica quando l'effetto biologico è al di fuori dell'intervallo in cui l'organismo può normalmente compensarlo, e ciò porta a qualche condizione di detrimento della salute.

Alcuni effetti biologici possono essere innocui, come ad esempio quella reazione corporea che consiste in un aumento della circolazione sanguigna nella pelle in risposta ad un leggero aumento del riscaldamento da parte del sole. Alcuni effetti possono essere vantaggiosi, come la sensazione di calore da parte dei raggi diretti del sole in una giornata fredda, o possono addirittura portare ad effetti positivi per la salute, come nel caso del sole che aiuta la produzione di vitamina D. Tuttavia, alcuni effetti biologici conducono ad effetti nocivi per la salute, come il dolore per le ustioni solari o il cancro della pelle.

Effetti del campo elettrico

I campi a bassa frequenza inducono soprattutto cariche e correnti elettriche, che possono stimolare le cellule di tessuti come nervi e muscoli. All'interno del corpo circolano delle correnti elettriche come effetto delle reazioni chimiche che fanno parte della vita. Se i campi inducono correnti che superano in misura significativa il livello di corrente biologica nel corpo, vi è la possibilità di conseguenze negative per la salute. In particolare la stimolazione dei nervi periferici nelle persone richiede generalmente valori delle densità di correnti nel tessuto muscolare in esame pari a circa 1 A/m², che corrisponde grosso modo ad una conducibilità elettrica all'interno del tessuto di $\sigma \approx 1$ S/m con un valore di campo elettrico dell'ordine di 1 V/m. Quindi è importante che un soggetto non sia sottoposto ad un campo elettrico interno superiore a tale valore (1 V/m), al fine di evitare interferenze con i segnali biologici. Il campo elettrico interno è legato a quello esterno con una relazione riportata nel seguito.

Campi elettrici esistono ogni volta che una carica (o una tensione) è presente, indipendentemente dal fatto che vi sia un flusso di corrente elettrica. Nel caso di campi a bassissima frequenza quasi nulla del campo elettrico penetra all'interno del corpo umano. Infatti si può assimilare il corpo umano ad un condensatore le cui armature sono costituite dallo strato epiteliale esterno, facendo l'ipotesi semplificativa di considerare il tutto come un mezzo lineare, omogeneo e isotropo, si può dimostrare (Polk 1986) che nel caso di un campo elettrico stazionario di frequenza f applicato esternamente, il rapporto tra il campo esterno e quello interno dipende dal rapporto tra l'ampiezza della corrente di conduzione e l'ampiezza della corrente di spostamento indotte, ovvero dall'equazione di Maxwell si può scrivere:

$$\frac{E_{out}}{E_{in}} \approx \frac{\sigma}{\omega \varepsilon}$$

dove

$\omega = 2\pi f$ ed ε è la permittività dielettrica dell'aria e σ è la conduttività del tessuto che è

approssimativamente unitaria. Poiché per l'aria $\varepsilon \approx 8.84 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, il rapporto dato dall'equazione precedente che descrive l'attenuazione che subisce un campo elettrico esterno all'interno di un tessuto è approssimativamente 100 milioni alla frequenza di 50Hz.

Si può osservare che eventuali distorsioni del campo nell'aria, per la presenza di un corpo conduttore, o per effetto dell'umidità atmosferica, possono ridurre in qualche misura questo rapporto, che non sarà comunque mai molto inferiore ai 10 milioni.

Da notare però che per intensità molto elevate, i campi elettrici possono essere percepiti attraverso la vibrazione dei peli cutanei.

Effetti del Campo magnetico

Campi magnetici si creano ogni volta che vi è un flusso di corrente elettrica. Essi penetrano facilmente nel corpo umano, senza alcuna attenuazione apprezzabile.

Questo è dovuto sostanzialmente a due motivi. Il primo è che la permeabilità magnetica di un tessuto o di una cellula è uguale approssimativamente a quella del vuoto; il secondo è che la conducibilità elettrica relativamente bassa del tessuto umano (dell'ordine di 1 S/m) in confronto a quella di una struttura metallica (circa 10^7 S/m), rende trascurabile il campo magnetico generato dalle correnti indotte nel corpo umano.

Le considerazioni sopra riportate vanno ulteriormente dettagliate nel caso il campo elettromagnetico sia statico.

Inoltre, seppure l'effetto principale dei campi elettromagnetici sui sistemi biologici è l'induzione di cariche e correnti elettriche, è stato provato che si verificano anche altri effetti, che potrebbero portare a danni per la salute ma solo a intensità di campo molto elevate.

Effetti di Campi elettrici e magnetici statici

I campi elettrici statici non penetrano nel corpo. Questa affermazione deriva dalle stesse considerazioni fatte per il caso di campi ELF con la differenza che ora $f \rightarrow 0$ e di conseguenza l'attenuazione tende ad aumentare ulteriormente, rendendo praticamente nullo il campo elettrico che penetra all'interno del corpo. I campi elettrici statici possono comunque essere percepiti attraverso il movimento dei peli cutanei se sono di intensità molto elevata. Quindi se si eccettuano le scariche elettriche dovute a forti campi elettrici statici, questi ultimi non sembrano avere effetti significativi sulla salute.

I campi magnetici statici hanno virtualmente la stessa intensità all'interno e all'esterno del corpo, questo per le stesse considerazioni fatte per il caso di campi magnetici ELF. Campi magnetici

statici molto intensi possono alterare il flusso sanguigno o modificare i normali impulsi nervosi. Ma intensità così elevate non si incontrano nella vita quotidiana. Comunque, vi è insufficiente informazione sugli effetti di un'esposizione prolungata a campi magnetici statici, ai livelli che si incontrano negli ambienti di lavoro.

In generale lo studio degli effetti del campo elettromagnetico sulla salute è argomento contrastato e in grande discussione a tutti i livelli (medico, tecnico, politico). Sono tuttora oggetto di studio eventuali effetti differiti (tumori, in particolare leucemia mieloide nei bambini) dovuti a esposizione prolungate al campo, soprattutto magnetico.

Le indagini epidemiologiche in merito hanno fornito finora risultati contrastanti e non definitivi; probabilmente perché l'eventuale correlazione tra l'esposizione al campo e l'insorgenza di neoplasie è talmente debole che si confonde con l'influenza di tutti gli altri parametri che provocano lo stesso fenomeno. È come cercare un segnale paragonabile al rumore di fondo.

Già da decenni vengono studiati gli effetti dannosi provocati dalla esposizione ai campi elettromagnetici. Molti organismi, a livello mondiale, hanno cercato di individuare una relazione di causa-effetto tra l'esposizione a campi elettrici, magnetici, elettromagnetici, e lo sviluppo di malattie di grossa rilevanza dal punto di vista sanitario. È necessario effettuare una distinzione tra effetti dannosi a breve ed a lungo termine. I primi vengono associati all'effetto di surriscaldamento di tessuti che, essendo scarsamente irrorati dal sangue, non hanno la capacità di smaltire il calore prodotto dall'esposizione (come nel caso dell'opacizzazione del cristallino causata dal surriscaldamento per esposizione ad un campo elettromagnetico di forte intensità e ad alta frequenza) grazie al meccanismo di termoregolazione. Per quanto riguarda gli effetti a lungo termine, si è supposta l'esistenza di un nesso di causalità tra esposizione a campi elettromagnetici anche di debole intensità (in particolare campi magnetici a bassa frequenza) ed un aumento della probabilità dello sviluppo di tumori e leucemie, specie in soggetti di giovane età, oltre che altri effetti non cancerogeni sull'uomo quali aborti spontanei sia in ambienti lavorativi che in ambiente domestico ed il morbo di Alzheimer. La difficoltà che la ricerca scientifica incontra è quella della esiguità numerica dei campioni, che non consente di procedere a valutazioni di carattere epidemiologico e statistico con un sufficiente grado di attendibilità. In altre parole, l'eventuale incremento di casi di tumore in soggetti esposti a campi potenzialmente pericolosi, viene a confondersi con le variazioni casuali del numero di colpiti dalla malattia. Inoltre, altri fattori rendono difficile il raggiungimento di risultati certi, quali il lungo tempo di latenza delle forme tumorali, l'imponderabilità dei fattori di predisposizione dei soggetti colpiti e, non da ultimo, l'oggettiva difficoltà dell'azione di monitoraggio.

3.1.2 Modellizzazione matematica e simulazione dei fenomeni elettromagnetici a basse frequenze

Una volta individuati i tratti di linea elettrificata coinvolti, si effettua una modellizzazione al fine di poter simulare i campi da essi generati e riportarne i risultati nella modalità grafica ritenuta più opportuna.

Il campo magnetico H spesso viene espresso in termini di densità di flusso magnetico, B , anche nota come induzione magnetica.

L'induzione magnetica è legata all'intensità del campo magnetico dalla relazione :

$$B = \mu \cdot H \quad (1)$$

dove $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ è la permeabilità del mezzo; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m è il valore della permeabilità assoluta del vuoto e μ_r è la permeabilità relativa, che nel caso dell'aria vale $\mu_r = 1$.

Per il calcolo del campo di induzione magnetica si è adottato un modello analitico basato sulla risoluzione delle leggi di Biot-Savart. Tale modello prevede che i vari conduttori percorsi dalla corrente vengano rappresentati mediante dei segmenti rettilinei in cui si considera costante la corrente. Applicando il principio di sovrapposizione lineare delle cause e degli effetti, l'induzione magnetica in ogni punto viene calcolata come somma vettoriale delle induzioni dovute alle correnti nei vari segmenti rettilinei.

Le espressioni utilizzate sono valide per conduttori paralleli al terreno; per i conduttori che presentano andamento a catenaria si deve tener conto dell'altezza media rispetto al piano del ferro.

La metodologia utilizzata fonda le sue basi nell'applicazione della "prima formula di Laplace" che consente di determinare il campo magnetico prodotto da una qualsiasi distribuzione spaziale di cariche in moto stazionario, e quindi nel caso specifico anche il campo di induzione prodotto da un circuito percorso da corrente continua in un generico punto (x, y, z) .

$$\vec{B}_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \int \frac{\vec{j}(x, y, z) \cdot \vec{r}}{r^3} d\tau \quad (2)$$

dove $\vec{j}$ è il vettore densità di corrente nello spazio, $\vec{r}$ è la distanza orientata dal generico punto (x, y, z) dello spazio verso il punto di osservazione P in cui si vuole determinare il campo e τ è lo spazio stesso.

Nel caso di filo rettilineo molto lungo e punto P di osservazione non vicino ad uno degli estremi del conduttore l'applicazione della formula (2) consente di ottenere un'espressione (3) abbastanza semplice per il calcolo del modulo del campo di induzione magnetica.

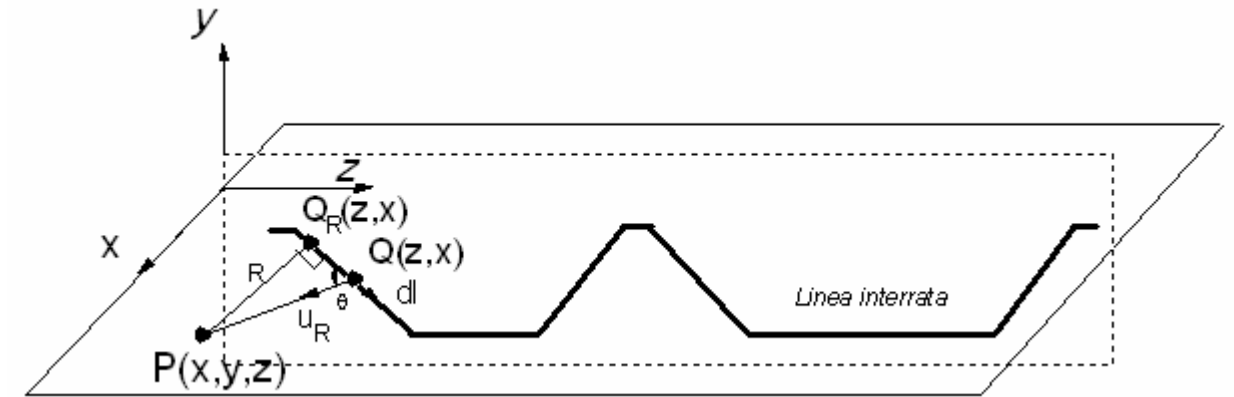
$$B_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i}{R} \quad (3)$$

dove i è la corrente nel conduttore e R la distanza del punto di osservazione P dal conduttore.

Il programma di calcolo utilizzato per le valutazioni presenti si basa sostanzialmente sull'implementazione dei concetti base sopra illustrati, estendendo opportunamente le formule presentate al caso di un sistema inducente composto da un numero qualsiasi di conduttori percorsi da corrente.

In particolare si è applicata la sovrapposizione degli effetti considerando la corrente che scorre nei due conduttori, poi calcolata la componente x e y del vettore B si è determinata l'intensità (modulo) dell'induzione magnetica.

L'approssimazione compiuta si può considerare accettabile ad una distanza pari a dieci volte la sezione lineare dei conduttori.



Il contributo del campo magnetico di ciascun tratto infinitesimo al punto $P(x, y, z)$ è stato calcolato in base alla seguente relazione:

$$\vec{B}(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \int I \frac{d\vec{l} \wedge \vec{u}_r}{r^2} \quad (4)$$

Il campo totale si ottiene attraverso l'integrazione numerica dei singoli contributi; basandosi sulla (4) il programma di simulazione è in grado di ricostruire correttamente geometrie complesse quali profili di impianti sotterranei e linee aeree (denominate 'catenarie').

Il programma di simulazione CAD

Il simulatore utilizzato, AIDAEM, è stato sviluppato dallo stesso gruppo di lavoro che ha effettuato le misure, si tratta di un programma il cui algoritmo di calcolo si basa sulla equazione (4) che è stata ulteriormente raffinata al fine di poter calcolare il campo elettrico e magnetico di una generico elettrodotto caratterizzato da un sistema simmetrico polifase (generalmente trifase) od, in alternativa, da una arbitraria configurazione di conduttori posizionati nello spazio.

In particolare generalizzando la (4) al fine di poter specificare le componenti spaziali si ottiene :

$$|B^m(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})| = \frac{\mu I}{4\pi} \sqrt{1 + n_1^2} \sqrt{(\bar{x} - \bar{x})^2 + \bar{y}^2 + (\bar{z} - \bar{z})^2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{[(\bar{x} - x)^2 + \bar{y}^2 + (\bar{z} - n_1 x - p_1)^2]^{3/2}} dx$$

ed separando ulteriormente le singole componenti di corrente generate dal dovute al generico conduttore i -esimo caratterizzato dal insieme di percorsi j -esimi:

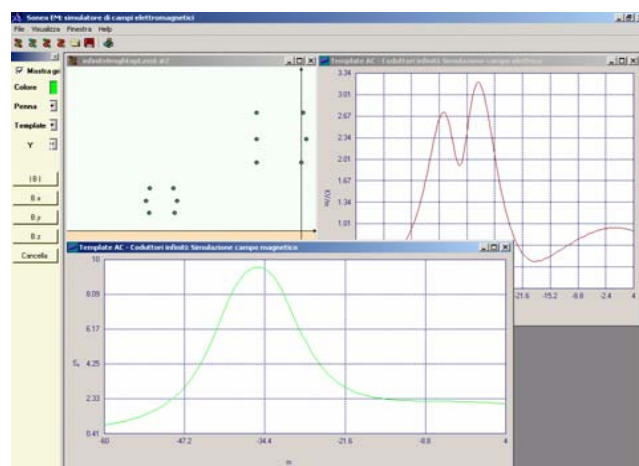
$$|B(x, y, z)| = \sum_i I_i \sum_j |B^j(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})| \quad (5)$$

Il programma, grazie all'implementazione in forma finita dell (5), consente di gestire oltre ai parametri base quali tensione e corrente del conduttore, anche alcune grandezze secondarie: la sezione dello stesso garantisce una corretta interpretazione di alcuni fenomeni di bordo che si verificano a distanze ravvicinate dal conduttore, la fase relativa della corrente di ogni conduttore consente di effettuare una corretta valutazione dei fenomeni di interazione tra i campi generati dai singoli conduttori, questo parametro è fondamentale nell'analisi di campi generati da sorgenti a frequenza non nulla.

E' ovviamente possibile poi configurare una serie di parametri che gestiscono la risoluzione e l'area di calcolo del simulatore.

La figura rappresenta il menu principale di inserimento dati in 2D, in questa configurazione è possibile simulare una generica sezione di conduttori infinitamente lunghi e paralleli al terreno.

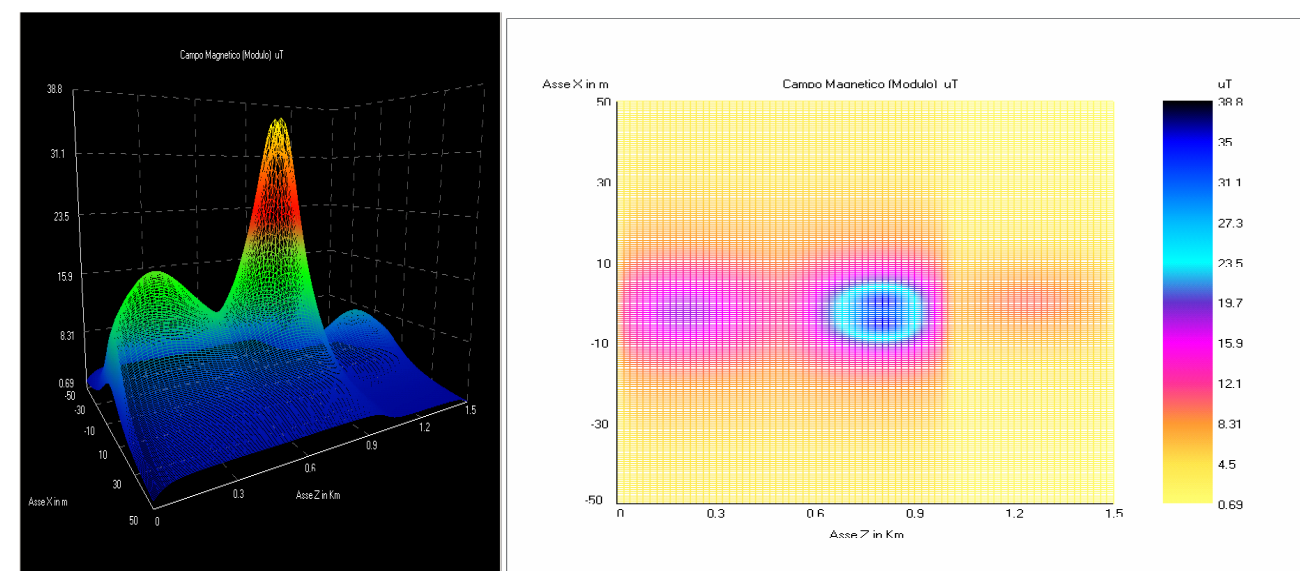
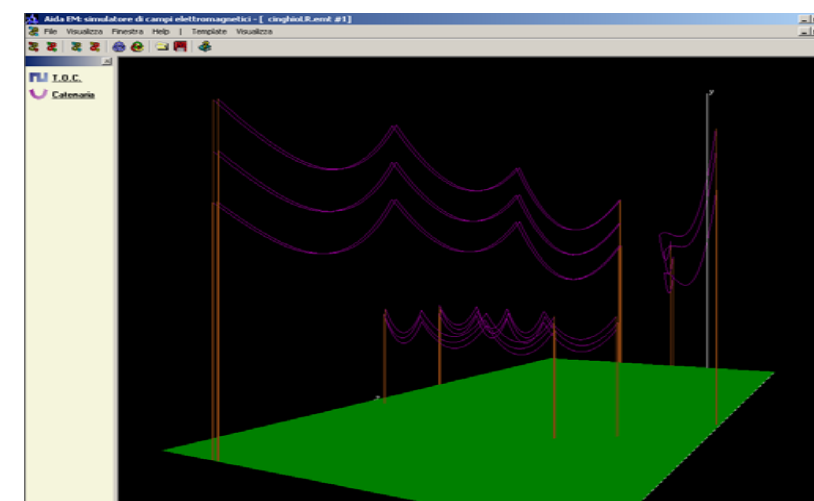
Una volta calcolato il campo elettrico o magnetico è possibile visualizzarlo graficamente come si evince dalla figura oppure esportare i risultati sottoforma di tabella.



Il menù evoluto consente di elaborare geometrie 3D nello spazio, è così possibile inserire qualsiasi tipo di geometria del conduttore, dalle catenarie di un elettrodotto alle forme costituite da linee spezzate miste.

La figura riportata sotto rappresenta un tipico esempio di schematizzazione di elettrodotto aereo (catenaria)

I dati provenienti da una simulazione 3D possono essere visualizzati sottoforma di curve isolivello facilmente importabili dai generici programmi di progettazione CAD (per questo progetto è stato utilizzato AutoCAD per esempio), grafici 3D o semplicemente sottoforma di file tabellari formato testo; le figure sotto riportano degli esempi delle prime due forme grafiche



3.1.3 Normativa vigente per l'esposizione a campi elettromagnetici a basse frequenze (ELF)

La normativa nazionale e regionale per la tutela della popolazione dagli effetti dei campi elettromagnetici disciplina separatamente le basse frequenze (elettrodotti) e le alte frequenze (impianti radiotelevisi, stazioni radiobase, ponti radio).

Il 14 febbraio 2001 è stato approvato dalla Camera dei deputati il disegno di legge quadro sull'inquinamento elettromagnetico che era stato approvato lo scorso 24 gennaio dal Senato (Legge quadro 36 sulla protezione delle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici).

In generale il sistema di protezione dagli effetti delle esposizioni agli inquinanti ambientali distingue tra:

effetti acuti (o di breve periodo), basati su una soglia, per cui si fissano limiti di esposizione che garantiscono - con margini cautelativi - la non insorgenza di tali effetti;

effetti cronici (o di lungo periodo), privi di soglia e di natura probabilistica (all'aumentare dell'esposizione aumenta non l'entità ma la probabilità del danno), per cui si fissano livelli operativi di riferimento per prevenire o limitare il possibile danno complessivo.

È importante dunque distinguere il significato dei termini utilizzati nelle leggi (riportiamo le definizioni inserite nel disegno di legge quadro):

Limiti di esposizione	valori di campo elettromagnetico che non devono essere superati in alcuna condizione di esposizione, ai fini della tutela dagli <i>effetti acuti</i> .
Valori di attenzione	valori di campo elettromagnetico che non devono essere superati negli ambienti abitativi, scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze prolungate. Essi costituiscono la misura di cautela ai fini della protezione da possibili <i>effetti di lungo periodo</i> .
Obiettivi di qualità	valori di campo elettromagnetico causati da singoli impianti o apparecchiature da conseguire nel breve, medio e lungo periodo, attraverso l'uso di tecnologie e metodi di risanamento disponibili. Sono finalizzati a consentire la minimizzazione dell'esposizione della popolazione e dei lavoratori ai campi elettromagnetici anche per la protezione da possibili <i>effetti di lungo periodo</i> .

È chiaro quindi che i valori di attenzione (come per esempio i 6 V/m del Decreto Ministeriale sulle radiofrequenze) e gli obiettivi di qualità (come il valore di 0.2 μ T della Legge della Regione Veneto sugli elettrodotti) non devono essere considerati come soglie di sicurezza, ma come riferimenti operativi per il conseguimento di obiettivi di tutela da possibili effetti di lungo periodo nell'applicazione del 'principio cautelativo'.

Tale principio prevede di adottare misure di tutela della popolazione anche in assenza di dati definitivi sulla nocività dei campi elettromagnetici. Tali misure, sempre secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità, dovrebbero essere semplici, facilmente perseguibili e di basso costo, e per queste ragioni dovrebbero essere adottate in particolare per le nuove installazioni.

L'Italia ha per prima recepito nella normativa questo principio, con una legge nazionale sulle radiofrequenze e leggi regionali (Veneto, Emilia Romagna) sulle basse frequenze, che adottano misure cautelative per la protezione dai possibili effetti di lungo periodo.

Le legge prevede che la definizione dei suddetti livelli venga effettuata separatamente per le basse frequenze (ELF) e per le alte frequenze.

E in particolare vengono stabiliti limiti diversi per la popolazione e per i lavoratori.

Ogni norma ha infatti una struttura a due livelli nella quale per la popolazione in generale vengono fissati limiti più bassi che per i lavoratori. Per essa bisogna tenere conto di tutte le attività possibili e di tutte le età e le condizioni di salute. La popolazione può non essere consapevole di

alcuni degli effetti dell'esposizione ai campi elettromagnetici, mentre ai lavoratori possono essere forniti addestramento e informazioni appropriate.

Fino alla emanazione dei decreti di seguito indicati restano in vigore il DPCM 23/4/92 e succ. modif. in tema di esposizione residenziale in bassa frequenza(elettrodotti) e il D.M. 10 settembre 1998 n. 381, in tema di tetti di radiofrequenza compatibili con la salute umana.

La distanza minima

Fino all'aprile 1992, gli elettrodotti italiani erano costruiti osservando le apposite norme tecniche emanate dal CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano), a cui è stata quasi sempre data una valenza legislativa tramite l'inserimento in leggi o decreti ministeriali.

In questo ambito si collocano innanzitutto la legge 28 giugno 1986, n.339 e il decreto interministeriale 21 marzo 1988, n.449 che recepiscono la normativa CEI 11-4. Esse ripartivano innanzitutto le linee elettriche aeree nelle seguenti quattro classi:

Classe 0: Linee telefoniche, telegrafiche, di segnalazione o comando a distanza.

Classe I:Linee di trasporto o distribuzione di energia elettrica la cui tensione nominale è inferiore o uguale a 1000 V.

Classe II:Linee di trasporto o distribuzione di energia elettrica la cui tensione nominale è superiore a 1000 V ma inferiore o uguale a 30 kV.

Classe III:Linee di trasporto o distribuzione di energia elettrica la cui tensione nominale è superiore a 30 kV.

Inoltre, in queste disposizioni venivano specificate le distanze minime dei conduttori dal terreno e dagli edifici mediante formule, nelle quali la tensione nominale di esercizio compariva come parametro; questo approccio sarà conservato anche nella normative successive. È importante osservare che le distanze erano basate esclusivamente sulla necessità di evitare il cosiddetto *rischio di scarica*, cioè la possibilità di innesco di una scarica elettrica tra il conduttore sotto tensione ed un oggetto a tensione zero.

All'inizio del 1991, un Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici ([DMLP 16 gennaio 1991](#)) ha introdotto un'importante novità: citando testualmente veniva "riconosciuta la necessità di apportare modifiche agli articoli 2.1.05 e 2.1.08 del citato regolamento in riferimento a possibili effetti sulla salute derivanti dai campi elettromagnetici prodotti dalle linee elettriche aeree".

Il decreto del 1991 ha fissato nuovi valori minimi per "l'altezza dei conduttori sul terreno a sulle acque non navigabili" (articolo 2.1.05) e per le "distanze di rispetto dai fabbricati" (articolo 2.1.08). La situazione per alcune tipologie di elettrodotti di classe III molto comuni in Italia è schematizzata nella tabella seguente:

	380 kV	220 kV	132 kV
Altezza minima sul terreno e su specchi d'acqua non navigabili [m]	7.78	6.82	6.29
Altezza minima sul terreno in aree adibite ad attività ricreative, impianti sportivi, luoghi d'incontro, piazzali di deposito e simili [m]	11.34	6.82	6.29
Distanza minima dai fabbricati [m]	6.80	5.20	4.32
Altezza minima su terrazzi e tetti piani [m]	11.34	4.00	4.00

Tabella 1

La situazione è rimasta tale fino al sopraggiungere di un importante DPCM ([Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 23 aprile 1992](#)) che ha fissato i "limiti massimi di esposizione ai campi elettrico e magnetico generati alla frequenza industriale nominale (50 Hz) negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno".

Questo decreto ha stabilito le seguenti intensità massime di campo elettrico e di induzione magnetica "in aree o ambienti in cui si possa ragionevolmente attendere che individui della popolazione trascorrono una parte significativa della giornata":

Campo elettrico	Induzione magnetica
5 kV/m	0,1 mT

Tabella 2

Mentre "nel caso in cui l'esposizione sia ragionevolmente limitata a poche ore al giorno", il decreto ha stabilito che i limiti suddetti possono essere rilassati come segue:

Campo elettrico	Induzione magnetica
10 kV/m	1 mT

Tabella 3

Oltre a ciò il DPCM del 1992 ha fissato le seguenti nuove distanze minime tra i conduttori delle linee elettriche aeree ed i "fabbricati adibiti ad abitazione o ad altra attività che comporta tempi di permanenza prolungati":

380 kV	220 kV	132 kV
28 m	18 m	10 m

Tabella 4

Questo aspetto del decreto è stato oggetto di numerose critiche da parte di alcuni esponenti tanto dell'Azienda Elettrica quanto del mondo accademico, basate sulla considerazione che lo specificare sia limiti di intensità dei campi sia distanze minime non solo avrebbe potuto portare a situazioni di possibile contraddizione, ma soprattutto avrebbe mortificato qualunque tentativo di innovazione tecnologica che mirasse ad abbattere le emissioni di campo elettrico e magnetico degli elettrodotti, a parità di tensione e corrente sulla linea.

Le critiche hanno forse portato qualche risultato, visto che pochi anni dopo ([DPCM 28 settembre 1995](#)) è stata pubblicata una norma tecnica secondo la quale (Art. 3) nell'eseguire il risanamento degli elettrodotti esistenti non in regola con il decreto del 1992, è sufficiente (almeno nella prima fase di attuazione del DPCM 23 aprile 1992) limitarsi al solo rispetto dei valori delle intensità dei campi ed ignorare la questione delle distanze minime, purché queste siano conformi alle normative precedenti, espresse nella Tabella 1.

Oltre a ciò sono state emanate alcune normative regionali. Nella Regione Emilia Romagna la legge regionale ER 9/2000 al capo IV art. 13 comma 4 recita che *gli strumenti urbanistici devono assicurare con riferimento agli impianti con tensione uguale o superiore a 15 kV che si realizzi il perseguimento dell'obiettivo di qualità di 0,2 µT di induzione magnetica valutata al ricevitore in prossimità di asili, scuole, aree verdi attrezzate e ospedali nonché edifici adibiti a permanenza di persone non inferiore a quattro ore giornaliere. Il perseguimento del valore di qualità deve essere realizzato attraverso gli strumenti urbanistici sia per le nuove costruzioni nei confronti delle linee e degli impianti esistenti sia per i nuovi impianti nei confronti delle costruzioni esistenti.*

Inoltre l'art. 14 della stessa legge regola i Risanamenti degli impianti di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica:

1. In attuazione dell'art. 30 del D.Lgs. 31 marzo 1998, n. 112, gli enti gestori delle reti di trasmissione e distribuzione di energia elettrica con linee ed impianti elettrici di tensione sino a 150.000 volt presentano alla Provincia, per gli impianti che non rispettano i valori limite fissati dalla normativa statale vigente, un Piano di risanamento con le procedure di cui al presente articolo ed entro i tempi di adeguamento della normativa statale.

2. Il Piano di risanamento con le priorità d'intervento è approvato dalla Provincia acquisito il parere del Comune interessato nonché dell'ARPA e dell'AUSL con le modalità previste all'art. 17 della L.R. n. 44 del 1995. Gli interventi contenuti nel Piano sono dichiarati di pubblico interesse, urgenti e indifferibili.

3. Nel caso in cui le opere di risanamento interessino il territorio di due o più Province, il Piano di risanamento è presentato alla Provincia nel cui territorio si sviluppa la porzione maggiore dell'impianto ed è approvato acquisita l'intesa delle Province interessate.

4. L'approvazione del Piano contiene l'autorizzazione prevista all'art. 3 della L.R. n. 10 del 1993.

5. L'ente gestore della rete di trasmissione di energia elettrica per le reti con tensione superiore a 150.000 volt attiva la procedura di risanamento con le modalità previste dal DPCM 23 aprile 1992.

L'art. 15 infine regola il Censimento e catasto delle linee e degli impianti elettrici. Si prevede che vengano identificate le linee e gli impianti in esercizio che superano il valore di 0,5 μ T di induzione magnetica misurato al ricettore sulla base delle comunicazioni degli enti gestori delle reti di trasmissione e distribuzione di energia elettrica.

Appare evidente che i limiti e le distanze di rispetto fissati dal decreto nazionale e dalla legge regionale sono molto diversi perché il primo fa riferimento agli effetti acuti dei campi ELF, mentre la seconda nell'ottica della cautela introduce misure di prevenzione per i nuovi elettrodotti e le nuove aree residenziali in vicinanza di elettrodotti esistenti.

I limiti di esposizione del DPCM 23/4/92 coincidono con i livelli di riferimento indicati dalla Raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea n. 1999/519/CE del 12/7/99 la quale fa esplicito riferimento ai risultati dello studio pubblicato il 28/04/1998 dall'International Committee for Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) dal titolo "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)".

Si rammenta che alle basse frequenze ed in condizioni statiche il campo magnetico e quello elettrico devono essere considerati separatamente.

Livelli di riferimento base per i campi elettrici e magnetici a frequenze ELF – Raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea n. 1999/519/CE del 12/7/99 – Valori efficaci RMS non perturbati.

Frequenza (f, Hz)	Campo elettrico (V/m)	Campo Magnetico (mT)
0-1	-	40
1-8	10 000	40 / (f ²)
8-25	10 000	0.5 / f

25-800	250 / f	0.0005 / f
800-3000	250 / f	0.00625
3000-150 000	87	0.00625

Si osserva inoltre che la raccomandazione non indica alcun valore di riferimento per il limite di esposizione al campo elettrico statico, proponendo tuttavia un valore limite di 10kV/m per le frequenze 1÷8 Hz.

Per campi magnetici non uniformi, si può considerare il valore medio delle intensità di campo all'interno del volume che potrebbe essere occupato dalla testa o dal busto di una persona o, se non fosse possibile determinare questo valore medio, i valori che il campo assume al centro dei volumi suddetti.

Si osserva inoltre che viene proposto un valore di riferimento per il limite di esposizione al campo magnetico statico di 40mT.

Di recente emanazione è il D.P.C.M. del 28 Luglio 2003 (GU n. 200 del 29-8-2003) che fissa limiti di esposizione ai campi ELF relativamente alla frequenza degli elettrodotti, cioè 50 Hz; per le frequenze inferiori sino a 0 Hz e superiori sino a 100kHz nulla viene definito e perciò si intende valida al di fuori dei 50 Hz la Raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea n. 1999/519/CE del 12/7/99.

Tale decreto definisce dei limiti per il campo magnetico su base nazionale, abrogando implicitamente le leggi Regionali finora emanate; inoltre le sentenze numero 307 e 303 del 2003 della Corte Costituzionale hanno reso incostituzionali le leggi regionali aprendo la strada al cosiddetto Decreto Matteoli (D.P.C.M. del 28 Luglio 2003).

In esso vengono distinti:

- Limiti di esposizione (validi in tutte le circostanze ed indicati anche sono indicati nella Raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea n. 1999/519/CE del 12/7/99), pari a 100 μ T.
- Valori di attenzione (o misure di cautela) in corrispondenza di edifici adibiti a permanenze prolungate (per assicurare la protezione dai possibili effetti a lungo termine, in tutte le strutture ove sia prevista la permanenza media annua di almeno 4 ore giornaliere), pari a 10 μ T
- Gli obiettivi di qualità per le nuove linee o i nuovi edifici e in corrispondenza a spazi dedicati all'infanzia (scuole, asili, parchi-gioco, nonché di tutte le strutture ove sia prevista la permanenza media annua di almeno 4 ore giornaliere), pari a 3 μ T.

Mentre per il limite di esposizione si fa riferimento ad una misura istantanea, per cui tale valore non deve essere mai superato nemmeno in regime di transitorio, i valori di qualità ed attenzione fanno riferimento al valore mediano della misura estesa nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio dell'elettrodotto.

Inoltre vengono stabiliti limiti diversi per i lavoratori e per la popolazione: per i primi si applica solamente il limite di esposizione, mentre per i secondi vanno considerate tutte e tre le soglie descritte sopra.

3.2 Valutazione dello stato ante-operam (misure e simulazioni)

Al fine di poter valutare gli effetti dell'intervento in esame sul clima locale, è stato effettuato uno studio *Ante operam*.

In esso si sono identificate le sorgenti significative di campi elettromagnetici presenti sul territorio, individuandone la natura, la frequenza caratteristica e le possibili interazioni con le infrastrutture e gli edifici circostanti, tenendo in considerazione i limiti e gli obiettivi di qualità di cui al par. 3.1.

A completamento di tale quadro si sono effettuate delle simulazioni dei campi elettromagnetici potenzialmente generati nelle ipotesi di caso peggiore, inoltre si sono effettuate delle misure in situ nei punti ritenuti sensibili, al fine di convalidare le simulazioni e le considerazioni precedentemente fatte.

In primo luogo si sono separate le problematiche legate agli impianti ed elettrodotti funzionanti a frequenze industriali (50Hz), dalle sorgenti di campo a frequenza nulla; per le due situazioni si presentano infatti limiti e condizioni al contorno di misura decisamente differenti, inoltre per la stessa natura delle sorgenti risulta impossibile effettuare simulazioni e misure contemporaneamente ad entrambe le frequenze. Si ricorda tuttavia che le equazioni descrittive i campi elettrici e magnetici valgono per tutte le frequenze ELF, dove cioè è possibile applicare la condizione di quasi-stazionarietà e separare così il contributo del campo elettrico da quello del campo magnetico.

3.2.1 Campi a frequenze industriali (50Hz)

In questo ambito si sono identificati tutti gli elettrodotti ad Alta Tensione (132, 220, 380 kV) che si trovano nelle zone limitrofe a quelle destinate al passaggio della metropolitana, tali elettrodotti sono delegati al trasporto primario di energia, pertanto sono caratterizzati dal passaggio di correnti elevate e, conseguentemente, fonte di campo magnetico intenso (si ricorda che per queste frequenze si applica il recente 'Decreto Matteoli', D.P.C.M. del 28 Luglio 2003, che pone grande attenzione alla componente magnetica del campo generato da un generico elettrodotto).

Una volta individuati i tratti di linea elettrificata coinvolti, si è effettuata una modellizzazione al fine di poter simulare i campi da essi generati e riportarne i risultati su mappe georeferenziate, mediante il programma di simulazione CAD AidaEM.

3.2.1.1 Campi a frequenze industriali (50Hz): misure dello stato di fatto

In particolare si sono individuati i seguenti punti di intersezione :

- Via Abbeveratoia: è presente un elettrodotto 132kV di proprietà ENEL Distribuzione (linea 605).
- Via Calatafimi, Via Pellico: è presente un elettrodotto 132kV di proprietà ENEL Distribuzione (linea 679).
- Via S.Pertini (laterale destra di via Torelli entrando a Parma coordinate GPS: 44.78210lat, 10.34620lon) sono presenti due elettrodotti che utilizzano dei tralicci a doppia terna, 132kV e 220kV di proprietà Terna (linea 607 e 256 rispettivamente).
- Via Cimabue, Via Lago Scuro (trasversali di via Langhirano, località 'Orti del Cinghio') sono presenti 4 elettrodotti in Alta Tensione, 132kV e 220kV, nonché 2 elettrodotti in Media Tensione (linee 256 (220 kV), 607 661 680 659 (132kV), Campus e Felten (15kV) di proprietà AMPS).
- Via S.Leonardo altezza Via Prampolini, sono presenti un elettrodotto 132kV di proprietà Trenitalia, nonché un elettrodotto 132kV di proprietà ENEL Distribuzione (linea 602).
- Via S.Leonardo altezza Via M. Serao, è presente un elettrodotto 132kV di proprietà Trenitalia.
- Campus Universitario parcheggio di Ingegneria sede Didattica (Coordinate GPS: 10.31288lon, 44.76561lat) è presente un elettrodotto 132kV di proprietà Terna (linea 684).
- Via Langhirano oltre la rotonda della tangenziale (Coordinate GPS: 10.32110lon, 44.82754lat) è presente un elettrodotto 132kV di proprietà Terna (linea 659).

Una volta localizzati i punti di cui sopra, sono stati organizzati dei sopralluoghi al fine di identificare eventuali discrepanze dei dati forniti dai gestori relativi alle linee, inoltre si sono scelti dei punti significativi, tipicamente sotto le catenarie degli elettrodotti nel punto di minima altezza da terra; si sono effettuate delle misure di campo magnetico con analisi armonica, registrando l'andamento del campo per 30 s circa ad una altezza di 1,5 dal suolo, come suggerito dalla regola di buona tecnica (CEI 211-6).

Lo strumento utilizzato per le misure è un PMM 8053A dotato di sonda di campo elettrico e magnetico esterna EHP 50B.

Le suddette misure sono state effettuate nei giorni 19 e 20 Marzo 2004 dall' Ing. Giacomo Frassi e dall' Ing Alberto Bellini.

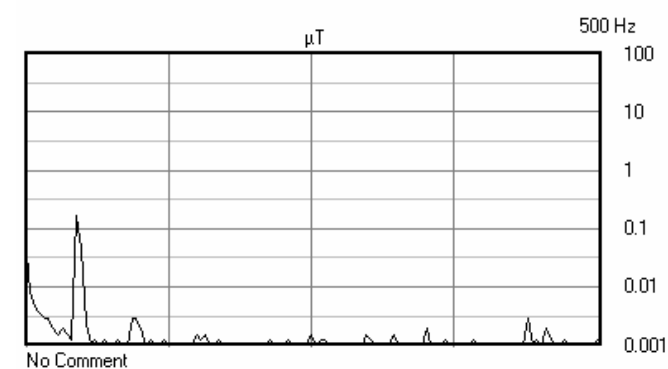
Via Abbeveratoia (Coordinate GPS: 44.7994lat, 10.3048lon) linea 605



Corrente in servizio nominale dell'elettrodotto, definite dalla norma CEI 11-60, facendo riferimento alla zona B (Italia Settentrionale), nel periodo F:

$$I_{22.8mm}^{132kV} = 450A$$

EHP 50B 19.03.04 16.19.35
Level: 0.16 μT (Wide Band)

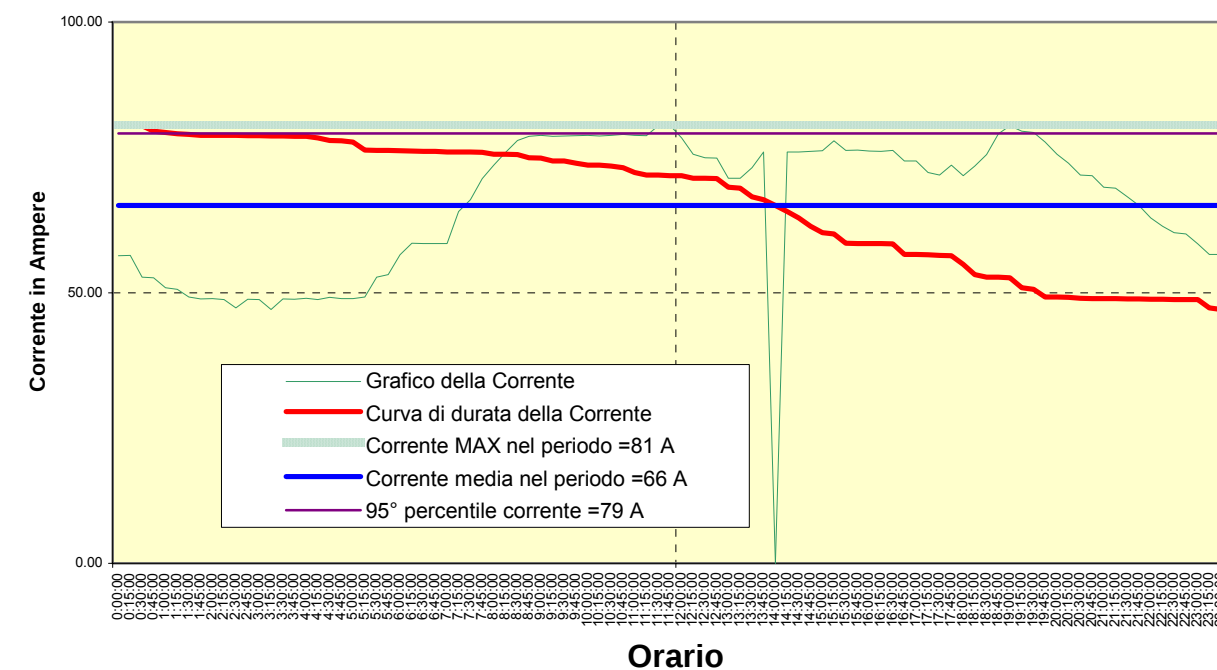


RMS: 0.15 μT

+0 s	0.15
+1 s	0.15
+2 s	0.15
+3 s	0.15
+4 s	0.15
+5 s	0.15
+6 s	0.15
+7 s	0.15
+8 s	0.15
+9 s	0.15
+10 s	0.15
+11 s	0.15
+12 s	0.15
+13 s	0.15
+14 s	0.15
+15 s	0.15
+16 s	0.15



ANDAMENTO DELLA CORRENTE SULLA LINEA 132kV N° 605 - PARMA VIGHEFFIO-PARMA
VALERA MISURE A PARMA VIGHEFFIO (PRMF)



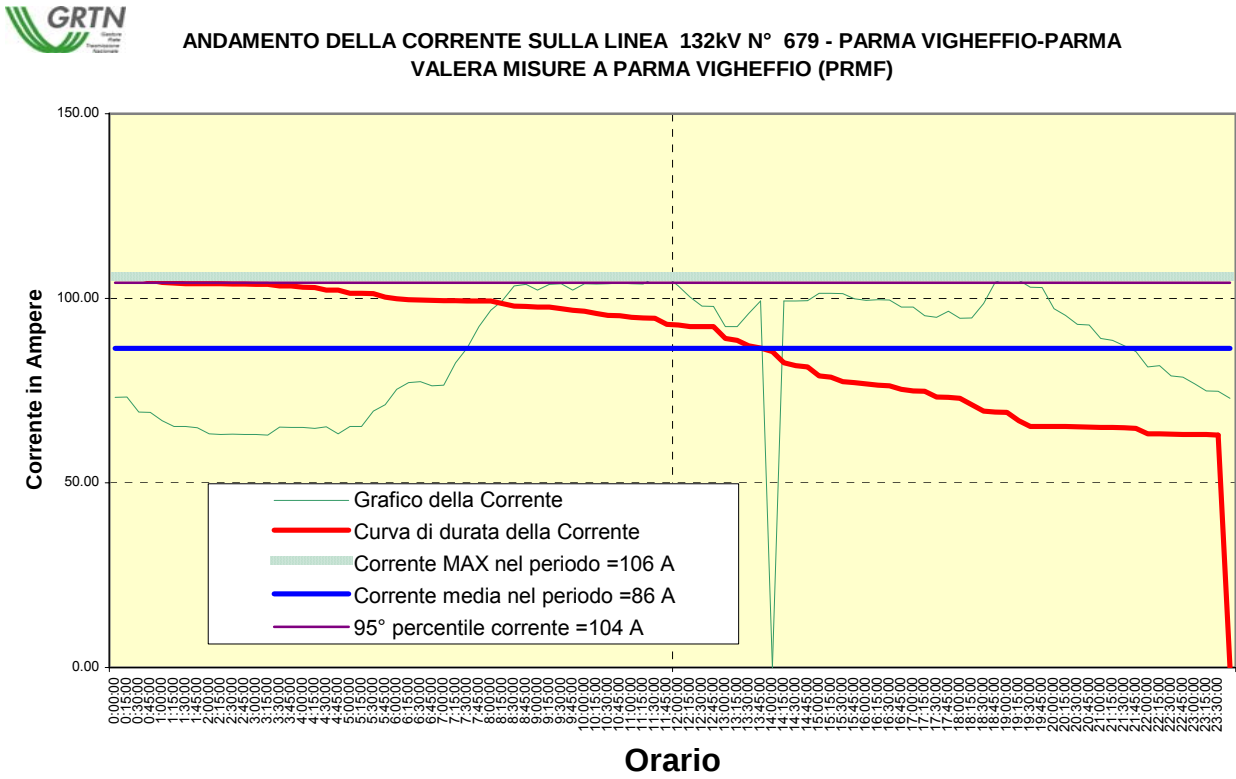
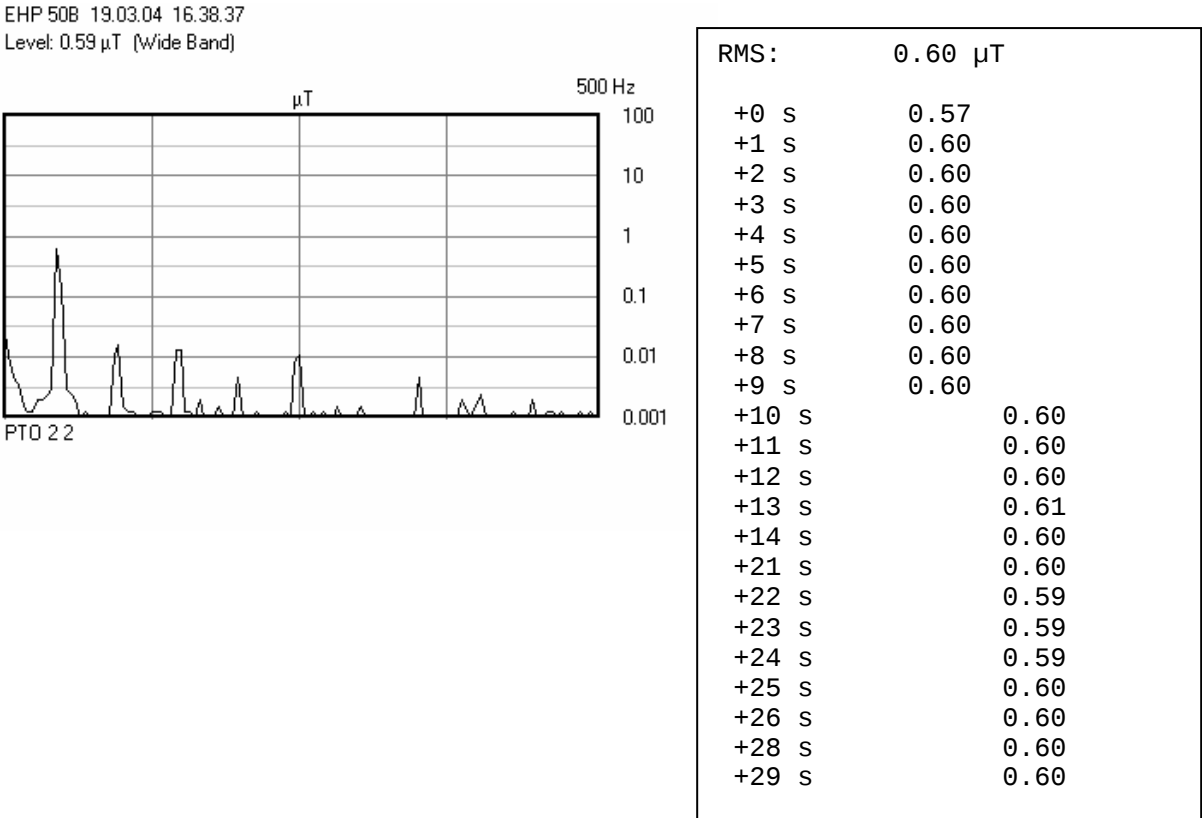
La linea 605 presenta un carico medio di corrente basso (66A), d'altra parte l'altezza complessiva dei tralicci è elevata (circa 30 m al conduttore inferiore), ciò si traduce in un campo magnetico decisamente contenuto, come di dimostrano le misure che hanno registrato valori prossimi a 0.15 μT , quindi più di un ordine di grandezza inferiori all'obiettivo di qualità di 3 μT .

Via Calatafimi, Via Pellico (Coordinate GPS: 44.79544lat, 10.30534lon), linea 679



Corrente in servizio nominale dell'elettrodotto, definite dalla norma CEI 11-60, facendo riferimento alla zona B (Italia Settentrionale), nel periodo F:

$$I_{22.8mm}^{132kV} = 450A$$

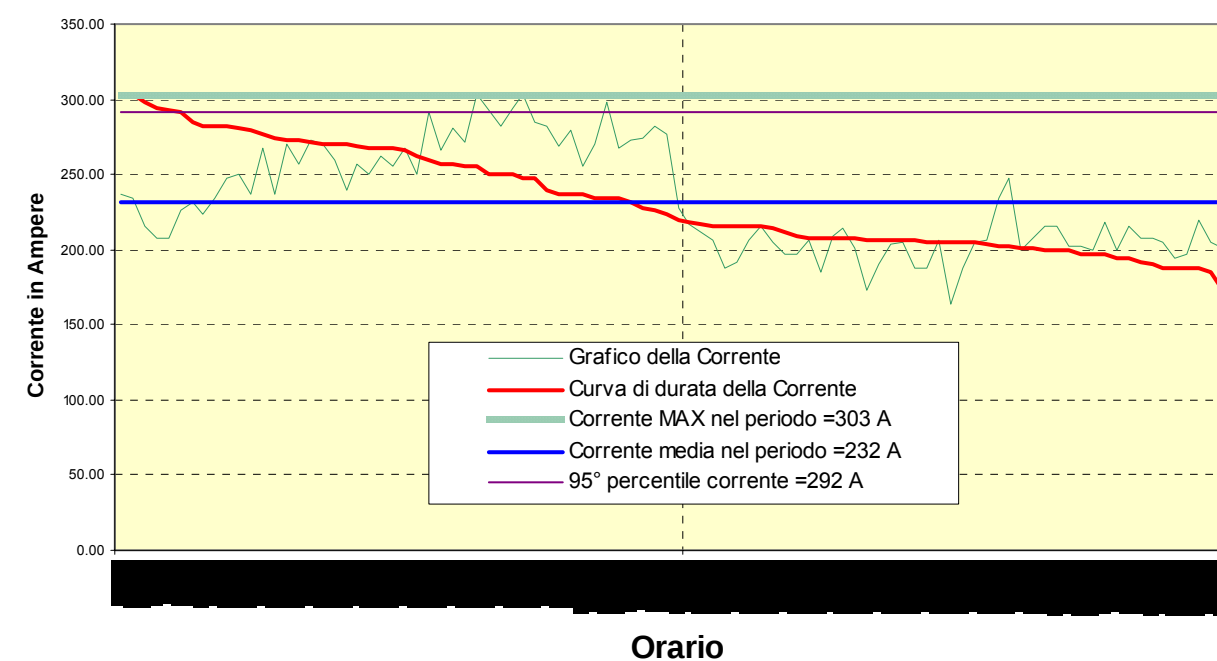


La linea 679 presenta un carico medio di corrente pari a 86A, che genera un campo magnetico 0.60 μ T rms, un valore abbondantemente inferiore all'obiettivo di qualità di 3 μ T, tuttavia è da notare la presenza di armoniche di ordine superiore probabilmente dovute allo sbilanciamento dei carichi applicati alla linea.

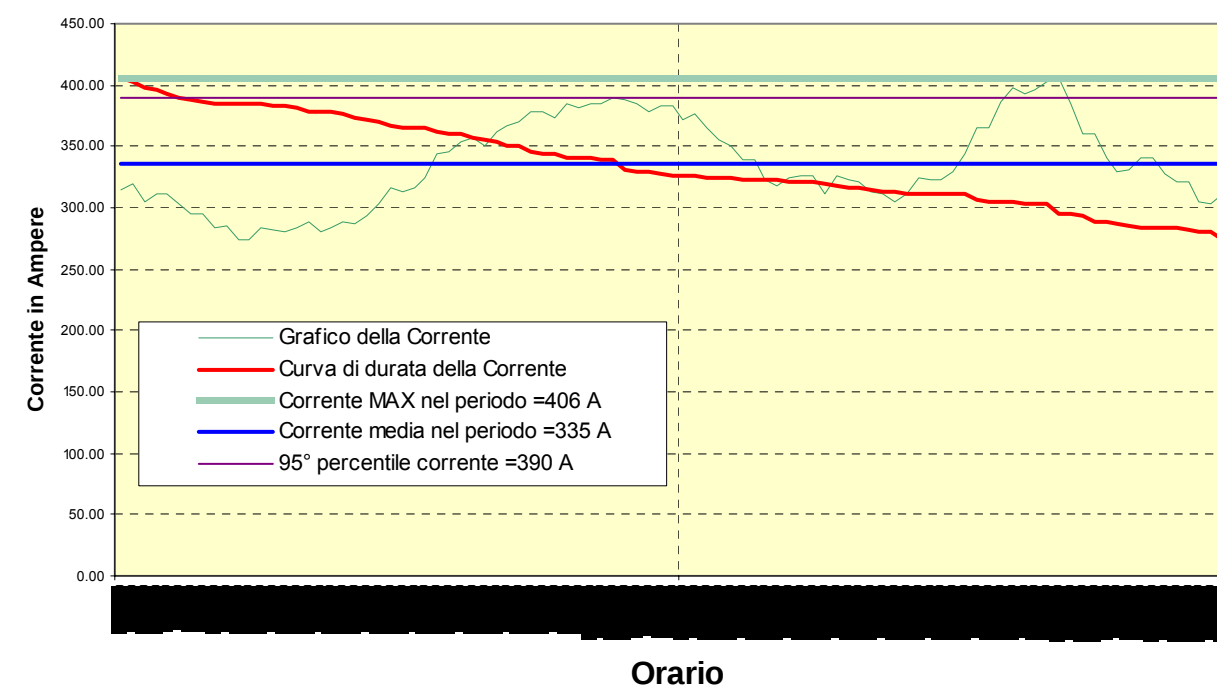
Via S.Pertini (GPS: 44.78210lat, 10.34620lon), line 607 e 256



ANDAMENTO DELLA CORRENTE SULLA LINEA 220kV N° 256 - COLORNO-SPEZIA STAZIONE
MISURE A COLORNO (CLRF)



ANDAMENTO DELLA CORRENTE SULLA LINEA 132kV N° 607 - PARMA VIGHEFFIO-S.QUIRICO
MISURE A PARMA VIGHEFFIO (PRMF)



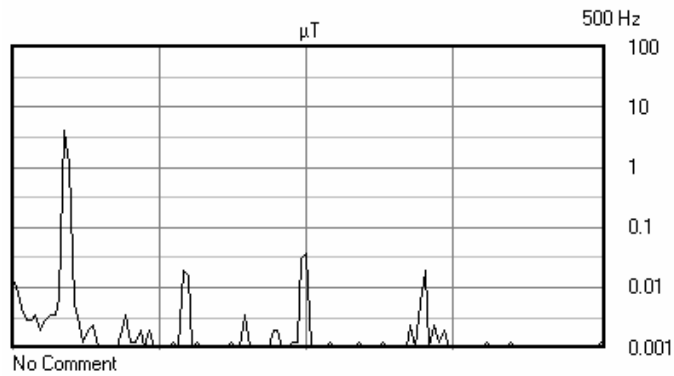
Corrente in servizio nominale dell'elettrodotto, definite dalla norma CEI 11-60, facendo riferimento alla zona B (Italia Settentrionale), nel periodo F:

$$I_{26.9mm}^{220kV} = 585A$$

$$I_{26.9mm}^{132kV} = 555A$$

Via Cimabue, Via Lago Scuro (GPS: 10.32148lon, 44.77738lat): linee 256 (220 kV), 607 661 680 659 (132kV), Campus e Felten (15kV)

EHP 508 20.03.04 11.42.46
Level: 4.56 µT (Wide Band)



RMS:	4.58 µT
+0 s	4.60
+1 s	4.58
+2 s	4.59
+3 s	4.60
+4 s	4.63
+5 s	4.58
+6 s	4.57
+7 s	4.57
+8 s	4.60
+9 s	4.57
+10 s	4.56
+11 s	4.60
+12 s	4.59
+13 s	4.59
+14 s	4.57
+15 s	4.58
+16 s	4.59
+17 s	4.58
+18 s	4.57
+19 s	4.56
+20 s	4.57
+21 s	4.59
+22 s	4.55
+23 s	4.55
+24 s	4.55
+25 s	4.57
+26 s	4.54
+27 s	4.56
+28 s	4.56
+29 s	4.56

In questo caso la presenza di due linee affiancate in configurazione doppia terna, per altro caratterizzate da correnti sostenute (medie pari a 335 A per la 607 e 232 A per la 256), comporta valori di campo magnetico pari a 4.58µT.

Non sono in assoluto valori preoccupanti, si ricorda infatti che il valore di attenzione per centri abitati e luoghi caratterizzati da permanenza prolungata è di 10µT, tuttavia nell’ottica di realizzare nuove strutture in prossimità di tali elettrodotti si ritiene opportuno analizzare mediante la simulazione riportata in seguito al fine di individuare i ‘corridoi’ all’interno dei quali si ritiene superato l’obiettivo di qualità di 3 µT.



Corrente in servizio nominale dell’elettrodotto, definite dalla norma CEI 11-60, facendo riferimento alla zona B (Italia Settentrionale), nel periodo F:

Linea 256: $I_{26.9mm}^{220kV} = 585A$

Linea 607: $I_{26.9mm}^{132kV} = 555A$

Linea 661: $I_{26.9mm}^{132kV} = 555A$

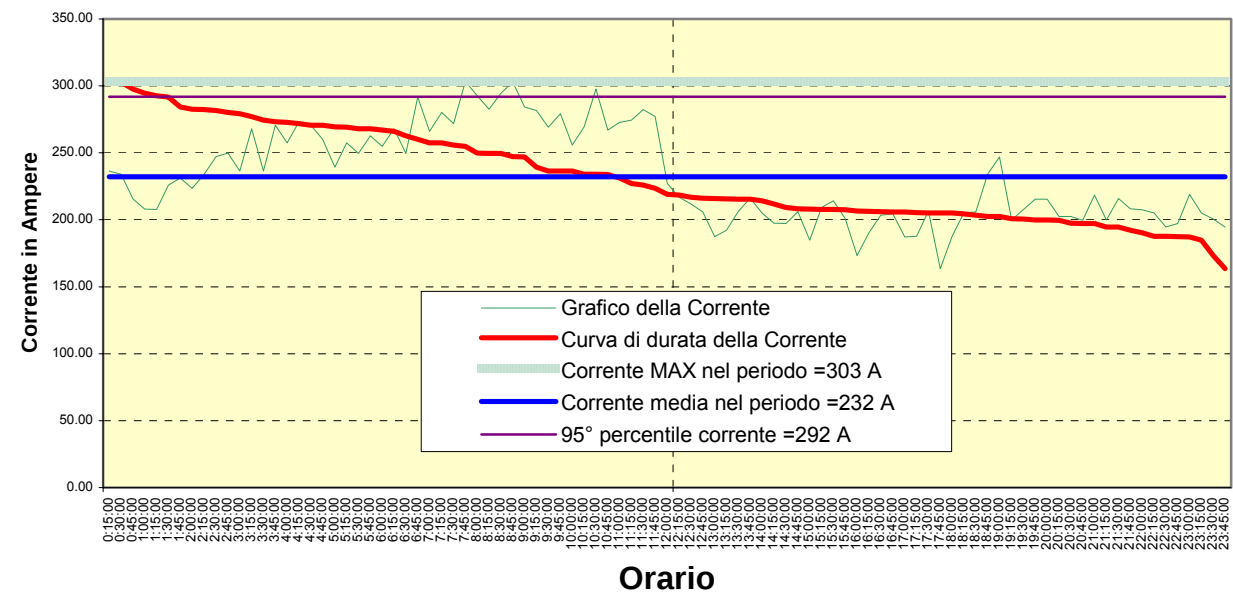
Linea 680: $I_{26.9mm}^{132kV} = 555A$

Linea 659: $I_{26.9mm}^{132kV} = 555A$

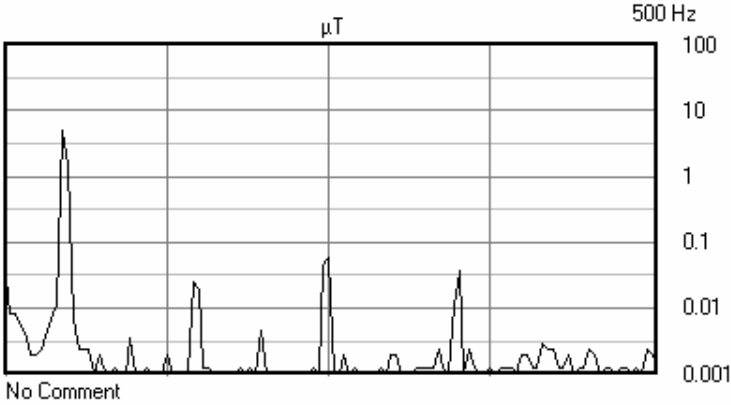
Linee Felten e Campus (15kV) $I^1 = 280A$ (come da specifiche AMPS)



ANDAMENTO DELLA CORRENTE SULLA LINEA 220kV N° 256 - COLORNO-SPEZIA STAZIONE
MISURE A COLORNO (CLRF)



EHP 50B 20.03.04 15.11.07
Level: 5.05 μ T (Wide Band)

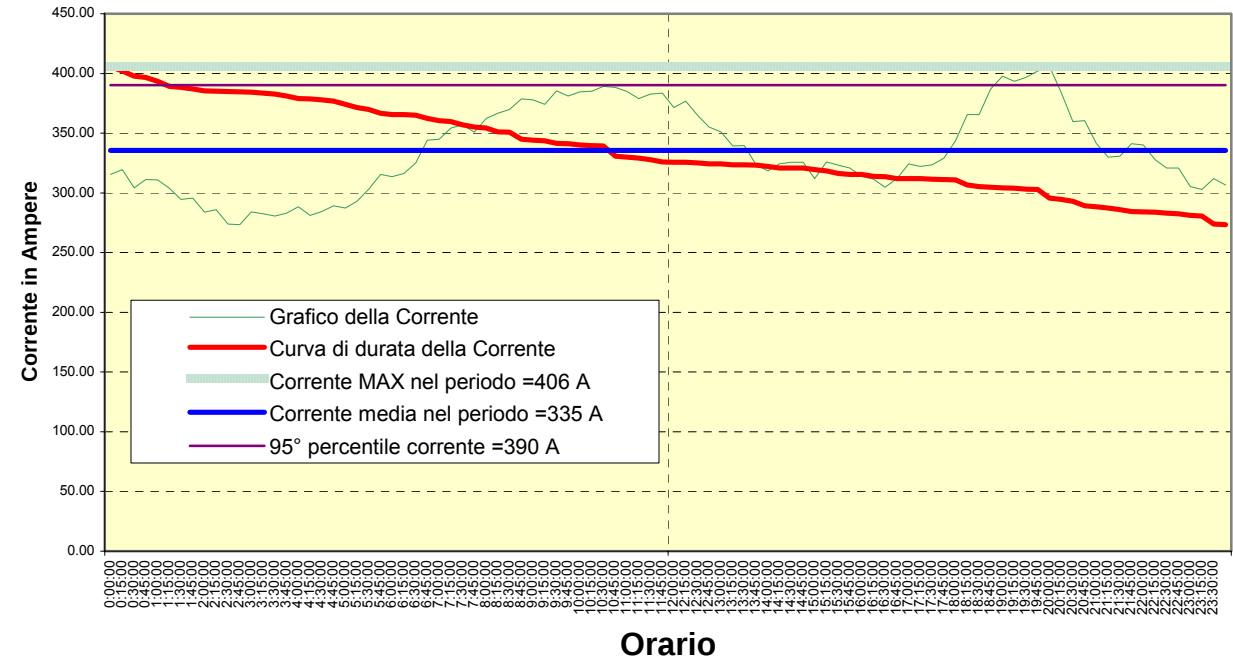


RMS: 5.12 μ T

+0 s	5.12
+1 s	5.16
+2 s	5.12
+3 s	5.10
+4 s	5.10
+5 s	5.13
+6 s	5.15
+7 s	5.11
+8 s	5.10
+9 s	5.12
+10 s	5.11
+11 s	5.12
+12 s	5.12
+13 s	5.10
+14 s	5.11
+15 s	5.12
+16 s	5.11
+17 s	5.10
+18 s	5.14
+19 s	5.12
+20 s	5.12
+21 s	5.11
+22 s	5.15
+23 s	5.13
+24 s	5.12
+25 s	5.11
+26 s	5.13
+27 s	5.13
+28 s	5.14
+29 s	5.12



ANDAMENTO DELLA CORRENTE SULLA LINEA 132kV N° 607 - PARMA VIGHEFFIO-S.QUIRICO
MISURE A PARMA VIGHEFFIO (PRMF)



Come per le misure effettuate in Via S.Pertini, anche in questo caso le linee 607, 256 generano un campo sostenuto: 5.12 μ T.

E' fondamentale analizzare mediante una simulazione i 'corridoi' all'interno dei quali si ritiene superato l'obiettivo di qualità di 3 μ T.

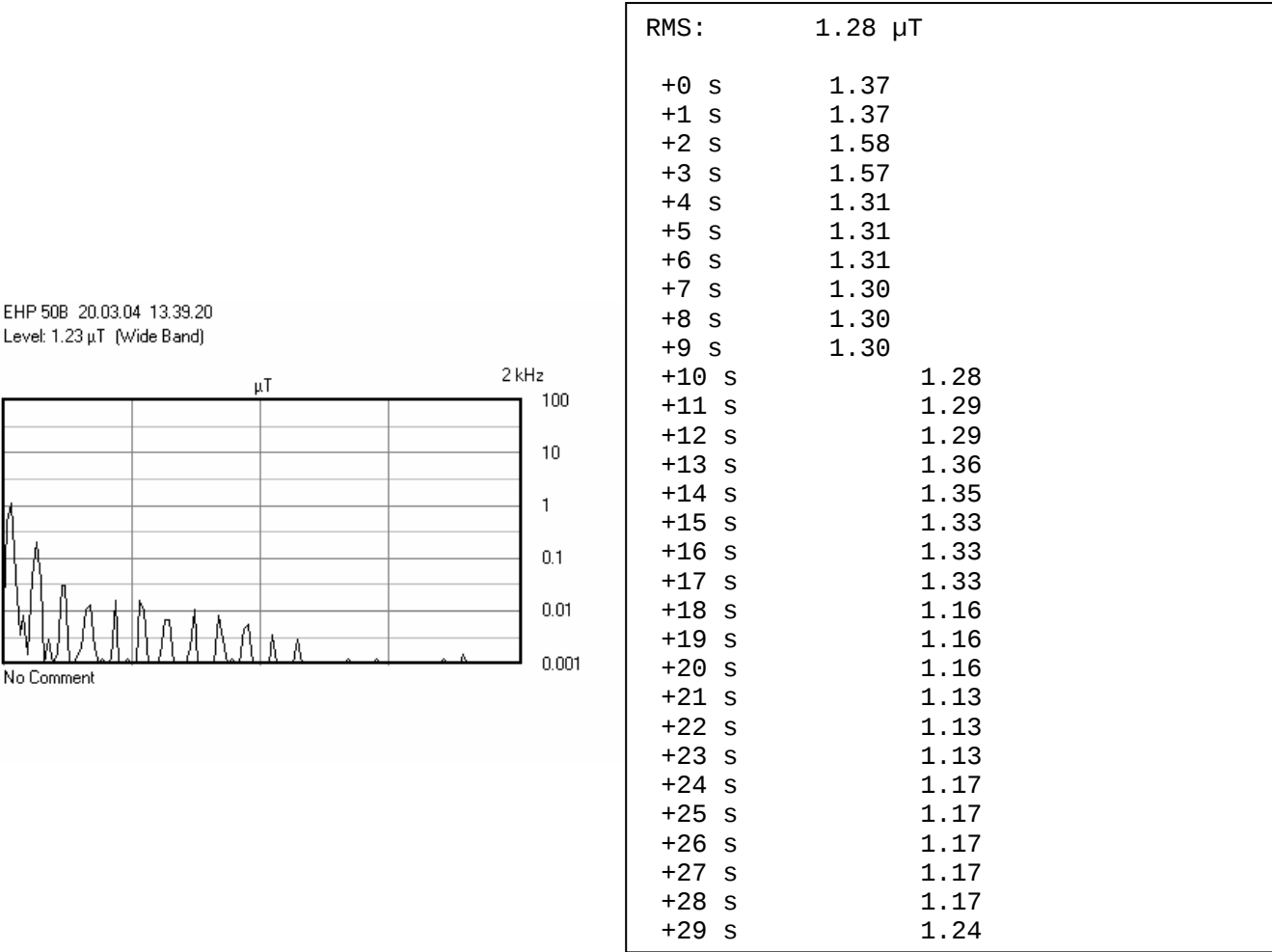
Via S.Leonardo altezza Via Prampolini (Coordinate GPS: 10.33129lon, 44.81896lat), elettrodotto 132kV di proprietà Trenitalia, elettrodotto 132kV di proprietà ENEL Distribuzione (linea 602).



Corrente in servizio nominale dell’elettrodotto, definite dalla norma CEI 11-60, facendo riferimento alla zona B (Italia Settentrionale), nel periodo F:

Linea 602 : $I_{22.8mm}^{132kV} = 450A$

Linea Trenitalia : $I_{26.9mm}^{132kV} = 555A$



Dati caratteristici del Periodo : 20/03/04 - 20/03/04									
Dati TOT. NON VALIDI: NON SOSTITUITI									
E.: MODENA C.: PR NORD M.: BRM602									
Grandezze calcolate									
Max. CORRENTE (A) : 92.3 20/03 08:30									
Coeff. di utilizzaz. perdite (÷) : 0.9516									
Dati ERRATI-NON DISP. = NON considerati.									
E.: MODENA C.: PR NORD M.: BRM602									
ERR.-NON Disp.SOSTITUITI:(+^) Tutti,Nessuno,Alcuni									
Periodo : dal 20/03/04 al 20/03/04 Mod.CORRENTE (A) (*0)									
Tralasciato,Almeno 1 Addendo (F.S. od INTER. Aperto)									
-00- -01- -02- -03- -04- -05- -06- -07- -08- -09- -10- -11- -12- -13- -14- -15- -16- -17- -18- -19- -20- -21- -22- -23-									
90. 90. 89.8 88.2 87.7 90.5 91. 89.1 90.5 91. 91. 90.5 90.1 91.3 91.3									
90.8 89.4 89.5 90.3 91.1 88.8 89.5 88.6 88.7 04/03/20									
89.3 90. 87.8 88.7 89.3 90.3 91. 90.8 92.2 91.8 91.92.28 90.5 91. 91.4									
91. 89.2 89.6 89.9 90.7 88.6 89.5 88.3 88. Sabato									
88.2 88.5 87.1 88.3 88.9 90.8 91.4 89.992.28 91. 91.3 90.9 91.7 90.9 90.1									
90.2 90.1 89.2 91.7 91.2 87.9 88.3 89.7 89.2 Min.86.84									
89.8 89.486.84 88.3 89.6 90.4 89.5 89.3 92. 91.3 91.2 91.3 91.7 91. 91.4 89.9 90.2									
90. 90.7 90.9 88.2 89.5 89.4 89.6 Max.92.28									

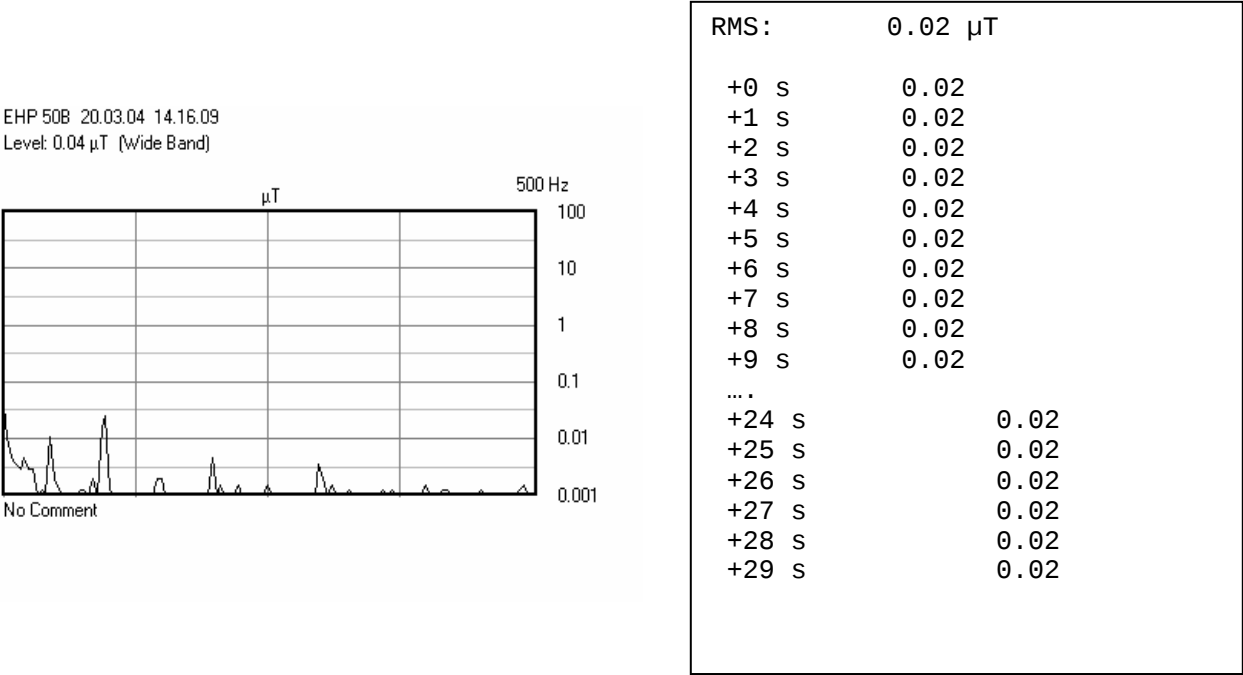
Gli elettrodotti complessivamente generano un valore di campo magnetico non preoccupante: 1.28 µT, circa la metà dell’obiettivo di qualità. Tuttavia è da sottolineare come i valori di carico della linea 602 siano decisamente contenuti, non in grado generare un campo come quello misurato; il campo è quindi in buona parte da attribuirsi all’elettrodotto di proprietà Trenitalia, tesi avvalorata dall’analisi armonica che evidenzia componenti armoniche tipiche di un carico di tipo ‘ferroviario’.

Via S.Leonardo altezza Via M. Serao (Coordinate GPS: 10.33814lon, 44.82754lat) elettrodotto 132kV di proprietà Trenitalia.



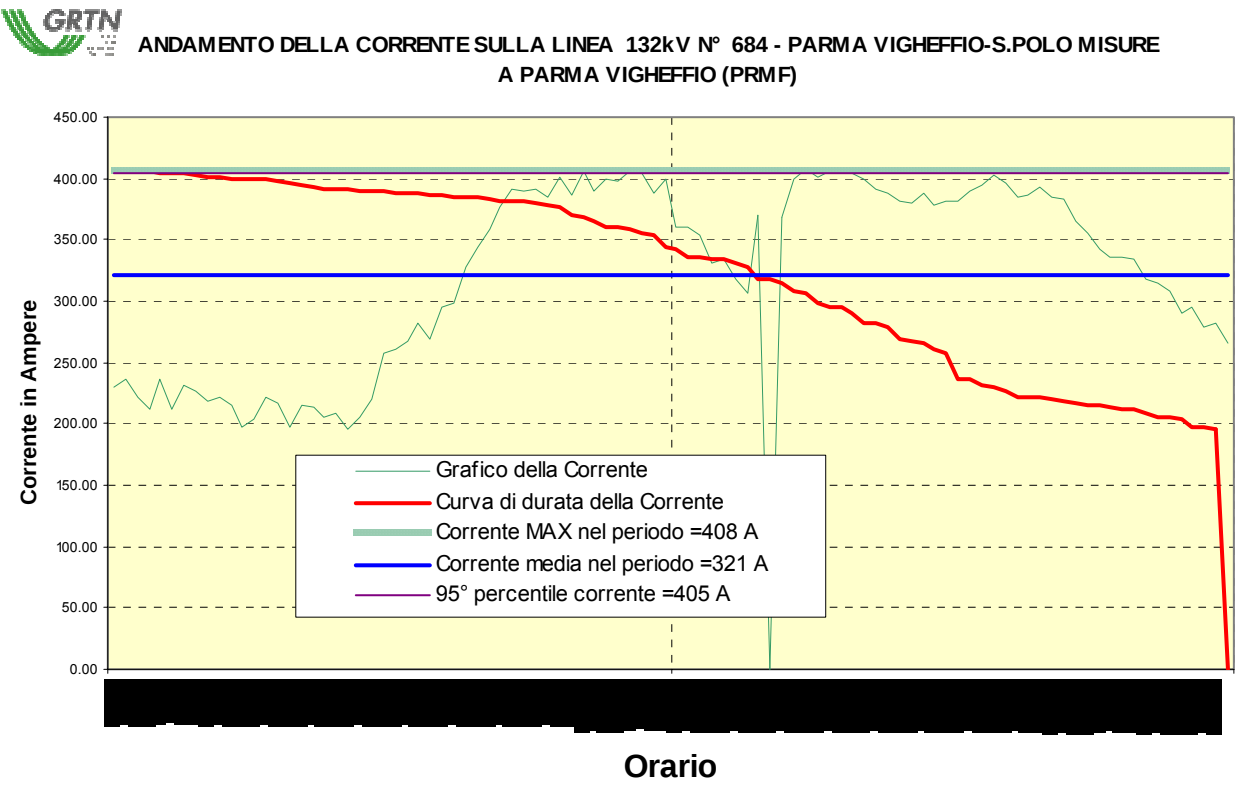
Corrente in servizio nominale dell’elettrodotto, definite dalla norma CEI 11-60, facendo riferimento alla zona B (Italia Settentrionale), nel periodo F:

$I_{26.9mm}^{132kV} = 555A$



La linea genera un campo magnetico ai limiti della sensibilità dello strumanto, è perciò da considerarsi scarica, al fine di verificare questa situazione sono state effettuate misure in diversi giorni, vengono riportate in questa sede le sole misure più significative.

Campus Universitario (Coordinate GPS: 10.31288lon, 44.76561lat), linea 684

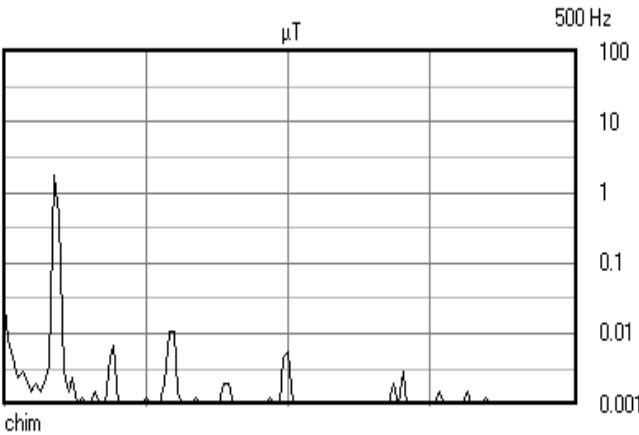


Corrente in servizio nominale dell'elettrodotto, definite dalla norma CEI 11-60, facendo riferimento alla zona B (Italia Settentrionale), nel periodo F:

$$I_{31.5mm}^{132kV} = 675A$$

$$I_{31.5mm}^{132kV} = 675A$$

EHP 50B 19.03.04 13.44.38
Level: 1.82 µT (Wide Band)



RMS: 1.85 µT

+0 s	1.85
+1 s	1.84
+2 s	1.84
+3 s	1.84
+4 s	1.86
+5 s	1.86
+6 s	1.86
+7 s	1.84
+8 s	1.84
+9 s	1.84
+10 s	1.84
+11 s	1.84
+12 s	1.84
+13 s	1.84
+14 s	1.84
+15 s	1.85
+16 s	1.85
+17 s	1.85
+18 s	1.83
+19 s	1.83
+20 s	1.86
+21 s	1.86
+22 s	1.86
+23 s	1.85
...	
+29 s	1.85

La linea in esame è da considerarsi anomala in quanto il carico indicato dalla tabella fornita da gestore GRTN, viene partizionato su un doppio elettrodotto, peraltro caratterizzato da connduttori di grossa sezione, come si evince anche dai limiti di corrente in servizio nominale calcolati in base alla Norma CEI 11-60.

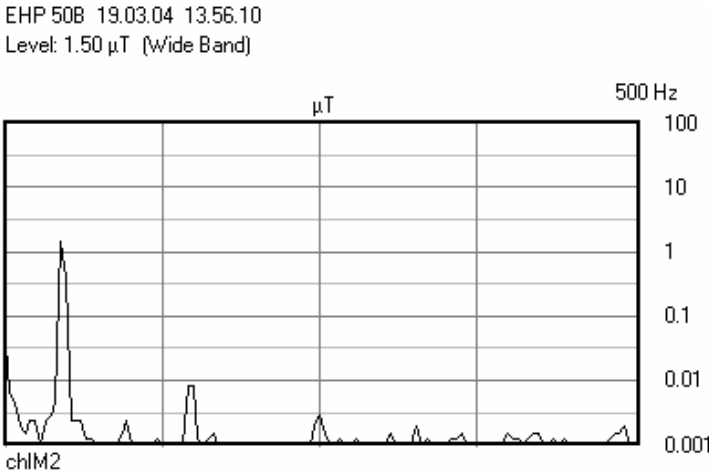
Complessivamente il carico medio giornaliero è decisamente elevato (321A, con picchi di oltre 400A) e tuttavia il campo magnetico è limitato a 1.85 µT, tale risultato lo si deve sostanzialmente alla separazione fisica in due elettrodotti separati che distribuiscono nello spazio il carico e quindi il campo da esso generato.

Via Langhirano oltre la rotonda della tangenziale (Coordinate GPS: 10.32110lon, 44.82754lat), linea 659



Corrente in servizio nominale dell’elettrodotto, definite dalla norma CEI 11-60, facendo riferimento alla zona B (Italia Settentrionale), nel periodo F:

Linea 659: $I_{26.9mm}^{132kV} = 555A$



RMS:	1.51 µT
+0 s	1.50
+1 s	1.50
+2 s	1.50
+3 s	1.50
+4 s	1.52
+5 s	1.52
+6 s	1.49
+7 s	1.47
+8 s	1.51
+9 s	1.51
+10 s	1.51
+11 s	1.51
+12 s	1.51
+13 s	1.51
+14 s	1.51
+15 s	1.52
+16 s	1.53
+17 s	1.54
+18 s	1.52
+19 s	1.51
+20 s	1.51
+21 s	1.51
+22 s	1.51
+23 s	1.51
...	
+29 s	1.51

Il campo magnetico rilevato si attesta sui 1.51 µT, tale risultato rappresenta un valore tutto sommato limitato considerando la particolare geometria della campat: essa infatti è caratterizzata da conduttori molto distanziati (i tralicci hanno delle testate tipo O-27), aventi altezza limitata da terra, è d’altra parte opportuno osservare che la zona è prevalentemente rurale, in particolare campata in esame sovrasta del terreno agricolo coltivato.

3.2.1.2 Campi a frequenze industriali (50Hz): simulazioni dello stato di fatto

Le simulazioni sono state effettuate, come richiesto dal 'Decreto Matteoli', considerando le portate in corrente in servizio nominale degli elettrodotti, come calcolate nella sezione dedicata alle misure per ogni singolo elettrodotto; esse sono definite in base alla norma CEI 11-60, facendo riferimento alla zona B (Italia Settentrionale), nel periodo F (cioè invernale) caratterizzato dalla massima corrente nominale, quindi rappresentante il caso peggiore.

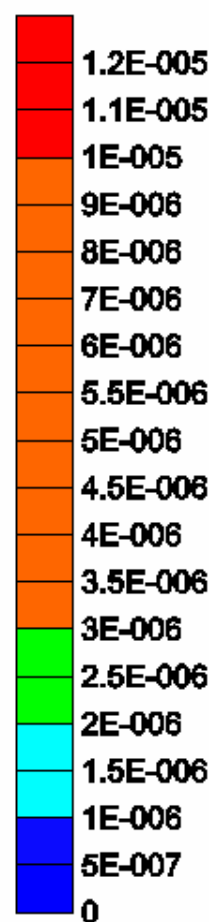
Tali portate rappresentano il limite di esercizio ed è quindi ragionevole supporre che le correnti effettive siano sempre ragionevolmente inferiori a tali valori: le misure effettuate sul campo e riportate in precedenza confermano queste ipotesi.

Le geometrie degli elettrodotti sono state estrapolate dai dati forniti dai gestori delle linee, ulteriormente convalidate dai rilievi effettuati durante le sessioni di misura.

Si ricorda inoltre che la normativa italiana in vigore prevede un valore di attenzione di 10 μT ed un obiettivo di qualità per la realizzazione di nuovi insediamenti ed elettrodotti di 3 μT ; tuttavia tali vincoli si riferiscono alla sola popolazione (sono esclusi i lavoratori) e, soprattutto, alle 'strutture ove sia prevista la permanenza media annua di almeno 4 ore giornaliere'. In tutti gli altri casi vale il limite di 100 μT .

La TAVOLA 1 di 16, con riferimento al file 'Unione_Anteoperam_CampiEM.dwg', illustra il quadro di unione delle simulazioni dei campi magnetici preesistenti, le successive tavole (dalla 2 di 10 alla 16 di 16) riportano in dettaglio le singole aree indicate dai riquadri blu presenti nel quadro d'unione.

Tutte le curve isolivello fanno riferimento a valori in T (Tesla) del campo magnetico, a fianco sono riportati i colori utilizzati nelle tavole ed i valori del campo magnetico ad essi associati.



Via Abbeveratoia, linea 605 e Via Calatafimi, Via Pellico linea 679 TAVOLE 4 e 5 di 16

Vengono riportate le simulazioni riguardanti i due elettrodotti di proprietà Enel Distribuzione, essi sono stati raggruppati nella descrizione in quanto afferenti alla stessa zona, ma soprattutto perché simili per tipologia di carico nominale e risultati teorici: entrambi infatti generano al più un campo magnetico di 1.5 μT ad altezza di 1.5 metri da terra, la metà dell'obiettivo di qualità previsto dalla legge e non rappresentano quindi motivo di ulteriori analisi.

Via S.Leonardo altezza Via Prampolini, elettrodotto 132kV di proprietà Trenitalia, elettrodotto 132kV, linea 602. TAVOLA 3 di 16

Via S.Leonardo altezza Via M. Serao, elettrodotto 132kV di proprietà Trenitalia. TAVOLA 2 di 16

Le simulazioni in entrambe le zone evidenziano un'area sottostante l'elettrodotto in cui viene superato l'obiettivo di qualità (linee arancioni), è tuttavia opportuno osservare come la metropolitana venga coinvolta in una zona di solo transito, non sono infatti previste stazioni per cui il limite cui fare riferimento è quello massimo di esposizione (100 μT), che si pone quindi un ordine di grandezza oltre i massimi valori teorici stimati.

Campus Universitario, linea 684 TAVOLA 8 di 16

Le simulazioni evidenziano un campo sostenuto, prossimo seppur inferiore all'obiettivo qualità (si segnalano picchi pari a 2.6 μT), tuttavia la zona è destinata al solo transito della Metrotramvia, per cui non si ritengono necessarie ulteriori analisi.

Via Langhirano oltre la rotonda della tangenziale, linea 659 TAVOLA 7 di 16

Le simulazioni indicano un evidente superamento degli obiettivi di qualità (linee arancioni) ed una zona in cui anche i valori di attenzione vengono superati (zona rossa), ciò è fondamentalmente dovuto alla geometria della campata, molto asimmetrica e avente altezza ridotta da terra; tuttavia le stazioni previste (Scambiatore Sud e Langhirano) si pongono a sufficiente distanza tanto da risultare immerse in un campo residuo assolutamente trascurabile (inferiore agli 0.5 μT).

Via S. Pertini, line 607 e 256 TAVOLA 6 di 16

Le simulazioni evidenziano un campo elevato, nelle zone sottostanti l'elettrodotto si raggiungono i 7 μT , superando abbondantemente la soglia dell'obiettivo di qualità, del resto anche le misure effettuate con un carico sostenuto, confermano i dati teorici.

E' da sottolineare che la Metrotramvia presenta un percorso di circa 600 m in cui la vicinanza con i due elettrodotti è evidente, in questa zona sono altresì previste due fermate, in particolare Traversetolo e S. Eurosia.

Tali aree sono immerse in un campo magnetico superiore all'obiettivo di qualità, per cui è sconsigliabile prevedere la costruzione di locali pubblici e infrastrutture in cui si stima una permanenza superiore alle 4 (quattro) ore giornaliere su media annua. La norma italiana indica in tal caso il rispetto del vincolo più stringente (3 μT), valore abbondantemente superato in tutta l'area afferente l'elettrodotto; d'altra parte le fermate previste, pur essendo di utilizzo pubblico, lasciano supporre una permanenza dell'individuo decisamente inferiore alle 4 ore giornaliere su media annua, per cui per esse si può considerare il solo vincolo del limite di sicurezza previsto dalla legge e pari a 100 μT .

Zona Cinghio TAVOLE 9 e 10 di 16

La zona in esame è caratterizzata da una elevata concentrazione di elettrodotti ad Alta Tensione e Media Tensione, per tale motivo si è ritenuto opportuno effettuare una simulazione interamente dedicata alla zona; a scopo puramente precauzionale si è contemplata nel calcolo anche la componente del campo dovuta alle linee in Media Tensione, che, come si evince dai risultati, generano comunque un contributo trascurabile.

Le zone limitrofe alle linee 607, 256 (a nord) e 659 (a sud) sono caratterizzate da valori di campo magnetico che superano abbondantemente l'obiettivo di qualità: ad esclusione della fermata Cinghio 2, i tratti di linea immersi in un campo elevato sono caratterizzati dal solo transito della Metrotramvia, per cui il valore di soglia è quello del limite di attenzione (100 μT) che si pone ben oltre i picchi di campo stimati.

Per quanto riguarda la fermata Cinghio 2 è opportuno sottolineare come essa sia immersa in valori di campo magnetico prossimi all'obiettivo di qualità, per tale motivo, valgono le considerazioni fatte precedentemente per le due fermate Traversetolo e S. Eurosia (zona Via S. Pertini): è sconsigliabile prevedere in tali punti insediamenti, infrastrutture e locali pubblici che prevedano la permanenza superiore alle 4 (quattro) ore giornaliere su media annua, perlomeno nelle zone efferenti l'elettrodotto e, conseguentemente, immerse in un campo magnetico prossimo ai 3 μT .

3.2.2 Campi a frequenza nulla (in continua): misure e simulazioni dello stato di fatto

In questo ambito si sono identificate le linee urbane della filovia, esse infatti sono alimentate con una tensione di 650 Volt in continua e, conseguentemente generano un campo magnetico statico; quest'ultimo risponde alle leggi fisiche applicate anche ai campi a frequenza industriale, per cui la trattazione di cui al par. 3.1 può essere ritenuta valida anche in questo ambito.

E' opportuno osservare che in questa tipologia rientra anche la Metrotramvia, seppur con una geometria differente dei conduttori e con valori di corrente differenti; anch'essa è, infatti, alimentata con tensioni in continua di valore confrontabile (750 Volt).

A queste frequenze di esercizio non esiste una legge nazionale, tuttavia si fa riferimento alla Raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea n. 1999/519/CE del 12/7/99 (cfr. Cap. 1), essa impone un limite massimo di 40mT per il solo campo magnetico e nulla specifica per il campo elettrico che deve quindi soddisfare solamente il limiti previsti per il contatto diretto o le scariche in aria.

Si sono concentrate le misure e le simulazioni in tre punti in cui si stima che la futura metrotramvia correrà per tratti di alcune centinaia di metri parallela ai filobus.

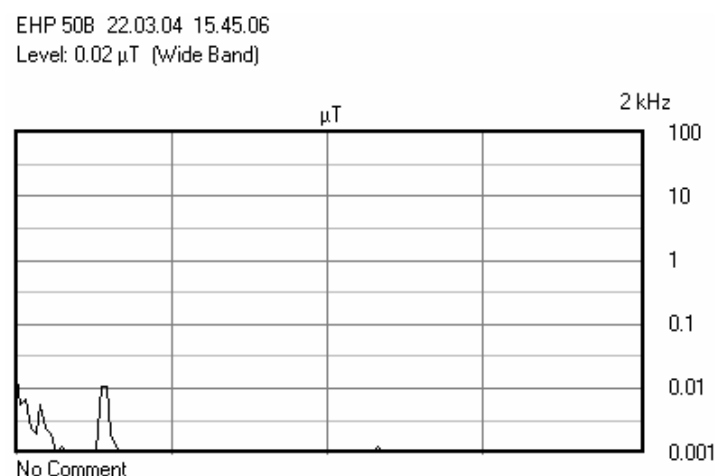
- Via Gramsci, Via Abbeveratoia, Via A.Fleming, Via S. Pellico interesserà la futura Linea 2
- Via N.Bixio, P.le Barbieri, V. Villetta, Via Baganza interesserà le future Linee 1 e 2
- Strada Zarotto, Via G.Sidoli interesserà la futura Linea 2

Lo strumento utilizzato per le misure è il Namicon MTU-ST con sonda trasversale avente un range di misura di 200 A/cm (20mT) ed una accuratezza del 2%.

In tutti e tre i punti di misura si sono effettuati dei rilievi sia in assenza di traffico veicolare, sia in presenza di filobus in transito, tutti i valori misurati sono compresi tra -1 A/cm e 1A/cm (-100 μT e 100 μT). Si è osservato inoltre, come le misure siano scorrelate rispetto al transito dei veicoli ed all'orientamento della sonda; considerando che la sensibilità dello strumento è confrontabile ai valori misurati, che il campo magnetico terrestre varia da 20 μT a 70 μT ed è quindi indubbia fonte di disturbo, si evince che il campo magnetico statico generato dai conduttori della filovia si può quantificare in un valore sicuramente inferiore ai 100 μT e confrontabile quindi con il campo magnetico terrestre naturale.

Le Linee 1 e 2 si troveranno nei pressi della stazione FFSS, a correre in prossimità della linea ferroviaria Parma-Fidenza, in questo caso si sono effettuate delle misure che hanno portato a conclusioni simili a quelle fatte per la filovia: il campo statico generato dalla ferrovia in prossimità dei siti dedicati alla Metrotramvia è del tutto trascurabile in quanto inferiore a 100 μT . Si riporta la sola analisi armonica del campo magnetico rilevato in Strada dei Mercati altezza strada del Taglio al

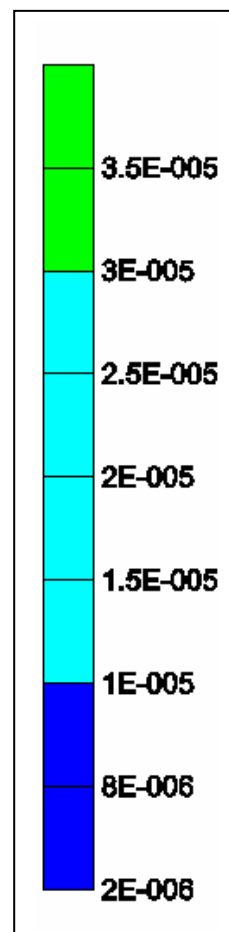
passaggio di un treno Interregionale: pur trattandosi di campo statico (frequenza nulla) sono presenti alcune spurie a frequenze superiori (250 Hz) che confermano l'origine 'ferroviaria' del campo misurato, una eventuale predominanza del campo terrestre avrebbe implicato l'assenza totale di distorsione.



Le simulazioni danno conferma delle ipotesi fatte finora, per cui si è ritenuto opportuno tralasciare ulteriori dettagli in merito alle misure effettuate, riportando le sole mappe isolivello del campo magnetico statico (B, espresso in Tesla) a scopo di verifica.

La TAVOLA 1 di 16, con riferimento al file 'Unione_Anteoperam_CampiEM.dwg', illustra il quadro di unione delle simulazioni dei campi magnetici preesistenti, le successive tavole (dalla 11 di 10 alla 16 di 16) riportano in dettaglio le singole aree indicate dai riquadri blu presenti nel quadro d'unione.

Tutte le curve isolivello fanno riferimento a valori in T (Tesla) del campo magnetico, a fianco sono riportati i colori utilizzati nelle tavole ed i valori del campo magnetico ad essi associati.



Al fine di riprodurre gli effetti generati dalla filovia si è inserita nel simulatore la geometria standard delle linee presenti nella città di Parma, ossia conduttori paralleli distanziati di 60 cm e posti all'altezza di 5.3 m, per la corrente di alimentazione si è imposto il valore di 1250 A, soglia di taratura dei fusibili delle cabine di alimentazione, esso rappresenta un valore di caso peggiore difficilmente raggiungibile in condizioni normali di esercizio; come previsto dalle Norme CEI 211-6 si suppone il ricettore ipotetico posto ad una altezza di 1.5 m dal suolo. Le simulazioni contemplano due linee disposte agli estremi della carreggiata della strada.

Si ricorda inoltre che la Raccomandazione Europea impone il solo limite di 40 mT; nelle zone afferenti la filovia, si evidenzia la presenza di un campo nell'ordine dei μ T (linee blu), solamente in prossimità dei conduttori si raggiungono valori di picco pari a 30 μ T (linee azzurre), che rappresentano il massimo campo magnetico statico rilevabile ad 1.5 m da terra.

I risultati teorici confermano quindi i valori misurati sul campo e si pongono ben tre ordini di grandezza sotto il limite previsto, tali grandezze sono direttamente confrontabili per intensità al campo magnetico terrestre naturale e sono pertanto trascurabili.

3.3 Valutazione delle emissioni da parte del nuovo sistema di trasporto rapido in esercizio (simulazioni)

Al fine di valutare l'impatto da campi magnetici generato dalla realizzazione delle opere in esame, si sono effettuate delle simulazioni in grado di prevedere il campo generato dai conduttori di alimentazione.

Per quanto riguarda le situazioni analizzate vengono considerate due condizioni:

1. Passeggero a bordo vettura.
2. Pedone all'esterno della vettura.

Per entrambi viene considerata la condizione di caso peggiore, ovvero si calcola il campo elettrico e magnetico generato dalla linea tranviaria in condizioni imperturbate, ovvero come se non ci fosse né la vettura né ogni altro ostacolo: in prima approssimazione la vettura funge da schermo per il campo elettrico, ed è trasparente per il campo magnetico.

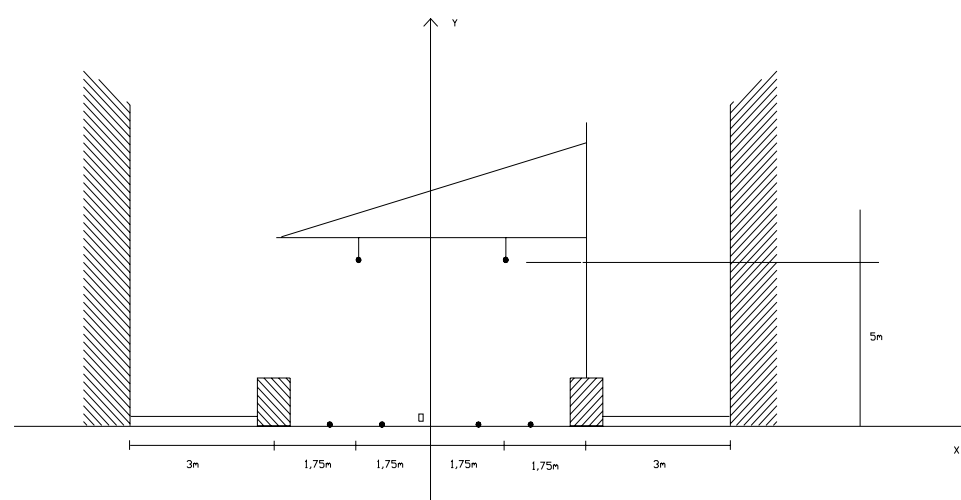
Si è ritenuto opportuno nel primo caso effettuare una simulazione che rappresenta la condizione più sfavorevole e quindi applicabile in qualsiasi punto della linea, mentre per la valutazione del campo esterno si è preferito effettuare una simulazione dettagliata di tutto il percorso coinvolto al fine di individuare nel dettaglio le zone immerse nel campo magnetico.

Si ricorda quanto indicato nella Raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea n. 1999/519/CE del 12/7/99, in merito ai campi a frequenza nulla, per cui il limite del campo magnetico è di 40 mT, mentre nulla viene indicato per il campo elettrico.

3.3.1 Modellizzazione del nuovo sistema di trasporto

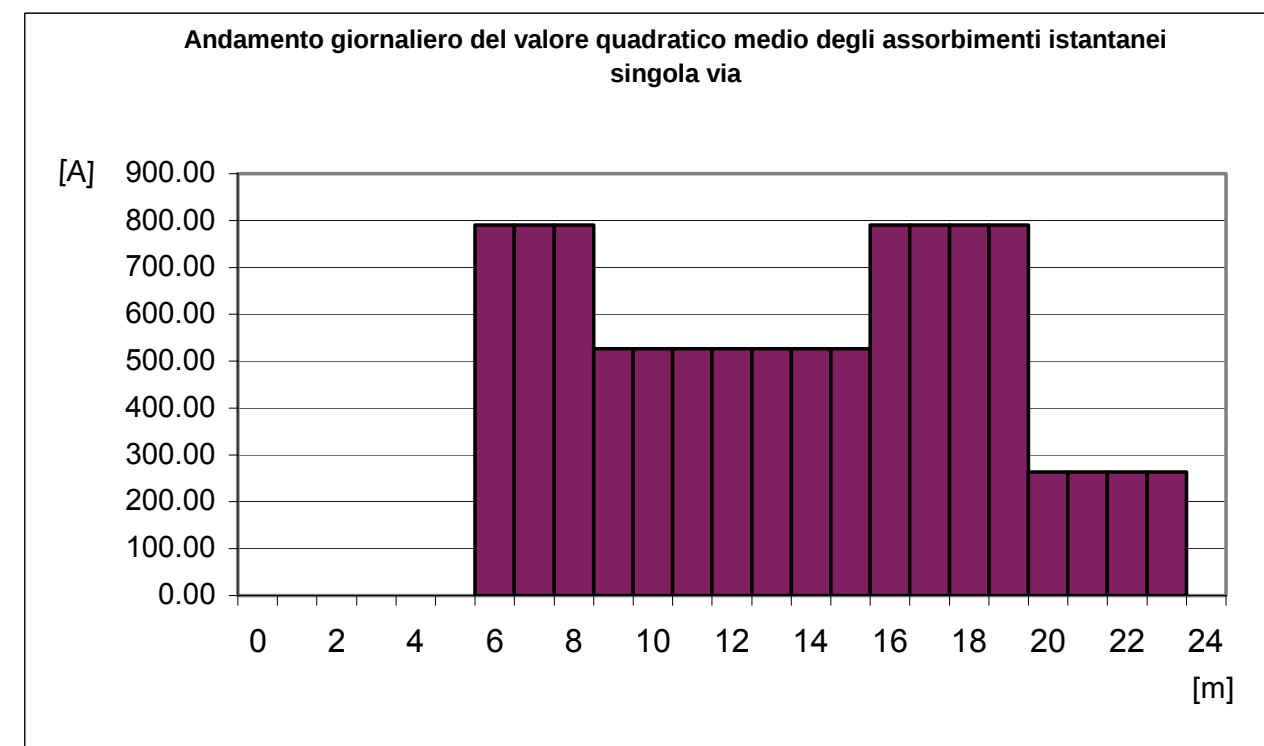
La linea di alimentazione, caratterizzata una tensione di 750 V in continua (frequenza nulla), è stata modellizzata ipotizzando sezione tipica come riportato nella figura seguente; si ricorda che al fine di simulare il campo magnetico prodotto le sole informazioni utili riguardano la geometria dei conduttori, ossia come interagiscono tra loro l'alimentazione positiva sospesa con la linea di ritorno costituita dai binari.

Le infrastrutture immerse nel campo afferenti la linea e le stesse vetture della metropolitana non rappresentano in prima approssimazione un ostacolo per il campo magnetico e si possono perciò trascurare.



Al fine di quantificare il traffico persente sulle linee metropolitane e quindi ricavare un andamento dei carichi di alimentazione, si suppongono le seguenti fasce di orario:

24,00÷06,00	assenza circolazione
06,00÷09,00	punta di cadenzamento
09,00÷16,00	due terzi della punta di cadenzamento
16,00÷20,00	punta di cadenzamento
20,00÷24,00	un terzo della punta di cadenzamento



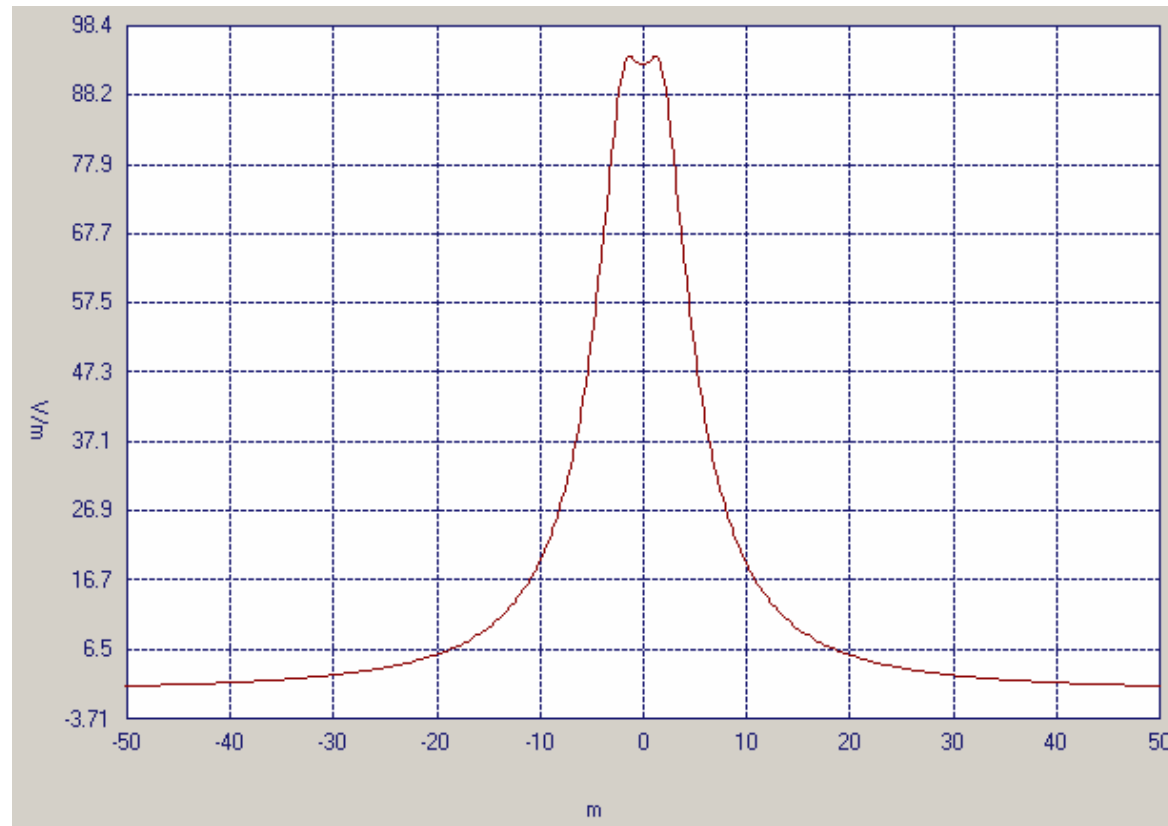
In particolare si suppone che nelle ore di picco il campo magnetico sia quello corrispondente ad una corrente di ampiezza pari al valore quadratico medio degli assorbimenti istantanei (790 A per via), mentre le correnti massime si stimano pari a 1800 A per ogni via; le simulazioni fanno riferimento al caso peggiore, cioè considerando il valore istantaneo della corrente massima, ma è chiaro come, anche nelle fasce di orario di massimo traffico, questa situazione difficilmente possa essere raggiunta.

Nelle figure seguenti vengono riportati i valori di campo magnetico e campo elettrico, supponendo che un passeggero a bordo vettura sia posizionato a circa 2.5 m di altezza da terra.

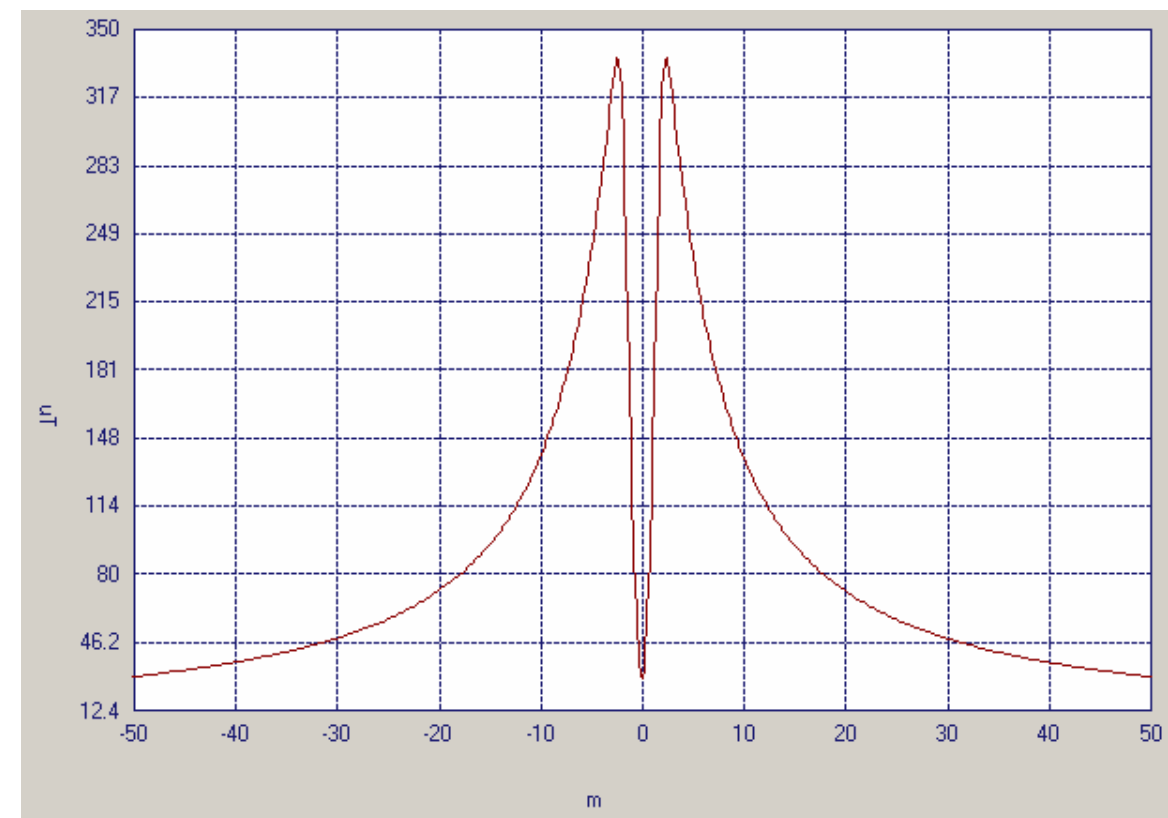
Si osserva come sia il campo elettrico (comunque non contemplato dalle normative), sia quello magnetico, raggiungano valori non preoccupanti; quest'ultimo in particolare presenta valori di picco due ordini di grandezza inferiori al limite di 40mT e, in accordo alla teoria relativa la propagazione dei campi magnetici, esso decade come

$$B \propto \frac{1}{d^2}$$

dove d rappresenta la distanza del punto di misura dal piano su cui è posizionato il conduttore che genera il campo.



Campo Elettrico a 2.5 m di altezza dal suolo, con alimentazione 750V per via (simulazione passeggero a bordo vettura).

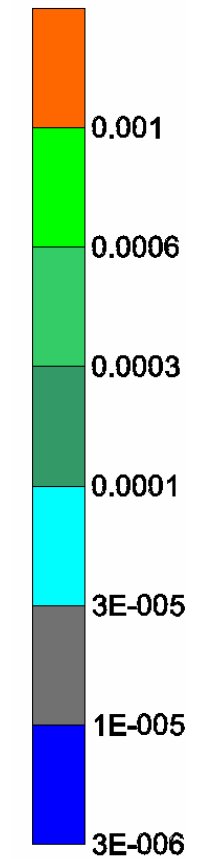


Campo Magnetico a 2.5 m di altezza dal suolo, corrente massima nominale di 1800 A per via (simulazione passeggero a bordo vettura).

3.3.2 Simulazioni del campo magnetico generato dal nuovo servizio di trasporto

La TAVOLA 1 di 31, con riferimento al file 'Unione_Postoperam_CampiEM.dwg', illustra il quadro di unione delle simulazioni dei campi magnetici generati nelle ipotesi di caso peggiore dal nuovo sistema di trasporto, le successive tavole (dalla 2 di 31 alla 31 di 31) riportano in dettaglio le singole aree indicate dai riquadri blu presenti nel quadro d'unione.

Tutte le curve isolivello fanno riferimento a valori in T (Tesla) del campo magnetico, a fianco sono riportati i colori utilizzati nelle tavole ed i valori del campo magnetico ad essi associati.



Nelle simulazioni delle linee metrotranviarie, viene calcolato il campo magnetico statico ad una altezza di 1.5 m, supponendo la linea a cielo aperto e caratterizzata da una corrente di 1800 A.

E' opportuno sottolineare che in alcune tratte le linee si sviluppano in gallerie superficiali ed a foro cieco, ad una profondità variabile tra -8 ed -30 metri; in questi casi, al fine di mantenere le ipotesi di caso peggiore, le simulazioni riportate fanno riferimento al campo presente a 1.5 metri di altezza dal piano delle rotaie, mentre il campo residuo in superficie sarà sicuramente inferiore, essendo il piano del marciapiede distanziato di almeno 8 m dal piano dei binari.

Complessivamente dalle tavole allegate si evince come il campo magnetico generato sia estremamente regolare, caratterizzato da valori di picco prossimi ad 400 μ T in prossimità dell'alimentazione aerea; si ricorda a tal proposito che il limite di attenzione è 40 mT, quindi due ordini di grandezza superiore al valore massimo stimato.

In realtà dalle simulazioni si evince che nelle zone ove le due linee corrono parallele il campo sfiora gli 800 μ T, ma questa rappresenta l'ipotesi assolutamente peggiorativa in cui in queste tratte vengano posate quattro rotaie due per ogni linea: è plausibile prevedere che verrà adottata una soluzione di confluenza del traffico delle nuove linee su due sole rotaie, allorché la situazione tornerebbe ai valori di campo misurati altrove.

Il decadimento nelle zone laterali, in buon accordo con le formule di Biot-Savart, è tale per cui a circa 15 m dalle rotaie si riscontrano valori nell'ordine dei 30 μT , valori comparabili con il massimo campo preesistente generato dai filobus; a tal proposito è da sottolineare come nelle tre aree già individuate al par. 3.2.2, il campo magnetico misurato nella fase ante operam non influenzi il contributo della metropolitana: si è già accennato come la situazione dello stato di fatto sia caratterizzata dai livelli paragonabili al rumore di fondo generato dal campo magnetico naturale terrestre.

Infine si osserva, come, nelle zone afferenti ai depositi ed alle stazioni principali, il campo presenti un generale aumento di distribuzione spaziale, pur senza modificare il suo valore massimo; in vero, non è da escludere che, nell'area di rimessa e riparazioni (a nord della linea 1), a causa di un utilizzo aggiuntivo di energia elettrica in continua necessità per le attività di verifica e riparazione, il campo subisca alcune variazioni incrementando il valore massimo: si ricorda come comunque ci si trovi due ordini di grandezza sotto il limite e che queste aree sono riservate al personale autorizzato e quindi non riguardano la popolazione.

3.4 Sintesi e conclusioni dello studio di impatto da campi elettromagnetici

Vengono di seguito riassunti e commentati i risultati ottenuti dalle misure e simulazioni dello stato di fatto, nonché dalle simulazioni delle emissioni del nuovo servizio di trasporto per quanto riguarda i campi magnetici; sono inoltre riportate alcune proposte di modifiche o migliorie al fine di garantire il rispetto delle buone regole dettate dalle normative CEI, nonché dalla Normativa vigente in materia.

Si è ritenuto opportuno separare i fenomeni a frequenza industriale (50Hz) da quelli a frequenza nulla poiché i primi derivano sostanzialmente da una condizione pregressa che è stata identificata nell'analisi ante-operam, viceversa per i fenomeni in continua si tratta sostanzialmente di emissioni da imputare al nuovo sistema di trasporto metropolitano e rientrano quindi nell'analisi post-operam.

3.4.1 Campi a frequenze industriali (50Hz)

Come già accennato nei paragrafi dedicati alle misure ed alle simulazioni della situazione pregressa, complessivamente emerge una situazione nei limiti delle vigenti leggi.

Tuttavia è opportuno segnalare alcune situazioni che meritano particolare attenzione in quanto il campo magnetico generato dagli elettrodotti preesistenti supera i valori indicati come obiettivo di qualità (3 μT), avvicinandosi in alcuni punti al limite di attenzione (10 μT), entrambe previsti dalla legge D.P.C.M. del 28 Luglio 2003 (GU n. 200 del 29-8-2003):

- Via S. Pertini, fermate Traversetolo e S. Eurosia
- Zona Cinghio, fermata Cinghio 2

in questi siti è prevista la costruzione di fermate che si troverebbero immerse in valori di campo per i quali la legge prevede dei vincoli nel caso che si preveda la realizzazione 'scuole, asili, parchi-gioco, nonché di tutte le strutture ove sia prevista la permanenza media annua di almeno 4 ore giornaliere'.

Una fermata di una linea di trasporto pubblico in generale non presuppone una permanenza così elevata, tuttavia è sconsigliabile per nei casi sopracitati prevedere ulteriori strutture quali edifici e luoghi a destinazione pubblica (bar, luoghi di ricreazione, edicole, ecc.).

Si ricorda inoltre che tali vincoli non valgono per eventuali strutture dedicate esclusivamente agli addetti ai lavori della metropolitana (come per esempio cabine di controllo e monitoraggio del sistema metropolitano) per i quali nulla osta alla loro realizzazione anche in quelle zone caratterizzate da campi magnetici superiori ai 3 μT .

3.4.2 Campi a frequenza nulla

Le simulazioni e le considerazioni fatte nel paragrafo dedicato (3.2.2), indicano un inevitabile incremento dei campi elettrico e magnetico statici lungo tutte le linee metropolitane ed ovunque verranno realizzati gli elettrodotti sospesi per l'alimentazione di tale servizio.

Facendo riferimento alla Raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea n. 1999/519/CE del 12/7/99 in questi casi il limite di esposizione da non superare in nessuna situazione è fissato in 40 mT per il solo campo magnetico, mentre nulla viene specificato per quello elettrico, per il quale valgono solo le norme di impiantistica industriale che specificano gli opportuni isolamenti e le distanze minime da rispettare al fine di evitare gli effetti acuti.

Il campo generato dal nuovo servizio metropolitano, anche nella situazione di caso peggiore, si attesta nei punti di massima emissione (cioè per i passeggeri a bordo vettura posti ad una altezza di 2.5 m da terra) su valori di un ordine di grandezza inferiori al limite previsto (800 μT).

Si sottolinea inoltre la natura continua del campo generato per il quale le indagini epidemiologiche indicano una minore pericolosità rispetto ai fenomeni a frequenza non nulla (50Hz).

Si conclude quindi che, ai sensi della citata Raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea n. 1999/519/CE del 12/7/99, l'impatto del progetto di tramvia, risulta generare campi magnetici statici (a frequenza nulla) contenuti. Pertanto, dal punto di vista della componente ambientale "campi elettrici e magnetici", nulla osta alla realizzazione della tramvia stessa salvo le considerazioni fatte al par. 2.4.1 in merito alle sorgenti preesistenti a frequenza industriale (50 Hz).

3.5 Analisi delle emissioni in fase di cantiere

Attualmente non esiste alcuna normativa che faccia riferimento a tali situazioni, pecui in tale fase si considerano trascurabili i contributi aggiuntivi di eventuali linee elettriche temporanee, gruppi elettrogeni e macchine operatrici.

E' altresì opportuno osservare che le norme europee in materia di campi elettrici e magnetici a basse frequenze (ELF), per la determinazione dei limiti, fanno riferimento ad effetti biologici di lungo periodo, dovuti cioè ad una esposizione prolungata nel tempo; per tale motivo una fase temporanea in cui si vengono a creare campi anche non trascurabili, non rappresenta una fonte di influenza quantificabile.

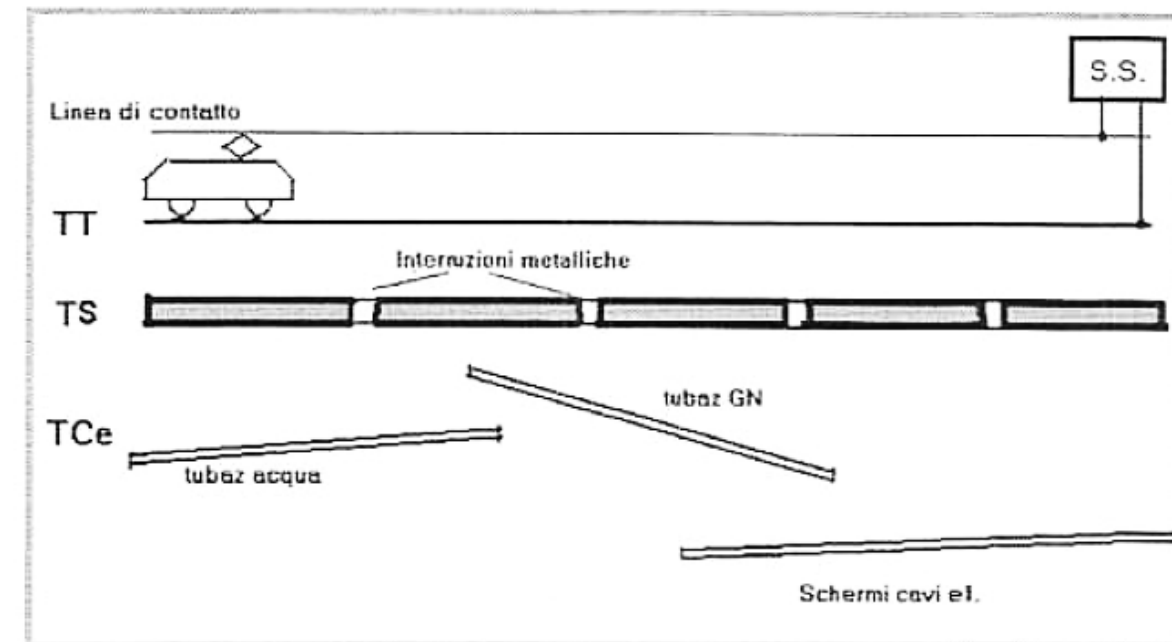
4. ANALISI DELL'ISOLAMENTO ELETTRICO, CORRENTI VAGANTI

4.1 Introduzione metodologica e normativa di riferimento

A partire dal progetto preliminare, che non illustra i dettagli tecnici necessari all'ottenimento delle prestazioni di isolamento elettrico volute, vengono via via precisati i particolari costruttivi che si prevede di impiegare, con riferimento alle caratteristiche ed ai dettagli tecnici forniti da una serie di primari fornitori di sistemi di armamento completi (traverse + organi di attacco), nonché di componentistica ferroviaria (si vedano a tal proposito gli allegati in appendice), i quali hanno gentilmente fornito una serie di disegni e certificati di prova relativi ai componenti del sistema di armamento, costituito da traversa blocco Coopsette, organi di attacco Nabla RNTC 150, elementi di isolamento elettrico dell'attacco Bear Plast, piastra sottorotaia e guanciali SOGO.

Per quanto riguarda invece la guaina bituminosa da installare al di sotto del getto di CLS di base, si è fatto riferimento al certificato di prova fornito dalla soc. Valli Zabban S.P.A. di Sesto Fiorentino.

Analizzando il contenuto della norma CEI 9-20/1, si osserva che essa prevede la definizione di tre sistemi di terra, come indicati nella seguente figura :



Definizione delle tre terre previste dalla norma CEI 9-20/1

In particolare, TT indica la Terra di Trazione, TS è la Terra di Struttura, e si identifica, in genere, con l'armatura prevista all'interno del getto della platea in c.a. Infine TCe è la Terra Comune esterna, costituita dall'insieme delle strutture metalliche circostanti: tubazioni, fondazioni degli edifici, etc.

La norma CEI prevede che possa essere considerato immune da problemi di correnti vaganti solamente un binario realizzato in modo che la conduttanza fra la Terra di Trazione e la Terra di

Struttura sia inferiore a 0.05 S/km (riferiti al singolo binario, dunque a due rotaie), e viceversa non è previsto il fatto di isolare la Terra di Struttura dall'esterno, e lasciare così che correnti vaganti percorrano tali strutture metalliche, danneggiandole inevitabilmente.

Tuttavia al fine di garantire una adeguata protezione dalle correnti vaganti sia generate all'esterno (cioè dalle infrastrutture preesistenti) che all'interno (cioè dalla metropolitana oggetto di studio) la norma propone, tra le altre, due alternative entrambe di interesse per le particolari tipologie di armamento previste nel progetto:

- Isolare opportunamente la Terra di Struttura dalla Terra Comune esterna abbattere notevolmente il pericolo di correnti vaganti, questa soluzione è per esempio di facile applicazione per le soluzioni antivibranti a massa flottante, ove cioè è prevista la posa di un materassino antivibrante ed isolante tra le due terre.
- Nel caso in cui non sia possibile isolare la Terra di Struttura dalla Terra Comune esterna, si può intervenire sulle strutture coinvolte, prevedendo l'interruzione delle strutture metalliche quali per esempio l'armamento, a tratti regolari (lungi dai 20 m ai 300m a seconda dei campi elettrici esterni alla struttura) ed isolando elettricamente in tali zone di interruzione la struttura dalla Terra Comune.

Onde ottenere tale risultato, occorre dunque selezionare componenti di alta qualità per tutti gli elementi isolanti elettrici impiegati.

In seguito verranno presentate le soluzioni tecniche individuate al fine di ottemperare a tali requisiti, per ogni variante di progetto, e verrà operata una semplice verifica numerica del raggiungimento della prestazione richiesta.

Si ricordano, a scopo bibliografico le seguenti norme CEI 9-2/6/14, 11-1, 64-8 e 84-8.

4.2 Sistema di armamento realizzato su platea in c.a. con rotaie a gola

Il progetto preliminare prevede alcune varianti destinate a differenti condizioni progettuali, in particolare si prende in considerazione l'armamento in sede promiscua realizzato su platea in c.a., che offre il notevole vantaggio della stabilità geometrica, con conseguente beneficio nei riguardi della manutenzione e rappresenta una soluzione particolarmente valida dove il binario è posato su sede stradale; esso prevede in alcuni casi anche l'appoggio della piastra in c.a. su un materassino antivibrante, realizzando un sistema "a massa flottante".

Tale sistema è quello di gran lunga più efficace nei riguardi del taglio delle emissioni sonore per via solida, delle vibrazioni e garantisce un buon livello di isolamento al fine di evitare il nefasto fenomeno delle correnti vaganti. Questa soluzione viene in generale adottata nei tratti in cui la natura e/o la distanza degli edifici impongono una salvaguardia vibro-acustica; nel caso particolare del sistema di trasporto di Parma sarà adottata la soluzione "a massa flottante" ed inoltre il binario sarà, nella zona a traffico promiscuo, completato con una pavimentazione in conglomerato bituminoso, per garantire la carrabilità dello stesso ai mezzi gommati.

Le rotaie a gola in rettilineo sono del tipo Ri 60 ed il passo tra gli appoggi è di 0,75 m; in curva le rotaie sono del tipo Ic ed il passo fra gli appoggi è di 0,67 m; esse, inoltre, sono connesse a una platea in c.a. gettata in opera (solettone di regolamento) tramite attacchi elastici, comprendenti piastre in acciaio, ramponi tipo SKL3 e sottosuola in materiale resiliente. Ciascuna piastra di attacco è vincolata al solettone di regolamento tramite due bulloni in acciaio.

Fra le piastre di attacco e il solettone è interposto un massello di sabbia di quarzo e resina epossidica, dello spessore di circa 30 mm (di fatto questo spessore varia nei limiti della tolleranza della quota di getto del solettone di regolamento).

Questo tipo di armamento realizza un funzionamento del tipo cosiddetto "a massa flottante". Questa è costituita dalla piastra in c.a. gettata in opera (solettone di regolamento); lo stadio elastico è costituito da un materassino elastomerico, interposto fra la piastra e la fondazione. La piastra è totalmente isolata dal supporto cementizio di base; l'appropriata flessibilità del materassino e l'assenza di qualunque ente di collegamento rigido garantiscono un efficace taglio delle vibrazioni.

L'elastomero del materassino antivibrante possiede le seguenti caratteristiche:

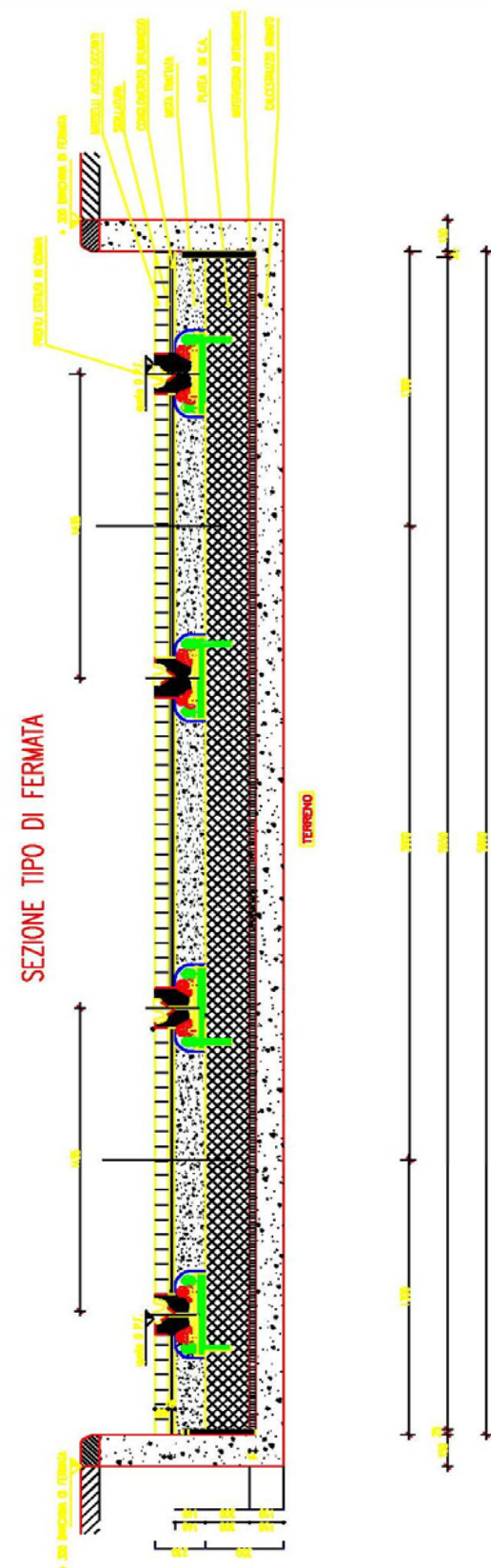
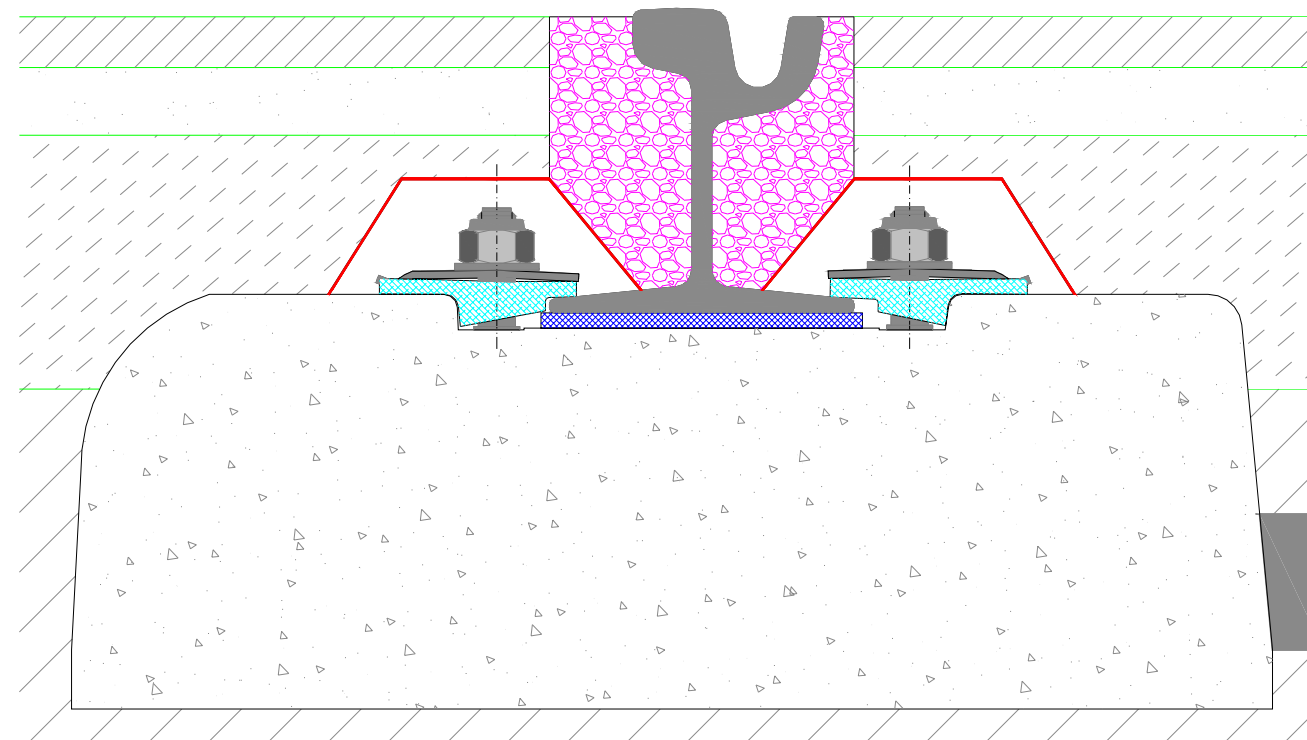
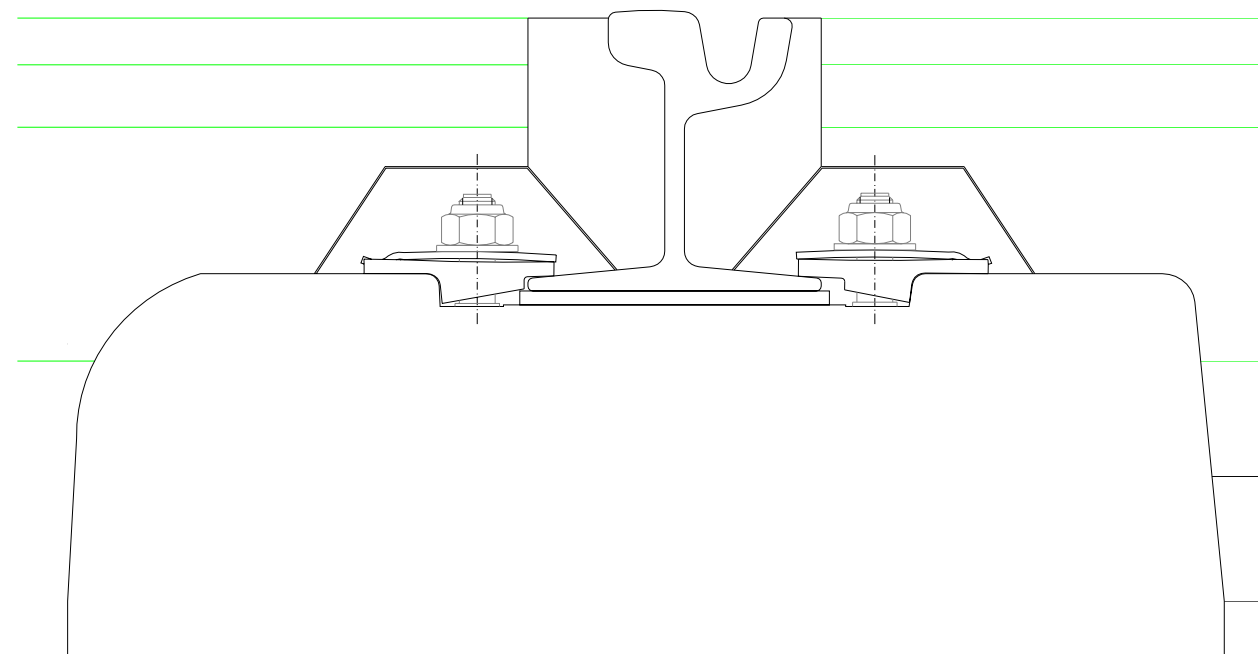
- elevata resistenza agli agenti chimici e biologici;
- piccola deformazione permanente ("compression set");
- modulo di elasticità dinamico il più possibile vicino a quello statico, con rigidità dinamica bassa in valore assoluto;
- elevato smorzamento;
- elevata resistenza ai carichi dinamici e ai picchi di sollecitazione.
- Buon isolamento elettrico tra Terra di Trazione e Terra di Struttura, come imposto dalla Norma CEI.

Il sistema armamento si completa con profili estrusi in gomma, disposti sui fianchi delle rotaie a gola e interposti fra le rotaie stesse e la pavimentazione, migliorando anche l'isolamento elettrico del binario, con beneficio nei riguardi della protezione contro le correnti disperse.

Si prevede l'applicazione dei profili estrusi anche nel caso di realizzazioni con binario inerbito, onde prevenire i potenziali problemi di questo tipo di armamento: i profili, mantenendo il manto erboso discosto dalle superfici di rotolamento, evita il possibile degrado dell'aderenza e assicura un adeguato isolamento elettrico.

La figura seguente illustra la sezione tipica in esame

Volendo identificare meglio la parti compoennti il sistema di attacco, ed in particolare gli elementi isolanti elettrici, si può osservare una versione del suddetto poarticolare sviluppata con maggior, essa è riportata di seguito:



Sebbene si comincino ad individuare correttamente gli elementi isolanti elettrici relativi all'attacco nabla, costituiti dai guanciali laterali, dalla piastra sottorotaia e dai piastrini isolanti posti sotto alla piastrina metallica sagomata di fissaggio della rotaia, è opportuno fare riferimento ai disegni riportati nelle figure in allegato C, realizzati da Coopsette Traverse; seppur non sono previste traverse biblocco in questa variante, il sistema di isolamento utilizzato per esse può essere tranquillamente impiegato anche nella soluzione in esame che prevede un ancoraggio diretto delle rotaie alla platea.

Le figure in allegato C evidenziano i seguenti particolari di isolamento elettrico:

2 – suola sottorotaia in gomma RI 60/59

6 – piastrino isolante NABLA RNTC 150

7 – cuneo di regolazione TC 150

La presenza di tali tre elementi garantisce la completa assenza di contatto elettrico fra la rotaia e gli organi d'attacco.

E' ovvio comunque come, nelle zone estranee agli attacchi sulle traverse, la rotaia corre completamente avvolta nel conglomerato bituminoso della superficie stradale. In tali zone l'isolamento elettrico è affidato unicamente ai guanciali laterali, e ad uno strato sottorotaia che evita il contatto nella parte inferiore della stessa.

Va anche notato che, sempre per evitare che la realizzazione degli strati di pavimentazione stradale vada a collegare a terra la rotaia in corrispondenza degli attacchi, questi ultimi sono coperti da cuffie in materiale plastico.

La mostra un particolare di tale soluzione, realizzata avvolgendo completamente la rotaia prima della realizzazione degli strati di pavimentazione stradale, e collocando il cappuccio in materiale plastico (in bianco nella foto in allegato D) al di sopra dell'organo di attacco Nabla.

4.2.1 Caratteristiche dei materiali per l'isolamento delle rotaie (Terra Trazione e Terra di Struttura)

Vengono qui presentate le caratteristiche elettriche dei materiali che sono stati individuati al fine di ottemperare alle prescrizioni tecniche evidenziate nel precedente capitolo.

Si parte dalla piastra sottorotaia in gomma scanalata, per la quale si fa riferimento ad un prodotto sviluppato dalla SOGO su specifica CSA/Coopsette, il cui disegno tecnico è visibile in figura in allegato D.

Le caratteristiche di isolamento elettrico di questa piastra in gomma sottorotaia sono state certificate dal produttore, la ditta SOGO di Frosinone. Le figure in allegato D riportano il testo di tale certificazione e le caratteristiche del prodotto.

Si osserva come il requisito di una resistenza elettrica maggiore di 100 MΩ viene sistematicamente superato; vengono poi presi in esame i due elementi in Nylon situati sotto il piastrino metallico di fissaggio della rotaia.

In maggior dettaglio, si tratta del piastrino forato isolante e del cuneo di regolazione dello scartamento, questi due componenti sono prodotti dalla ditta Bear Plast di Reggio Emilia, su disegno e specifica tecnica della C.S.A..

La prestazione isolante elettrica di questi elementi deriva sia dalla loro resistività di volume (misurata in Ω·m), sia dalla resistività di superficie (misurata in Ω).

I valori forniti dal costruttore sono i seguenti:

Prodotto	Resistività di Volume	Resistività di Superficie (Ω)
Piastrino Isolante	$1 \cdot 10^{11} \Omega \cdot m$	$1 \cdot 10^{13} \Omega$
Cuneo di Scartamento	$1 \cdot 10^{11} \Omega \cdot m$	$1 \cdot 10^{12} \Omega$

In allegato A viene riportato il fax inviato dal costruttore, che contiene le schede tecniche dei due prodotti.

Volendo valutare la resistenza effettivamente offerta da un attacco montato, occorre osservare che la conduttanza totale è data dalla somma delle conduttanze della piastra sottorotaia e del piastrino isolante (il cuneo di scartamento non partecipa direttamente, in quanto esso è situato fra due strutture equipotenziali, cioè il bullone di fissaggio e l'estradosso del blocchetto di armamento).

Per valutare la conduttanza complessiva del piastrino isolante, si possono sommare il contributo legato alla conduttanza di volume a quello dato dalla conduttanza di superficie. Si ottiene così:

$$G_{\text{piastrino}} = \frac{A}{\rho_V \cdot s} + \frac{p}{\rho_S \cdot d}$$

In cui A è la superficie del piastrino ed s il suo spessore, p è il perimetro della sua faccia superiore e d la distanza fra essa e la rotaia (in sostanza, pari ancora al suo spessore s).

Assumendo $A = 0.15 \cdot 0.03 = 0.0045 \text{ m}^2$, $s = d = 5 \text{ mm}$, $p = 0.35 \text{ m}$, si ottiene

$$G_{\text{piastrino}} = 1 \cdot 10^{-11} \cdot 0.0045 / 0.005 + 1 \cdot 10^{-13} \cdot 0.35 / 0.005 = 1.6 \cdot 10^{-11} \text{ S}$$

Ed infine, considerando che per ciascun attacco ci sono due piastrini ed una piastra sottorotaia, si ottiene la conduttanza di un attacco completo:

$$G_{\text{attacco}} = \frac{1}{R_{\text{sottorotaia}}} + 2 \cdot G_{\text{piastrino}} = \frac{1}{150000} + 2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-11} = 6.67 \cdot 10^{-6} \text{ S}$$

In sostanza dunque la conduttanza dominante è quella della piastra sottorotaia; occorre poi prendere in considerazione la conduttanza del rivestimento della rotaia nei tratti fra attacco ed attacco. Essa viene realizzata con cuscinetti in materiale gommoso realizzati sempre dalla SOGO, che fornisce questo valore delle proprietà elettriche:

$$\rho_V = 1 \cdot 10^{10} \Omega \cdot m$$

In questo caso per il calcolo della conduttanza occorre considerare l'intera superficie laterale della rotaia a gola, che, per un interasse L fra gli appoggi pari a 750mm, risulta pari a:

$$A = p \cdot L = 0.734 \cdot 0.75 = 0.5505 \quad \text{m}^2$$

Considerando infine uno spessore s pari mediamente a 15 mm, si ottiene:

$$G_{\text{cuscinetti}} = \frac{A}{\rho_V \cdot s} = \frac{0.5505}{1 \cdot 10^{10} \cdot 0.015} = 36.7 \cdot 10^{-10} \quad \text{S}$$

Si osserva come in curva l'interasse L fra gli appoggi sia pari a 670mm, riducendo così ulteriormente il valore di conduttanza:

$$G_{\text{cuscinetti}} = \frac{A}{\rho_V \cdot s} = \frac{0.4918}{1 \cdot 10^{10} \cdot 0.015} = 32.8 \cdot 10^{-10} \quad \text{S}$$

Si va ora a valutare la conduttanza complessiva per km di binario, supponendo che in 1 km ci sono 1333 traversine, e dunque 2666 attacchi e 2666 cuscinetti di avvolgimento rotaia:

$$G_{1\text{km}} = 2666 \cdot [G_{\text{attacco}} + G_{\text{cuscinetto}}] = 2666 \cdot [6.67 \cdot 10^{-6} + 3.67 \cdot 10^{-9}] = 0.017792 \quad \text{S/km}$$

Si osserva che il valore ottenuto è ampiamente inferiore del limite previsto dalla norma CEI, che riporta come valore più restrittivo 0.05 S/km.

Si conclude quindi che il sistema isolante descritto sopra, e riferito all'isolamento fra rotaie e terra di Struttura, è efficace e conforme alle prescrizioni.

4.2.2 Caratteristiche dei materiali per l'isolamento della sottostruttura (soluzione antivibrante, Terra di Struttura a Terra Comune esterna)

Rimane infine da valutare la prestazione della guaina isolante ed antivibrante prevista al di sotto del getto di CLS che sosterrà le traversine.

Il produttore di un materiale idoneo a questa applicazione ha fornito il seguente valore di resistività volumica:

$$\rho_V = 4.35 \cdot 10^{11} \quad \Omega \cdot \text{m}$$

In Allegato B viene riportato il certificato di prova del materiale in oggetto, denominato "Gummiflex 4 PL Super 33".

Onde valutare la conduttanza complessiva di 1 km di linea, si deve osservare che è prevista l'installazione di una guaina isolante con spessore s di almeno mm 15, e che la superficie totale A vale, nei tratti a doppio binario:

$$A = p \cdot L = 6.90 \cdot 1000 = 6900 \quad \text{m}^2$$

Si ottiene quindi la seguente stima della conduttanza G:

$$G_{1\text{km}, \text{guaina}} = \frac{A}{\rho_V \cdot s} = \frac{6900}{4.35 \cdot 10^{11} \cdot 0.015} = 1.05 \cdot 10^{-6} \quad \text{S/km}$$

per quanto riguarda le tratte a singolo binario si avrà

$$G_{1\text{km}, \text{guaina}} = \frac{A}{\rho_V \cdot s} = \frac{3200}{4.35 \cdot 10^{11} \cdot 0.015} = 4.90 \cdot 10^{-7} \quad \text{S/km}$$

Si osserva tuttavia che il valore di resistenza elettrica misurato in laboratorio su campione secco è ben poco rappresentativo della reale resistività del materiale installato in opera, e che di conseguenza ci saranno da attendersi valori della conduttanza complessiva senz'altro più elevati di quelli derivanti da questo calcolo, anche se pur sempre rispettosi del limite delle norme.

4.3 Sistema di armamento realizzato su ballast con rotaie a gola

Il progetto preliminare prevede che in alcune varianti destinate a differenti condizioni progettuali, venga realizzata una armatura su ballast, che presenta le seguenti caratteristiche:

- rotaie a gola;
- traverse blocco;
- attacchi tipo Nablà;
- sottorotaie in gomma neoprenica;
- spessore di ballast di 24 cm sotto traversa.

Le traverse sono poste a passo di 75 cm in rettilineo, di 67 cm in curva; il sistema di attacco riduce al minimo il materiale minuto di armamento. Non vi è piastra di attacco; l'inclinazione 1/20 è conferita grazie alla forma della traversa.

Il ballast è costituito da pietrisco ottenuto per frantumazione di rocce tenaci, cioè dure senza essere fragili. Sono adeguate rocce di origine endogena: basalti, porfidi, graniti. Come granulometria,

il pietrisco ha pezzatura passante al vaglio a fori circolari di 6 cm, ma non passante al vaglio a fori circolari di 3 cm.

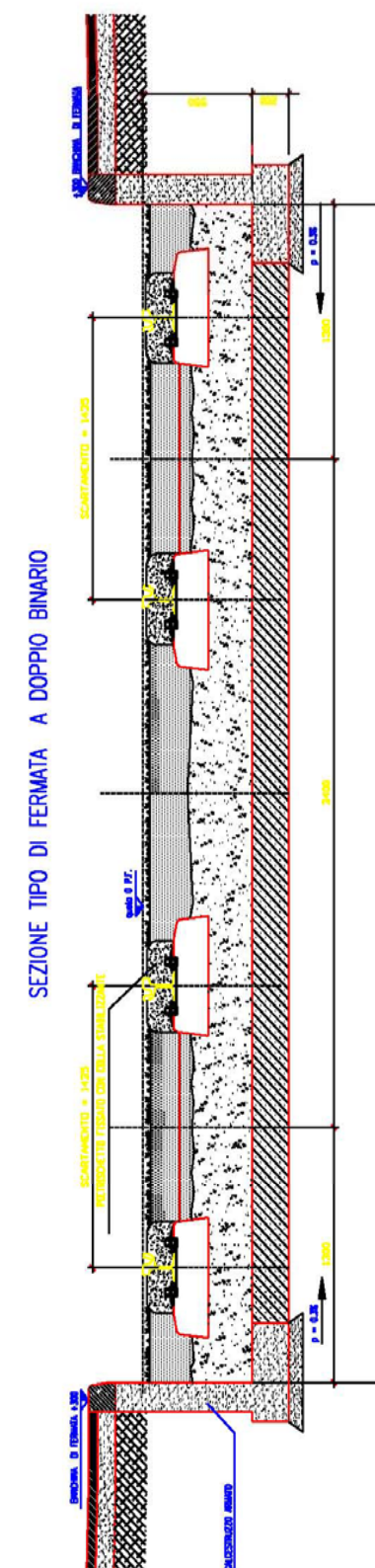
Viene adottata inoltre la soluzione di inerbimento sulla tratta della linea di trasporto in progetto al di fuori dell'ambito urbano fatta eccezione per le tratte di sottopasso alla viabilità esistente e futura dove si farà ricorso alla soluzione su ballast con superficie carrabile ai mezzi di soccorso/servizio (masselli autobloccanti o piastre in cls. Nella soluzione con ballast inerbito vengono utilizzate rotaie a gola Ri60.

Su entrambi i lati di ciascuna rotaia sono collocati grossi profili in gomma, che mantengono il manto erboso discosto dalle superfici di rotolamento. Per il binario inerbito con rotaie Ic, che ricorre in tratte relativamente brevi, si è ritenuto opportuno di evitare di realizzare altri profili, di dimensioni diverse rispetto a quelli per le Ri60, e di ottenere lo stesso risultato tramite "cordoli" di pietrischetto fissati con colla stabilizzante (del tipo usato per la stabilizzazione del ballast).

Come per l'armamento su piastra in c.a. antivibrante, il sistema viene completato dalla applicazione di profili estrusi in gomma disposti sui fianchi delle rotaie ed interposti tra le rotaie e l'inerbimento, ciò al fine di prevenire i potenziali problemi di questo tipo di armamento: i profili, mantenendo il manto erboso discosto dalle superfici di rotolamento, evitano il possibile degrado dell'aderenza e assicurano un adeguato isolamento elettrico tra Terra di Trazione e Terra di Struttura come prescritto dalla Norma CEI.

Nell figura seguente viene riportata la sezione tipica in esame.

Per l'analisi delle specifiche dei componenti utilizzati nella seguente trattazione, si rimanda al par. 4.2 ai dettagli indicati per la soluzione di armamento platea in c.a., sottolineando come nella soluzione ballast siano previste le traverse biblocco: quelle riportate come esempio possono quindi essere considerate un valido riferimento per i calcoli di isolamento tra TT e TS.



4.3.1 Caratteristiche dei materiali per l'isolamento delle rotaie (Terra Trazione e Terra di Struttura)

Vengono qui presentate le caratteristiche elettriche dei materiali che sono stati individuati al fine di ottemperare alle prescrizioni tecniche evidenziate nel precedente capitolo.

Si parte dalla piastra sottorotaia in gomma scanalata, per la quale si fa riferimento ad un prodotto sviluppato dalla SOGO su specifica CSA/Coopsette, il cui disegno tecnico è visibile in figura.

Le caratteristiche di isolamento elettrico di questa piastra in gomma sottorotaia sono state certificate dal produttore, la ditta SOGO di Frosinone. Le figure in allegato D riportano il testo di tale certificazione e le specifiche del prodotto.

Si osserva come il requisito di una resistenza elettrica maggiore di 100 MΩ viene sistematicamente superato; vengono poi presi in esame i due elementi in Nylon situati sotto il piastrino metallico di fissaggio della rotaia.

In maggior dettaglio, si tratta del piastrino forato isolante e del cuneo di regolazione dello scartamento, questi due componenti sono prodotti dalla ditta Bear Plast di Reggio Emilia, su disegno e specifica tecnica della C.S.A..

La prestazione isolante elettrica di questi elementi deriva sia dalla loro resistività di volume (misurata in Ω·m), sia dalla resistività di superficie (misurata in Ω).

I valori forniti dal costruttore sono i seguenti:

Prodotto	Resistività di Volume	Resistività di Superficie (Ω)
Piastrino Isolante	$1 \cdot 10^{11} \Omega \cdot m$	$1 \cdot 10^{13} \Omega$
Cuneo di Scartamento	$1 \cdot 10^{11} \Omega \cdot m$	$1 \cdot 10^{12} \Omega$

In allegato A viene riportato il fax inviato dal costruttore, che contiene le schede tecniche dei due prodotti.

Volendo valutare la resistenza effettivamente offerta da un attacco montato, occorre osservare che la conduttanza totale è data dalla somma delle conduttanze della piastra sottorotaia e del piastrino isolante (il cuneo di scartamento non partecipa direttamente, in quanto esso è situato fra due strutture equipotenziali, cioè il bullone di fissaggio e l'estradosso del blocchetto di armamento).

Per calcolare la conduttanza complessiva del piastrino isolante, si possono sommare il contributo legato alla conduttanza di volume a quello dato dalla conduttanza di superficie. Si ottiene così:

$$G_{\text{piastrino}} = \frac{A}{\rho_V \cdot s} + \frac{p}{\rho_S \cdot d}$$

In cui A è la superficie del piastrino ed s il suo spessore, p è il perimetro della sua faccia superiore e d la distanza fra essa e la rotaia (in sostanza, pari ancora al suo spessore s).

Assumendo $A = 0.15 \cdot 0.03 = 0.0045 \text{ m}^2$, $s = d = 5 \text{ mm}$, $p = 0.35 \text{ m}$, si ottiene

$$G_{\text{piastrino}} = 1 \cdot 10^{-11} \cdot 0.0045 / 0.005 + 1 \cdot 10^{-13} \cdot 0.35 / 0.005 = 1.6 \cdot 10^{-11} \text{ S}$$

Ed infine, considerando che per ciascun attacco ci sono due piastrini ed una piastra sottorotaia, si ottiene la conduttanza di un attacco completo:

$$G_{\text{attacco}} = \frac{1}{R_{\text{sottorotaia}}} + 2 \cdot G_{\text{piastrino}} = \frac{1}{150000} + 2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-11} = 6.67 \cdot 10^{-6} \text{ S}$$

In sostanza dunque la conduttanza dominante è quella della piastra sottorotaia.

Occorre poi prendere in considerazione la conduttanza del rivestimento della rotaia nei tratti fra attacco ed attacco. Essa viene realizzata con cuscinetti in materiale gommoso realizzati sempre dalla SOGO, che fornisce questo valore delle proprietà elettriche:

$$\rho_V = 1 \cdot 10^{10} \Omega \cdot m$$

In questo caso per il calcolo della conduttanza occorre considerare l'intera superficie laterale della rotaia a gola, che, per un interasse L fra gli appoggi pari a 750mm, risulta pari a:

$$A = p \cdot L = 0.734 \cdot 0.75 = 0.5505 \text{ m}^2$$

Considerando infine uno spessore s pari mediamente a 15 mm, si ottiene:

$$G_{\text{cuscinetti}} = \frac{A}{\rho_V \cdot s} = \frac{0.5505}{1 \cdot 10^{10} \cdot 0.015} = 36.7 \cdot 10^{-10} \text{ S}$$

Si osserva come in curva l'interasse L fra gli appoggi sia pari a 670mm, riducendo così ulteriormente il valore di conduttanza:

$$G_{\text{cuscinetti}} = \frac{A}{\rho_V \cdot s} = \frac{0.4918}{1 \cdot 10^{10} \cdot 0.015} = 32.8 \cdot 10^{-10} \text{ S}$$

Si va ora a valutare la conduttanza complessiva per km di binario, supponendo che in 1 km ci sono 1333 traversine, e dunque 2666 attacchi e 2666 cuscinetti di avvolgimento rotaia:

$$G_{1\text{km}} = 2666 \cdot [G_{\text{attacco}} + G_{\text{cuscinetti}}] = 2666 \cdot [6.67 \cdot 10^{-6} + 3.67 \cdot 10^{-9}] = 0.017792 \text{ S/km}$$

Si osserva che il valore ottenuto è ampiamente inferiore del limite previsto dalla norma CEI, che riporta come valore più restrittivo 0.05 S/km.

Si conclude quindi che il sistema isolante descritto sopra, e riferito all'isolamento fra rotaie e terra di Struttura, è efficace e conforme alle prescrizioni.

4.3.2 Caratteristiche dei materiali per l'isolamento della sottostruttura (soluzione antivibrante. Terra di Struttura a Terra Comune esterna)

Per questa configurazione di armamento, non è previsto l'isolamento tra la Terra di Struttura e la Terra Comune esterna.

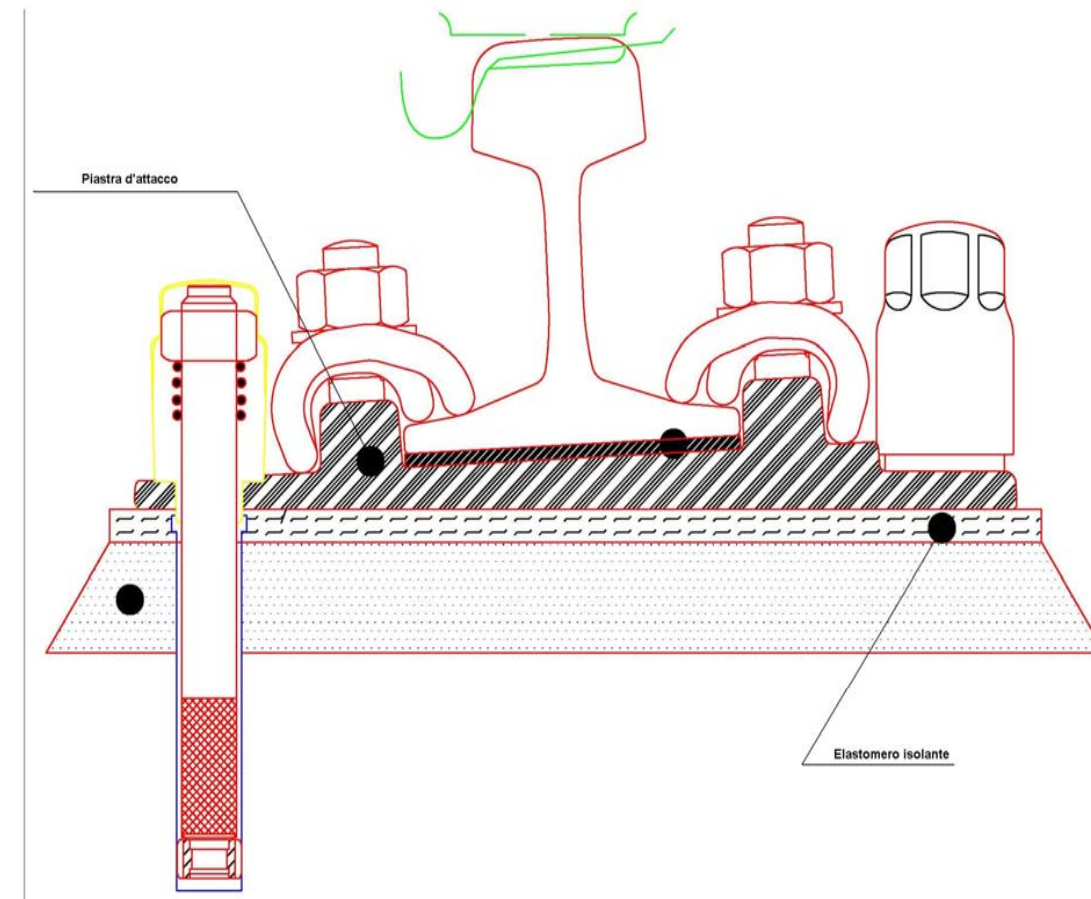
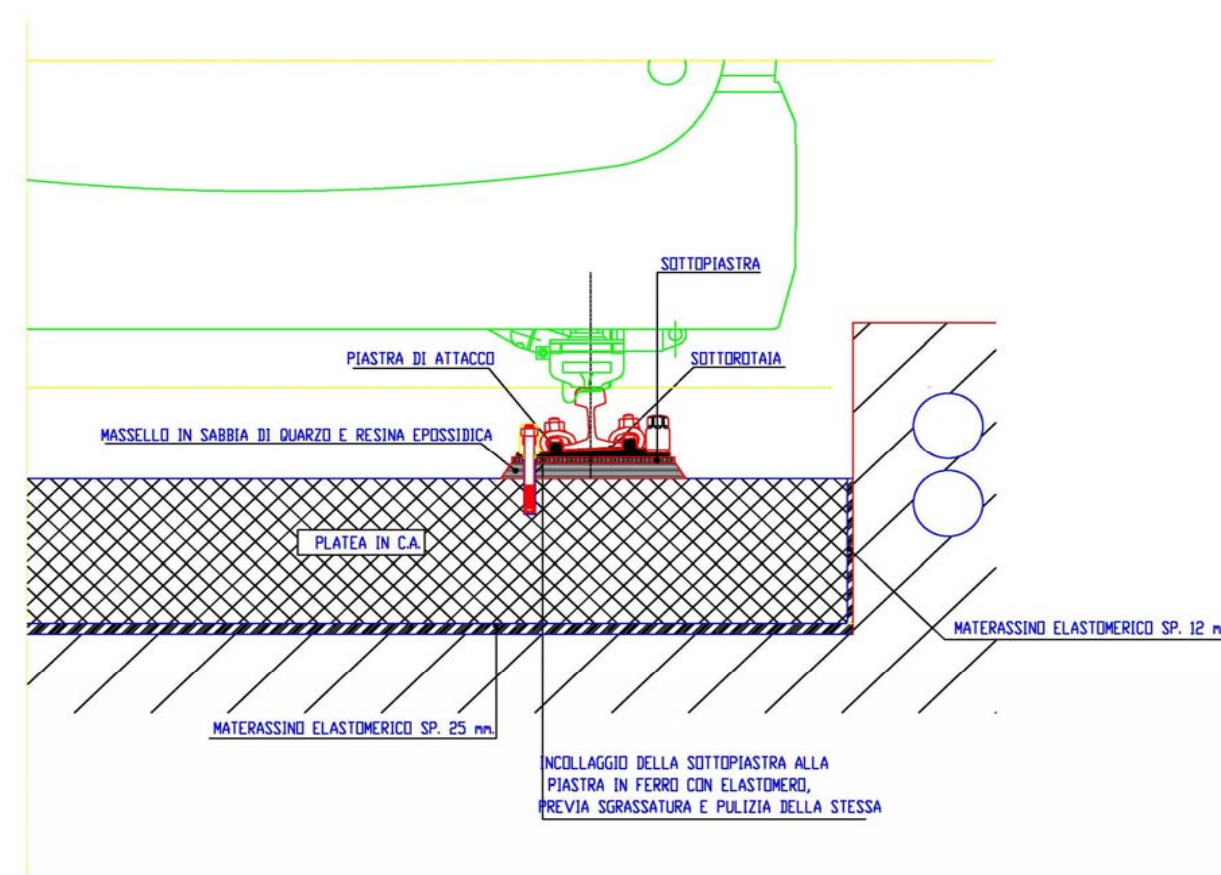
4.4 Sistema di armamento Milano Modificato

Si tratta di un binario su platea in c.a.; l'attacco è di tipo indiretto:

- le piastre sono fissate alla platea tramite ancoranti in acciaio ad alta resistenza a fissaggio chimico, previa foratura del cls. per mezzo di carotatrice. In rettilineo ciascuna piastra è fissata tramite due ancoranti, mentre nelle curve si adottano quattro ancoranti;
- gli organi di attacco di primo livello sono costituiti da chiavarde A 50-60 UNI 3557 e da ramponi elastici tipo Skl 3.

Fra la suola delle rotaie e le piastre di attacco sono interposte piastre sottorotaia in Noene (materiale elastomerico caratterizzato da elevatissimo smorzamento) dello spessore di 5 mm; fra il piano del ferro e l'estradosso della platea viene tenuto un dislivello tale che al di sotto delle piastre di attacco resti uno spazio di altezza attorno ai 4 cm. Dopo aver realizzato allineamento e livello del binario, in questo spazio viene formato un massello costituito da una speciale malta di sabbia di quarzo e resina epossidica; in questo modo vengono recuperate le tolleranze costruttive della platea. al di sotto della piastra di attacco è collocata una sottopiastra elastomerica in polierutano cellulare, dello spessore di 12 mm. Tale sottopiastra è incollata alla superficie inferiore della piastra, in modo da consentire la rinalzata della suddetta malta di riempimento dello spazio residuo rispetto all'estradosso della platea.

Inoltre per aumentare l'effetto smorzante è stata prevista la posa, al di sotto ed ai lati della platea in c.a., di un materassino elastomerico dello spessore di 12 mm ai lati e di 25 mm alla base in grado quindi di garantire un adeguato isolamento elettrico tra Terra di Trazione e Terra di Struttura come consigliato dalla Norma CEI.



4.4.1 Caratteristiche dei materiali per l'isolamento delle rotaie (Terra Trazione e Terra di Struttura)

Vengono qui presentate le caratteristiche elettriche dei materiali che sono stati individuati al fine di ottemperare alla prescrizioni tecniche secondo le Norme CEI

L'elemento isolante che caratterizza la realizzazione, come si può notare dalla figura di dettaglio rappresentata qui di fianco, è la sottopiastra elastomerica in materiale composito, per la quale vengono riportate le caratteristiche rilasciate dalla Isolgomma s.r.l. per il proprio prodotto, riportate in allegato E; oltre alla suola viene illustrato anche un tipico esempio di sigillante per posa, come si evince dalla descrizione tecnica, esso, se impiegato correttamente, fornisce un ulteriore contributo all'isolamento elettrico della rotaia.

Volendo valutare la resistenza d'isolamento effettivamente offerta da un attacco montato, occorre osservare che la conduttanza totale è data dalla suola sottorotaia lungo tutto la tratta considerata, più il contributo degli ancoraggi del singolo attacco alla platea.

Per questi ultimi, non avendo dati specifici, si fa riferimento ai valori di conduttanza calcolati nei paragrafi precedenti per i piastrini di isolamento delle traverse blocco:

$$G_{\text{piastrino}} = \frac{A}{\rho_V \cdot s} + \frac{p}{\rho_S \cdot d}$$

in cui A è la superficie del piastrino ed s il suo spessore, p è il perimetro della sua faccia superiore e d la distanza fra essa e la rotaia (in sostanza, pari ancora al suo spessore s).

Assumendo $A = 0.15 \cdot 0.03 = 0.0045 \text{ m}^2$, $s = d = 5 \text{ mm}$, $p = 0.35 \text{ m}$, si ottiene

$$G_{\text{piastrino}} = 1 \cdot 10^{-11} \cdot 0.0045 / 0.005 + 1 \cdot 10^{-13} \cdot 0.35 / 0.005 = 1.6 \cdot 10^{-11} \text{ S}$$

Occorre poi prendere in considerazione la conduttanza della suola sottorotaia, presente anche nei tratti fra attacco ed attacco. Con riferimento alle caratteristiche elettriche fornite dal costruttore, si ottiene:

$$\rho_V = 8 \cdot 10^{11} \quad \Omega \cdot \text{cm} = 8 \cdot 10^9 \quad \Omega \cdot \text{m}$$

In questo caso per il calcolo della conduttanza occorre considerare l'intera superficie della suola, che, per una lunghezza di riferimento L pari a 1000 m, risulta pari a:

$$A = p \cdot L = 0.734 \cdot 1 = 0.7340 \text{ m}^2$$

Considerando infine uno spessore s pari mediamente a 10 mm, si ottiene:

$$G_{\text{suola}} = \frac{A}{\rho_V \cdot s} = \frac{0.7340}{8 \cdot 10^9 \cdot 0.010} = 91.7 \cdot 10^{-10} \text{ S}$$

Si va ora a valutare la conduttanza complessiva per km di binario, supponendo che in 1 km ci sono 1333 traversine, e dunque 2666 attacchi e 2000 m di suola protettiva:

$$G_{1\text{km}} = 2666 \cdot G_{\text{attacco}} + 2000 \cdot G_{\text{suola}} = 2666 \cdot 1.6 \cdot 10^{-11} + 2000 \cdot 9.17 \cdot 10^{-9} = 0.0184 \text{ mS/km}$$

Si osserva che il valore ottenuto è ampiamente inferiore del limite previsto dalla norma CEI, che riporta come valore più restrittivo 0.05 S/km; tuttavia il valore ottenuto è estremamente piccolo poiché si è fatta una ipotesi ben precisa: il sistema di fissaggio alla platea deve essere opportunamente isolato, una errata installazione dell'ancoraggio infatti comprometterebbe l'intero isolamento eliminando di fatto l'effetto della suola elastomerica e 'cortocircuitando' la rotaia alla platea.

Si conclude quindi che il sistema isolante descritto sopra, e riferito all'isolamento fra rotaie e terra di Struttura, è efficace e conforme alle prescrizioni, a condizioni che vengano isolati opportunamente i fissaggi alla platea.

4.4.2 Caratteristiche dei materiali per l'isolamento della sottostruttura (soluzione antivibrante, Terra di Struttura a Terra Comune esterna)

Rimane infine da valutare la prestazione della guaina isolante ed antivibrante prevista al di sotto del getto di platea.

Il produttore di un materiale idoneo a questa applicazione ha fornito il seguente valore di resistività volumica:

$$\rho_V = 4.35 \cdot 10^{11} \quad \Omega \cdot \text{m}$$

In Allegato B viene riportato il certificato di prova del materiale in oggetto, denominato "Gummiflex 4 PL Super 33".

Onde valutare la conduttanza complessiva di 1 km di linea, si deve osservare che è prevista l'installazione di una guaina isolante con due spessori differenti s di 25mm sotto la platea e 15mm ai lati,:

Si ottiene quindi la seguente stima della conduttanza G:

$$G_{1\text{km}, \text{guaina}} = \frac{A_{\text{inf}}}{\rho_V \cdot s} + \frac{A_{\text{laterale}}}{\rho_V \cdot s} = \frac{5300}{4.35 \cdot 10^{11} \cdot 0.025} + \frac{900}{4.35 \cdot 10^{11} \cdot 0.012} = 7.02 \cdot 10^{-7} \text{ S/km}$$

per quanto riguarda le tratte a singolo binario si avrà

$$G_{1km, guaina} = \frac{A_{inf}}{\rho_V \cdot s} + \frac{A_{laterale}}{\rho_V \cdot s} = \frac{2300}{4.35 \cdot 10^{11} \cdot 0.025} + \frac{900}{4.35 \cdot 10^{11} \cdot 0.012} = 3.84 \cdot 10^{-7} \quad S / km$$

Si osserva tuttavia che il valore di resistenza elettrica misurato in laboratorio su campione secco è ben poco rappresentativo della reale resistività del materiale installato in opera, e che di conseguenza ci saranno da attendersi valori della conduttanza complessiva senz'altro più elevati di quelli derivanti da questo calcolo, anche se pur sempre rispettosi del limite delle norme.

4.5 Sintesi e conclusioni dello studio di impatto da correnti vaganti

Nei paragrafi precedenti si è dimostrato come le soluzioni previste nelle diverse varianti delle tratte superficiale ed in galleria rispondano ai requisiti previsti dalla norma CEI.

Tuttavia si raccomanda di prestare particolare cura nella posa delle guaine antivibranti e degli isolatori di fissaggio delle rotaie, da essi infatti dipende la perfetta tenuta degli isolamenti.

Per quanto riguarda la posa delle guaine, affinché esse garantiscano una continuità della separazione sino agli strati superficiali, si raccomanda di posarle sino a livello della copertura stradale interrompendo eventuali strati di binder o di conglomerato bituminoso, nonché di manto d'usura i quali in alcuni dettagli delle sezioni allegate, ne determinano una interruzione (che causa di fatto una continuità tra la Terra di Struttura e Terra Comune esterna).

Per quanto riguarda gli isolatori di fissaggio, costituiti da piastrini isolanti interposti tra i bulloni e rotaie, essi rappresentano l'anello debole nella posa soprattutto della variante con armamento 'Milano Modificato'; una eventuale imperizia nell'installazione può comportare di fatto la perdita dell'isolamento tra la Terra di Trazione e la Terra di Struttura o peggio ancora della Terra Comune esterna, causando così correnti vaganti in grado di danneggiare strutture afferenti e, quel che è peggio, costituire pericolo di folgorazione per contatto.

Complessivamente le varianti presentate si possono separare in due gruppi:

- Soluzioni con Terra di Struttura Estranea (cioè separata dalla Terra Comune esterna): Milano Modificato, Platea in c.a. con binario a gola e soluzione antivibrante.
- Soluzioni con Terra di struttura Comune (cioè connessa alla Terra Comune esterna): Platea in c.a. con binario a gola senza guaina antivibrante, ballast con binario a gola.

La prima tipologia garantisce la massima protezione dalle correnti vaganti, a patto ovviamente che gli isolamenti siano fatti a regola d'arte; essa è particolarmente indicata nelle zone fortemente urbanizzate dove si prevede la presenza di numerose strutture già esistenti e non si esclude la presenza di potenziali elettrici generati da fonti esterne possibili cause di correnti vaganti.

In questo modo è possibile preservare l'armatura dalle correnti vaganti esterne e, contemporaneamente, salvaguardare le strutture esterne (elettrdotto, acquedotti, gasdotti, fondamenta di edifici limitrofi, ecc) dalle correnti vaganti generate dal nuovo sistema di trasporto su ferro.

La seconda tipologia garantisce solamente l'isolamento necessario della Terra di Trazione da ciò che circonda i binari, armamento compreso; quest'ultimo si trova quindi a 'convivere' con i potenziali generati dalle strutture preesistenti ed è quindi possibile bersaglio di correnti vaganti esterne: per tale motivo si consiglia la posa di queste tipologie di armamento solo in zone scarsamente urbanizzate e previa verifica, mediante opportuni rilievi, delle condizioni di potenziale elettrico e conducibilità del suolo, al fine di verificare la presenza nelle vicinanze dell'armamento di possibili fonti di correnti vaganti indesiderate.

E' altresì consigliato l'utilizzo della seconda tipologia nei pressi delle officine di riparazione e di deposito della metropolitana; in queste aree la Norma CEI prevede infatti che la Terra di Trazione, la Terra di Struttura e la Terra Comune estrema coincidano a formare una Terra Globale.

Pertanto, ai sensi della Norma CEI 9-20/1 e con riferimento alla CEI EN 50122-2, dal punto di vista della componente ambientale "correnti vaganti", nulla osta alla realizzazione della tramvia stessa salvo le considerazioni fatte in questo stesso paragrafo.

Allegato A

17-LUG-2002 17:53

BEAR PLAST SPA

39+0522+557208 P.01

**BEAR PLAST** SpA

PROGETTAZIONE - COSTRUZIONE STAMPI E STAMPAGGIO TERMOPLASTICI

Via Monari, 2 - 42100 Reggio Emilia, Tel. 0522/551472 Fax 0522/557208

TRASMISSIONE TELEFAX

FAX MESSAGE

Nr. :

Data :

17/7/02

Da / From

A / To

Fax Number

Alla cortese attenzione Sig./Attention

Marco Bedogni
CSA
647501
Caggiani

Oggetto / Subject: Schede tecniche prodotto a Cuneo.

Come da accordi le giro le schede
tecniche con evidenziati i dati sulle
caratteristiche Elettriche.
Nel terzo foglio si trovano dati
integrativi.
Il materiale del piastrello FE50221
quello del cuneo è AZ18V30

A disposizione per eventuali
richieste di integrazioni ulteriori
al produttore la saluto
cordialmente

Nr. pagine compresa la presente / Nr. pages including this one)

4

Se la trasmissione dovesse risultare illeggibile si prega di comunicarlo al più presto.

If the message is not clear or page are missing please inform us urgently.

I nostri numeri / our numbers : tel. 0522 / 551472 - fax 0522/557208

17-LUG-2002 17:54

BEAR PLAST SPA

39+0522+557208 P.02

TECHNYL® FE 50221 AL

Proprietà Generali

Valori misurati a 23 °C

I valori indicati sono quelli del colore naturale.

Proprietà	Norme	Unità	Valori	
			EH 0 - 23 °C	EH 50 - 23 °C
Fisiche				
Ass. d'acqua a 23°C in acqua per 24 ore	ISO 62	%	1.5	-
Densità	ISO 1183-A	g/cm3	1.14	-
Ritiro allo stampaggio, senso parallelo	NYLTECH	%	1.8	-
Ritiro allo stampaggio, senso perpendic.	NYLTECH	%	1.7	-
Meccaniche				
Modulo a Trazione	ISO 527	MPa	3000	1100
Carico al limite snervamento	ISO 527	MPa	90	45
Allungamento a snervamento	ISO 527	%	8	12
Allungamento alla rottura	ISO 527	%	40	400
Carico al 50% d'allungamento	ISO 527	MPa	-	40
Carico a rottura	ISO 527	MPa	50	50
Urto Charpy senza intaglio	ISO 178/IEU-1993	kJ/m2	NB	NB
Urto Charpy con intaglio	ISO 178/IEA-1993	kJ/m2	5.5	40
Urto Izod con intaglio	ISO 180	kJ/m2	5	35
Termiche				
Punto di fusione	ISO 3145 -C	°C	242	-
Temper. inflessione sotto carico 1,8 MPa	ISO 75-2	°C	57	-
Coef. dilatazione lineare / 23°C a 85°C	ASTM E 831	E-5 / °C	7	-
Infiammabilità UL94 / 1,5 mm	ISO 1210UL 94	V	HB	-
Filo incandescente spessore 1,6 mm			-	-
Elettriche				
Permittività relativa 1 MHz	IEC 250		3	3.2
Fattore di dissipazione 1 MHz	IEC 250		0.03	0.11
Resistività di volume	IEC 93	E14.Ohm.cm	10	0.1
Resistività di superficie	IEC 93	E14.Ohm	1	0.1
Rigidità dielettrica	IEC 243-1	kJ/mm	25	24
Resistenza alle correnti striscianti KC	IEC 112	Volt	575	600
Proprietà specifiche				
Urto Charpy senza intaglio a -30°C	ISO 178/IEU 1993	kJ/m2	NB	-
Urto Charpy con intaglio a -30°C	ISO 178/IEA-1993	kJ/m2	4	-
Indice d'ossigeno	ISO 4899	%	23.5	-

Marchio per l'identificazione

>PA66/6<

Annulla e sostituisce numero TL0117/96.107

Le informazioni di questa scheda sono fornite in buona fede ma hanno solo un valore indicativo e non implicano perciò nessun impegno né una garanzia da parte nostra, specialmente in caso di lesione dei diritti appartenenti a terzi derivante dalla utilizzazione dei nostri prodotti. I valori riportati delle varie proprietà si riferiscono salvo indicazione contraria al prodotto naturale.

A joint venture of Rhône-Poulenc and Snia group

NYLTECH FRANCE

Avenue Rambouillet BP 64
F-69192 Saint-Fons Cedex
Tel. (33) 04 72 89 27 00 Fax (33) 04 72 89 27 01

Société Anonyme au capital de 339 915 000 F
RCS Lyon B 393 335 104.

17-LUG-2002 17:54

BEAR PLAST SPA

39+0522+557208 P.03

TECHNYL® A 218 V30**Proprietà Generali**

Valori misurati a 23 °C

I valori indicati sono quelli del colore naturale.

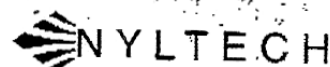
Proprietà	Norme	Unità	Valori		
			EH 0 - 23 °C	EH 50 - 23 °C	
Fisiche	Ass. d'acqua a 23°C in acqua per 24 ore	ISO 62	%	0,8	-
	Densità	ISO 1183-A	g/cm3	1,37	-
	Ritiro allo stampaggio, senso parallelo	NYLTECH	%	0,5	-
	Ritiro allo stampaggio, senso perpendic.	NYLTECH	%	0,8	-
Meccaniche	Modulo a Trazione	ISO 527	MPa	10000	7500
	Carico al limite snervamento	ISO 527	MPa	190	135
	Allungamento a snervamento		%	-	-
	Allungamento alla rottura	ISO 527	%	3	4
	Carico al 50% d'allungamento		MPa	-	-
	Carico a rottura	ISO 527	MPa	190	135
	Urto Charpy senza intaglio	ISO 179/IEU-1993	kJ/m2	80	95
	Urto Charpy con intaglio	ISO 179/IEU-1993	kJ/m2	12	16
	Urto Izod con intaglio	ISO 180	kJ/m2	11	16
Termiche	Punto di fusione	ISO 3146 - C	°C	250	-
	Temper. inflessione sotto carico 1,8 MPa	ISO 75-2	°C	255	-
	Coef. dilatazione lineare // 23°C a 85°C	ASTM E 831	E/°C	2,5	-
	Infiammabilità UL94 / 1,6 mm	ISO 1210/UL 94	V	HB	-
	Filo incandescente spessore 1,6 mm	IEC 695-2-1	°C	700	-
Elettriche	Permittività relativa 1 MHz	IEC 250		3,7	4
	Fattore di dissipazione 1 MHz	IEC 250		0,01	0,11
	Resistività di volume	IEC 93	E14, Ohm.cm	5	0,1
	Resistività di superficie	IEC 93	E14, Ohm	6	0,01
	Rigidità dielettrica	IEC 243-1	kV/mm	34	29
	Resistenza alle correnti striscianti KC	IEC 112	Volt	450	425
Proprietà specifiche	Indice d'ossigeno	ISO 4589	%	23	-

Marchio per l'identificazione

>PA66-GF30<

Annulla e sostituisce numero TL0088/96.081

Le informazioni di questa scheda sono fornite in buona fede ma hanno solo un valore indicativo e non implicano perciò nessun impegno né una garanzia da parte nostra, specialmente in caso di lesione dei diritti appartenenti a terzi derivante dalla utilizzazione dei nostri prodotti. I valori riportati delle varie proprietà si riferiscono salvo indicazione contraria al prodotto naturale.



A joint venture of Rhône-Poulenc and Sella group

NYLTECH FRANCE

Avenue Rambouillet BP 64
F-69192 Saint-Fons Cedex
Tél. (33) 04 72 89 27 00 Fax (33) 04 72 89 27 01

Société Anonyme au capital de 339 915 000 F
RCS Lyon B 393 335 104

17-LUG-2002 17:55

BEAR PLAST SPA

39+0522+557208 P.04

Fax



Engineering Plastics

From: **Gilberto Gaggiotti**
CIG Technical Assistance

To: **Franceschetti**
BEARPLAST

Telephone no.: **+39.029616544**

Fax no.: **+39.0522557208**

Fax no.: **+39.029616528**

Numbers of pages: **1**

e-mail: **gilberto.gaggiotti@eu.rhodia.com**

Date: **7 Marzo 2001**

Copy(ies)

M.Bedogni, A.Clerici@, D.Voce@
@posta elettronica

Oggetto: misure di resistività di volume e di superficie su A 218V30 NATURALE, FE 50221 NATURALE e PSA 246 NERO

Egr. Sig. Franceschetti,
come d'accordo, Le invio i risultati completi delle misure di resistività di volume e di superficie eseguite sui nostri prodotti:

	Resistività di volume (Ω cm)		Resistività di superficie (Ω)	
	DAM	U.R.:50%	DAM	U.R.:50%
A 218V30 Naturale	1.7 x 10 ¹⁵	8.40 x 10 ¹³	4.2 x 10 ¹⁴	8.30 x 10 ¹¹
FE 50221 Naturale	4.6 x 10 ¹⁵	8.40 x 10 ¹³	9.0 x 10 ¹⁴	2.40 x 10 ¹²
PSA 246 Nero	2.2 x 10 ¹⁵	6.00 x 10 ¹³	4.5 x 10 ¹⁴	6.90 x 10 ¹¹

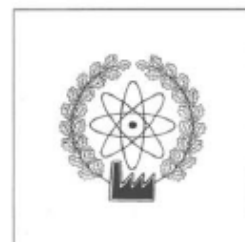
Secondo norma CEI 93
Spessore dei provini: 2 mm

A disposizione per ogni eventuale chiarimento.
Colgo l'occasione per porgerLe i più cordiali saluti
Gilberto Gaggiotti

BEAR PLAST SpA
Resp. Approvvigionamenti
Matteo Bedogni

Via F. Maggior 80 - 20020 Ceriano Laghetto (MI). Tel: 0296161 - Fax: 029616500

TOTALE P.04

Allegato B

ISTITUTO GIORDANO s.p.a.

CENTRO POLITECNICO DI RICERCHE E CERTIFICAZIONI

Via Rossini, 2
47814 BELLARIA (RN) Italy
Tel. ++39/0541 343030 (10 linee)
Telefax ++39/0541 345540

e-mail: istitutogiordano@giordano.it
web site: www.giordano.it

Cod. Fisc./Part. IVA: 00 548 540 409
R.E.A. c/o C.C.I.A.A. (RN) 156766
Registro Imprese Rimini n. 00549540409
Cap. Soc. € 516.000,00 i.v.

RICONOSCIMENTI UFFICIALI:

• MINISTERO LAVORO PUBBLICI Legge 1086/71 con D.M. 27/11/82 e 22/12/82 "Prove sui materiali da costruzione"
• MINISTERO INDUSTRIA COMMERCIO ARTIGIANATO D.M. 03/11/83 "Certificazione CE per la prima da dipinti"
• MINISTERO INDUSTRIA COMMERCIO ARTIGIANATO D.M. 21/11/91 "Certificazione CEE delle emissioni sonore di macchine da cantiere"
• MINISTERO INDUSTRIA COMMERCIO ARTIGIANATO D.L. 21/01/98 n. 135 "Certificazione CEE delle emissioni sonore di macchine di movimento terra"
• MINISTERO INDUSTRIA COMMERCIO ARTIGIANATO D.M. 28/07/93 "Certificazione CEE concernente la sicurezza dei giocattoli"
• MINISTERO INDUSTRIA COMMERCIO ARTIGIANATO D.M. 24/01/94 "Certificazione CE attesta di conformità CEE per il rendimento delle caldaie ad acqua calda alimentate con combustibili liquidi e gas"
• MINISTERO INDUSTRIA COMMERCIO ARTIGIANATO Decreto n. 71786 del 15/12/98 "Certificazione CEE per gli apparecchi a gas"
• MINISTERO INDUSTRIA COMMERCIO ARTIGIANATO e MINISTERO LAVORO e PREVIDENZA SOCIALE D.M. 04/05/99 "Certificazione CEE in materia di impianti sanitari e prevenzione"
• MINISTERO INDUSTRIA COMMERCIO ARTIGIANATO e MINISTERO LAVORO e PREVIDENZA SOCIALE D.M. 04/05/94 "Certificazione CEE sulle macchine"
• MINISTERO INDUSTRIA COMMERCIO ARTIGIANATO "Tecnica di verifica della sicurezza e conformità dei prodotti nell'ambito della sorveglianza sul mercato e tutela dei consumatori"
• MINISTERO INDUSTRIA COMMERCIO ARTIGIANATO D.M. 02/04/98 "Metodo di valutazione di conformità delle caratteristiche e prestazioni energetiche dei componenti degli edifici e degli impianti"
• MINISTERO INTERIORE Legge 81/84 e D.M. 26/05/85 con autorizzazione del TUGM "Prove di reazione al fuoco secondo D.M. 26/05/84"
• MINISTERO INTERIORE Legge 81/84 e D.M. 26/05/85 con autorizzazione del 10/01/90 "Prove di resistenza al fuoco secondo Ordine n. 31 del 10/01/90"
• MINISTERO INTERIORE Legge 81/84 e D.M. 26/05/85 con autorizzazione del 03/01/90 "Prove di resistenza al fuoco secondo Ordine n. 7 del 03/01/90 e norme CEN/ISO UNI 9257"
• MINISTERO INTERIORE Legge 81/84 e D.M. 26/05/85 con autorizzazione del 03/01/90 "Prove su sistemi d'impianto passivi secondo D.M. 20/12/92"
• SUOI MINISTERO UNIVERSITA' RICERCA SCIENTIFICA E TECNOLOGICA Legge 48/92 con D.M. 09/10/93 "missione affidata dei laboratori autorizzati a svolgere ricerche di carattere applicativo e base delle prove e delle indagini"
• MINISTERO PUBBLICA ISTRUZIONE Decreto n. 176 del 21/03/87 "Iscrizione allo Schedario Anagrafe Nazionale delle scuole con codice N. 84947979"
• ENCEIT (Accreditamento Organismi Certificazioni) Accreditazione n. 5174 del 18/12/00 "Organismo di certificazione di sistemi qualità"
• DINL (Sistema Nazionale per l'Accreditamento dei Laboratori) Accreditazione n. 001 del 14/11/91
• DTI (Sistema di Taratura in Italia) Accreditazione n. 20 "Centro DTI di Taratura per grandezze termomeccaniche nel settore"
• ICM (Istituto di Certificazione Industriale per la Meccanica) "Prove di laboratorio nell'ambito degli schemi di Certificazione di Prodotto"
• IBC (Istituto per il Banchino Qualità) "Prove di laboratorio nell'ambito degli schemi di Certificazione di Prodotto per come fanno"
• UNICUAL (Sistema Nazionale Certificati Sperimentali Autorizzati Accreditati) Riconoscimento del MINISTERO "L'accreditamento per le prove di certificazione (UNICUAL) su servizi e servizi correlati"
• UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - Settore Certificazioni) "Prove di laboratorio nell'ambito degli schemi di Certificazione di Prodotto per termomeccaniche a lungo con ruolo a costruzione teorica e sperimentale estesa"

PARTICIPAZIONI ASSOCIATIVE:

• AIA Associazione Italiana di Acustica
• ACAPR Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria Riscaldamento Refrigerazione
• ACO Associazione Italiana per la Qualità
• APNO Associazione Italiana Prove non Distruttive
• ASP Associazione Italiana Laboratori di Prove
• ALPI Associazione Laboratori di Prove Indipendenti
• AOPAE American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.
• ASSINDUSTRIA Associazione degli Industriali di Rimini
• ASTM American Society for Testing and Materials
• ASIG Associazione Tecnica Italiana del Gas
• CTE Collegio dei Tecnici della Industrializzazione Edilizia
• CTA Comitato Tecnico Italiano
• EAFMA European Association of Research Managers and Administrators
• EARTO European Association of Research and Technology Organization
• EGOLF European Group of Official Laboratories for Fire Testing
• UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione

CLAUSOLE

Il presente documento si riferisce solamente al campione o materiale sottoposto a prova.
Il presente documento non può essere riprodotto, modificato, né approvato senza la scritta del laboratorio

Rapporto di prova n. 180017

Luogo e data di emissione: Pomezia 10-feb-04

Committente: Valli Zabban S.p.A.
Via Danubio, 10
50011 Sesto Fiorentino (FI)

n. e data dell'ordine: Acc.ne ns. offerta 11419 del 04-feb-2004

n. e data della commessa: 24579 del 04-feb-2004

Luogo della prova: Istituto Giordano S.p.A.
Sede operativa di Pomezia
via Honduras snc - 00040 Pomezia (Roma)

data del ricevimento dei campioni: 29-gen-04

data di esecuzione della prova: 10-feb-04

tipo di prova: Prova di isolamento elettrico e rigidità dielettrica.

Provenienza del campione: Fornito dal committente

Identificazione: campioni numerati da 1 a 5

Denominazione dei campioni:

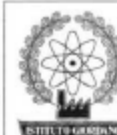
Il campione sottoposto a prova è denominato: "Gummiflex 4 PL Super 33"

(*) secondo le dichiarazioni del committente

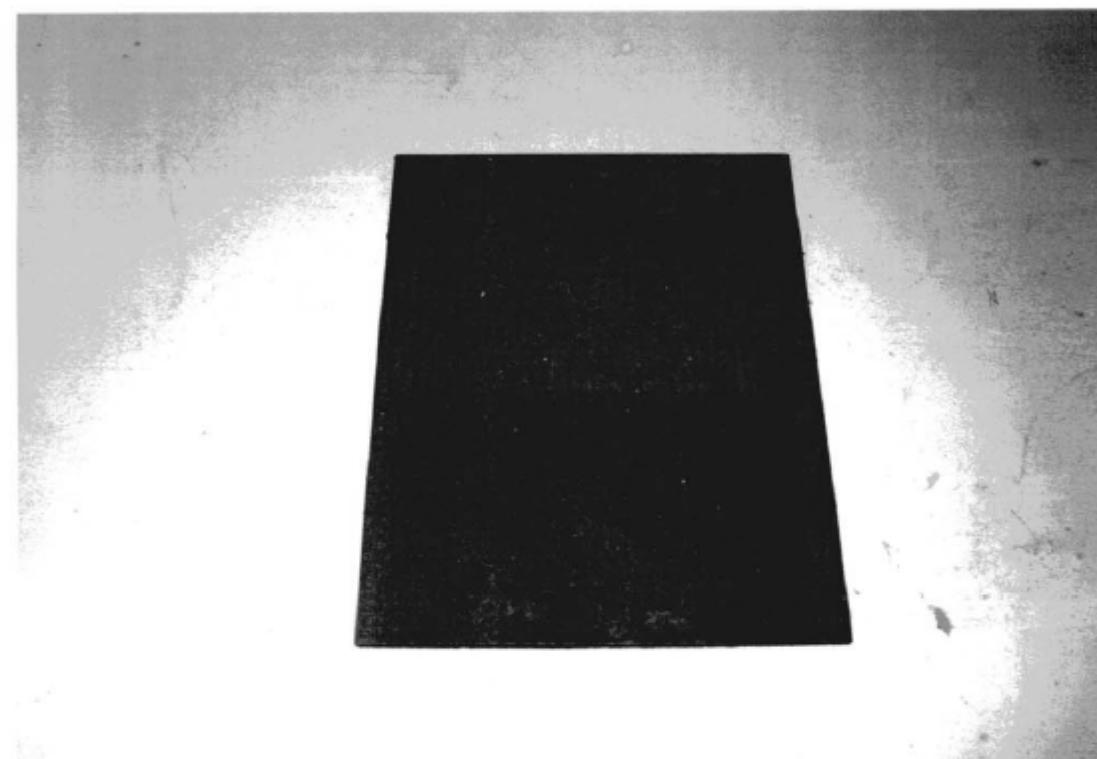
Comp.
rev.

Il presente Rapporto di taratura è costituito da n. 3 fogli

Foglio
n. 1 di 3

**Descrizione del campione**

Il campione in prova, provini dalle dimensioni 220 x 220 x 10, è mostrato nella seguente fotografia:

**Riferimenti normativi:**

Le prove sono state eseguite secondo la norme richieste dal committente e precisamente:
Prova di rigidità dielettrica UNI 429
Prova di resistenza di isolamento UNI 5572

Condizioni ambientali:

temperatura $23 \pm 1^\circ\text{C}$
umidità: $50 \pm 10\%$



Foglio
n. 2 di 3

Rapporto di prova n. 180017



Apparecchiatura di prova

Per l'esecuzione della prova è stata utilizzata la seguente apparecchiatura:

- Megaohmetro General radio mod. 1864 matr. 080E981 munito di certificato valido di taratura RT 19 con scadenza 30-giu-2005
- Rigidimetro Hipotronics 720-2M matr. 081E993 munito di certificato valido di taratura RT 5 con scadenza 09-apr-2004
- Calibro centesimale matr. 091M8551

Modalità della prova: Resistenza di isolamento.

- I campioni in prova sono stati posti tra gli elettrodi cui è stata applicata una tensione di 250 V_{CC} per un minuto
- Trascorso tale tempo è stata misurata la resistenza di isolamento espressa in GΩ

Esito della prova

La prova è stata eseguita su 5 provini ricavati dai camioni ricevuti con le seguenti dimensioni: 90 x 90 x 4
La tabella che segue riporta i valori misurati, le medie per i singoli provini e l'incertezza di misura

provino	misure	incertezza di misura U(x)
n.	GΩ	GΩ
1	80	
2	100	
3	100	
4	90	
5	80	
media	90	4,47

Modalità della prova: Rigidità dielettrica.

I campioni in prova, posti tra gli elettrodi del rigidimetro sono stati sottoposti a tensione crescente fino ad ottenere la perforazione del provino.

Esito della prova

La tensione di prova, portata al limite strumentale di 50 kV non ha prodotto scariche o perforazione
Pertanto la rigidità dielettrica del campione in prova risulta maggiore a 50 kV

L'operatore tecnico
(Mario Sanna)

Il Responsabile tecnico
(Alberto Aiello)

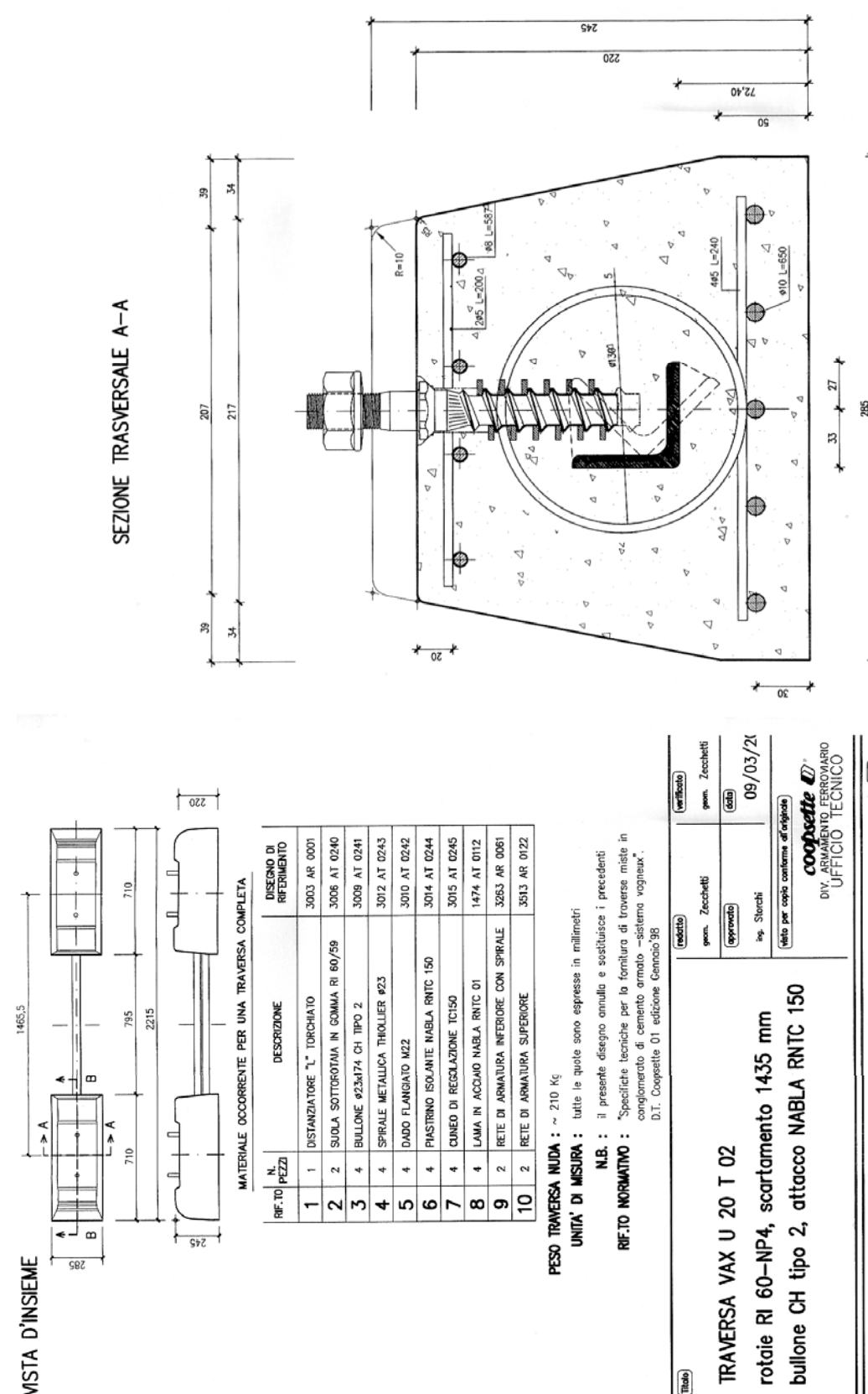
Il Responsabile del laboratorio
(Massimo Marchegiani)

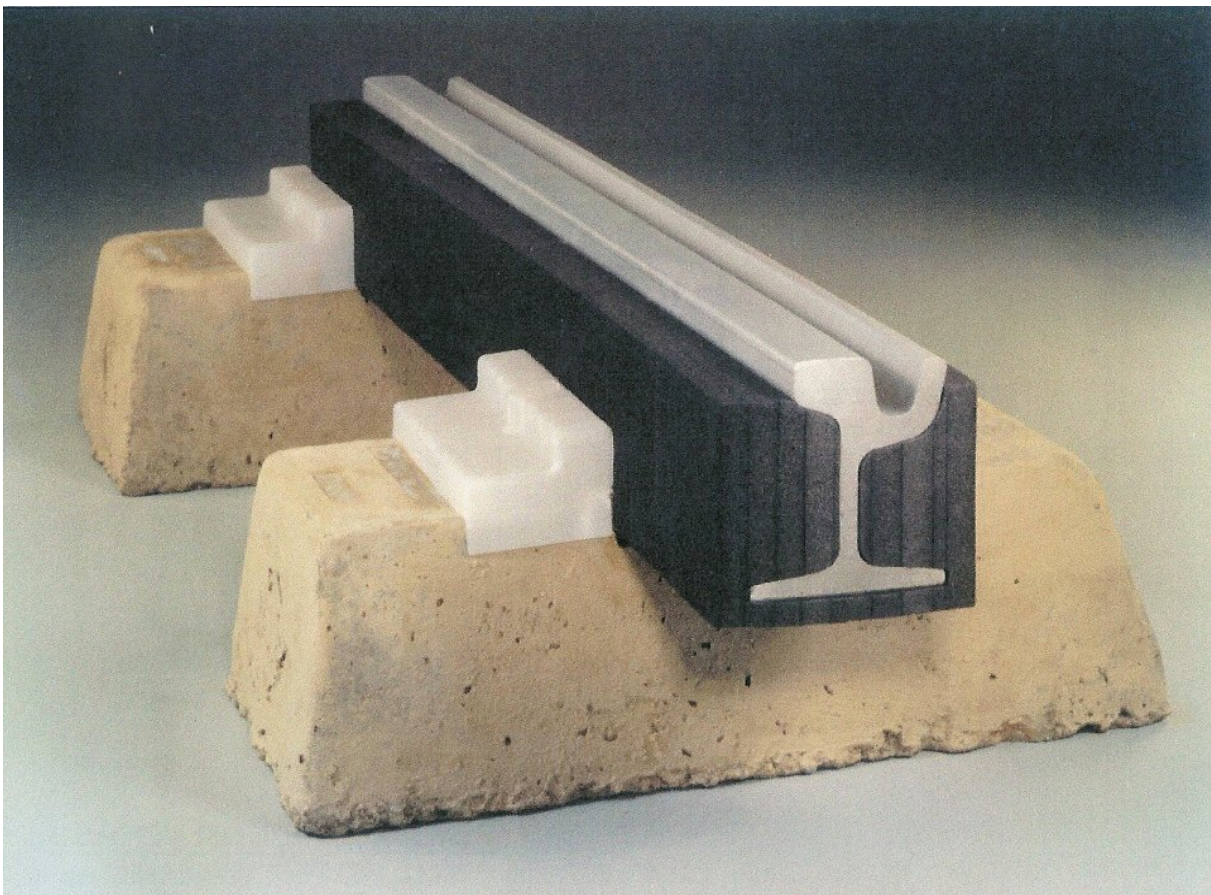


Foglio
n. 3 di 3

Rapporto di prova n. 180017

Allegato C





18 LUG '02 14:16 CSA CAMPEGINE RE 0522/677501

10776200719

P.1



S.p.A.
INDUSTRIA ARTICOLI TECNICI IN GOMMA
Sede e Stabilimento: VIA LE LAME, 8 - 03100 FROSINONE
TEL: +39 775 88880 - FAX: +39 775 200719
e-mail: info@sogo.it

Certificato N° SQ 1563-IT



A:
Spett.le
Coopsette s.c.a.r.l.
Via S. Biagio, 75
42024 Castelnovo Sotto (RE)

Frosinone, 18 luglio 2002

Con la presente si dichiara che sulle piastre per rotaia RI 60/59, disegno 3006/AT0240, per la resistenza elettrica misurata secondo IEC 864-5 0 4^ edizione del 01/01/1986 dove viene richiesto un valore > 100 MΩ, vengono riscontrati valori da 150.000 a 200.000 MΩ.

IL DIRETTORE GENERALE
(1000) (Maurizio Bernard)

FAX LANZAFAME
 ALESSANDRA/CSA
03 8107102



LUG '02 14:23 CSA CAMPEGINE RE 0522/677501

10776200719

P.1

SOGO S.p.A.		LABORATORIO QUALITA'				
MOD. LAB. 26 rev. 3 del 04/02						
SCHEDA CONTROLLO N° 3		ORDINE N° 8612. A. G. 7004				
CLIENTE: SN OF		LOTTO N° 3 Q.TA' 50.000				
PRODOTTO: 0927-8000						
PARAMETRI	VALORI					MEDIANA
CARICO A ROTTURA ≥ 14 Mpa	15,1	14,5	15,3	15	15,5	15,1
CARICO A ROTTURA A 80 ± 120 %	89,5	82,3	83,9	93,7	94	89,5
ALLUNGAMENTO A ROTTURA ≥ 300 %	350	326	335	342	361	342
ALLUNGAMENTO A ROTTURA B 70 ± 130 %	82,5	83,1	80	78,5	77,9	80
MODULO 100 % 4,5 a 7,5 Mpa	4,9	5,0	5,4	5,3	5,5	5,3
MODULO 100 % C 60 ± 140 %	130	126	119	122	120	122
DUREZZA SHORE A 75 ± 5	76	75	77	78	76	77
DEFORMAZIONE PERMANENTE A COMPRESSIONE < 30%	20	19,2	20,6	20	20	20
DEFORMAZIONE PERMANENTE A TRAZIONE < 20%	17,5	19,3	19	19	19	19
ASPETTO E MARCATURA	OK	OK	OK	OK	OK	OK
SPESORE 4,5 +0,5 mm -0 mm	4,57	4,88	4,92	4,65	4,91	4,59
LARGHEZZA 165 ± 2 mm	165,1	165,4	165,1	165	165,3	165,1
LUNGHEZZA 180 + 6 mm -0 mm	180,9	182	182	181,7	182	181,5
SQUADRATURA ± 1 mm	OK	OK	OK	OK	OK	OK
RESISTENZA ELETTRICA STATO NATURALE > 100 MΩ	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000
RESISTENZA ELETTRICA 48 h IN ACQUA > 100 MΩ	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000
PIGGIA TERMOSALDATA Kg (74) ≥ 51 ≥ 50 ≥ 47 ≥ 44	116	129	120	120	120	120
LABORATORIO QUALITA'					DATA	
COMPIUTO VERRELLI RITA					12/04/02	
VISTO DI MAURIZIO						

Allegato E

SCHEMA TECNICA	
ISOLGOMMA srl sistema di qualità certificato UNI EN ISO 9002 - n° SO 00435 Via dell'Artigianato, Z.I. - 36020 Albettone (VI) ITALY Tel. 0444.790781 Fax 0444.790784 email info@isolgomma.it	 SCH 1.11.07 REV 0 - Data 01/08/01 PAGINA 1 DI 1
SUOLA SOTTOROTAIA	

PRODOTTO

Suola sottorotaia o pelle per la fasciatura delle rotaie, spessori 5 e 10 mm

DESCRIZIONE

Suola di rivestimento in materiale composito, fornita in pannelli o rotoli, dello spessore da 5 a 10mm, a seconda della richiesta, realizzata con granuli di gomma butilica e leganti poliuretani.

I prodotti sono ottenuti per pressatura a caldo con procedure automatizzate, a temperatura e pressione prestabilite.

CAMPO D'IMPIEGO

Rivestimento dielettrico ed antiacustico delle rotaie in ambiente urbano, per la protezione dai rumori e dalle correnti vaganti.

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE

	VALORE
• Spessori di normale produzione:	5 e 10 mm
• Lunghezza:	1000 cm
• Larghezza:	80 - 160 cm
• Densità:	980 ± 30 kg/m ³
• Peso unitario:	da 5 a 10 kg/m ²

CARATTERISTICHE TECNICHE

	NORMA	VALORE
• Resistenza elettrica	DIN 53482/VDE 0303T3	> 8 x 10 ¹¹ Ω/cm
• Coeff. di assorbimento del rumore	UNI EN 20354	α = 1.05
• Rigidezza secante statica:		S 5 M: K _s 0,138 N/mm ³ S 10 M: K _s 0,087 N/mm ³
• Durezza:	NF ISO 868	35 ± 5 shore
• Allungamento a rottura:	NF T 51-034	180 ± 20%
• Resistenza allo strappo:	NF T 51-034	0,65 ± 0,05 MPa

PROPRIETÀ FISICO-CHIMICHE

	NORMA	VALORE
• Resistenza alle temperature:	UNICHIM 87/1970	da - 80° a + 200 °C
• Coefficiente di conducibilità termica:	UNI 4916/74	0,113 W/m°C
• Comportamento al fuoco:	D.M. del 26/06/84	CLASSE B2
• Ottima resistenza agli olii e ai grassi		
• Buona resistenza agli acidi e alle soluzioni		
• Buona resistenza ad H ₂ O ed umidità		
• Chimicamente neutrale.		
• Imputrescibile e non pulverulento.		

MODALITÀ D'USO

I pannelli possono essere posati a secco o incollati accuratamente sulla superficie della rotaia da isolare.

Le giunzioni fra un pannello ed il successivo vengono realizzate per sovrapposizione parziale oppure sigillate con apposito nastro adesivo, a seconda delle applicazioni.

PRECAUZIONI E SICUREZZA

Il pannello non è pericoloso né nocivo, e pertanto non è soggetto agli obblighi fissati dalla direttiva 67/548/CEE. Il composito non contiene sostanze dannose come formaldeide, fluoro carburi, mercurio o similari e allo stato normale non emette fumi tossici.

I suggerimenti e le informazioni tecniche fornite rappresentano le nostre migliori conoscenze riguardo le proprietà e le utilizzazioni del prodotto. I dati esposti sono dati medi indicativi relativi alla produzione attuale e possono essere cambiati ed aggiornati dall'ISOLGOMMA in qualsiasi momento senza alcun preavviso e secondo la propria discrezionalità.

IL DOCUMENTO È DI PROPRIETÀ DELL'ISOLGOMMA. I DIRITTI SONO RISERVATI

SCHEMA TECNICA	
ISOLGOMMA srl sistema di qualità certificato UNI EN ISO 9002 - n° SO 00435 Via dell'Artigianato, Z.I. - 36020 Albettone (VI) ITALY Tel. 0444.790781 Fax 0444.790784 email info@isolgomma.it	 SCH 1.12.07 REV 1 - Data 01/08/01 PAGINA 1 DI 1
SIGILLANTE BMQ	

PRODOTTO

Isolgomma tipo SIGILLANTE BMQ.

DESCRIZIONE

Il SIGILLANTE BMQ è un prodotto a formulazione sintetica che indurisce a temperatura ambiente.

Il legante base è una resina epossipoliuretanica "Legante BM", additivata con speciali catrami ed elastomeri liquidi compatibili. È composta di tre componenti: base, induritore e inerti quarziferi.

Dopo la maturazione (reticolazione chimica) il SIGILLANTE BMQ diventa un materiale compatto, tenace, di ottime proprietà meccaniche, con ottime caratteristiche di impermeabilità, inerzia chimica e ottima adesione ai supporti sia cementizi che ferrosi.

Possiede inoltre notevoli caratteristiche dielettriche.

CAMPO D'IMPIEGO

- Indicato quale materiale ausiliario, di riempimento nella posa in opera di giunti di dilatazione stradali, in viadotti, ponti, armamenti ferroviari.

CARATTERISTICHE TECNICHE

	NORMA	VALORE
• Densità relativa:	UNI 7092	2±0.05 Kg/dm ³
• Adhesion tester:	UNI EN 24624	≥4 Mpa
• Resistenza a flessione:	Dm 03.06.1968	> 16 Mpa
• Resistenza a compressione:	Dm 03.06.1968	> 10 Mpa
• Modulo elastico secante a compressione	UNI 6556	150-200 Mpa
• Gelività (50 cicli gelo disgelo):	RILEM CDC/2	< 0.10 mg/mm ²
• Assorbimento d'acqua:	UNI 7699	<0.05 % peso
• Ritiro lineare:	UNI 6687/73	< 300 μm/m

MODALITÀ D'USO**1.Preparazione del supporto**

È fondamentale per l'adesione ottimale al supporto una idonea preparazione delle superfici da trattare.

In particolare le superfici destinate a supporto devono essere essenti da disarmenti superficiali, grassi, ecc.

2.Miscelazione

Per ottenere i risultati ideali è di fondamentale importanza impiegare le parti secondo rapporti di miscelazione esatti e risultanti dall'impiego di una confezione di parte A e di una di parte B di legante BM con una dose di parte C costituita da una miscela di sabbia di quarzo naturale, essiccata e depolverizzata:

Parte A - Base epossipoliuretanica:	Kg 8
Parte B - Induritore:	Kg 14,5
Parte C - Inerte	Kg 50

Versare il componente A nel barattolo contenente il componente B.

Miscelare con spatola o trapano. Travasare quindi la miscela nell'impastatrice dove già è stata introdotto il componente C. La miscelazione deve essere protratta fino a completa omogeneizzazione.

È assolutamente vietato introdurre nel prodotto solventi e diluenti per modificarne la viscosità.

3.Tempo di lavorabilità

Il tempo d'impiego di una dose miscelata del prodotto è di 20 minuti a temperatura ambiente(20°C)

4. Temperatura di maturazione

Il SIGILLANTE BMQ catalizza già a temperatura ambiente. Un aumento della temperatura accelera la maturazione.

La temperatura minima di applicazione è di 5°C; a tale temperatura la reattività del prodotto diminuisce notevolmente.

5.Applicazione

Gli attrezzi idonei per una applicazione ottimale sono quelli tradizionalmente usati per la stesa di malte cementizie.

La buona compattazione è essenziale per l'ottenimento delle caratteristiche chimico-fisiche desiderate.

Il lavaggio degli attrezzi va eseguito con un comune solvente a base di xilene o acetato di etile o una miscelazione degli stessi. Per la pulizia di una eventuale betoniera da cantiere, si consiglia di aggiungere della sabbia comune al solvente e azionare la betoniera stessa per facilitare la rimozione di eventuali residui del prodotto. Si consiglia di non eseguire l'applicazione a temperature inferiori a + 5°C.

6.Stoccaggio

Il tempo di stoccaggio del SIGILLANTE BMQ nelle confezioni separate è di circa un anno se tenuto in luogo asciutto e coperto.

PRECAUZIONI E SICUREZZA

Vedi scheda di sicurezza del prodotto.

Le informazioni contenute in questo documento si riferiscono ai due componenti "LEGANTE BM comp. A" e "LEGANTE BM comp. B" miscelati tra loro. Ogni indicazione relativa supplementi dati sono senza garanzia, non essendo le condizioni di impiego sotto il nostro diretto controllo. In caso di incertezze è sempre consigliabile fare delle prove preliminari.

IL DOCUMENTO È DI PROPRIETÀ DELL'ISOLGOMMA. I DIRITTI SONO RISERVATI