



AUTOSTRADA REGIONALE CISPADANA DAL CASELLO DI REGGIOLO-ROLO SULLA A22 AL CASELLO DI FERRARA SUD SULLA A13

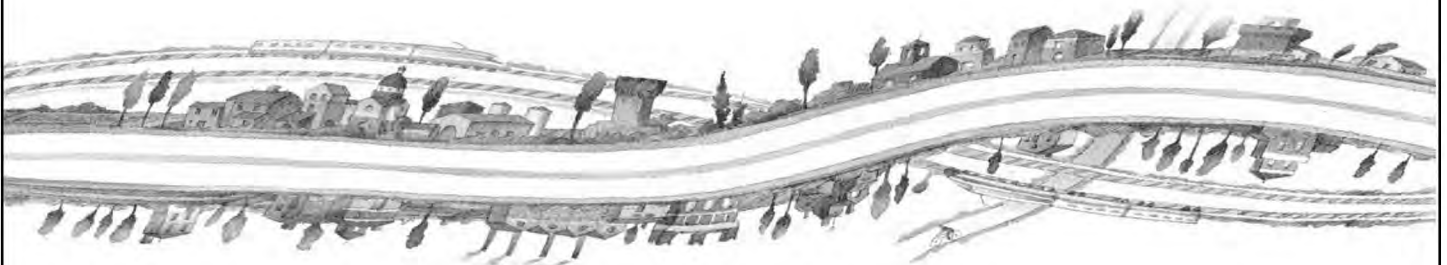
CODICE C.U.P. E81B08000060009

PROGETTO DEFINITIVO

AUTOSTRADA REGIONALE CISPADANA - PARTE GENERALE

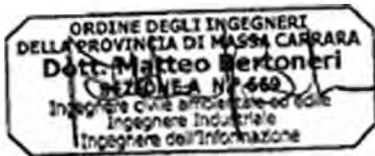
INDAGINI VIBRAZIONI

RELAZIONE TECNICA DESCRITTIVA



IL PROGETTISTA

Ing. Matteo Bertoneri
Albo Ing. Massa Carrara n°669



RESPONSABILE INTEGRAZIONE
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

Ing. Emilio Salsi
Albo Ing. Reggio Emilia n° 945



IL CONCESSIONARIO

Autostrada Regionale
Cispadana S.p.A.
IL PRESIDENTE
Graziano Pettuzzi

G										
F										
E										
D										
C										
B										
A	17/04/2012	Emissione				Angeloni	Bertoneri	Salsi		
REV.	DATA	DESCRIZIONE				REDAZIONE	CONTROLLO	APPROVAZIONE		
IDENTIFICAZIONE ELABORATO										DATA: Maggio 2012
NUM. PROGR.	FASE	LOTTO	GRUPPO	CODICE OPERA WBS	TRATTO OPERA	AMBITO	TIPO ELABORATO	PROGRESSIVO	REV.	SCALA:
0075	PD	0	X00	X0000	0	AC	RG	02	A	-

INDICE

1.	PREMESSA	2
1.3.	VIBRAZIONI	2
2.	INQUADRAMENTO LEGISLATIVO	3
2.1.	VIBRAZIONI	3
2.1.1.	MISURA DELLE VIBRAZIONI: DESCRITTORI FISICI.....	4
2.1.2.	ANALISI TECNICA DEI LIMITI DI ACCETTABILITÀ DELLE VIBRAZIONI SULLA BASE DELLE NORME UNI VIGENTI.....	5
3.	ACQUISIZIONE DATI	11
3.1.	SOPRALLUOGO IN CAMPO - VIBRAZIONI	11
3.2.	CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE DELLO STATO DI FATTO.....	13
3.2.1.	CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE DEGLI EDIFICI ADIACENTI LE INFRASTRUTTURE FERROVIARIE INTERNE ALLA FASCIA DI PERTINENZA DELL'AUTOSTRADA DI PROGETTO – SPECIFICHE TECNICHE.....	13
3.2.2.	CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE DEGLI EDIFICI ADIACENTI LE INFRASTRUTTURE STRADALI INTERNE ALLA FASCIA DI PERTINENZA DELL'AUTOSTRADA DI PROGETTO – SPECIFICHE TECNICHE.....	13
3.2.3.	CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE DEGLI EDIFICI ADIACENTI IL TRACCIATO AUTOSTRADALE DI PROGETTO – SPECIFICHE TECNICHE	14
3.2.4.	CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE DELLA PROPAGAZIONE NEL TERRENO SPECIFICHE TECNICHE.....	14
4.	STRUMENTAZIONE DI MISURA.....	15
4.1.	Vibrometro	15
5.	RISULTATI MONITORAGGIO VIBROMETRICO.....	16
5.1.	VIBRAZIONI	17

1. PREMESSA

Il presente documento ha lo scopo di illustrare le metodologie di analisi ed i risultati per la caratterizzazione vibrazionale dell'Autostrada regionale Cispadana allo stato attuale.

In una prima parte del documento si riportano in modo sintetico le attività svolte e nei capitoli successivi si entrerà nel dettaglio per ognuna delle attività summenzionate. Al termine dello studio si riportano i risultati delle misurazioni effettuate.

Si consideri che i rilievi conetnuti nella presente relazione costituiranno elemento propedeutico per la redazione del Progetto Definitivo e dello Studio di impatto Ambientale (SIA).

1.3. VIBRAZIONI

Dopo una prima fase di sopralluogo in campo e ricerca dati pregressi si è proceduto alla caratterizzazione dello stato vibrazionale andando ad analizzare diverse configurazioni:

- edifici adiacenti le infrastrutture ferroviarie interne alla fascia di pertinenza dell'autostrada di progetto;
- edifici adiacenti le infrastrutture stradali interne alla fascia di pertinenza dell'autostrada di progetto;
- edifici adiacenti il tracciato autostradale di progetto;
- propagazione nel terreno.

In tema di vibrazioni si faccia riferimento ai capitoli seguenti.

2. INQUADRAMENTO LEGISLATIVO

2.1. VIBRAZIONI

Allo stato attuale in Italia le uniche disposizioni di legge vigenti nel settore delle vibrazioni sono quelle che disciplinano l'esposizione professionale dei lavoratori alle vibrazioni "corpo intero" o "mano-braccio", che sono normate dal DECRETO LEGISLATIVO 19 agosto 2005, n.187. Esso tuttavia non ha alcuna attinenza con il caso qui in esame, ove siamo in presenza di fenomeni vibratorii che si propagano nel terreno e che possono indurre, da un lato, disturbo alle persone residenti in edifici posti a breve distanza dalla infrastruttura autostradale, e dall'altro potrebbero potenzialmente far insorgere danni strutturali in strutture edilizie "delicate" o in cattivo stato di conservazione. Tali problematiche non sono al momento normate per legge in Italia, il cui quadro legislativo fornisce, a generica tutela del proprietario di un fondo, unicamente l'art 844 del Codice Civile, che qui si riporta integralmente: *Art. 844 - Immissioni - Il proprietario di un fondo non può impedire le immissioni di fumo o di calore, le esalazioni, i rumori, gli scuotimenti e simili propagazioni derivanti dal fondo del vicino, se non superano la normale tollerabilità, avuto anche riguardo alla condizione dei luoghi. Nell'applicare questa norma l'autorità giudiziaria deve contemperare le esigenze della produzione con le ragioni della proprietà. Può tener conto della priorità di un determinato uso.*

A livello giurisprudenziale, si è affermata la prassi di valutare la "normale tollerabilità" dei fenomeni vibratorii facendo ricorso alle raccomandazioni contenute in alcune norme tecniche, in particolare alle tre seguenti norme UNI:

- Norma UNI 9916 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici", Novembre 1991.
- Norma UNI 9614 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo", Marzo 1990.
- Norma UNI 11048 "Metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo", Marzo 2003

La prima norma definisce i possibili modi di misurare e valutare le vibrazioni al fine della valutazione del rischio di danni strutturali: si tratta di fenomeni vibratorii molto intensi, che possono instaurarsi solo a seguito dell'azione di speciali macchine da cantiere progettate in modo da far vibrare volutamente i manufatti.

Tra queste assumono particolare rilevanza i rulli compattatori vibranti, le macchine per la infissione di pali di fondazione mediante battitura, ed i sistemi di infissione delle palancole mediante vibratore idraulico. I livelli di vibrazioni a cui, secondo la norma UNI 9916, comincia a verificarsi un minimo rischio di piccole lesioni (cavillatura di intonaci, etc.) sono indicati, per edifici particolarmente delicati, al di sopra dei 2- 5 mm/s di velocità di vibrazioni. Tali livelli non sono raggiungibili né di normale traffico veicolare su una grande infrastruttura di trasporto, né dalle attività di cantierizzazione "normali", e restano possibili solo quando entrano in azione le macchine dotate di vibratorii sopra esemplificate.

La seconda e la terza norma, che allo stato attuale costituiscono nei fatti un unico dispositivo normativo integrato, valutano invece la percezione umana del fenomeno vibratorio e la "soglia di disturbo" in ambiente residenziale, e risultano pertanto particolarmente pertinenti al caso qui studiato, per cui vengono nel seguito più ampiamente descritte.

Va qui comunque subito messo in evidenza come i valori di soglia previsti da tali normative siano ordini di grandezza inferiori alla soglia di danno strutturale, e siano potenzialmente raggiungibili anche dal normale traffico veicolare o dalle

normali attività di cantiere, per cui è necessario operare adeguate verifiche strumentali e previsionali, onde garantire che tali limiti di soglia non vengano superati.

2.1.1. MISURA DELLE VIBRAZIONI: DESCRITTORI FISICI

Prima di presentare i valori limite suggeriti dalla diverse normative, è necessario introdurre le grandezze fisiche usate al fine di quantificare gli effetti vibratorii sull'uomo e sulle strutture edili. Per fenomeni vibratorii si intendono 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 (ponderata) per valutare la percezione umana. Per la misurazione, si utilizzano normalmente accelerometri, che ovviamente forniscono il livello di accelerazione, o "geofoni", che forniscono un segnale proporzionale alla velocità. È 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. Si deve osservare però che la corrispondenza dei due livelli si verifica solo a questa particolare frequenza (che difatti 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. Nel seguito verrà anche mostrato come l'uso del filtro di ponderazione impiegato per valutare gli effetti sull'uomo dei fenomeni vibratorii porti a valori in dB di accelerazione ponderata ancora diversi dai "semplici" livelli di accelerazione e di velocità, sebbene sia possibile passare dall'uno all'altro con semplici operazioni matematiche. Proseguendo nell'esempio suddetto (livello di accelerazione di 100 dB a 40 Hz), si scopre che il livello di accelerazione ponderata è significativamente inferiore, risulta infatti pari a 83 dB. Occorre dunque prestare molta attenzione allorché si esprime l'entità di un fenomeno vibratorio nella scala dei dB, occorre sempre esplicitare se si tratta di un valore in dB di velocità, di accelerazione, oppure di accelerazione ponderata.

2.1.2. ANALISI TECNICA DEI LIMITI DI ACCETTABILITÀ DELLE VIBRAZIONI SULLA BASE DELLE NORME UNI VIGENTI

Si prende qui primariamente in esame il problema della percezione umana delle vibrazioni. Infatti, i limiti di danno strutturale lieve sono indicati negli allegati della norma UNI 9916, e risultano più elevati di circa 20 dB dei limiti di percezione individuati dalla norma UNI 9614

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:

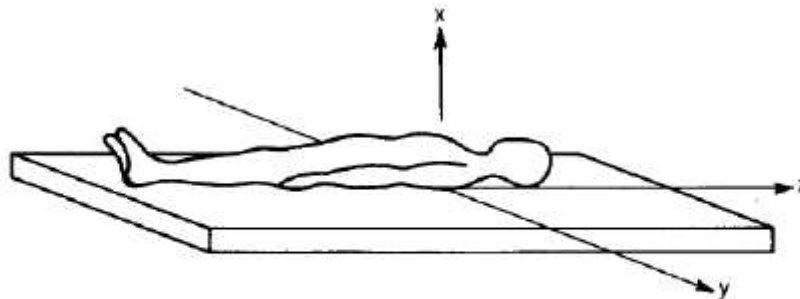


FIG. 4.1 – SISTEMA CARTESIANO DI RIFERIMENTO PER PERSONA CORICATA

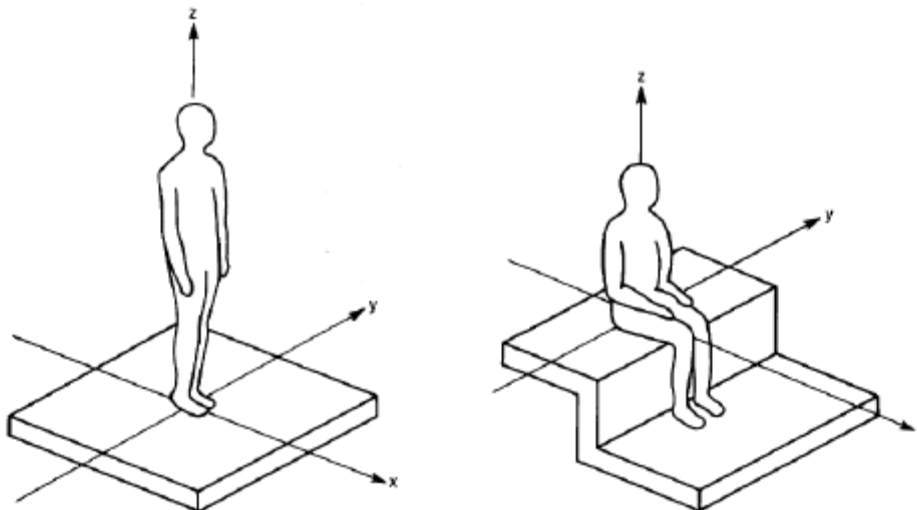


FIG. 4.2 – SISTEMA CARTESIANO DI RIFERIMENTO PER PERSONA IN PIEDI O SEDUTA

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.

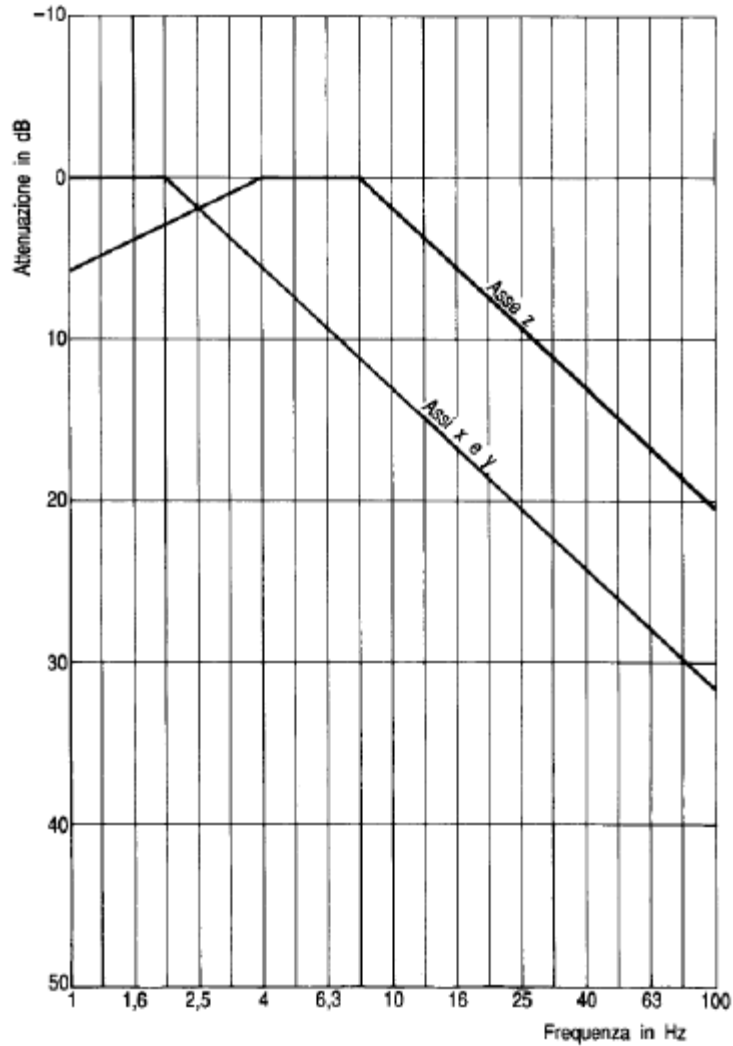


FIG. 4.3 – CURVA DI PONDERAZIONE ASSI X, Y E ASSE Z

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.

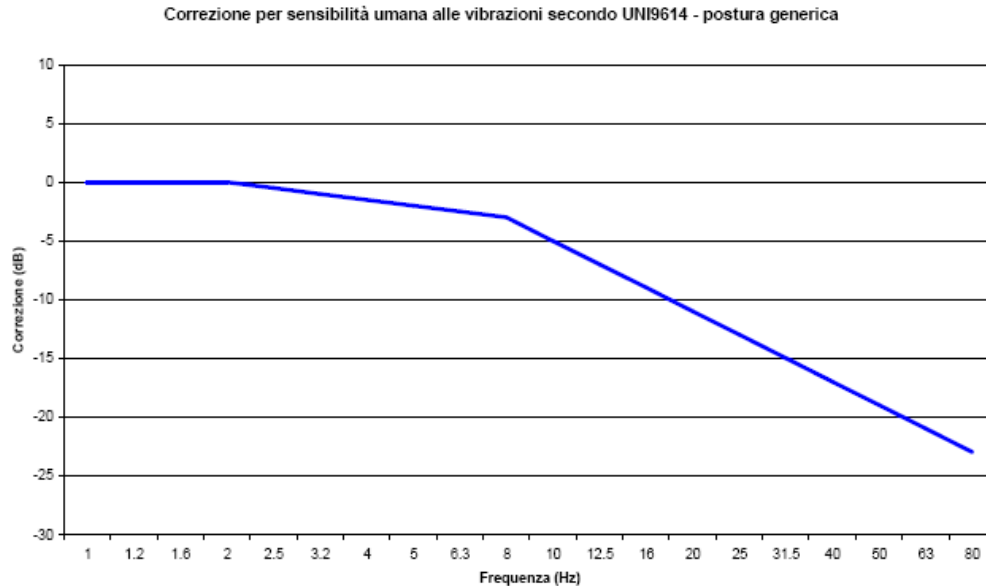


FIG. 4.4 – CURVA DI PONDERAZIONE ASSE GENERICO

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 traffico stradale a velocità autostradali 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. Si è pertanto adottato come limite di accettabilità il valore notturno di 74 dB, ad eccezione degli edifici "particolarmente sensibili" per i quali si adotta come limite (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, 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 almeno 10 o 12).

La valutazione del disturbo sulle persone è anche oggetto di una nuova norma UNI, la 11048 del marzo 2003. In base a tale norma, per valutare l'impatto vibrazionale di una infrastruttura come quella 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, senza combinare fra loro i valori misurati lungo i tre assi. 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 per essere precisi il suo valore **di picco**. È 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 dei veicoli stradali è caratterizzato da una forte emissione di energia solo a frequenze superiori ai 10 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.

Sia i livelli di accelerazione, sia quelli di velocità, possono essere espressi in dB, facendo riferimento ad opportuni valori di riferimento a_0 e v_0 , che sono pari rispettivamente a:

$$a_0 = 0.001 \text{ mm/s}^2 \text{ e } v_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ mm/s}$$

Definiti i valori di riferimento, i livelli in dB sono definiti come:

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

Tenuto conto della differenza fra i valori di riferimento, e della curva di ponderazione "per asse generico" della accelerazione, si verifica che il livello di velocità può essere ottenuto dal livello di accelerazione ponderata raggiungendovi un termine costante (a qualsiasi frequenza maggiore o uguale di 8 Hz) e pari a +29 dB.

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 picco di 3 mm/s; si ottiene dunque:

$$L_{a,w,lim} = L_{v,lim} - 29 = 20 \cdot \lg \left[\frac{3}{1 \cdot 10^{-6}} \right] - 29 \cong 129 - 29 = 100 \text{ dB}$$

Tale valore è decisamente più elevato dei livelli di accelerazione ponderata che è usuale riscontrare a seguito del traffico stradale, che può in alcuni casi arrivare o superare di qualche dB i limiti di disturbo (74 dB nel periodo notturno per edifici residenziali), ma rimane sempre perlomeno 20 dB inferiore rispetto al suddetto limite di danno strutturale.

Si osserva comunque che il limite per danno strutturale è pari a $L_{a,w,lim} = 100$ dB DI PICCO, mentre il limite di disturbo (pari a 74 dB notturni) si riferisce ad un livello RMS con costante di tempo Slow. Per una stessa registrazione di un evento vibrazionale (quale il transito di un veicolo) è normale osservare valori di picco anche 10-12 dB superiori del valore RMS. Nonostante questa precisazione, si osserva che è sempre vero che se un livello vibrazionale non induce disturbo alle persone, allora sicuramente non è nemmeno lesivo per le strutture.

Qualche problema di rispetto del limite suddetto (100 dB di picco) 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 "Trelicon" 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 potendo facilmente superare i limiti di disturbo alle persone, allorché si fa impiego di macchine movimento terra o similari.

Si riporta qui integralmente la tabella finale dell'allegato B della norma UNI 9916:

Prospetto IV — Velocità ammissibili

Categoria	Tipi di strutture	Velocità di vibrazione in mm/s*			
		Misura alla fondazione			Misura al pavimento dell'ultimo piano
		Campi di frequenza (Hz)			Frequenze diverse
< 10	10-50	50-100**			
1	Edifici utilizzati per scopi commerciali, edifici industriali e simili	20	20-40	40-50	40
2	Edifici residenziali e simili	5	5-15	15-20	15
3	Strutture particolarmente sensibili alle vibrazioni, non rientranti nelle categorie precedenti e di grande valore intrinseco	3	3- 8	8-10	8

* Si intende la massima delle tre componenti della velocità nel punto di misura.
** Per frequenze maggiori di 100 Hz possono applicarsi i valori riportati in questa colonna.

In essa il valore limite di velocità, per edifici sensibili e di grande valore intrinseco, viene fatto crescere progressivamente con la frequenza, partendo da 3 mm/s sino a 10Hz, per poi arrivare progressivamente a 10 mm/s a 100 Hz.

Ai fini pratici, comunque, i livelli di velocità di vibrazione ammissibili restano sostanzialmente quelli sopravvalutati, e si verifica a tutte le frequenze che il limite di disturbo per le persone è sistematicamente più restrittivo del limite di danno strutturale.

3. ACQUISIZIONE DATI

3.1. SOPRALLUOGO IN CAMPO - VIBRAZIONI

Nel corso della ricognizione sul campo finalizzata alla realizzazione del censimento ricettori, saranno effettuate valutazioni specifiche riguardanti la potenziale suscettibilità al problema vibrazionale di ciascun ricettore individuato. In particolare:

- La presenza di fonti di vibrazioni rilevanti è stata valutata molto semplicemente sulla base della presenza o assenza di sensazione di vibrazione attraverso la pianta dei piedi: infatti, la soglia umana di percezione corrisponde ad un livello di accelerazione ponderata "per asse generico" pari a 71 dB, valore significativamente inferiore sia al limite di disturbo per le persone, sia al limite di danno strutturale. Se pertanto presso un ricettore non si è rilevato durante il sopralluogo alcuna percezione umana di vibrazione del terreno, si sono esclusi effetti disturbanti o pericolosi per le strutture. Se viceversa sono state percepite delle vibrazioni, allora il ricettore si identificherà come "già soggetto a vibrazioni".
- La possibilità che il ricettore possa successivamente risultare impattato dalle vibrazioni prodotte durante la fase di cantiere o di esercizio verrà valutata semplicemente sulla base della distanza fra la parete più esposta dell'edificio-ricettore e la fonte di vibrazioni: se tale distanza risulta inferiore a 60m, allora si è proceduto al rilevamento.

Di seguito si indicano le postazioni individuate per il monitoraggio di vibrazioni:

CODICE POSTAZIONE DI MISURA	LUOGO E SORGENTE MONITORATA
VIB1	Strada Fantozza – Reggilo (RE)
VIB2	Via Tre Ponti presso incrocio Via per Novi (SP8) – Concordia (MO)
VIB3	Via Posta Vecchia – Mirandola (MO)
VIB4	Via Imperiale – San Felice sul Panaro (MO)
VIB5	Località Marchetta , Via Salde Entrà - Finale Emilia (MO)
VIB6	Via per Cento - Finale Emilia (MO)
VIB7	Località Ponte Alto, Via dei Pioppeti – Sant’Agostino (FE)
VIB8	Località San Carlo, Corso Italia (SP66) – Mirabello (FE)
VIB9	Via Padusa in prossimità di Strada Cispadana – Poggio Renatico (FE)
VIB10	Località Villarotta, Via Lanzoni– Luzzara (RE)
VIB11	10 metri dal resede stradale di Via Bologna (SS64) - Località Uccellino (Ferrara)
VIB12	20 metri dal resede stradale di Via Bologna (SS64) - Località Uccellino (Ferrara)
VIB13	40 metri dal resede stradale di Via Bologna (SS64) - Località Uccellino (Ferrara)
VIB14	70 metri dal resede stradale di Via Bologna (SS64) - Località Uccellino (Ferrara)
VIB15	100 metri dal resede stradale di Via Bologna (SS64) - Località Uccellino (Ferrara)
VIB16	10 metri dal resede stradale di Via Moglia (SP43) - Località Reggiolo
VIB17	20 metri dal resede stradale di Via Moglia (SP43) - Località Reggiolo
VIB18	40 metri dal resede stradale di Via Moglia (SP43) - Località Reggiolo
VIB19	70 metri dal resede stradale di Via Moglia (SP43) - Località Reggiolo
VIB20	100 metri dal resede stradale di Via Moglia (SP43) - Località Reggiolo Si evidenzia il passaggio di alcuni trattori agricoli in prossimità dello strumento di misura
VIB21	Linea ferroviaria - Località San Felice sul Panaro (MO), presso via Suozzi
VIB22	Linea Ferroviaria - Località Rolo (RE) presso via Ponte Nuovo
VIB23	Linea ferroviaria - Località Poggio Renatico (FE) presso strada Cispadana

Tabella 1 – Ubicazioni postazioni di misura vibrazioni

3.2. CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE DELLO STATO DI FATTO

3.2.1. CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE DEGLI EDIFICI ADIACENTI LE INFRASTRUTTURE FERROVIARIE INTERNE ALLA FASCIA DI PERTINENZA DELL'AUTOSTRADA DI PROGETTO – SPECIFICHE TECNICHE

Il rilievo dei livelli vibrazionali dello stato di fatto prodotto dalle infrastrutture ferroviarie è stato condotto nel rispetto delle vigenti norme tecniche. In particolare, non avendo avuto a disposizione per accedere agli spazi pertinenti le proprietà private è stato necessario posizionare la terna accelerometrica su una parte della struttura solidale all'edificio più prossimo alla fonte vibrazionale, ed in una parte strutturale particolarmente sensibile ai moti causati dalle vibrazioni (ad es. al centro di un solaio del piano terra o del primo piano).

Nel corso del rilievo si è avuto cura di acquisire il profilo di passaggio di alcuni convogli ferroviari, considerando che il convoglio critico è solitamente costituito da treni merci con elevato carico per asse. Risultano viceversa solitamente irrilevanti gli impatti dei treni passeggeri veloci, in particolare dei treni AV, che hanno sospensioni e freni molto sofisticati, cosa che porta a livelli vibrazionali inferiori anche di 20 dB rispetto a quelli di un treno merci con freni a ceppi.

La strumentazione impiegata è in grado di registrare simultaneamente i tre segnali sui tre assi, campionando gli stessi con adeguata frequenza di campionamento (tipicamente almeno 500 – 1000 Hz) e salvando i segnali in formato digitale di tipo "aperto", quali files WAV, TXT o XLS, ed evitando in ogni caso l'uso di formati binari proprietari, che risultano non leggibili da software di tipo "general purpose".

La successiva analisi di tali forme d'onda, utilizzando appositi strumenti software, consente poi di valutare entrambe le quantità necessarie a definire il potenziale impatto sulle persone o sugli edifici, senza necessità di operare due distinte campagne di misurazione con diverse impostazioni dello strumento di misura.

3.2.2. CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE DEGLI EDIFICI ADIACENTI LE INFRASTRUTTURE STRADALI INTERNE ALLA FASCIA DI PERTINENZA DELL'AUTOSTRADA DI PROGETTO – SPECIFICHE TECNICHE

La metodica di misurazione del livello vibrazionale dello stato di fatto presso ricettori posti a breve distanza da primarie infrastrutture stradali (autostrade, strade statali molto trafficate da mezzi pesanti) non differisce significativamente da quella descritta al precedente sottocapitolo.

La differenza sostanziale consiste nel fatto che, mentre le infrastrutture ferroviarie si registrano i singoli eventi costituiti dal transito di un treno, in questo caso si tratta eseguire una registrazione continua, della durata di alcuni minuti, in modo da comprendere il passaggio di alcuni mezzi pesanti.

Per tali tratte si è proceduto con la rilevazione dei livelli di accelerazione al suolo in superficie a 3 m dall'asse della carreggiata esterna in corrispondenza di un tratto rettilineo al passaggio di un automezzo; oltre alla rilevazione della velocità di percorrenza del mezzo. Ciascuna campagna prevederà il campionamento di almeno dieci autoveicoli, dieci furgoni e quindici autocarri. Da ciascun evento sarà calcolato il valore di SEVL0 (Livello di vibrazione associato al singolo evento alla distanza di riferimento) ottenendo alla fine i tre valori medi per ciascuna tipologia di veicoli.

3.2.3. CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE DEGLI EDIFICI ADIACENTI IL TRACCIATO AUTOSTRADALE DI PROGETTO – SPECIFICHE TECNICHE

La caratterizzazione dello stato vibrazionale attuale è avvenuto anche in corrispondenza degli edifici presenti lungo il tracciato di progetto.

Le modalità di rilievo sono state sostanzialmente identiche a quelle previste per la caratterizzazione dello stato di fatto presso gli edifici prospicienti la viabilità già in essere, risultando solitamente sufficiente una acquisizione di qualche minuto.

Poichè i valori rilevati sono risultati inferiori alla soglia di percezione (livello di accelerazione ponderata per asse generico inferiore a 71 dB), tali ricettori non sono più soggetti ad ulteriori accertamenti vibrometrici.

Se viceversa tale valore di soglia dovesse venire superato, allora si prevederà una periodica riverifica dei livelli vibrazionali presso il ricettore in esame.

Se l'edificio dovesse presentare delle lesioni delle lesioni, si avrà cura di confrontare le stesse con quelle rilevate durante il censimento ricettori, eventualmente utilizzando gli indicatori di spostamento dei lembi delle crepe installati in tale occasione, al fine di quantificare l'eventuale peggiorare delle stesse.

3.2.4. CARATTERIZZAZIONE VIBRAZIONALE DELLA PROPAGAZIONE NEL TERRENO SPECIFICHE TECNICHE

Prima dell'avvio dei lavori di costruzione verrà effettuata, in due siti prossimi alle due estremità della tratta autostradale, una rilevazione vibrometrica finalizzata a verificare la legge di attenuazione del fenomeno vibratorio con la distanza.

A tal fine, la terna accelerometrica è stata posizionata successivamente a distanza via via crescente, da 10 a 100 m, da una primaria infrastruttura di trasporto già esistente, e percorsa da un significativo e continuo flusso di mezzi pesanti.

Ciascuna postazione di rilevamento ha richiesto un tempo di misurazione adeguato, in modo da garantire un valore stabile, indipendente dal particolare segmento temporale analizzato. In questo modo, i livelli misurati via via a distanze crescenti rimangono fra loro confrontabili, e diventa possibile interpolare la legge di propagazione.

A tal fine è risultato particolarmente utile effettuare, in ciascuna posizione, una analisi spettrale in bande di 1/3 d'ottava, in quanto si è osservato che la legge di propagazione varia fortemente con la frequenza. E' stato pertanto necessario eseguire questa sperimentazione utilizzando un analizzatore di spettro multicanale.

4. STRUMENTAZIONE DI MISURA

4.1. VIBROMETRO

La strumentazione impiegata per le misure di vibrazioni è stata composta da:

- accelerometri e relativi cavi di connessione alla scheda di acquisizione;
- cubo in alluminio per misure triassiali;
- sistema di acquisizione;
- software per post-elaborazione delle misure;
- computer portatile.

La strumentazione risponde ai requisiti richiesti dalle norme: ISO 8041 e UNI ENV 28041. Queste norme hanno infatti lo scopo di unificare le strumentazioni di misura di vibrazioni per la valutazione del disturbo agli individui in modo che i risultati ottenuti con diverse strumentazioni siano riproducibili e compatibili tra di loro.

In particolare la linea di misura è costituita da un trasduttore accelerometrico accoppiato ad uno strumento di misura dotato del filtro di ponderazione oppure da un accelerometro e un analizzatore di frequenza in tempo reale a bande di terzo di ottava. Le caratteristiche dell'accelerometro sono state tali da consentire il rilievo delle vibrazioni ambientali; in particolare il sensore sarà dotato di una risposta piatta nel campo di frequenza da 0 ad 80 Hz.

L'analizzatore di vibrazioni utilizzato è lo SVAN 948, completamente digitale, a 4 canali, in classe 1. Di seguito si riportano le caratteristiche salienti dello strumento:

- soddisfacimento della norma IEC 651, IEC 804 and IEC 61672-1;
- misura simultaneamente ISO 8041RMS, Peak, Max, Min, MTVV, VDV, Time History;
- range intensità vibrazioni compresa tra 0.003 m/s-2 e 1000 m/s-2 (r.m.s.);
- range frequenza misura vibrazioni compresa tra 0.5 Hz e 20 kHz;
- filtri pesatura implementati Vibrazioni: W-Bxy, W-Bz, W-Bc, H-A, Wk, Wc, Wd, Wj (ISO 8041, ISO5349 e ISO2631-1);
- Digital True RMS & RMQ con rilevazione del Peak, risoluzione 0.1 dB, tempo di integrazione programmabile fino a 24 ore con costanti di tempo da 100 ms a 10 s nel modo Vibrometro;
- memoria 32 MB non-volatile (flash type).

L'accelerometro triassiale impiegato è un DYTRAN 3233A con sensibilità pari a 1000 mV/g.

5. RISULTATI MONITORAGGIO VIBROMETRICO

Nei paragrafi successivi si procede la riepilogo dei livelli vibrazione acquisiti ed al confronto con i limiti .

5.1. VIBRAZIONI

	dB W_m (asse x)	mm/s ² W_m (asse y)	mm/s ² W_m (asse z)	limite asse x	limite asse y	limite asse z	
VIB1	52,7	57,1	57,8	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB2	56,1	57,9	57,7	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB3	56,1	72,6	65,8	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB4	53,6	58,6	68,8	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB5	59,9	63,8	65,5	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB6	57,2	64,2	59,8	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB7	54,3	52,5	52,2	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB8	68,8	71,1	71,2	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB9	60,5	60,0	68,2	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB10	49,7	49,7	55,2	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB11	50,1	52,8	56,6	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB12	54,4	53,4	57,5	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB13	52,5	52,0	56,3	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB14	47,1	48,2	53,7	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB15	45,3	47,0	57,3	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB16	57,5	56,3	70,6	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB17	56,2	59,0	69,7	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB18	50,4	52,4	59,4	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB19	49,0	49,3	57,3	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB20	55,6	58,1	70,3	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB21	62,9	62,5	76,9	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB22	66,5	70,3	79,1	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti
VIB23	55,8	57,4	63,4	77,0	77,0	80,0	Entro i limiti

Tabella 2 – Livelli di vibrazione rilevati (espressi in dB)

	dB W_m (asse x)	mm/s ² W_m (asse y)	mm/s ² W_m (asse z)	limite asse x	limite asse y	limite asse z	
VIB1	4,32E-04	7,16E-04	7,76E-04	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB2	6,38E-04	7,85E-04	7,67E-04	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB3	6,38E-04	4,27E-03	1,95E-03	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB4	4,79E-04	8,51E-04	2,75E-03	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB5	9,89E-04	1,55E-03	1,88E-03	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB6	7,24E-04	1,62E-03	9,77E-04	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB7	5,19E-04	4,22E-04	4,07E-04	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB8	2,75E-03	3,59E-03	3,63E-03	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB9	1,06E-03	1,00E-03	2,57E-03	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB10	3,05E-04	3,05E-04	5,75E-04	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB11	3,20E-04	4,37E-04	6,76E-04	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB12	5,25E-04	4,68E-04	7,50E-04	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB13	4,22E-04	3,98E-04	6,53E-04	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB14	2,26E-04	2,57E-04	4,84E-04	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB15	1,84E-04	2,24E-04	7,33E-04	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB16	7,50E-04	6,53E-04	3,39E-03	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB17	6,46E-04	8,91E-04	3,05E-03	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB18	3,31E-04	4,17E-04	9,33E-04	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB19	2,82E-04	2,92E-04	7,33E-04	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB20	6,03E-04	8,04E-04	3,27E-03	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB21	1,40E-03	1,33E-03	7,00E-03	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB22	2,11E-03	3,27E-03	9,02E-03	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti
VIB23	6,17E-04	7,41E-04	1,48E-03	7,2E-03	7,2E-03	1,0E-02	Entro i limiti

Tabella 3 – Livelli di vibrazione rilevati (espressi in mm/s²)