

18. COMPONENTE INQUINAMENTO VIBRAZIONALE

Il fenomeno della percezione delle vibrazioni meccaniche, risulta in generale tanto trascurato dal legislatore nazionale e locale, quanto avvertito dalla popolazione come una delle cause di maggiore disturbo delle occupazioni, non in secondo piano all'inquinamento acustico ed atmosferico; frequentemente, nell'ambito della redazione dei piani di classificazione acustica e piani urbani della mobilità, gli scriventi hanno dovuto registrare lamentele da parte della popolazione di alcuni comuni che in ambito urbano e principalmente in faccia alle principali direttrici del traffico di interconnessione tra comuni e locale, sono sottoposti a regimi vibrazionali provocati soprattutto dal traffico pesante, che deteriorano pesantemente la loro qualità della vita in ambiente domestico.

19. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Dal punto di vista normativo la legislazione risulta carente, in quanto nel nostro paese, l'ordinamento giuridico non prevede norme specifiche che fissano gli stati limite di assunzione di onde vibrazionali da parte dell'uomo e degli edifici; nei casi di potenziale disturbo della proprietà, delle occupazioni a qualsiasi uso adibite ed alle persone, ci si deve riferire all'art. 844 del codice Civile ed art. 659 del Codice Penale riguardanti le immissioni; questi fissano il concetto di "*superamento della normale tollerabilità*" come discriminante dell'esistenza del disturbo.

Escludendo il recente D.Lgs. n.187 del 19 agosto 2005 riguardante l'esposizione alle vibrazioni durante il lavoro, le uniche norme di carattere specifico a cui far riferimento sono pertanto tecniche ISO ed UNI (Ente Italiano di Unificazione) ovvero DIN, e riguardano la strumentazione di misura, la metodologia di indagine, nonché dei valori limite scaturiti da prove tecniche e criteri di valutazione dei livelli vibrazionali a partire dagli effetti provocati da queste sulle strutture edilizie.

Per gli scopi di cui alla presente valutazione, oltre a tali norme tecniche, sono stati presi in considerazione alcuni testi scientifici assolutamente importanti in materia di geotecnica e di propagazione delle vibrazioni, che di seguito si elencano:

- R.D. 16 marzo 1942 n.1942. Approvazione del testo del Codice Civile (Ed. Straord. Della G.U. n. 79 del 4 aprile 1942). – Art. 844 Immissioni.
- R.D. 19 ottobre 1930 n. 1398 Approvazione del testo definitivo del Codice Penale (Supp. Ord. Alla G.U. n.251 del 26 ottobre 1930) - Art. 659. Disturbo delle occupazioni o del riposo delle persone.
- UNI 9614 – marzo 1990 – “ Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo.

- UNI 9916 – novembre 1991 - “Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici”.
- UNI 11048:2003 “Vibrazioni meccaniche ed urti - Metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo”
- UNI ISO 2017 – marzo 1992 – “Vibrazioni ed urti – Elementi isolanti – procedura per specificare le caratteristiche.
- ISO 2631 parte 1 e 2 – “Valutazione dell’esposizione degli individui alle vibrazioni globali del corpo”
- UNI 9670 – “Risposta degli individui alle vibrazioni”
- DIN 4150 e BS 7385
- Quaderni ISPESL – “Vibrazioni meccaniche nei luoghi di lavoro: stato della normativa”
- Quaderni ISPESL – “Linee guida per la valutazione del rischio da vibrazioni in ambiente di lavoro”
- Direttiva 2002/44/Cedel Parlamento Europeo e del Consiglio del 25 giugno 2002 sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all’esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (vibrazioni).
- D.Lgs. n.187 del 19 agosto 2005 attuazione della direttiva 2002/44/CE sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all’esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti da vibrazioni meccaniche.
- Terzaghi Peck – “Geotecnica” – UTET ed. 1987.
- Cestelli Guidi – “Geotecnica e tecnica delle fondazioni” – Hoepli ed.1975

Di queste, risultano fondamentali, le norme UNI 9614 ed UNI 9916.

UNI 9614 - *Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo*

La norma definisce il metodo di misura delle vibrazioni di livello costante, non costante od impulsive, gli assi di misura, i tipi di locali e di edifici, i periodi diurno e notturno, la soglia di percezione delle vibrazioni, nonché i metodi di acquisizione, di elaborazione e di presentazione dei dati.

In merito al campo di applicazione, *”Questa norma non costituisce inoltre una guida per la valutazione delle vibrazioni che, a bordo di veicoli, navi, aerei e all’interno di installazioni industriali, possono pregiudicare il comfort, l’efficienza lavorativa, la salute-sicurezza dei soggetti esposti; tali vibrazioni i cui limiti sono strettamente dipendenti dalla durata dell’esposizione, sono anch’esse oggetto di norme specifiche”*; tale asserzione della UNI 9614, fissa il limite tra le norme relative all’ambiente di lavoro e quelle relative all’ambiente esterno.

La norma, nei prospetti II e III dell'art. A1 prevede valori e livelli limite di assunzione delle vibrazioni all'interno degli uffici, fabbriche ed abitazioni, che risultano:

- per il disturbo dovuto a vibrazioni di livello costante e non costante

Asse Z	a m/s ²	L dB
Aree critiche	5,0 10 ⁻³	74
Abitazioni (notte)	7,0 10 ⁻³	77
Abitazioni (giorno)	10,0 10 ⁻³	80
Uffici	20,0 10 ⁻³	86
Fabbriche	40,0 10 ⁻³	92
Assi X, Y	a m/s ²	L dB
Aree critiche	3,6 10 ⁻³	71
Abitazioni (notte)	5,0 10 ⁻³	74
Abitazioni (giorno)	7,2 10 ⁻³	77
Uffici	14,4 10 ⁻³	83
Fabbriche	28,8 10 ⁻³	89

- per il disturbo dovuto a vibrazioni di livello impulsivo

	Asse Z a m/s ²	Assi X, Y a m/s ²
Aree critiche	5,0 10 ⁻³	3,6 10 ⁻³
Abitazioni (notte)	7,0 10 ⁻³	5,0 10 ⁻³
Abitazioni (giorno)	0,30	0,22
Uffici e Fabbriche	0,64	0,46

All'Art. 5 la stessa norma, fornisce i valori di accelerazione e livello relativi alla soglia di percezione relativamente all'individuo che staziona all'interno di un edificio interessato da vibrazioni, soglia che risulta:

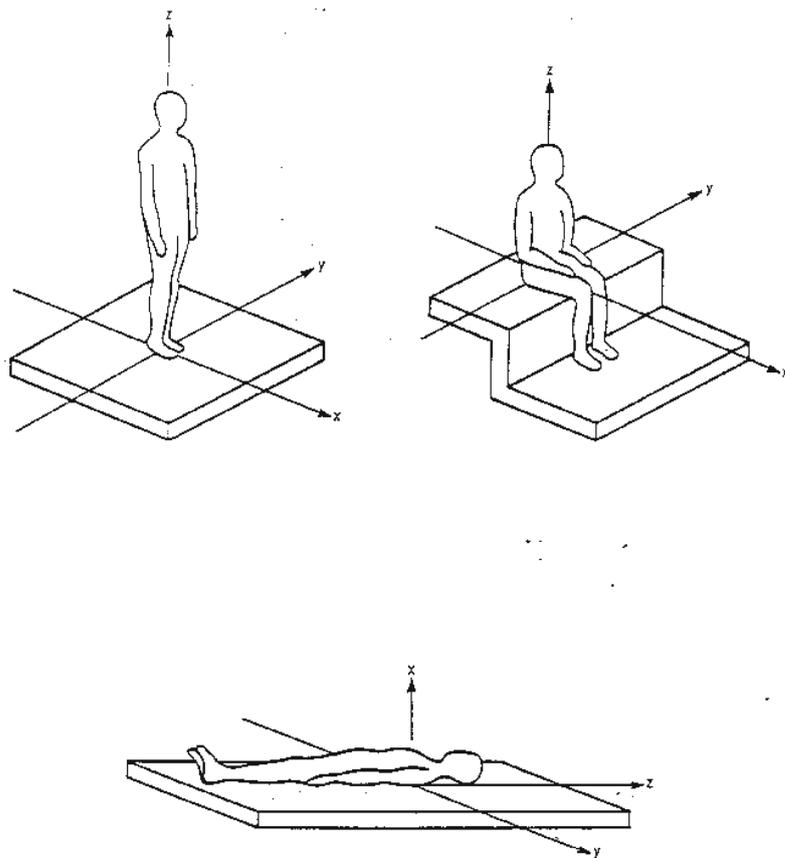
$$\begin{aligned}
 a_z &= 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2 & L_z &= 74 \text{ dB} \\
 a_{x,y} &= 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2 & L_{x,y} &= 71 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

Come unità di misura viene assunto il valore efficace (RMS) dell'accelerazione espresso in mm/s². L'analisi in frequenza delle vibrazioni va effettuata in bande di 1/3 di ottava nel campo da 1 a 80 Hz (estremi inclusi).

Le vibrazioni vanno rilevate nel punto più significativo del locale o dell'edificio interessato dalle vibrazioni, orientando l'accelerometro secondo la terna di assi ortogonali ad un'altezza dal piano pavimento pari a m 1,20 ed orientati secondo le direttrici:

- verticale: asse Z, ortogonale al pavimento;
- orizzontale: asse X, parallela al piano pavimento ed ortogonale agli assi Y e Z;

Direzione delle vibrazioni e posizione dei rilievi



Se il fenomeno vibrazionale risulta impulsivo e non energeticamente costante nei vari impulsi, l'effettuazione delle misurazioni deve essere effettuata esclusivamente con sonda accelerometrica triassiale collegata ad un analizzatore multicanale per il rilevamento contemporaneo sui tre assi; in tale caso non è quindi permessa l'esecuzione di misure con sonde monoassiali effettuabili quindi solamente in tempi diversi sui tre assi.

Ai fini della previsione di impatto, dei progetti, delle verifiche eventuali e dei collaudi, come indice di riferimento va assunta la condizione peggiore riscontrata.

UNI 9916 – *Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici.*

Tale norma non fornisce limiti ben definiti ma fornisce una guida relativa ai metodi di misura, di trattamento dei dati, di valutazione dei fenomeni vibratorii allo scopo di permettere la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, con riferimento alla loro risposta strutturale ed integrità architettonica.

La norma classifica le definizioni di danno in funzione degli effetti che le vibrazioni provocano agli edifici secondo la seguente terminologia:

- danno di soglia: formazione di fessure filiformi sulle superfici dei muri a secco o accrescimento di fessure già esistenti sulle superfici intonacate o sulle superfici di muri a secco; inoltre formazione di fessure filiformi nei giunti a malta delle costruzioni in mattoni e in calcestruzzo.
- danno minore: formazione di fessure più aperte, distacco e caduta di gesso o pezzi di intonaco di muri a secco; formazione di fessure in blocchi di mattoni o di calcestruzzo.
- danno maggiore: danneggiamento di elementi strutturali; fessure nelle colonne di supporto; apertura di giunti; serie di fessure nella muratura.

Essa prosegue definendo le caratteristiche delle sorgenti di vibrazioni e della risposta dell'edificio, e pertanto mettono in stretta relazione il regime vibrazionale a manifestazioni oggettive degli effetti di quest'ultimo sugli edifici.

Riportiamo infine il prospetto IV all'Appendice B della norma UNI 9916 che fornisce le velocità ammissibili delle vibrazioni agli edifici relativamente alla massima delle tre componenti x, y, z della velocità nel punto di misura

TABELLA 1 – 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			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

20. CRITERI DI VALUTAZIONE

Partendo dalla litologia del substrato geologico e dalla caratterizzazione vibrazionale di alcune tipologie di sorgenti, per la valutazione della componente inquinamento vibrazionale, si è fatto riferimento al *Metodo di Crandel* (“Ground vibration due to blasting” Boston Society of Civil Engineers - aprile 1949) da Cestelli-Guidi “Geotecnica e Tecnica delle Fondazioni” – Ed. Hoepli vol.2. ed allo studio “*Valutazione dei livelli di vibrazione in edifici residenziali*” condotto dal Prof. Angelo Farina dell’Università degli Studi di Parma, Dipartimento di Ingegneria Industriale, per il calcolo previsionale.

21. CARATTERIZZAZIONE DEL SUBSTRATO GEOLOGICO

Lo studio geotecnico allegato al progetto, fornisce la natura e le caratteristiche specifiche del substrato geologico. Ai fini della presente valutazione si è considerata la stratigrafia ricavata da indagini dirette nel sondaggio T7 effettuato in darsena, e di cui si riporta la posizione nello schizzo planimetrico che segue, oltre alla sezione stratigrafica.

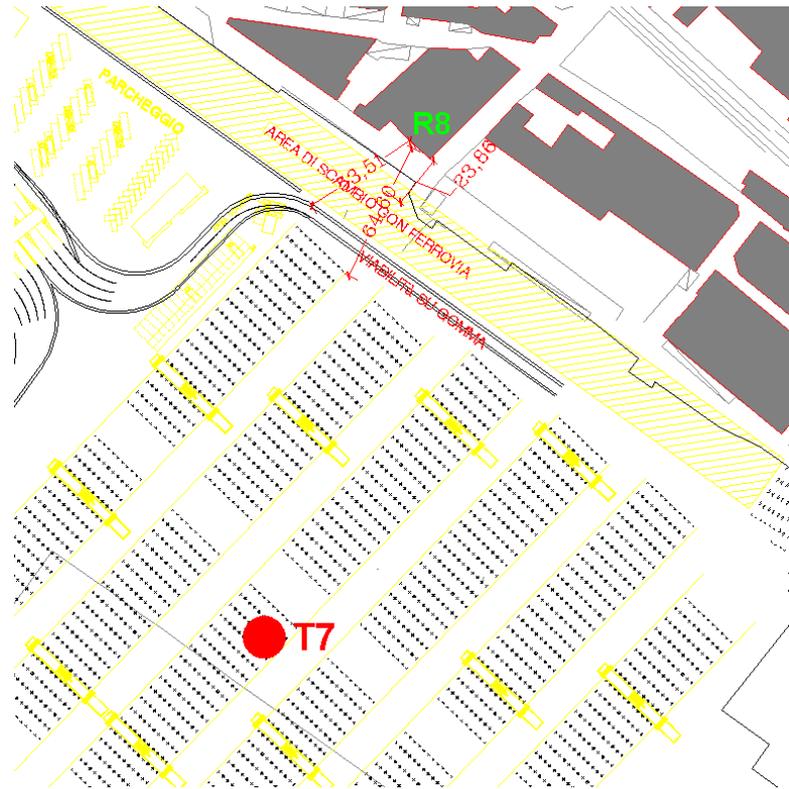
STRATIGRAFIA DEL SONDAGGIO T7

Sondaggio	Lunghezza (m)	Quota testa foro	Riporto	Sabbie superiori			Tufo			Sabbie inferiori		
				z		H (m)	z		H (m)	z		H (m)
			da (m)	a (m)	da (m)		a (m)	da (m)		a (m)*		
T7	50.00	1.89	12.0	12.0	23.6	11.6	23.6	28.3	5.7	28.3	50.0	21.7

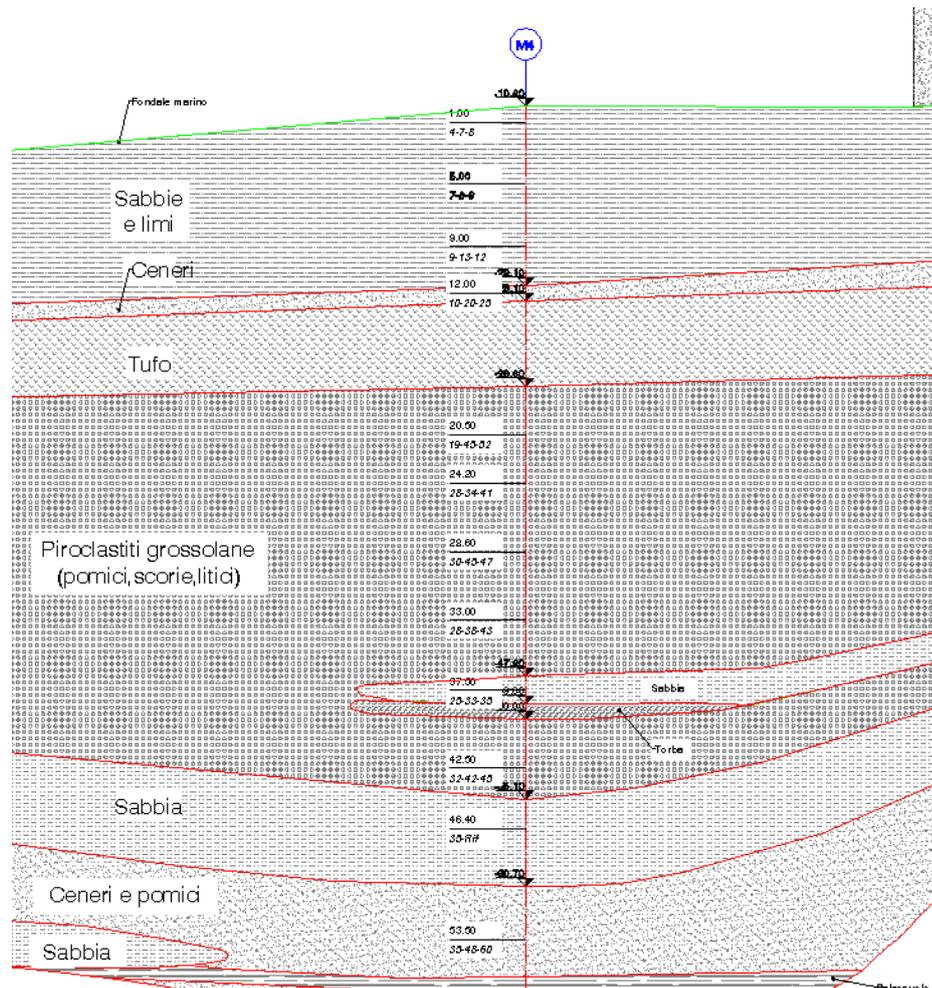
Si riportano di seguito i parametri che individuano le caratteristiche fisiche ed il comportamento meccanico del terreno.

CARATTERISTICHE DELLE TERRE	Parametri fisici					Parametri meccanici		
	γ_d kN/m ³	γ_n kN/m ³	γ_s kN/m ³	n %	Sr %	c' MPa	ϕ' grad.dec.	E' MPa
MATERIALI DI RIPORTO	-	17.5	-	-	100	0	28	14
SABBIE SUPERIORI 1° metro	-	17.5	-	-	100	0	28	14
SABBIE SUPERIORI	14.7	18.5	25.5	42.6	100	0	28÷31	15
TUFO LAPIDEO	-	17.5	-	-	-	0.22÷0.25	30÷32	1200
SABBIE INFERIORI	17	20	25	33.0	100	0	37	70

PLANIMETRIA CON UBICAZIONE DEL SONDAGGIO T7 ED INDIVIDUAZIONE DEL RICETTORE ABITATIVO PIÙ VICINO



SEZIONE STRATIGRAFICA



Dalla stratigrafia sopra riportata risulta evidente che le fondazioni degli edifici residenziali dell'area di interesse, poggiano sul primo litotipo costituito da sabbie e limi; non si hanno invece informazioni sulla tipologia di fondazione con cui tali edifici furono realizzati.

Il Terzaghi definisce la frequenza propria di un litotipo che risulta la frequenza delle vibrazioni che hanno origine in un corpo dai limiti ben definiti quando su di esso agisce un singolo impulso. Se l'impulso è periodico, l'ampiezza delle vibrazioni forzate che ne risultano aumenta man mano che la frequenza f_i dell'impulso si approssima alla frequenza propria del corpo considerato (il terreno) e raggiunge il suo massimo ad una frequenza molto vicina alla frequenza propria. Tale stato si chiama *risonanza* ed ogni litotipo ha una sua specifica frequenza di risonanza, che in generale aumenta con l'aumentare della densità e con il diminuire della compressibilità del terreno.

Dal punto di vista del campo vibrazionale, ad una frequenza costante degli impulsi, le dimensioni della zona interessata dal fenomeno, aumentano ad un ritmo che va decrescendo nel tempo; le dimensioni massime del campo sono determinate dall'intensità degli impulsi periodici esercitati dalla sorgente vibrazionale e dalla densità iniziale del terreno; al di fuori della zona in questione, la compattezza del terreno rimane sostanzialmente invariata.

Le frequenze di risonanza caratteristiche dei vari litotipi, sono proposte dal Terzaghi nella tabella che segue ed in cui si individuano:

FREQUENZE DI RISONANZA DI ALCUNI LITOTIPI (TERZAGHI 1989)

<i>Terreni o Rocce di base</i>	<i>Frequenza Hz</i>
Terreno sciolto	19,10
Scorie artificiali compatte	21,30
Sabbia di densità e granulometrie medie	24,10
Sabbia densa a granulometria mista	26,70
Ghiaia compatta	28,10
Calcere tenero	30,00
Arenaria	34,00

Sulla base della stratigrafia del sito, ai fini della presente valutazione, si può considerare il valore della frequenza di risonanza per sabbie di densità e granulometrie medie pari a $f = 24,10$ Hz.

22. VALUTAZIONE DELLA COMPONENTE INQUINAMENTO VIBRAZIONALE

Le attività che il progetto prevede e che possono produrre fenomeni di propagazione all'abitato, risultano suddivisibili in due categorie:

- durante le fasi di cantiere: transito dei mezzi d'opera, macchinari per l'escavazione, operazioni di infissione di pali battuti e/o vibroinfissi.
- durante la fase di esercizio: transito dei convogli ferroviari e transito dei mezzi di trasporto pesante su gomma.

Per le lavorazioni di cantiere nel caso in esame, le sollecitazioni prodotte dalla movimentazione di camion, escavatori e trivelle in lavorazione ecc., gli impulsi risultano a carattere non periodico e con frequenze assolutamente non stazionarie e molto al di sotto di 500 impulsi/minuto; pertanto le lavorazioni di cantiere, ad una distanza minima di 50 metri dall'edificio più vicino, non sono in grado di generare sollecitazioni vibrazionali stazionarie tali da raggiungere la frequenza di risonanza dei litotipi.

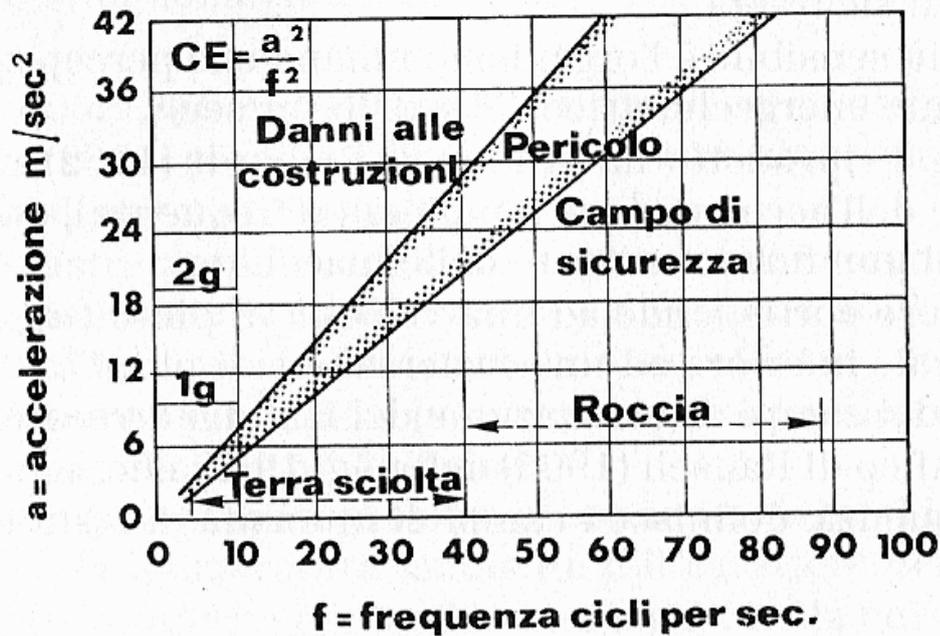
Invece la valutazione di lavorazioni come ad esempio la vibroinfissione di pali o di palancoato, i cui impulsi risultano a carattere periodico, può essere effettuata con il metodo di Crandell (1949) che commisura l'entità del danno all'energia cinetica dell'oscillazione del terreno espressa dal coefficiente energetico CE, che risulta:

$$C \cdot E = \frac{a^2}{f^2}$$

dove a è l'accelerazione della sorgente vibrazionale ed f è la frequenza di massimo livello dell'oscillazione vibrazionale. (da Cestelli Guidi -1975).



A normali costruzioni in cemento armato, ed in prossimità di essi, nell'ordine di circa 10 metri, non si producono danni per un coefficiente energetico $CE < 0,30$, mentre sussiste una notevole probabilità di dissesti per $CE > 0,6$.



Applicando la relazione al caso di un battipalo che lavorando in sabbie e limi debolmente consolidati quali quelle che caratterizzano il nostro sito, produce accelerazioni massime di circa 5 m/s^2 alla frequenza dominante di 15 Hz, si ha:

$$CE = \frac{5^2}{15^2} = 0,11$$

valore che si colloca ampiamente entro il campo di sicurezza del grafico di Crandel sopra riportato; va inoltre considerato che la lavorazione sopra calcolata, cioè l'utilizzo di battipali, avviene a distanze di almeno 200 metri dalle abitazioni.



Il Prof. Angelo Farina dell'Università degli Studi di Parma, Dipartimento di Ingegneria Industriale, propone per il calcolo previsionale un modello di propagazione qui impiegato, valido per tutti tre i tipi di onde (P, S, R), basato sulla seguente formulazione:

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

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 metri, e d_0 la distanza di riferimento a cui è noto lo spettro di emissione, qui assunta pari a 5 m.

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 :

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).

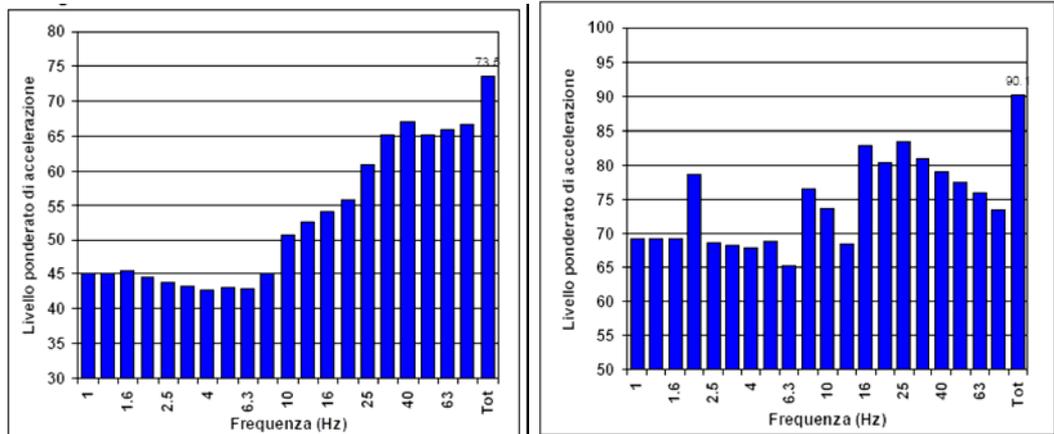
Il termine esponenziale rappresenta invece i fenomeni di dissipazione di energia meccanica in calore, che va crescendo proporzionalmente alla frequenza. Ciò fa sì che le alte frequenze si estinguano dopo un breve percorso, mentre le frequenze più basse si propagano a distanze maggiori.

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.

Volendo calcolare la propagazione della sorgente convoglio ferroviario il cui spettro di emissione a 5 m è di seguito mostrato e la cui accelerazione

massima è pari a $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ mm/s}^2$ a 40 Hz e che avviene mediante propagazione di onde superficiali ($n=0.5$), su un terreno che ha un fattore di smorzamento $\eta = 0.1$ ed una velocità di propagazione c pari a 500 m/s, considerando che l'apparato fondale dell'abitazione più vicina è a 50 metri, applicando la formula proposta dal Prof. Farina, all'abitazione si ha un'accelerazione pari a $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ mm/s}^2$.



spettro vibrazioni treno a 50 Km/h a 5 m dall'asse del binario

spettro vibrazioni battipalo a 5m

Calcolando invece con la stessa parametrizzazione il battipalo con lo spettro sopra indicato ed una accelerazione massima a 25 Hz di $5,6 \cdot 10^{-3} \text{ mm/s}^2$, si ottiene un valore di accelerazione al piano fondale dell'abitazione più vicina pari a $1,8 \cdot 10^{-3} \text{ mm/s}^2$.

23. CONCLUSIONI DELLA COMPONENTE INQUINAMENTO VIBRAZIONALE

Le valutazioni sopra mostrate, portano a verificare che la trasmissione di fenomeni vibrazionali sia nell'utilizzo di macchine operatrici che nella fase di esercizio del terminal, sono assolutamente irrilevanti.

Volendo infine considerare come valore limite la *soglia di percezione* relativamente all'individuo che staziona all'interno di un edificio interessato da vibrazioni, soglia che risulta $a_z = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$ ($L_z = 74 \text{ dB}$) ed $a_{x,y} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$ ($L_{x,y} = 71 \text{ dB}$) come da art. 5 della norma UNI 9614, i valori come sopra calcolati, risultano ampiamente inferiori.

Si può pertanto concludere che sia le fasi di cantierizzazione che l'esercizio del terminal contenitori, non produrranno impatti vibrazionali sia agli edifici che alle persone ivi stazionanti.

Dott. PAOLO CAROTTI

(Handwritten signature in blue ink)

ISCRIZ. ELENCO DEI TECNICI COMPETENTI DELLA REGIONE MARCHE CON DELIBERAZIONE G.R.M. N. 168 ME/AMB DEL 2/2/98 AI SENSI ART. 2 COMMI b e 7 LEGGE 447/95.