

HUB DI INTERSCAMBIO FERROVIARIO DI POMPEI

Progetto definitivo

Studio vibrazionale in fase di cantiere e in esercizio

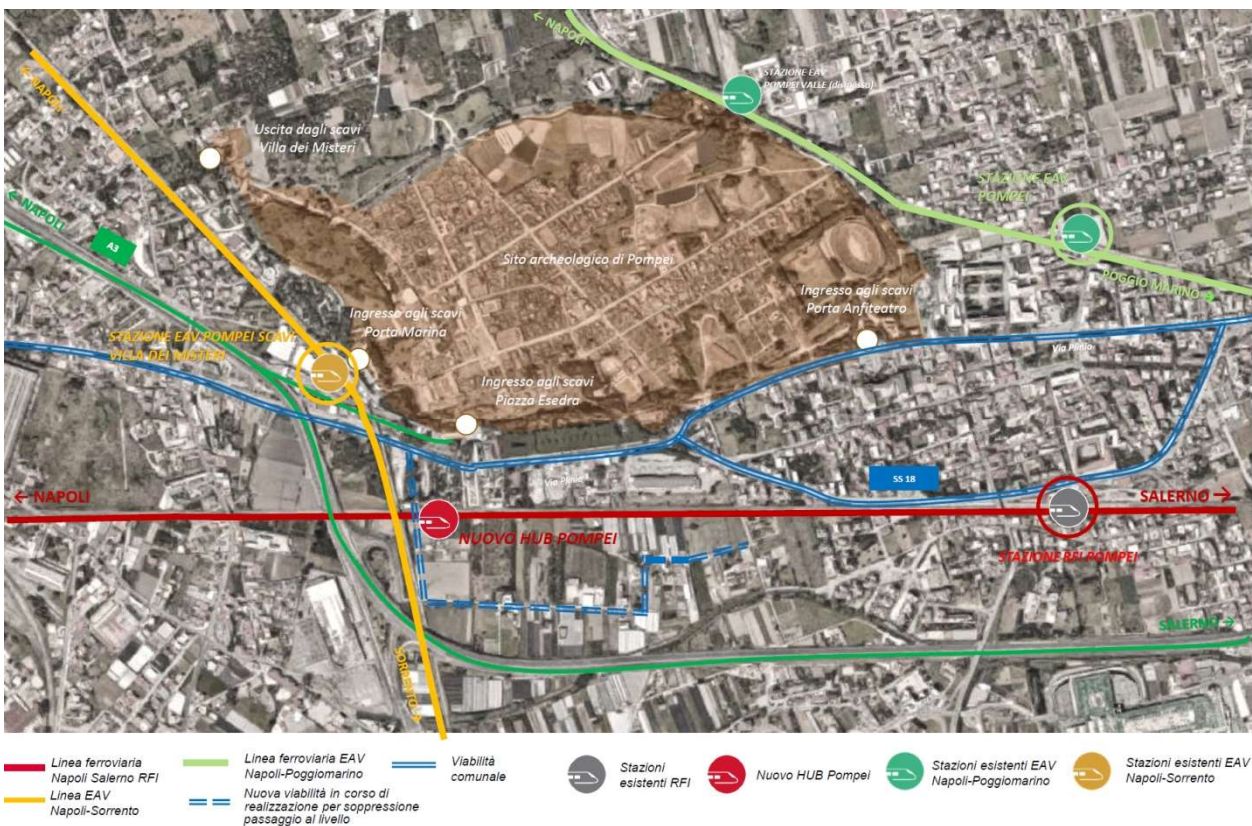
Rev.	Descrizione revisione	Redatto	Verificato	Approvato	Autorizzato
A	Emissione	D. Onorati	L. Nardoni	P. Luciani	G. Coppa

INDICE

1	PREMESSA	3
2	INQUADRAMENTO NORMATIVO	5
2.1	Effetti delle Vibrazioni sulle persone – limiti normativi	5
2.2	Effetti delle Vibrazioni sugli edifici – limiti normativi	7
3	DESCRIZIONE DEL CONTESTO DI PROPAGAZIONE	9
4	TIPOLOGIA DI VIBRAZIONI	11
4.1	Onde di volume longitudinali (Onde P) e di taglio (Onde S)	11
4.1.1	Onde P.....	11
4.1.2	Onde S.....	11
4.2	Onde di superficie: di Rayleigh e di Love.....	11
4.2.1	Onde di Rayleigh.....	11
4.2.2	Onde di Love.....	12
4.3	Il modello di calcolo.....	12
5	FASE DI ESERCIZIO	15
6	FASE DI CANTIERE	16
6.1.1	Definizione delle aree di influenza delle attività costruttive	16
6.1.2	Costruzione del rilevato o del sottofondo stradale.....	17
6.1.3	Scavi di scotico e bonifica.....	19
6.1.4	Transito di autocarri su viabilità esistente.....	21
7	MISURE DI PREVENZIONE E MITIGAZIONE	23
8	CONCLUSIONI	24

1 PREMESSA

Il presente documento ha la finalità di descrivere il potenziale impatto per la componente Vibrazioni del progetto di inserimento di una nuova Stazione RFI sulla linea Napoli-Salerno (via Nocera Inferiore), che costituirà il principale collegamento ferroviario al sito archeologico di Pompei. Dal punto di vista territoriale e infrastrutturale il nuovo Hub di Pompei si inserisce in una rete ferroviaria/stradale fondamentale per il collegamento di una vasta area del territorio campano.



Inquadramento Territoriale

A nord degli Scavi corre la linea Napoli-Poggioreale con due Stazioni Eav, mentre ad ovest è presente un'altra Stazione Eav sulla linea Napoli-Sorrento, che incrocia quasi ad angolo retto la linea Napoli-Salerno. La Napoli-Salerno è un asse principale ferroviario a doppio binario, della rete regionale che collega il capoluogo campano con i comuni costieri vesuviani, con Salerno e con i comuni della provincia di Salerno, asse ferroviario fondamentale della rete nazionale in quanto parte costitutiva della principale direttrice di collegamento Nord-Sud della penisola: Milano-Roma-Napoli-

Reggio Calabria. La linea ferroviaria storica serve il comune di Pompei con la stazione RFI localizzata in viale Giuseppe Mazzini e dalla quale, percorrendo circa 100 metri, si raggiunge piazza Bartolo Longo in cui è situato il santuario della Madonna di Pompei.

L'autostrada A3 Napoli -Pompei – Salerno scorre in direzione nord-ovest/sud-est con la presenza di tre svincoli (Pompei Est-Scafati, Pompei-Ovest e lo svincolo di Castellammare) che si innestano rispettivamente sulla Statale 18 sul versante orientale in prossimità del confine comunale con Scafati, a nord-ovest al confine con Torre Annunziata e sulla Statale 145 nella parte centro occidentale del territorio di Pompei al confine con i territori di Castellammare e Torre Annunziata, con un casello in prossimità del nuovo Hub.

L'analisi delle Vibrazioni è stata condotta facendo riferimento sia allo stato di esercizio della nuova infrastruttura che alla fase di cantierizzazione: l'obiettivo principale resta comunque quello di individuare sul territorio aree edificate potenzialmente interessate dalle vibrazioni indotte dalle operazioni necessarie alla costruzione delle opere in progetto per la realizzazione della nuova infrastruttura.

Generalmente nell'ambito di opere stradali la fase di corso d'opera presenta infatti criticità maggiori rispetto alla fase di esercizio, pur essendo legata ad un transitorio limitato nel tempo.

2 INQUADRAMENTO NORMATIVO

A differenza del rumore ambientale, regolamentato a livello nazionale dalla Legge Quadro n. 447/95, non esiste al momento alcuna legge che stabilisca limiti quantitativi per l'esposizione alle vibrazioni. Esistono invece numerose norme tecniche, emanate in sede nazionale ed internazionale, che costituiscono un utile riferimento per la valutazione del disturbo in edifici interessati da fenomeni di vibrazione.

Per quanto riguarda il disturbo alle persone, i principali riferimenti sono costituiti dalla norma ISO 2631 / Parte 2 "Evaluation of human exposure to whole body vibration / "Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz)". La norma assume particolare rilevanza pratica poiché ad essa fanno riferimento le norme tecniche per la redazione degli Studi di Impatto Ambientale relativi alla componente ambientale "Vibrazioni", contenute nel D.P.C.M. 28/12/1988. Ad essa, seppur con alcune non trascurabili differenze, fa riferimento la norma UNI 9614 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo".

Si riporta una descrizione sintetica delle suddetta normativa, con particolare riferimento alle soglie di disturbo vibrazionale in relazione al tipo di disturbo e di bersaglio sensibile.

2.1 Effetti delle Vibrazioni sulle persone – limiti normativi

Per la valutazione degli effetti di disturbo delle vibrazioni sulla persona, la normativa di riferimento per la definizione dei livelli massimi ammissibili nelle diverse condizioni è la ISO 2631, recepita in modo sostanziale dalla UNI 9614.

La direzione lungo le quali si propagano le vibrazioni sono riferite alla postura assunta dal soggetto esposto. Gli assi vengono così definiti : asse z passante per il coccige e la testa, asse x passante per la schiena ed il petto, asse y passante per le due spalle. Per la valutazione del disturbo associato alle vibrazioni di livello costante, i valori delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza, corrispondenti ai più elevati riscontrati sui tre assi, possono essere confrontati con i valori di riferimento normativo, tali valori sono espressi mediante l'accelerazione complessiva ponderata in frequenza $a(w)$ e del suo corrispondente livello $L(w)$.

Quando i valori delle vibrazioni in esame superano i livelli di riferimento, le vibrazioni possono essere considerate oggettivamente disturbanti per il soggetto esposto. Il giudizio sull'accettabilità (tollerabilità) del disturbo oggettivamente riscontrata dovrà ovviamente tenere conto di fattori quali la frequenza con cui si verifica il fenomeno vibratorio, la sua durata, ecc.

La UNI 9614 permette di caratterizzare la vibrazione di livello non costante anche attraverso l'espressione del livello di accelerazione in dB:

$$L = 20 \cdot \text{Log}_{10} \frac{a}{a_0}$$

dove a è il valore efficace R.M.S. dell'accelerazione sul periodo T di misura, e a_0 è il valore di riferimento. Al fine di valutare l'effetto cumulativo di tutte le componenti di accelerazione per frequenze da 1 a 80, vanno introdotti opportuni filtri di ponderazione che rendano tali componenti equivalenti dal punto di vista della percezione da parte dell'individuo.

Il livello dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza L_w è fornito dalla relazione:

$$L_w = 10 \cdot \left(\text{Log}_{10} \sum_i 10^{L_{i,w}/10} \right)$$

dove $L_{i,w}$ sono i livelli di vibrazione in accelerazione rilevati per terzi di ottava, ponderati in frequenza secondo specifici filtri di ponderazione.

Nella tabella che segue si riportano i valori limite di vibrazione per le persone proposti dalla UNI 9614. Si fa presente che tali valori si riferiscono a sorgenti di tipo continuo e, pertanto, il loro impiego è a vantaggio di sicurezza nell'analisi del disturbo arrecato da sorgenti intermittenti quali i macchinari di cantiere.

DESTINAZIONE D'USO	ACCELERAZIONE	
	A (m/s ²)	La,w (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

Valori e livelli limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza validi per l'asse z.

DESTINAZIONE D'USO	ACCELERAZIONE	
	A (m/s ²)	La,w (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

Valori e livelli limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza validi per gli assi x,y

2.2 Effetti delle Vibrazioni sugli edifici – limiti normativi

Il riferimento adottato per la verifica del livello di vibrazione indotto dalle attività di cantiere rispetto ai limiti di danneggiamento delle strutture è la normativa UNI 9916. Tale normativa recepisce ed è in sostanziale accordo con la normativa internazionale ISO 4866.

In accordo con tali normative, l'effetto della vibrazione sulle strutture viene valutato in termini di velocità di picco (PPV, PeakParticleVelocity), misurata in mm/s. A seconda del tipo di struttura considerato vengono assegnati i valori limite della PPV in funzione della frequenza considerata.

La UNI 9916, facendo proprie le indicazioni della DIN 4150, identifica i valori di riferimento al di sotto dei quali, salvo casi particolari, è ragionevole presumere che non vi sia danno per gli edifici.

Tali valori tengono conto della configurazione strutturale degli edifici e della caratteristiche di durata delle vibrazioni. In riferimento al primo aspetto (strutturale) la norma identifica tre diverse classi di edifici:

- edifici industriali e costruzioni strutturalmente simili;
- edifici residenziali e costruzioni simili;
- costruzioni che non appartengono alle prime due categorie e sono degne di essere tutelate.

Per quanto riguarda l'aspetto relativo alla durata del disturbo la norma distingue, per ognuna delle tre classi di edificio sopra elencate, i valori limiti, espressi in PPV (Velocità di picco) il caso di sollecitazioni vibrazionali temporanee (vedi **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) da quelle permanenti (vedi **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Si evidenzia che nel valutare la significatività del rischio di danneggiamento delle strutture delle Velocità di picco stimate mediante l'elaborazione modellistica più avanti illustrata, si è fatto

riferimento, in via estremamente cautelativa, al valore di attenzione definito per tutte le frequenze e relativo al disturbo vibrazionale permanente. Valore, questo, che è stato confrontato con la massima velocità di Picco in frequenza calcolata al ricettore.

TIPI DI STRUTTURE	VELOCITÀ DI VIBRAZIONE ALLA FONDAZIONE IN MM/S			
	CAMPI DI FREQUENZA [Hz]			
	1 < 10	10-50	50 < 100	>100(*)
Costruzioni per attività commerciale, costruzioni industriali e costruzioni con strutture similari	20	20-40	40-50	40
Edifici abitativi o edifici simili per costruzione o utilizzo	5	5-15	15-20	15
Edifici che per la loro particolare sensibilità alle vibrazioni non rientrano nelle precedenti classificazioni e che sono da tutelare in modo particolare (monumenti sotto la protezione delle belle arti)	3	3-8	8-10	8

(*) Per frequenze superiori ai 100 Hz possono essere adottati come minimo i valori per 100 Hz

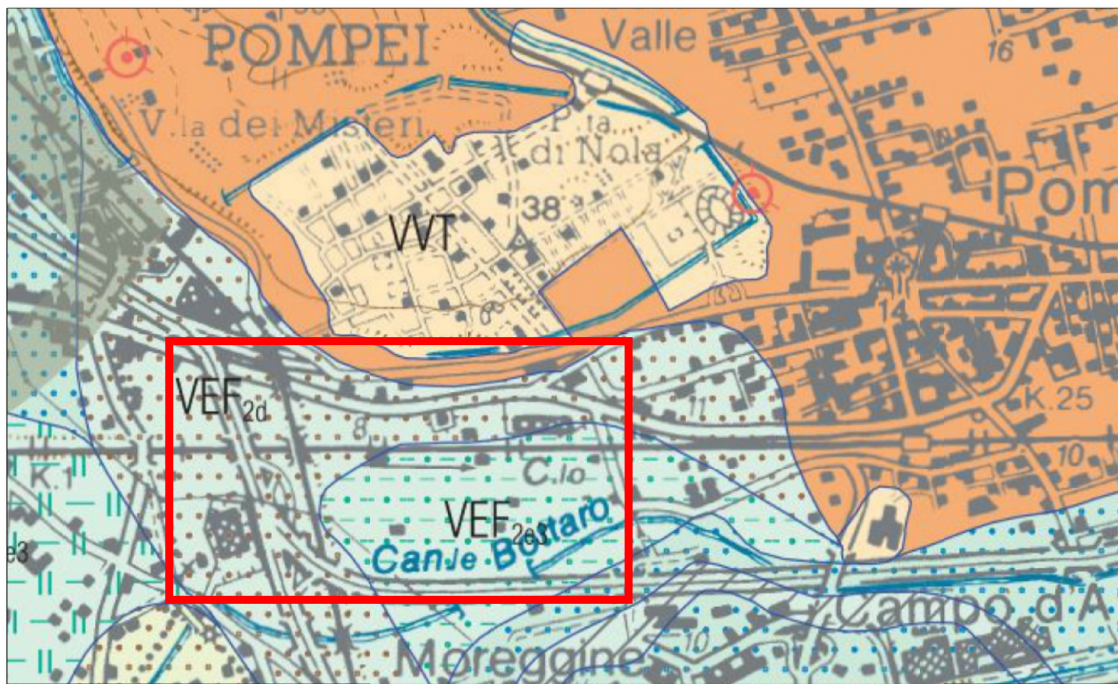
Valori limite di vibrazione per effetti sugli edifici – Vibrazioni temporanee (UNI 9916 – Prospetto D.1)

TIPI DI STRUTTURE	VALORI DI RIFERIMENTO PER LA VELOCITÀ DI VIBRAZIONE P.C.P.V. IN MM/S PER TUTTE LE FREQUENZE
Costruzioni per attività commerciale, costruzioni industriali e costruzioni con strutture similari	10
Edifici abitativi o edifici simili per costruzione o utilizzo	5
Edifici che per la loro particolare sensibilità alle vibrazioni non rientrano nelle precedenti classificazioni e che sono da tutelare in modo particolare (monumenti sotto la protezione delle belle arti)	2,5

Valori limite di vibrazione per effetti sugli edifici – Vibrazioni permanenti (UNI 9916 – Prospetto D.2)

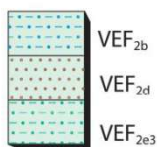
3 DESCRIZIONE DEL CONTESTO DI PROPAGAZIONE

L'area di progetto è ubicata sul subsistema dell'agro nocerino-sarnese, caratterizzato nel caso specifico da peliti e sabbie vulcanoclastiche, con intercalazioni di sabbie e ghiaie fini fluviali e sabbie di duna costiera.



Settore della piana del Sarno e dei rilievi carbonatici circostanti

SUBSISTEMA DELL'AGRO NOCERINO-SARNESE



Questo subsistema è compreso tra la superficie di erosione e non deposizione alla sommità del subsistema di Scanzano e la superficie topografica. Vi si intercalano vulcaniti del Somma-Vesuvio ed è eteropico della parte alta dell'Unità di Pomigliano. Nella parte nord-orientale del foglio è stata distinta l'unità informale di Piano delle Selve (PNV), mentre nell'area costiera la porzione superiore del subsistema, posta a tetto delle Piroclastiti di Pompei (79 d.C.), è distinta come unità informale di Ponte Persica (PNI). Si riconoscono all'interno del subsistema tre litofacies. Peliti e sabbie vulcanoclastiche, talora torbose, di ambiente palustre e fluvio-palustre con locali intercalazioni di sabbie e ghiaie fini fluviali. Nella bassa piana includono anche episodi in facies palustre (e₃); sabbie di duna costiera, passanti in basso a depositi di spiaggia sabbiosi in complessi eteropici della litofacies precedente (d); alluvioni di conoide dominate da vulcanoclastiti sabbioso-limose e con lenti ricche di clasti calcarei (b).

OLOCENE

Stralcio dell'area di progetto (carta geologica Sorrento – Termini, foglio 466 – 485)

Le caratteristiche geomeccaniche ed elastiche del terreno influenzano la propagazione delle vibrazioni.

Considerando il terreno come costituito da particelle legate da vincoli elastici, la vibrazione è una forma di energia che si propaga secondo una certa direzione (direzione di propagazione), dipendente dal tipo di sorgente, e con una certa velocità (velocità di propagazione), dipendente dal mezzo attraversato, imprimendo a tali particelle delle oscillazioni, intorno ad una posizione di equilibrio.

La velocità delle onde di compressione (V_p) è sempre **maggiore** di quella delle onde di taglio (V_s) e comunque in entrambi i casi aumenta generalmente con la profondità in uno stesso strato.

Si riportano di seguito le velocità caratteristiche di alcuni tipi di terreno e di rocce, evidenziando quelle relative al sito in oggetto come sopra identificate:

Tipo di terreno	V_p [m/s]	V_s [m/s]
Argilla satura	1500	100 ÷ 250
Sabbia fine e media	300 ÷ 500	120 ÷ 200
Sabbia densa	400 ÷ 600	200 ÷ 400
Ghiaia	500 ÷ 750	300 ÷ 600
Arenaria	1500 ÷ 4500	700 ÷ 1500
Marna	1500 ÷ 4500	600 ÷ 1500

4 TIPOLOGIA DI VIBRAZIONI

L'applicazione di una sollecitazione dinamica ad un mezzo continuo produce vibrazioni che si trasmettono sotto forma di onde sismiche. La distinzione tra i vari tipi di onde viene effettuata in base al fatto che la propagazione avvenga all'interno del mezzo (onde di volume) o in superficie (onde di superficie), alla direzione di propagazione dell'onda, al moto degli elementi di terreno rispetto a tale direzione.

In particolare, le onde sismiche si classificano principalmente in onde longitudinali e di taglio ed in onde di superficie.

4.1 Onde di volume longitudinali (Onde P) e di taglio (Onde S)

4.1.1 Onde P

- sono onde di volume;
- si propagano secondo fronti d'onda sferici (anche nell'acqua);
- producono vibrazioni polarizzate nella direzione di propagazione;
- inducono deformazioni di contrazione o estensione;
- hanno velocità più elevate delle altre onde.

4.1.2 Onde S

- sono onde di volume;
- si propagano secondo fronti d'onda sferici (non nell'acqua);
- producono vibrazioni polarizzate nella direzione perpendicolare alla direzione di propagazione (onde SH o SV, se contenute rispettivamente in un piano orizzontale o verticale);
- inducono nel mezzo deformazioni di taglio.

4.2 Onde di superficie: di Rayleigh e di Love

4.2.1 Onde di Rayleigh

- sono onde di superficie;
- si propagano secondo fronti d'onda cilindrici;

- producono vibrazioni polarizzate su piani verticali nella direzione di propagazione e in quella perpendicolare;
- si attenuano meno rapidamente delle onde di volume con la profondità;
- la componente verticale del moto predominante su quella orizzontale e significativa fino a profondità pari alla lunghezza d'onda λ .

4.2.2 Onde di Love

- sono onde di superficie;
- inducono vibrazioni orizzontali perpendicolari alla direzione di propagazione.

4.3 Il modello di calcolo

Un modello di propagazione valido per tutti i tipi di onde si basa sull'equazione di Bornitz, che tiene conto dei diversi meccanismi di attenuazione a cui l'onda vibrazionale è sottoposta durante la propagazione nel suolo.

$$w_2 = w_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^n e^{-a(r_2 - r_1)}$$

dove w_1 e w_2 sono le ampiezze della vibrazione alle distanze r_1 e r_2 dalla sorgente, n è il coefficiente di attenuazione geometrica e dipende dal tipo di onda e di sorgente, **a è il coefficiente di attenuazione del materiale e dipende dal tipo di terreno.**

L'equazione tiene conto dei meccanismi di attenuazione geometrica e di dissipazione che l'onda vibrazionale subisce propagandosi nel terreno:

- attenuazione per dissipazione interna del terreno;
- attenuazione geometrica, in relazione al tipo di sorgente e di onda;
- attenuazione dovuta a ostacoli o discontinuità del terreno;
- attenuazione dovuta all'accoppiamento terreno-fondazione;
- attenuazione dovuta alla propagazione in direzione verticale nel corpo dell'edificio;
- amplificazione determinata dai solai.

Il primo termine dell'equazione esprime l'attenuazione geometrica del terreno.

L'applicazione implica che sia nota l'ampiezza della vibrazione w_1 alla distanza r_1 e sia definita la localizzazione e il tipo di sorgente (sorgente puntuale o lineare, in superficie o in profondità) e il tipo di onda vibrazionale (di volume o di superficie).

Il valore del coefficiente n è determinato sperimentalmente secondo i valori individuati da Kim-Lee. 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).

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

Valori del coefficiente di attenuazione geometrica

Il secondo termine dell'equazione fa riferimento invece all'attenuazione dovuta all'assorbimento del terreno indotto dai fenomeni di dissipazione di energia meccanica in calore; dipende dal tipo di terreno e cresce linearmente con la 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 coefficiente di attenuazione a è esprimibile secondo la seguente formula:

$$a = \frac{2\pi \cdot f \cdot \eta}{c}$$

dove f è la frequenza in Hz, c è la velocità di propagazione dell'onda in m/s e η il fattore di perdita del terreno. Questi dipendono dalle caratteristiche del terreno e i loro valori sono stati determinati dalla letteratura in ragione della natura del terreno.

Nel caso in studio, i ricettori potenziali sono localizzati in corrispondenza di substrati di peliti e sabbie vulcanoclastiche, con intercalazioni di sabbie e ghiaie fini fluviali e sabbie di duna costiera, cui è possibile associare un fattore di perdita η e della velocità di propagazione delle onde c pari a $\eta=0,1$ e 600 m/s.

Utilizzando tale metodologia, nota l'emissione vibrazionale del macchinario e la distanza tra ricettore-sorgente è possibile calcolare l'entità della vibrazione in termini accelerometrici in corrispondenza del potenziale edificio interferito.

Per quanto riguarda i valori di emissione, si è fatto riferimento a dati sperimentali desunti in letteratura.

5 FASE DI ESERCIZIO

Il progetto oggetto di studio è estremamente semplice, sviluppandosi quasi completamente a raso ad eccezione dei due cavalcaferrovia, dei quali uno già realizzato.

In linea generale le vibrazioni, nel loro percorso verso il ricettore, vengono attenuate per diffusione geometrica e per dissipazione di energia nel terreno.

Per le tratte in *viadotto* si è in presenza di una riduzione dell'entità dei carichi dinamici trasmessi al suolo dalle fondazioni del viadotto in relazione all'effetto filtro connesso con le prime frequenze proprie dell'impalcato che risultano estremamente ridotte. Inoltre, va considerato che, poiché l'immissione della vibrazione nel terreno avviene tramite i plinti di fondazione del viadotto, il tipo di sorgente non è più da considerare lineare (come invece nel caso di rilevato, trincea e galleria) ma puntiforme. Ne consegue che la trasmissione delle onde di corpo avviene per fronti d'onda semisferici con maggiori attenuazioni di tipo geometrico rispetto ai fronti d'onda cilindrici. Inoltre, anche la trasmissione delle onde superficiali avviene per fronti d'onda circolari ed è quindi soggetta a riduzioni di tipo geometrico.

In questa fase progettuale non emergono pertanto criticità legate alla fase di esercizio.

6 FASE DI CANTIERE

In generale, durante la costruzione di infrastrutture stradali è possibile che si producano moti vibratori dovuti ad attività quali la battitura dei pali, l'infissione di palancole nel terreno, la compattazione del terreno, le operazioni di scavo, etc. Altri problemi possono essere dovuti al transito di mezzi pesanti di cantiere su strade e piste estremamente prossime ai ricettori in particolar modo nel caso in cui queste siano dissestate.

La sismicità indotta dalle attività di cantiere può interessare edifici situati in prossimità delle aree di lavoro: in relazione alla tipologia di macchinario sorgente e alle sue modalità di utilizzo le vibrazioni possono interessare il ricettore in modo diverso. Molto spesso si tratta di fenomeni vibranti di breve durata (ordine dei secondi) che interessano l'edificio poche volte durante la giornata ma nell'arco di più giorni lavorativi. In altre situazioni il fenomeno sismico ha una durata decisamente più ampia (anche ore) ma interessa il ricettore per un numero ristretto di giorni necessario ad eseguire le operazioni.

Gli eventi vibratorii di brevissima durata vengono definiti transienti mentre quelli di più lunga durata continui. Più precisamente le vibrazioni transienti sono quelle che si verificano con una ricorrenza insufficiente a provocare effetti di fatica sui materiali e la cui successione temporale sia tale da non provocare risonanze nella specifica struttura; quelle continue sono quelle non comprese in questa definizione.

6.1.1 Definizione delle aree di influenza delle attività costruttive

Per area di influenza di una determinata attività costruttiva si intende quella porzione di territorio a ridosso dell'attività stessa che può risultare interessata in modo significativo dalle vibrazioni indotte dai macchinari impiegati.

Per la definizione dell'area di influenza di una singola attività costruttiva risulta necessario conoscere l'ampiezza delle vibrazioni emesse dai macchinari utilizzati e le modalità di propagazione delle stesse nel terreno.

In riferimento all'ampiezza delle vibrazioni emesse si sono ricercati in letteratura dei valori di vibrazione indotte dai macchinari necessari all'attività stessa, semplificando quanto riportato nel modello di calcolo dei paragrafi precedenti.

Queste informazioni in genere consistono in valori di ppv misurati ad una certa distanza di riferimento dalle lavorazioni. I valori di vibrazioni trovati, che descrivono l'andamento della

vibrazione con la distanza dal punto di emissione, sono stati utilizzati per calibrare alcune relazioni proposte in letteratura tipo.

$$ppv = \frac{c}{R^n}$$

Nella precedente equazione:

- R è la distanza dalla zona di esecuzione della lavorazione;
- C e n sono delle costanti che dipendono dalle caratteristiche del terreno, dalla tecnica di lavorazione, etc (la costante n in genere assume valori variabili tra 0.5 e 1.5).

La precedente equazione può essere riscritta nella seguente forma nella quale compare il valore di riferimento della ppv ad una determinata distanza.

$$ppv = ppv_{ref} \left(\frac{R_{ref}}{R} \right)^n$$

Mediante la precedente equazione, noti i valori di riferimento della vibrazione ppv_{ref} ad una certa distanza R_{ref} , è possibile conoscere il valore delle vibrazioni indotte dalle attività costruttive ad una distanza generica dalla sorgente.

Il confronto di tali valori con quelli limite consigliati dall'Eurocode 3 porta a definire delle distanze di influenza dell'attività in termini di danno agli edifici e disturbo alle persone.

6.1.2 Costruzione del rilevato o del sottofondo stradale

La tabella seguente sintetizza i principali macchinari utilizzati per la realizzazione dei rilevati o dei sottofondi stradali a raso:

Operazione costruttive	Macchine operatrici utilizzate
Scavi di scotico e bonifica	Bulldozer + Autocarri + Escavatori
Trattamento a calce del sottofondo	Spandicalce (assimilabile autocarro)
Asportazione del materiale vegetale dalle scarpate esistenti	Escavatori + Autocarri
Gradonatura delle scarpate esistenti	Escavatori
Stesura degli strati di rilevato	Grader (assimilabili ad bulldozer) + autocarro + Rulli VibroCompattatori oppure Rulli Compattatori
Posa del rivestimento laterale	Escavatori + Autocarri
Stesura delle pavimentazioni	Finitrici + Autocarri + Rulli VibroCompattatori oppure Rulli Compattatori

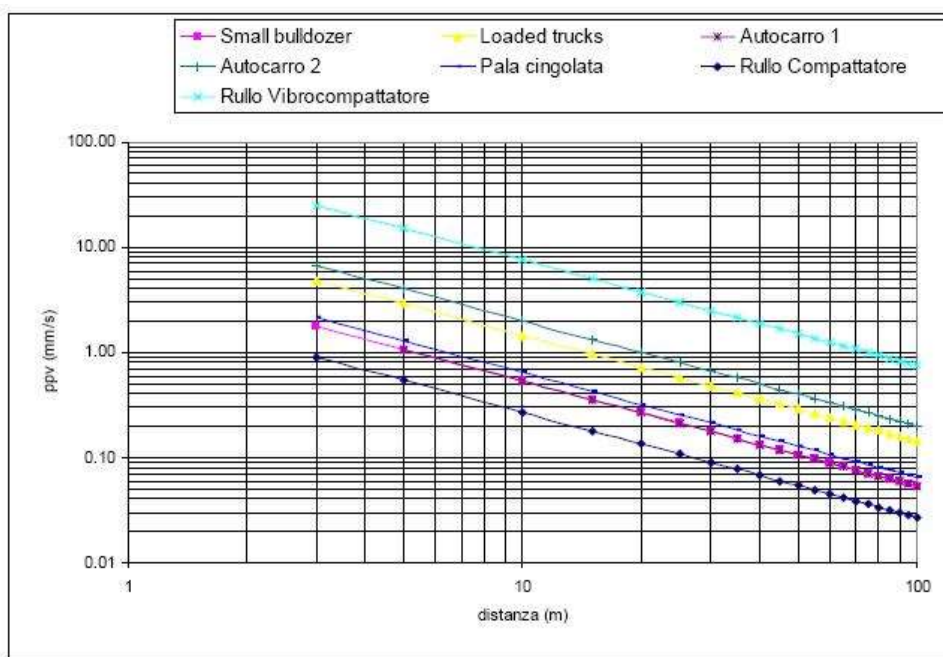
Macchinari utilizzati per la realizzazione dei rilevati

Per quanto attiene alla sismicità dovuta alla stesura degli strati risulta necessario prendere in considerazione i seguenti macchinari: grader, autocarri, rulli vibrocompattatori oppure rulli compattatori. Il grader può essere assimilato ad un bulldozer leggero. Alcune indicazioni in merito alla sismicità indotta da rulli vibrocompattatori e compattatori sono reperibili in studi analoghi al presente condotti in ambito ferroviario. La sintesi è riportata nella tabella sotto:

Mezzo	Vibrazione di riferimento ppv (mm/s)	Distanza di riferimento (m)
Rullo compattatore	0.9	3
Rullo Vibrocompattatore	25	3

Velocità di vibrazioni indotte da rulli compattatori

Nella seguente figura vengono riportate le curve di propagazione della vibrazione dei macchinari utilizzati per la realizzazione dei rilevati.



Propagazione della vibrazione indotta mezzi per la stesura degli strati dei rilevati

La vibrazione indotta da tali macchinari può essere considerata di tipo transitorio.

Si evidenzia però che, oltre alle vibrazioni dovute alla realizzazione del rilevato nella sezione di competenza, l'edificio risulta sottoposto alla sismicità dovuta al transito dei mezzi d'opera che approvvigionano il fronte avanzamento lavori nei tratti a monte e a valle della stessa.

La figura illustra che nel caso in cui per la compattazione degli strati di rilevato vengano utilizzati dei normali rulli a gravità la zona di influenza delle vibrazioni è ancora condizionata dal transito degli automezzi. Viceversa, nel caso in cui vengano utilizzati dei rulli vibrocompattatori la zona di influenza cresce sensibilmente.

In tal caso sono da attendersi criticità in termini di disturbo alle persone fino alla distanza di 25 m dalle lavorazioni.

6.1.3 Scavi di scotico e bonifica

Per questa attività costruttiva risulta necessario conoscere la sismicità indotta dalle attività dei bulldozer, degli autocarri e degli escavatori. La sintesi è riportata nella tabella seguente:

Mezzo	Vibrazione di riferimento ppv (mm/s)	Distanza di riferimento (m)
Bulldozer di grandi dimensioni	2.2	7.6
Bulldozer di piccole dimensioni	0.7	7.6
Bulldozer	6.3	3
Loaded Truck	1.9	7.6
Autocarro 1 Peso sull'asse posteriore 7.2 Mg Velocità 50 km/h Irregolarità artificiali 21 mm	1.45	3.6
Autocarro 2 Peso sull'asse posteriore 8.1 Mg Velocità 50 km/h Irregolarità artificiali 50 mm	2	10
Pala cingolata	0.8	8

Velocità di vibrazioni indotte da mezzi di cantiere

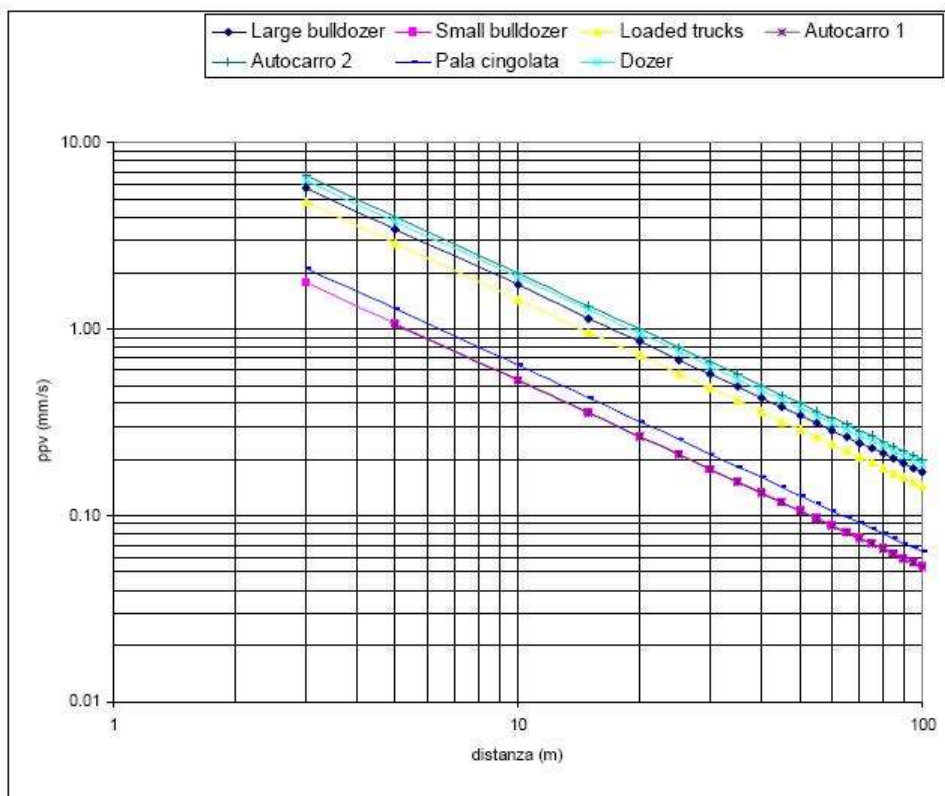
Per quanto riguarda le vibrazioni indotte dagli autocarri, un fattore estremamente importante è da attribuire alle condizioni del piano stradale (o pista): irregolarità, quali buche e dossi fanno sì che una maggior quota parte dell'energia cinetica del mezzo sia trasferita al piano stradale e quindi all'eventuale edificio ubicato nelle vicinanze.

Al fine di valutare l'incremento della vibrazione dovuta ad irregolarità del piano stradale nella tabella sopra sono stati riportati i risultati di misure eseguite in corrispondenza del transito di autocarri su irregolarità artificiali aventi forma di cunei (Autocarro 1 e 2).

I valori di ppv sono stati utilizzati per stimare la propagazione della vibrazione nel terreno mediante la formula già indicata nei paragrafi precedenti:

$$ppv = ppv_{ref} \left(\frac{R_{ref}}{R} \right)^n$$

È stato scelto di adottare il parametro $n=1$ al fine di valutare condizioni di propagazione medie.
Il risultato dell'elaborazione è riportato in forma grafica nella figura sotto:



Propagazione della vibrazione indotta mezzi per scavi di scotico e bonifica

L'analisi non è sicuramente esaustiva in relazione a tutti i tipi di macchinari utilizzabili e a tutte le condizioni che si possono presentare nella realtà. Tuttavia, possono essere considerati a livello orientativo per capire il grado di criticità indotta dall'attività di scotico e bonifica.

La vibrazione indotta da tali macchinari può essere considerata di tipo transitorio. Per quanto riguarda il tempo di esposizione si deve considerare che un generico ricettore risulta esposto alle vibrazioni oltre che nel momento di esecuzione dello scavo di fronte ad esso anche durante l'esecuzione dei rimanenti tratti: si pensi ai transiti dei mezzi per il trasporto di materiale o per

portare i mezzi d'opera dal deposito alla zona di lavorazioni che utilizzano come pista l'impronta del rilevato in allargamento.

In base ai dati a disposizione è possibile attendersi che le attività di scavo di scotico e bonifica possano indurre criticità in corrispondenza del transito di mezzi particolarmente pesanti (vedi loaded trucks, large bulldozer) o in presenza di forti irregolarità sul piano di rotolamento (autocarro 2).

Tale criticità, in termini di disturbo alle persone, sono da attendersi in edifici situati ad una distanza inferiore ai 10-15 m dalle zone di lavorazione.

6.1.4 Transito di autocarri su viabilità esistente

Alcune criticità possono insorgere nell'intorno dell'attuale viabilità utilizzata dagli autocarri per i trasporti di materiale tra le cave e le zone di lavorazione.

La sismicità indotta dai transiti dei vari mezzi dipende dal tipo di mezzo, dal peso e dal sistema di sospensioni. Un altro fattore estremamente importante è da attribuire alle condizioni del piano stradale: irregolarità, quali buche, dossi, tombini fanno sì che una maggior quota parte dell'energia cinetica del mezzo sia trasferita al piano stradale e quindi all'eventuale edificio ubicato nelle vicinanze.

Mezzo	Vibrazione di riferimento ppv (mm/s)	Distanza di riferimento (m)
Loaded Truck	1.9	7.6
Autocarro 3 assi	0.3	6
Autocarro 1 Peso sull'asse posteriore 7.2 Mg Velocità 50 km/h Irregolarità artificiali 21 mm	1.45	3.6
Autocarro 2 Peso sull'asse posteriore 8.1 Mg Velocità 50 km/h Irregolarità artificiali 50 mm	2	10

Velocità di vibrazioni indotte da transito di autocarri

Al fine di valutare l'incremento della vibrazione dovuta ad irregolarità del piano stradale nella tabella sopra sono stati riportati i risultati di misure eseguite in corrispondenza del transito di autocarri su irregolarità artificiali aventi forma di cunei (Autocarro 1 e 2).

I dati sono sicuramente non esaustivi in relazione a tutti i tipi di macchinari transitanti e a tutte le condizioni che si possono presentare nella realtà; tuttavia possono essere utilizzati a livello orientativo per capire il grado di criticità indotta da questo tipo di attività.

In base ai dati a disposizione ci si attende che il transito dei mezzi di cantiere induca criticità al più in termini di disturbo alle persone.

Tale tipo di criticità può essere presente in edifici situati ad una distanza inferiore ai 10 m dalla strada ed in corrispondenza del transito di mezzi particolarmente pesanti (vedi *loaded trucks*). Si segnala tuttavia che in presenza di forti irregolarità del fondo stradale si ha un incremento della sismicità indotta che amplia la zona di influenza a 15 m (autocarro 2).

Definite le distanze di influenza delle singole attività costruttive vengono conseguentemente a determinarsi delle porzioni di territorio potenzialmente critiche. Si tratta di quelle aree sulle quali sono presenti ricettori, ubicati nell'intorno delle attività di cantiere o lungo le viabilità dei mezzi d'opera.

Nel caso specifico, alla luce della distribuzione dei ricettori nell'intorno delle lavorazioni, non si riscontrano situazioni particolarmente critiche per l'Hub di Pompei. Tale assunzione andrà comunque verificata nelle successive fase progettuali.

7 MISURE DI PREVENZIONE E MITIGAZIONE

In linea generale, al fine di contenere i livelli vibrazionali generati dai macchinari, è necessario agire sulla scelta delle tipologie di macchinari adottati, sulle modalità organizzative del cantiere e di utilizzo dei medesimi.

È inoltre opportuno considerare l'informazione alla popolazione residente nelle aree prossime al cantiere, approssimativamente e cautelativamente, entro una fascia di almeno 100 metri, come uno strumento di prevenzione del disturbo.

La definizione di misure di dettaglio è demandata all'Appaltatore, che per definirle dovrà basarsi sulle caratteristiche dei macchinari da lui effettivamente impiegati e su apposite misure. In linea indicativa, l'Appaltatore dovrà:

- rispettare la norma di riferimento ISO 2631, recepita in modo sostanziale dalla UNI 9614, con i livelli massimi ammissibili delle vibrazioni sulle persone;
- contenere i livelli vibrazionali generati dai macchinari agendo sulle modalità di utilizzo dei medesimi e sulla loro tipologia;
- definire le misure di dettaglio basandosi sulle caratteristiche dei macchinari da lui effettivamente impiegati;
- per i ricettori sensibili, dove presumibilmente le attività legate alle lavorazioni più impattanti saranno incompatibili con la fruizione del ricettore, dovrà porre in essere procedure operative che consentano di evitare lavorazioni impattanti negli orari e nei tempi di utilizzo dei ricettori.

Quanto meno per i ricettori individuati e cautelativamente per altri prossimi alle aree di lavoro dove si svolgeranno le attività maggiormente impattanti, in considerazione della qualità dei componenti edilizi e strutturali fabbricati e dello stato di conservazione generale, riguardo ai quali in questa fase non si hanno informazioni adeguatamente dettagliate, si dovranno eseguire i necessari approfondimenti conoscitivi e stabilire le necessarie strategie di prevenzione del danno alle cose e alle persone potenzialmente prodotti dalle accelerazioni imposte dalle macchine operatrici durante le lavorazioni.

8 CONCLUSIONI

L'impatto sulla componente Vibrazioni è potenzialmente legato più alla fase di cantiere che alla fase di esercizio.

La nuova configurazione stradale si sviluppa infatti per lo più a raso, ad eccezione dei due cavalcaferrovia sul lato est ed ovest dell'area di progetto. La limitata presenza di ricettori, il rifacimento del manto stradale e le velocità di percorrenza non consentono di far prevedere sollecitazioni tali da poter essere analizzate.

Per quanto riguarda la fase di cantierizzazione sono state individuate le modalità costruttive da verificare in corso d'opera con attività di monitoraggio. Sulla base delle indicazioni delle indagini saranno da predisporre piani procedurali atti alla minimizzazione degli impatti (riduzione dei carichi per i mezzi d'opera in transito, dislocazione degli impianti dalla parte opposta rispetto ai potenziali ricettori, predisposizione di basi di lavoro antivibrazione, ripartizione dei carichi di lavoro su più postazioni).

In linea generale, al fine di contenere i livelli vibrazionali generati dai macchinari, è necessario agire sulla scelta delle tipologie di macchinari adottati, sulle modalità organizzative del cantiere e di utilizzo dei medesimi.

È inoltre opportuno informare la popolazione residente nelle aree prossime al cantiere, approssimativamente e cautelativamente, entro una fascia di almeno 100 metri, come uno strumento di prevenzione del disturbo.