

## VALUTAZIONE NUMERICA DELLA VARIAZIONE STAGIONALE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE DAL PASSAGGIO DI TRENI IN SOTTERRANEO

Nicola Pontani

*Politecnico di Milano*

[nicola.pontani@polimi.it](mailto:nicola.pontani@polimi.it)

Marco Acquati

*MM S.p.A.*

[m.acquati@mmspa.eu](mailto:m.acquati@mmspa.eu)

Federico Puteri

*Politecnico di Milano*

[federico.puteri@gmail.com](mailto:federico.puteri@gmail.com)

Luca Martinelli

*Politecnico di Milano*

[luca.martinelli@polimi.it](mailto:luca.martinelli@polimi.it)

Cristina Jommi

*Politecnico di Milano*

[cristina.jommi@polimi.it](mailto:cristina.jommi@polimi.it)

### Sommario

Viene presentato un modello numerico per la stima delle vibrazioni indotte dal passaggio di treni in gallerie metropolitane, mirato a quantificarne le variazioni a seguito di modifiche dello stato dei terreni superficiali. Le cause che portano a una variazione della percezione nel tempo delle vibrazioni possono essere di diversa natura: dall'aumento del peso dei convogli, usura dell'armamento ferroviario, maggiore velocità di transito dei treni, alla modifica della risposta dinamica dell'infrastruttura come risultato dell'interazione tra la galleria e il terreno circostante. In questo lavoro, l'attenzione è focalizzata sul ruolo del possibile cambiamento stagionale della risposta dinamica del terreno in funzione del regime idrologico. Due scenari sono stati calibrati sui risultati di prove geodinamiche ripetute in un sito di Milano in due diversi momenti: marzo 2012 e aprile 2021. Le due indagini hanno messo in evidenza differenze nella risposta dinamica dei terreni sopra falda imputabili a differenti profili di saturazione. Il passaggio di un tipico convoglio in galleria è stato simulato con un modello bidimensionale agli elementi finiti, che ha permesso di stimare le variazioni dei livelli vibrazionali attesi nei due scenari e quantificare gli effetti stagionali sulla percezione delle vibrazioni.

### 1. Introduzione

Il passaggio di convogli ferroviari all'interno delle gallerie produce sia rumore sia vibrazioni (Heckl et al., 1996). Mentre il primo è tipicamente causato da vibrazioni strutturali che trovano origine nell'interazione tra gli elementi del sistema rotaia-ruota-carrozza, le seconde sono soprattutto generate dalle irregolarità del contatto ruota-rotaia (Clouteau et al., 2001). Il cambiamento delle caratteristiche di peso e velocità di transito dei convogli e la naturale usura dell'armamento ferroviario possono tradursi in un incremento dei livelli di rumore e vibrazioni percepiti. Questi ultimi possono anche subire una variazione negli anni a seguito di modifiche nell'interazione tra galleria e terreno

circostante (Gupta et al., 2009). Da questo punto di vista, particolare importanza riveste il ruolo giocato sia dalla posizione della falda sia dalle condizioni di saturazione degli strati di terreno sovrastanti la galleria. Un recente studio condotto con riferimento alle linee storiche della metropolitana milanese (Rigoni, 2021) ha mostrato come i movimenti dell'acquifero superficiale possano tradursi in un incremento dei livelli di vibrazione attesi, specialmente qualora la falda si trovi al di sotto del piano delle rotaie. Tale configurazione risulta essere particolarmente gravosa per le gallerie sostenute da diaframmi verticali che caratterizzano la linea M1. In questo caso, parte della vibrazione trasmessa al terreno può rimanere intrappolata nel volume delimitato dal tetto di falda e dalla galleria. L'energia restituita alla struttura ne aumenta l'oscillazione e, quindi, l'accelerazione percepita in superficie. Insieme agli scambi idrici a piano campagna, la superficie piezometrica contribuisce anche a variare il profilo di saturazione degli strati sopra falda, modificandone la risposta dinamica. Nei terreni a grana prevalentemente grossolana, quali quelli riscontrabili in superficie lungo i tracciati della metropolitana milanese, al diminuire del grado di saturazione il modulo di taglio alle piccole deformazioni,  $G_0$ , manifesta un comportamento non monotono (Qian et al., 1993; Oh & Vanapalli, 2014), dipendente dalla fabric (Mancuso et al., 2002) e dal percorso idraulico (Khosravi et al., 2016). Speculare è l'andamento del rapporto di smorzamento, tipicamente espresso come una funzione decrescente del rapporto  $G/G_0$  (Ishibashi & Zhang, 1993). Il confronto dei risultati di due campagne di indagini geofisiche condotte a Milano a marzo 2012 e aprile 2021 evidenzia un cambiamento nella risposta dinamica degli strati di terreno sopra falda. La variazione osservata è interpretabile come conseguenza di diversi profili di saturazione nei due diversi momenti di indagine, coerenti con le variazioni stagionali del regime idrologico cittadino. Sulla base dei profili desunti dalle prove, è stato costruito un modello bidimensionale agli elementi finiti sul quale sono state condotte analisi dinamiche volte a fornire una predizione dei livelli di vibrazione attesi nelle due circostanze.

## **2. Materiali e modelli**

### *2.1 Prospezioni geofisiche*

I risultati delle indagini geofisiche delle due campagne condotte a marzo 2012 e aprile 2021 nel medesimo luogo sito in Milano sono mostrati in Figura 1. In particolare, la figura riporta i profili misurati delle onde di taglio e di compressione,  $V_{sv}$  e  $V_p$ , la densità,  $\rho$ , i valori dinamici medi del coefficiente di Poisson,  $\nu$ , della rigidezza a taglio,  $G$  e del rapporto di smorzamento,  $D$ . Le tecniche utilizzate nelle indagini hanno compreso: tomografia sismica in onde P, prospezioni M.A.S.W. (Multistation Analysis of Surface Waves), RE.MI. (Refraction Microtremor) e HVSR (o Tecnica di Nakamura). L'analisi delle piezometrie tra gli anni 2012 – 2021 ha permesso di identificare le variazioni medie annuali della posizione della falda, che mantiene una soggiacenza compresa fra 12.0 e 14.0 m. La ricostruzione stratigrafica del sito in esame (Fig. 2a) restituisce tre strati di materiale a grana grossa e localizza la posizione dell'acquifero al massimo alla base dello strato intermedio di ghiaia. Vista la scarsa capacità di ritenzione di questo materiale, si può ritenere che, almeno al di sopra dei 12 m, le differenze riscontrate nei profili dei parametri meccanici, desunti dalle prove geofisiche, possano essere spiegate con un diverso grado di saturazione e, in particolare, con un profilo mediamente più saturo nel 2021. L'interpretazione è anche confermata dall'analisi delle pluviometrie, che restituiscono un periodo precedente all'esecuzione delle prove più piovoso nell'aprile 2021 rispetto al marzo 2012 (la pioggia totale cumulata nel mese anteriore misurata da un pluviometro vicino al sito di indagine ammonta a 47.8 mm e 18.2 mm nel 2021 e 2012 rispettivamente).

### *2.2 Modellazione numerica*

I profili desunti dalle prove geofisiche (Fig. 1) sono stati implementati in un modello bidimensionale agli elementi finiti le cui caratteristiche sono riportate in Figura 2. Dal momento che la falda nelle due

situazioni riprodotte si trova a profondità comparabili, al fine di considerare la situazione di maggiore gravosità per il sistema, nel modello numerico si è fatto coincidere il tetto della falda con la base delle paratie della galleria, ossia con l'interfaccia tra lo strato intermedio di ghiaia e quello sottostante di sabbia. Per l'analisi di propagazione delle vibrazioni indotte dal passaggio di treni in sotterraneo, si è adottata la sezione di galleria riportata nel particolare di Figura 2c. La geometria e la collocazione della galleria, così come l'armamento, ricalcano le caratteristiche della linea M1 della metropolitana di Milano. I materiali sono modellati come mezzi elastici lineari con smorzamento viscoso alla Rayleigh. Le proprietà fisico-meccaniche del calcestruzzo e dell'armamento ferroviario sono state assegnate in base alle normative tecniche e a informazioni desunte da studi pregressi. Per il calcestruzzo della galleria si sono adottati densità, modulo elastico e coefficiente di Poisson rispettivamente pari a  $2.5 \text{ Mg/m}^3$ ,  $2.5 \cdot 10^4 \text{ MPa}$  e  $0.2$ . Per il ballast e le traversine in legno le stesse quantità valgono  $1.3$  e  $1.0 \text{ Mg/m}^3$ ,  $3.0 \cdot 10^2$  e  $9.4 \cdot 10^2 \text{ MPa}$ ,  $0.3$  e  $0.1$ . La curva smorzamento – frequenza del calcestruzzo e del ballast è stata calibrata in maniera tale da avere rapporti di smorzamento non maggiori rispettivamente del  $5.0 \%$  e  $3.0 \%$  nell'intervallo di frequenze di interesse per la risposta dinamica del sistema ( $10 - 80 \text{ Hz}$ ). Il passaggio del convoglio è stato modellato nel dominio del tempo, come storia di carico verticale direttamente applicato alla traversina in corrispondenza dell'impronta delle rotaie (Figura 2c). Il carico è ottenuto come sovrapposizione di due componenti: una statica data dal peso totale del treno, e una dinamica, desunta dallo spettro di carico riportato dalla norma UNI 11389-1:2011 (Fig. 3). Trattandosi in realtà di un meccanismo di trasmissione tridimensionale, si ritiene che la storia imposta alla componente verticale di carico sul modello bidimensionale abbia effetti più gravosi di quanto avvenga nella realtà. Il treno, che si è supposto passare attraverso la sezione di indagine ad una velocità di  $50 \text{ km/h}$ , è composto da 6 carrozze per una lunghezza complessiva di  $107.0 \text{ m}$ . Il carico statico trasmesso al binario è di  $160 \text{ kN/asse}$ . Il modello è stato discretizzato con 21245 elementi isoparametrici a 4 nodi, le cui dimensioni sono state fissate a seguito di analisi di sensitività preliminari. L'estensione del dominio indagato è stata determinata in maniera tale da avere una buona risoluzione spaziale sulla propagazione del moto indotto dal passaggio del convoglio. L'uso ai contorni di smorzatori viscosi, il cui smorzamento viene automaticamente calcolato a partire dal modulo elastico e dal coefficiente di Poisson degli elementi contigui, garantisce l'assenza di riflessioni (Figura 2b). Dopo l'applicazione delle condizioni geostatiche, la risposta del sistema al passaggio del treno è stata modellata in campo dinamico. Le analisi sono state svolte in condizioni drenate, a seguito dei risultati di analisi preliminari accoppiate, che hanno restituito variazioni di pressione trascurabili dati i coefficienti di conducibilità idraulica medi degli strati attraversati dalla sollecitazione.

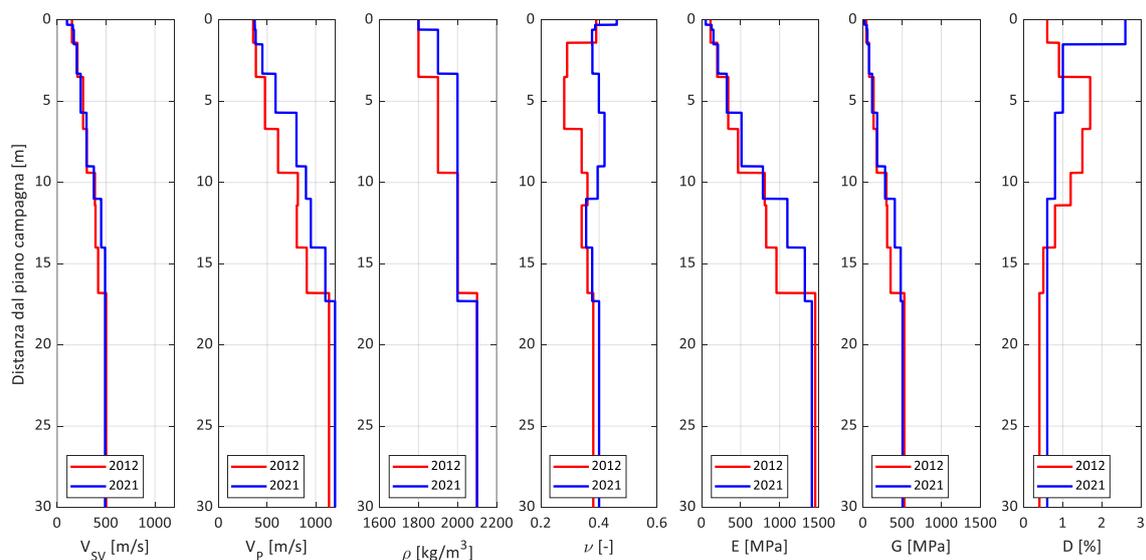


Fig 1. Risultati delle indagini geofisiche condotte a marzo 2012 e aprile 2021 a Milano.

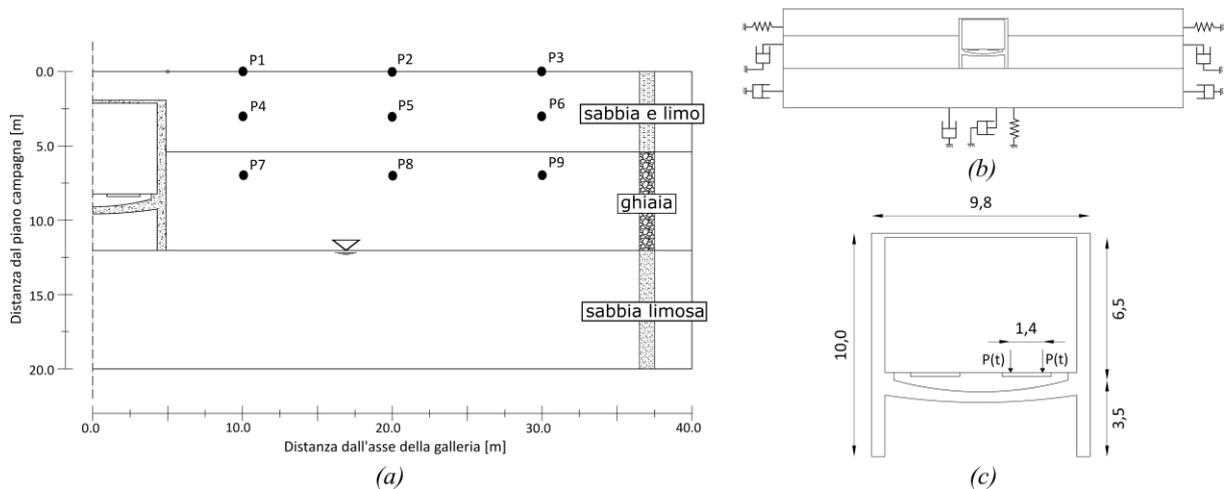


Fig 2. (a) Dimensioni del modello con stratigrafia. (b) Condizioni al contorno. (c) Particolare della galleria con il carico trasmesso dal treno.

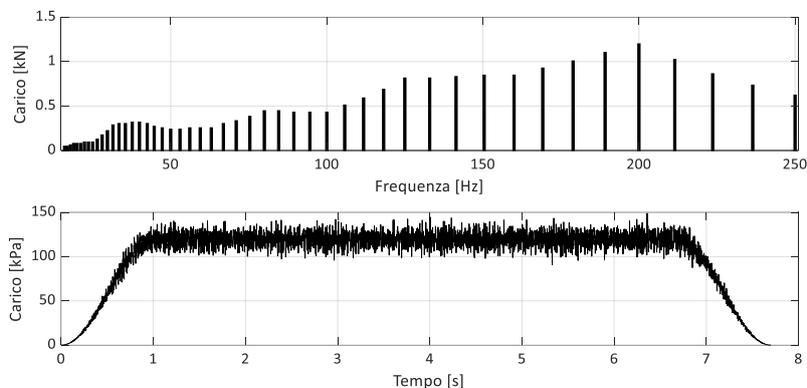


Fig 3. Spettro della componente dinamica del carico (UNI 11389-1:2011) e storia di carico applicata.

### 3. Risultati

Alcuni dei risultati delle simulazioni sono riportati di seguito in termini di spettri di Fourier (Fig. 4 e Fig. 5), valore quadratico medio e livelli complessivi di accelerazione ponderata (Fig. 6) nei punti di controllo di Figura 2a. Gli spettri di Fourier (Fig. 4 e Fig. 5) mettono in luce come, sia per il 2012 che per il 2021, l'ampiezza di entrambe le componenti dell'accelerazione subisca una generale amplificazione nella direzione di propagazione verso il piano campagna, Tale incremento non è omogeneo ma selettivo, concentrando l'energia dell'oscillazione alle frequenze al di sotto dei 40 Hz, con un picco per le accelerazioni verticali intorno ai 20 Hz. Vale la pena notare che la geometria della struttura in sotterraneo contribuisce all'amplificazione in superficie, che risente dell'oscillazione delle pareti e del tetto della galleria. Per la componente orizzontale (Fig. 5), il caso 2012 appare essere ovunque più gravoso in termini di ampiezze. Minori sono invece le differenze riscontrate sulla componente verticale dell'accelerazione (Fig. 4), fatta eccezione dei punti di controllo P1 e P3 per i quali i profili del 2021 sembrano dare effetti più gravosi. Tali differenze possono essere ricondotte ai diversi rapporti di impedenza tra gli strati nei due scenari riprodotti, i quali possono produrre diversi fenomeni di riflessione e rifrazione delle onde generate dal segnale all'interno della galleria. Con il crescere della distanza dalla stessa, lo smorzamento determina una diminuzione dell'ampiezza dell'oscillazione e della frequenza massima alla quale il moto può propagarsi. L'analisi dell'andamento spaziale del RMS del segnale calcolato (Fig. 6) consente di confrontare con maggiore immediatezza la risposta del sistema nei due scenari, confermando una diminuzione del contenuto energetico del segnale con la profondità e con la distanza dall'asse della galleria. Adottando

l'approccio della UNI 9614:1990, dagli spettri sopra discussi sono stati desunti i livelli complessivi di accelerazione ponderata, con il fine di ottenere una misura della percezione della vibrazione. Per oscillazioni che si propagano lungo l'asse passante per la schiena dell'individuo (curva di ponderazione A prevista dalla medesima norma), i risultati sono riportati in Figura 6 per i punti di controllo posti in superficie e a una profondità di 3.0 m dal piano campagna, quota di posa di fondazioni o piani interrati degli edifici nell'area. L'andamento è in linea con quanto discusso in precedenza. Le maggiori differenze tra i due casi si riscontrano per la componente orizzontale dell'accelerazione, per la quale si osservano variazioni di 2-3 dB in superficie. In tutti i casi, i livelli calcolati rimangono inferiori al valore minimo della soglia massima di tollerabilità, 71 dB, prevista dalla UNI 9614:1990 per le aree critiche.

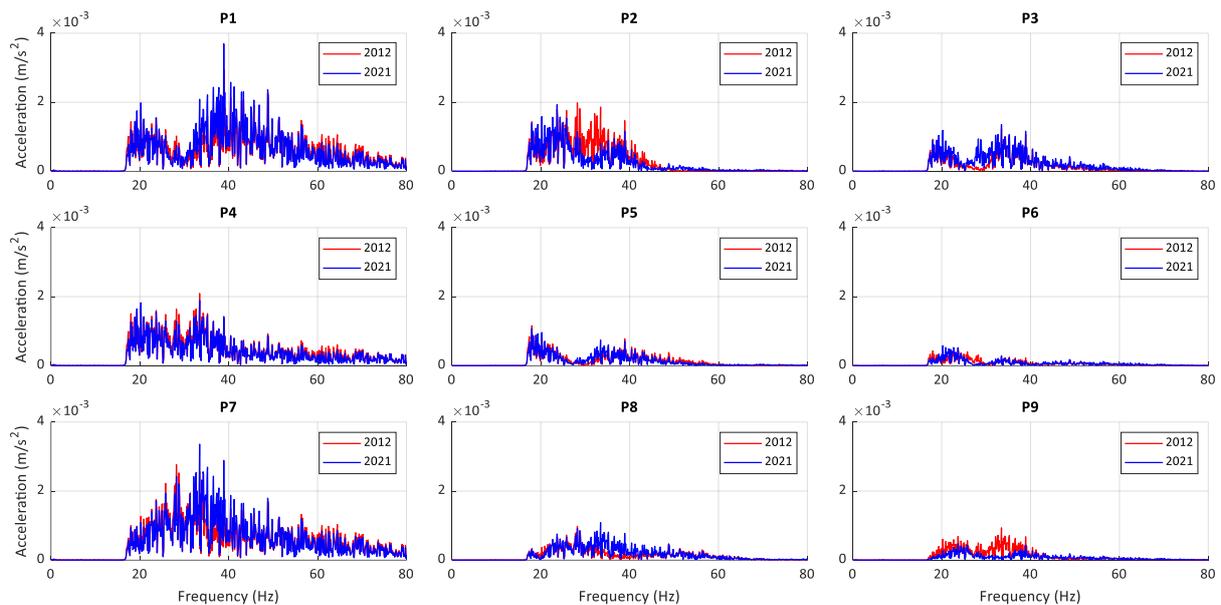


Fig 4. Spettri di Fourier della componente verticale dell'accelerazione nei punti di controllo di Fig. 2a.

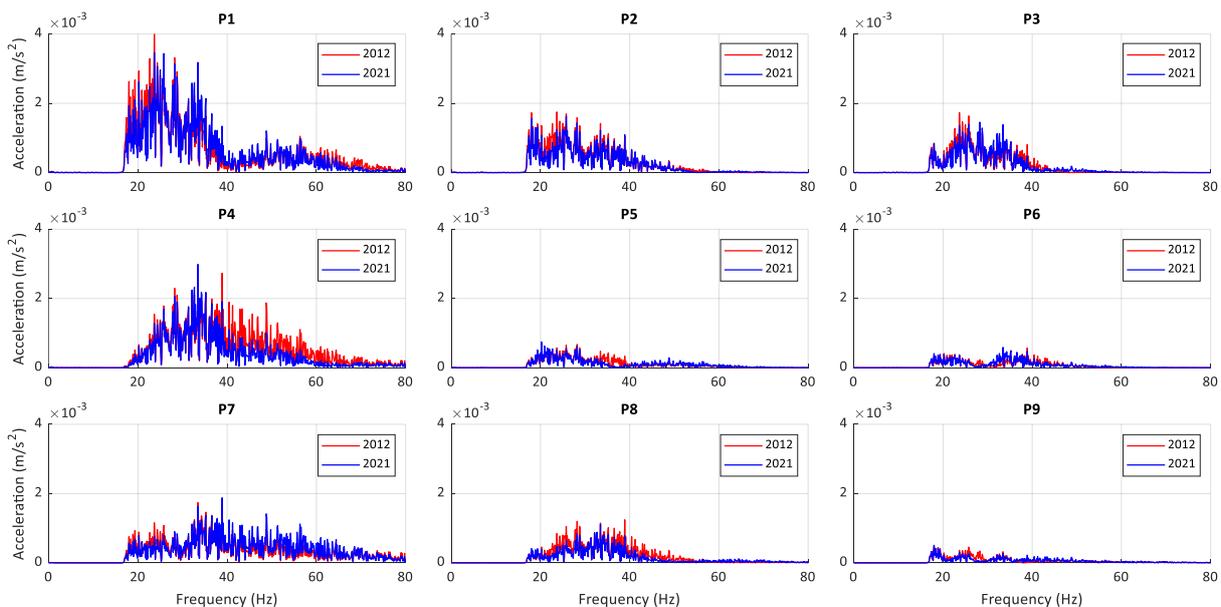


Fig 5. Spettri di Fourier della componente orizzontale dell'accelerazione nei punti di controllo di Fig. 2a.

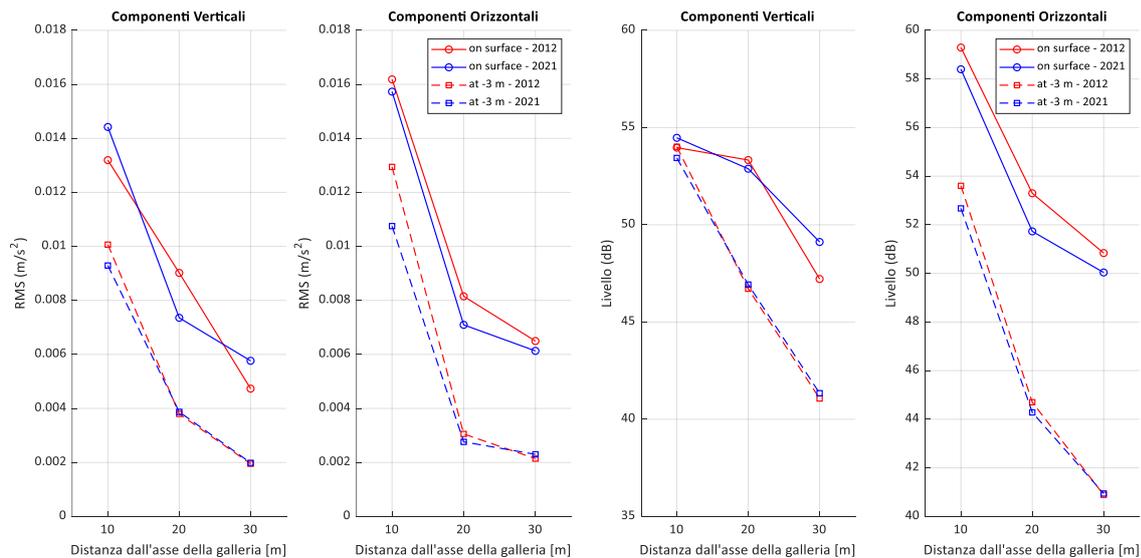


Fig 6. RMS e livelli di accelerazione ponderata (UNI 9614:1990), nei punti di controllo di Fig. 2a.

#### 4. Conclusioni

Le analisi numeriche svolte erano mirate a una valutazione preliminare dell'influenza della variazione stagionale delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni soprafalda in funzione del regime idrologico, così come campionate da prove geofisiche ripetute a marzo 2012 e aprile 2021 nello stesso sito di Milano. Seppur i livelli di accelerazione ponderata predetti sono simili nei due casi, si è messa in evidenza la variazione nella risposta dinamica del sistema, derivante da un cambiamento dei rapporti di impedenza misurati e simulati, che può essere enfatizzata qualora i profili di grado di saturazione e suzione diventassero più marcatamente diversi.

#### Bibliografia

- Clouteau D., Degrande G., Lombaert G. (2001). "Numerical Modelling of Traffic Induced Vibrations", *Meccanica*, 36, 401-420.
- Gupta S., Stanus Y., Lombaert G., Degrande G. (2009). "Influence of tunnel and soil parameters on vibrations from underground railways", *Journal of Sound and Vibration*, 327, 70–91.
- Heckl M., Hauck G., Wettschureck R. (1996). "Structure-borne sound and vibration from rail traffic", *Journal of Sound and Vibration*, 193 (1), 175-184.
- Ishibashi I., Zhang X. (1993), "Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay", *Soils and Foundation*, 33(1), 182-191
- Khosravi A., Rahimi M., Shahbazan P., Pak A., Gheibi A. (2016). "Characterizing the variation of small strain shear modulus for silt and sand during hydraulic hysteresis", Proc. 3rd Eu. Conf. On Unsaturated Soils, Paris.
- Lombaert G., Degrande G. (2009). "Ground-borne vibration due to static and dynamic axle loads of InterCity and high-speed trains", *Journal of Sound and Vibration*, 319, 1036–1066.
- Mancuso C., Vassallo R., d'Onofrio A. (2002). "Small strain behaviour of a silty sand in controlled – suction resonant column – torsional shear tests", *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 22-31.
- Oh T. O., Vanapalli S. K. (2014). "Semi-empirical Model for Estimating the Small-Strain Shear Modulus of Unsaturated Non-plastic Sandy Soils", *Geotechnical and Geological Engineering*, 32, 259-271.
- Qian X., Gray D.H., Woods R.D. (1993). "Voids and granulometry: effects on shear modulus of unsaturated sands", *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(2), 295-314
- Rigoni F. (2021). Effect of water table's depth in subway-induced vibrations: case of Line M1 in Milan. MSc Thesis. Milano.
- UNI 9614:1990. *Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo.*
- UNI 11389-1:2011. *Valutazione del comportamento statico e dinamico di sistemi di armamento ferroviario.*