

ANALISI SPERIMENTALE E SIMULAZIONE FEM DEL COMPORTAMENTO VIBRAZIONALE DELLA NUOVA METROPOLITANA LEGGERA DI CAGLIARI

Coni M, professore associato, Università degli Studi di Cagliari, mconi@unica.it
Ernesto Porcu, ingegnere, Dirigente Capo Servizio Tecnico FdS, ernestoporcu@tiscali.it
Silvia Portas, Dottore di Ricerca, Università degli Studi di Cagliari, sportas@unica.it

ABSTRACT

Nella memoria viene analizzato il comportamento vibrazionale della Nuova Metropolitana Leggera di Cagliari e condotta una valutazione di alcuni differenti interventi di mitigazione.

Un particolare sito sperimentale è stato monitorato prima della costruzione della nuova linea metropolitana, realizzata attraverso l'adeguamento di una preesistente ferrovia a scartamento ridotto.

Lo studio, dapprima condotto sperimentalmente, ha compreso una serie di misurazioni lungo allineamenti perpendicolari alla linea ferrata, per circa 45 m., in corrispondenza del passaggio dei convogli ferroviari.

Ciò ha permesso di costruire il profilo di attenuazione delle vibrazioni e validare il modello agli elementi finiti, utilizzato nella seconda fase della ricerca per simulare il fenomeno.

Il modello così validato è stato successivamente testato, modificando l'input della forzante generata dai nuovi convogli e trasmessa al terreno dal nuovo armamento.

I risultati hanno confermato il migliore comportamento della nuova metropolitana e, in modo meno banale, hanno permesso di quantificare l'attitudine di 4 tecniche differenti per lo smorzamento delle vibrazioni.

Il fenomeno è stato poi studiato parametricamente modificando gli input del modello quali materiali, potenza degli strati e configurazione al contorno. Infine, vengono illustrati i risultati del monitoraggio condotto in fase di costruzione e collaudo dell'opera.

KEYWORDS: vibrazioni, ferrovia, metropolitana, simulazione FE

1. INTRODUZIONE

La realizzazione delle linee metropolitane comporta, quasi sempre, la necessità di risolvere gli effetti negativi prodotti dal passaggio dei convogli. Numerose sono le situazioni di conflitto che emergono con le autorità locali e le popolazioni residenti e che accompagnano costantemente l'entrata in esercizio delle linee. In ambito urbano gli impatti sono strettamente legati a quattro aspetti distinti: il rumore, l'impatto visivo, la frattura del territorio urbanizzato e l'interferenza con il traffico veicolare.

Ciascuna di queste componenti può essere enfatizzata dalle scelte plano-altimetriche e dalle caratteristiche assegnate all'infrastruttura. Ad esempio, sezioni in trincea condizionano fortemente la continuità territoriale, pur risultando meno impattanti negli effetti acustici e visivi. Uno degli effetti che meglio possono essere controllati con un'opportuna scelta della sezione è la propagazione delle vibrazioni nelle aree adiacenti

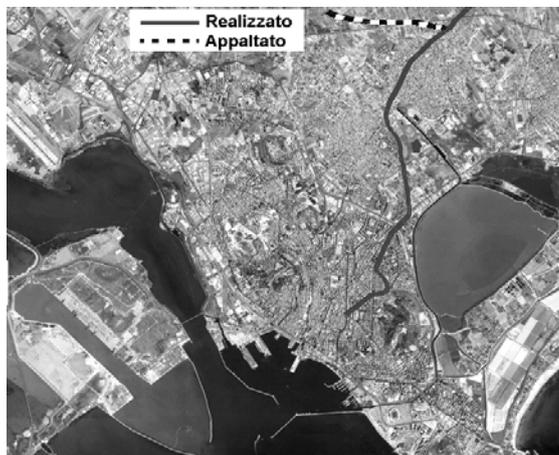


Figura 1 - Il tronco di Metropolitana

l'infrastruttura. Questo aspetto, spesso trascurato per i limitati effetti lesivi, può assumere in alcuni casi specifici rilevante significatività.

Nella memoria si è cercato di mettere in evidenza come una ponderata scelta dell'andamento plano-altimetrico e della sezione possa rappresentare un importante elemento di mitigazione nei confronti del campo vibrazionale. Tuttavia occorre considerare che l'andamento planimetrico è vincolato dalla necessità di attraversare aree urbane ad alta densità di popolazione per acquisire un più ampio bacino d'utenza. Tali aree, prive di adeguati spazi per accogliere tracciati indipendenti nel loro sviluppo, impongono il riutilizzo e la riqualificazione delle linee ferrate preesistenti. È questo il caso del primo tronco di metropolitana leggera della città di Cagliari, in esercizio dal marzo 2008. Il tracciato attraversa alcune zone centrali della città ed è interamente ricavato all'interno del sedime della originaria linea ferrata a scartamento ridotto delle Ferrovie della Sardegna.

Lo studio è stato inizialmente condotto sperimentalmente, attraverso la misurazione delle vibrazioni lungo allineamenti perpendicolari alla linea ferrata, in corrispondenza del passaggio di convogli ferroviari di differenti caratteristiche. Il sito è stato scelto in modo tale da ottenere risposte omogenee in assenza di edifici, di opere sotterranee o di disomogeneità geologiche che potessero alterare la risposta del sito alle oscillazioni meccaniche e, in tal modo, rendere complessa l'interpretazione delle misure. La fase successiva è stata quella di simulare il fenomeno mediante modellazione agli elementi finiti, validata sulla base dei risultati delle misurazioni sperimentali. Il modello FEM è stato successivamente studiato mediante una serie di analisi parametriche ottenute modificando le caratteristiche geometriche del sito e le caratteristiche meccaniche dei materiali. Ulteriori analisi sono state condotte su differenti tecniche per lo smorzamento delle vibrazioni: interposizione di strati smorzanti; introduzione di discontinuità nei materiali quali realizzazione di trincee o inserimento di masse rigide. Infine, vengono illustrati i risultati del monitoraggio sperimentale, ante e post operam, condotto in occasione dei lavori per la nuova infrastruttura.

2. ANALISI SPERIMENTALE

Durante la prima fase, le prove sperimentali sono state finalizzate a quantificare il fenomeno e sviluppare un modello FE, capace di riprodurre le caratteristiche principali. I primi test sono stati condotti nella primavera del 2000, nella tratta compresa tra la fermata “Vesalio” e quella “Centro Commerciale Marconi”, mostrata nella seguente immagine.



Figura 2 - Sito sperimentale

Il tratto di linea scelto ha un andamento rettilineo a semplice binario, con il piano del ferro a circa 1.00 m dal piano di campagna. L’armamento è costituito da una lunga rotaia saldata 36 UNI con attacchi elastici su traverse in c.c.a. e ballast ordinario, in buone condizioni di manutenzione. Sono state eseguite 6 rilevazioni, con differenti convogli a diversa velocità. Ulteriori misurazioni sono state effettuate a “vuoto” per valutare il campo vibrazionale di fondo e, mediante battute sulla testa della rotaia, per valutare le perturbazioni generate da un evento impulsivo.

	evento	Peso t.	Velocità km/h
A Misura 1	a vuoto	0	0
B Misura 2	Convoglio Ade95	32	50
C Misura 3	Convoglio Ade95+Ade12+Rpe110	77	37
D Misura 4	Impulso sulla rotaia	nd	Nd
E Misura 5	Convoglio Ade95	32	27
F Misura 6	Convoglio Ade02	29	54
G Misura 7	Convoglio Ade02	29	48
H Misura 8	Convoglio Ade02	29	47

Tabella 1 - Misure effettuate durante la prima campagna di test

La perturbazione vibrazionale è stata registrata in 10 posizioni differenti, perpendicolarmente alla linea ferrata su una sezione di 45 m, a partire da 1.80 m dalla rotaia esterna. La catena di misura è costituita da 14 geofoni (Mark L10AR) e dall’analizzatore Aben Terraloc Seismic System. Lo strumento è stato impostato per acquisire una serie di 1024 valori su un intervallo di 5 secondi.

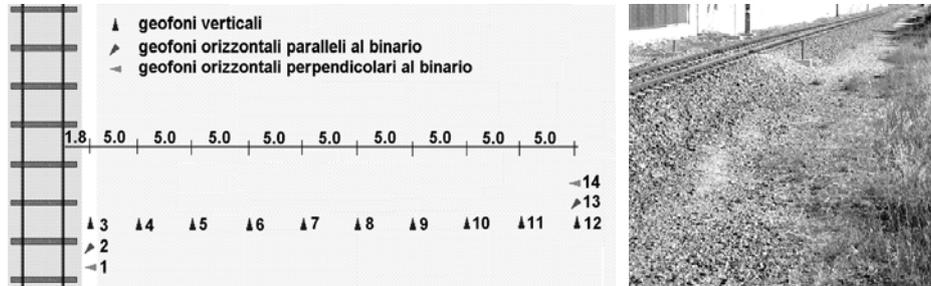


Figura 3 - Posizione dei geofoni e particolare dell'armamento

3. SIMULAZIONE FEM

La simulazione è stata condotta attraverso un modello agli elementi finiti bidimensionale di una sezione verticale del sito sperimentale larga 60.0 m e alta 10.0 m. Le informazioni geologiche disponibili indicavano la presenza di uno strato superficiale di potenza variabile tra 2.0 e 4.0 m costituito da materiali di riporto scarsamente addensati. L'orizzonte sottostante risulta costituito da sabbie limose ed argillose mediamente addensate. Nella schematizzazione del modello è stato considerato uno strato superficiale di altezza costante pari a 3.0 m disposto su uno strato più profondo alto 7.0 m. La seguente immagine mostra la mesh del modello utilizzato.

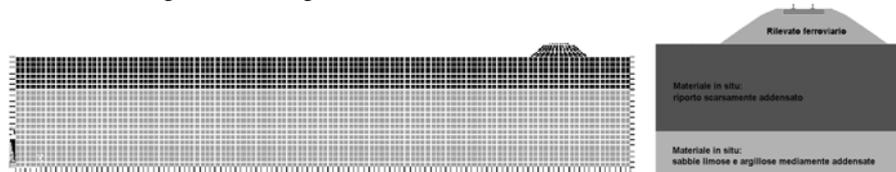


Figura 4 - La mesh del modello FE

Su un lato del modello è stato disposto un rilevato ferroviario di dimensioni analoghe a quello presente in situ, alto 1.0 m e scarpa 2/3, distante 4.0 m dal bordo del modello. Anche l'armamento è stato modellato considerando lo scartamento ridotto pari a 0.95 m. Per quanto concerne i vincoli del modello, si sono ipotizzati spostamenti impediti in direzione orizzontale nei margini verticali e in direzione verticale nel bordo inferiore. Per riprodurre la continuità del modello sono stati disposti elementi smorzanti capaci di simulare un assorbimento totale dell'energia vibrazionale sui confini laterali del modello. Gli elementi tipo brick utilizzati hanno un dimensione massima di 0.50 m. Ciò pone un limite alla capacità del modello di rappresentare le frequenze maggiori, ma consente di ridurre i tempi computazionali propri di un'analisi armonica, soprattutto in presenza di materiali non lineari (elasto-plastici) e dotati di capacità dissipative. La seguente tabella mostra i valori di input del modello relativi alle caratteristiche dei materiali.

Una serie di analisi armoniche sono state sviluppate con il modello descritto così da determinare la sua risposta ad una sollecitazione variabile nel tempo con legge sinusoidale di ampiezza A e pulsazione ω .

	Mod. elasticità MPa E	Coesione MPa c	Attrito interno ° φ	Smorzamento % ζ
Strato superficiale	50	0.2	26	10 - 15 - 20
Strato profondo	100	0.5	28	10 - 15 - 20
Rilevato ferroviario	250	0.6	32	10 - 15 - 20

Tabella 2 - Caratteristiche dei materiali inserite nel modello FE

Il valore di A è stato assunto pari a 1.0 mm sulla sommità delle rotaie. Nelle differenti analisi condotte è stato studiato in modo parametrico l'effetto di uno smorzamento crescente del terreno pari a 10%, 15 e 20%.

Il modello è stato calibrato sulla base dei dati sperimentali, confrontando i valori di spostamento verticale ricavati alle varie distanze dal binario per le seguenti frequenze: 21, 31, 41, 51 e 61 Hz. In particolare la calibrazione è stata condotta minimizzando gli scarti tra il profilo di attenuazione della velocità in direzione trasversale ricavato tramite la simulazione FE e quello rilevato sperimentalmente.

4. RISULTATI DEI RILIEVI E DELLA SIMULAZIONE FE

I dati sperimentali acquisiti in formato digitale sono stati successivamente elaborati in ambiente Matlab® per restituire i risultati in termini di velocità di spostamento e, attraverso derivazione ed integrazione, in termini di accelerazione e di spostamento. Le successive immagini mostrano l'andamento temporale di due differenti eventi caratterizzati da forzanti diverse sia come intensità sia come frequenza.

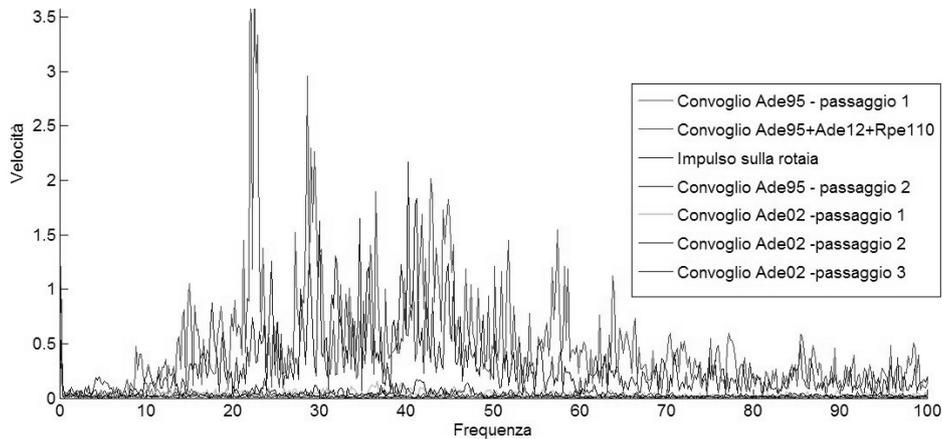


Figura 5 - Spettri rilevati per diversi convogli a 21.8 m

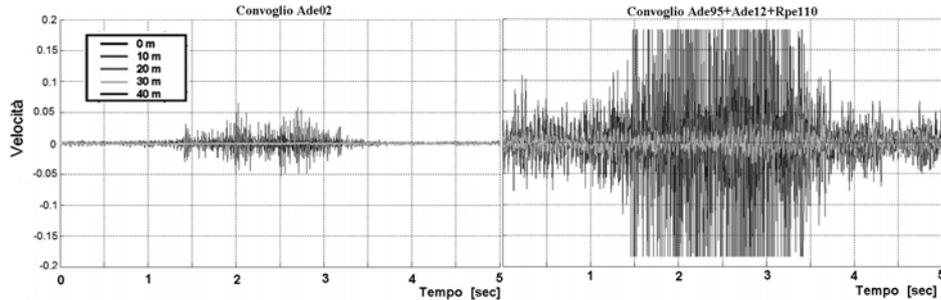


Figura 6 - Velocità di vibrazione a differenti distanze per due differenti convogli

Le analisi sono state ripetute nel dominio delle frequenze per mettere in evidenza le principali componenti in frequenza. Queste sono state registrate a 14 Hz, 22 Hz, 30 Hz e nel range 41-46 Hz, nel caso del convoglio Ade95+Ade12+Rpe110 (peso 77 t, velocità di transito 37 km/h) (Fig.6). Nel caso del passaggio del convoglio Ade02 (peso 29 t, velocità di transito 48 km/h) le frequenze con ampiezze maggiori si verificano tra 21 e 25 Hz e tra 35 e 37 Hz. Nel caso di vibrazioni libere ottenute mediante la percussione della rotaia con una pesante massa metallica, sono state evidenziate tra i 3 e i 10 Hz. In tale campo si concentrano le frequenze proprie del sistema e che meglio si propagherebbero se le forzanti avessero significative componenti comprese in questo range.

Un risultato immediato, derivante dalla campagna di misurazione, è quello relativo al profilo di attenuazione in direzione trasversale alla linea ferrata. L'immagine seguente mostra come il valore di picco si attenui in funzione della distanza dalla sorgente.

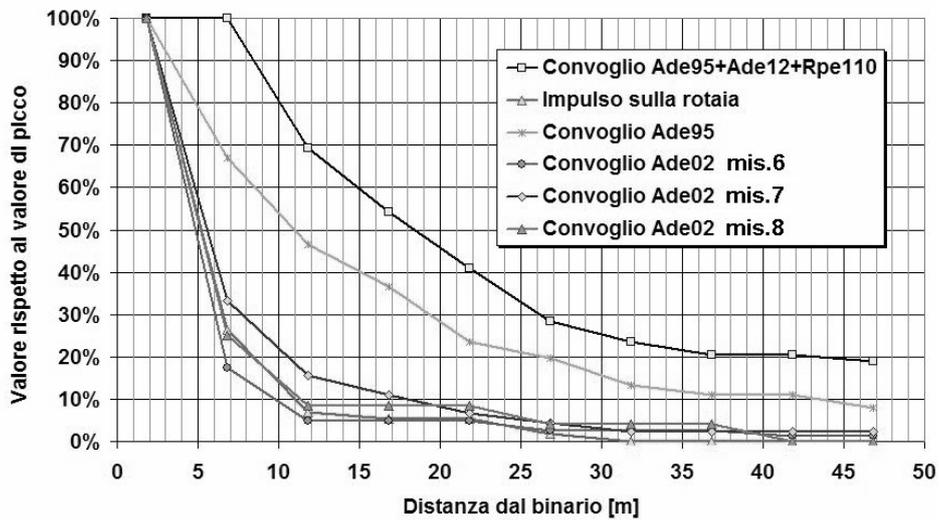


Figura 7 - Attenuazione trasversale della velocità per differenti passaggi dei convogli

Risulta evidente la ripetibilità della misurazione e dei profili di attenuazione, a parità di velocità e peso del convoglio. All'aumento del peso del convoglio corrisponde un incremento del contenuto energetico della forzante senza che si modifichino le frequenze. Il contenuto energetico e le frequenze di vibrazione si riducono al diminuire della velocità. Quest'ultimo aspetto implica una differente capacità di attenuazione del mezzo che risulta tanto maggiore quanto più alta è la frequenza. Infatti, la perturbazione a frequenze più alta vengono attenuate maggiormente, mentre quelle a basse frequenza possono propagarsi a distanze maggiori, trasportando il loro contenuto energetico. Pertanto la forma dei profili di attenuazione dipende essenzialmente da 4 aspetti: dalle caratteristiche dissipative del mezzo, dalla frequenza della forzante, dalla sua intensità e dalla distanza. La frequenza della forzante o meglio lo spettro di frequenze della forzante non è univocamente dato per ciascun convoglio ma dipende dalla velocità di percorrenza. L'analisi dei dati rilevati ha fornito come migliore approssimazione la seguente espressione:

$$PA = (11.808 - 0.189V)D^{[0.00176V - 1.1]}$$

PA = profilo di attenuazione rispetto al valore di picco;

V = velocità del convoglio [km/h]

D = distanza dalla rotaia [m]

Dalla formula risulta evidente che ad una data distanza D sorgente-ricevitore, le onde ad alta frequenza sono più attenuate di quelle a bassa frequenza e il loro contributo risulta sempre minore all'aumentare di D.

I risultati dell'analisi FE hanno permesso di mettere in evidenza le specifiche forme di vibrazione per le differenti frequenze. Le seguenti immagini mostrano quelle ricavate a 21 Hz, 31 Hz e 41 Hz. Ciascun modo è caratterizzato da una diversa risposta in termini di intensità ma anche nella configurazione geometrica dei massimi e minimi della perturbazione.

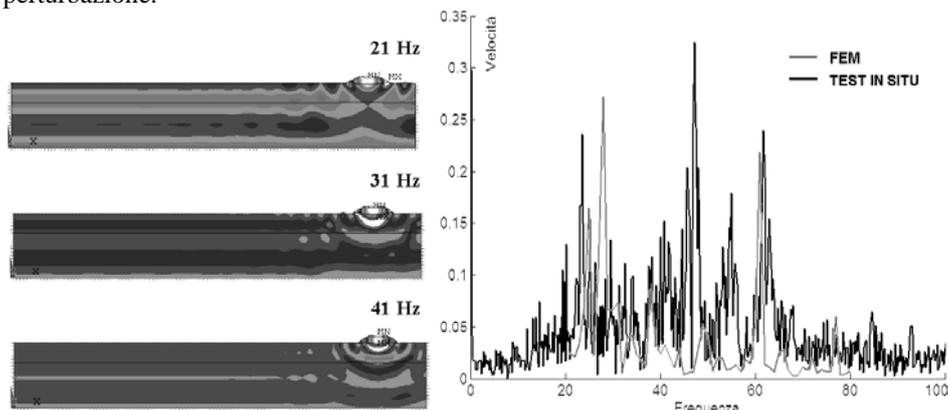


Figura 8 - Forme modali e confronto tra gli spettri della analisi sperimentale e FE

Tanto più le frequenze delle forzanti sono prossime alle frequenze proprie del sistema tanto maggiore è la risposta del modello. Ciò è chiaramente riconoscibile negli spettri di frequenza, dove la presenza di picchi evidenzia la presenza di risonanze. La seguente

immagine mostra il confronto tra il profilo di attenuazione registrato sperimentalmente (denso di componenti spettrali) e quello ricavato dalla modellazione FE per diverse frequenze ottenuto attraverso un'analisi armonica. La sommatoria delle diverse componenti presenti nella forzante consente, caso per caso, la ricostruzione del profilo in corrispondenza di ciascun specifico transito. Lo smorzamento che rende meglio conto dei dati è pari al 11%.

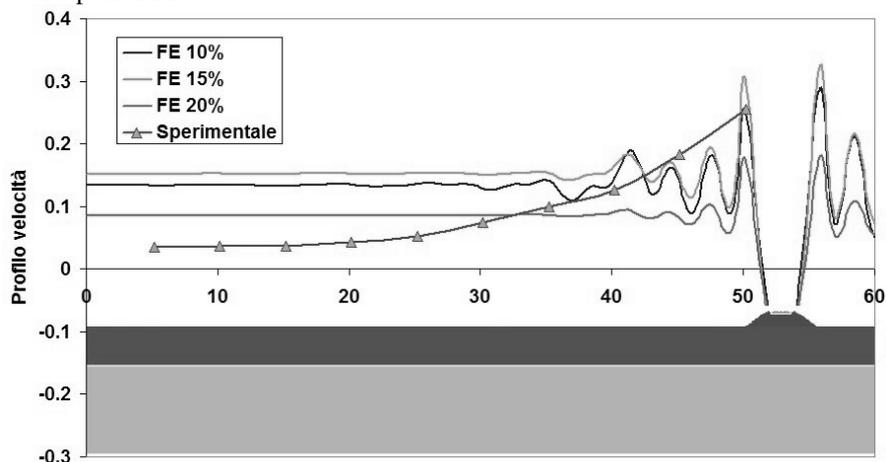


Figura 9 - Profili di velocità misurati e derivanti dalla simulazione FE

Il modello è stato successivamente utilizzato per analizzare l'effetto di quattro possibili soluzioni per la mitigazione degli effetti vibrazionale:

- realizzazione di discontinuità fisiche, mediante l'esecuzione di trincee di diversa profondità (0.0 m, 1.0 m, 2.0 m) e distanza dalla linea ferrata (0.0 m, 1.0 m, 2.0 m);
- inserimento di elementi massicci inerziali, mediante diaframmi di conglomerato cementizio di dimensioni crescenti (0.0 m, 1.0 m, 2.0 m);
- realizzazione di strati smorzanti, realizzato attraverso la posa in opera di materiali smorzanti di differente spessore e capacità dissipativa (0.0 m, 0.50, 1.0 m).

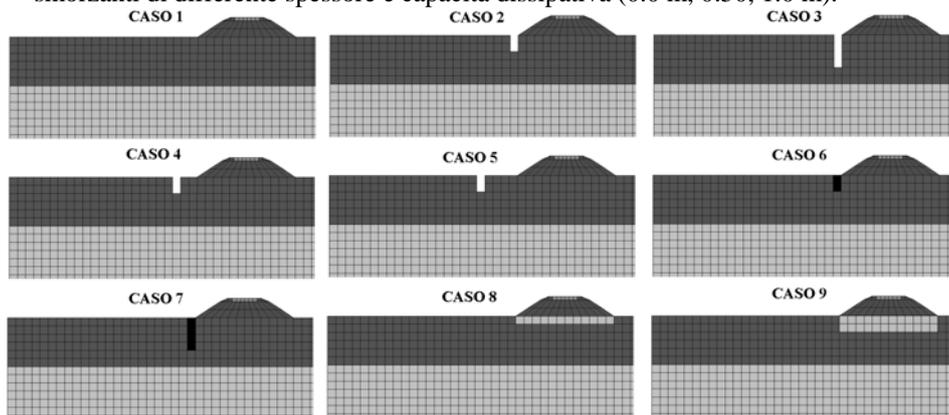


Figura 10 - Gli interventi di mitigazione considerati nella simulazione FE

I risultati di questa analisi, mostrati nelle seguenti immagini, sono risultati estremamente variabili in funzione della frequenza considerata. In genere è difficile derivare risultati generalizzabili per le differenti situazioni. Il materasso smorzante ha benefici migliori per frequenze maggiori, mentre l'inserimento di un elemento inerziale ha effetti positivi al diminuire della frequenza di vibrazione. La realizzazione di trincee ha un effetto comunque positivo più marcato alle basse frequenze e tanto migliore quanto più sono realizzate in vicinanza della sorgente.

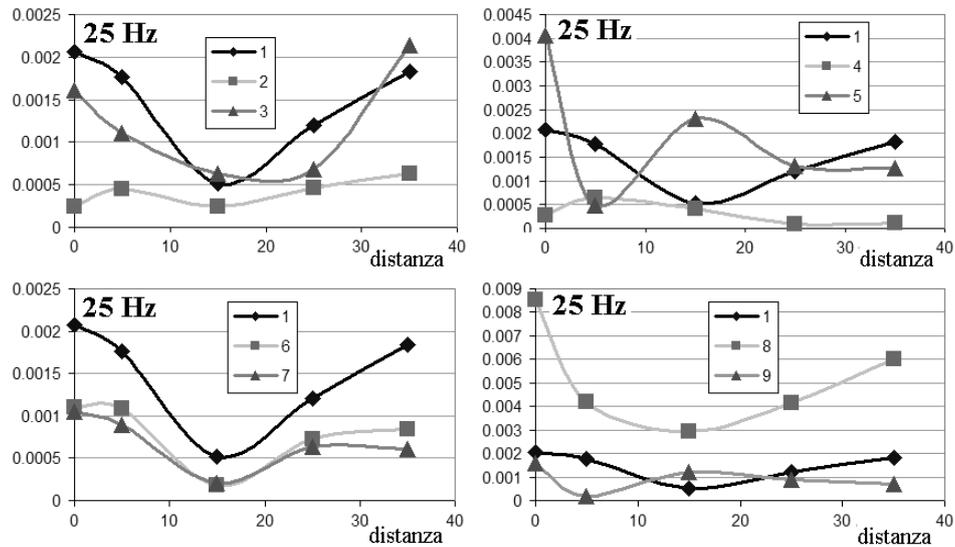


Figura 11 - Confronto dei differenti interventi sul profilo di velocità a 25 Hz

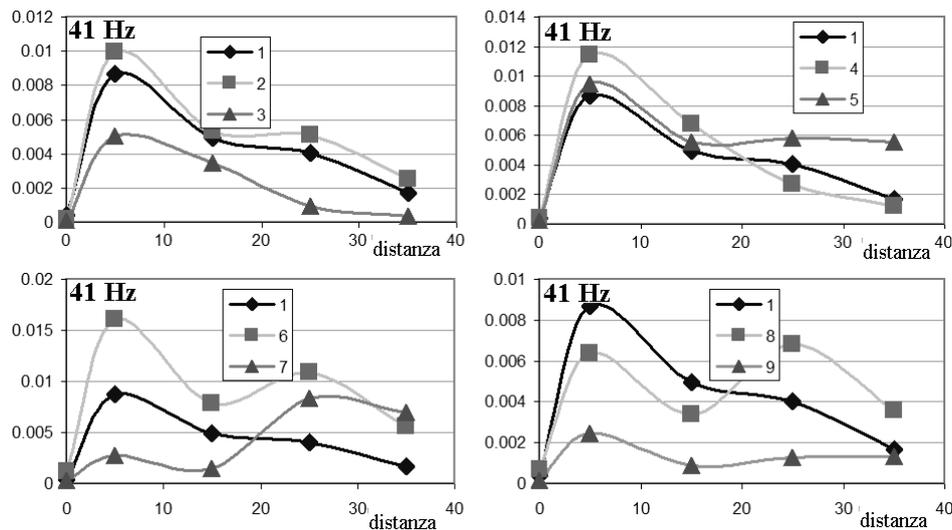


Figura 12 - Confronto dei differenti interventi sul profilo di velocità a 41 Hz

5. MONITORAGGIO ANTE E POST OPERAM

I livelli di vibrazione nella situazione ante e post operam sono stati oggetto di specifico studio previsto dalla stazione appaltante Ferrovie della Sardegna già nel capitolato dei lavori. I rilievi sono stati effettuati in 31 postazioni utilizzando accelerometri triassiali ed analizzando il profilo temporale del livello di accelerazione e il valore massimo *rms* con costante di tempo "slow" in corrispondenza del passaggio dei singoli convogli.

Al fine di evidenziare il reale contributo del mezzo ferroviario le misure sono state effettuate in momenti distinti, durante il passaggio del convoglio ferroviario e in sua assenza.

Nella seguente immagine è rappresentato il tracciato temporale rilevato per i tre assi durante un periodo di tempo rappresentativo, assunto pari a 2'.

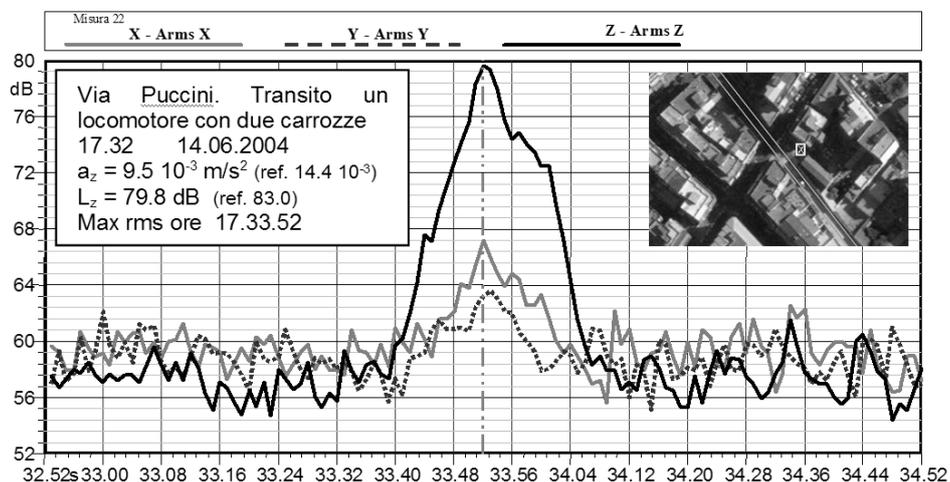


Figura 13 - Punto di rilievo n.22 nella situazione ante operam, con evidenza del passaggio di un convoglio

Dai rilievi emerge che lo spettro delle forze di eccitazione, presenta normalmente due picchi, uno situato a circa 8-10 Hz, e l'altro, con livello più elevato, a circa 40-50 Hz, prossimo alle frequenze di risonanza che caratterizzano tipicamente le strutture di fabbricato presenti lungo la linea. In genere l'analisi dei rilievi ha mostrato come la gran parte risulta ampiamente al di sotto della soglia limite di riferimento definita dalla UNI 9614 e che le situazioni limite sono confinate alla tratta di linea nella quale gli edifici sono in adiacenza al sedime ferroviario, a meno di 5.0 m dall'asse del binario. In tale tronco le condizioni geometriche del tracciato, la geologia e la tipologia di fondazione superficiale degli edifici esaltano il fenomeno vibratorio.

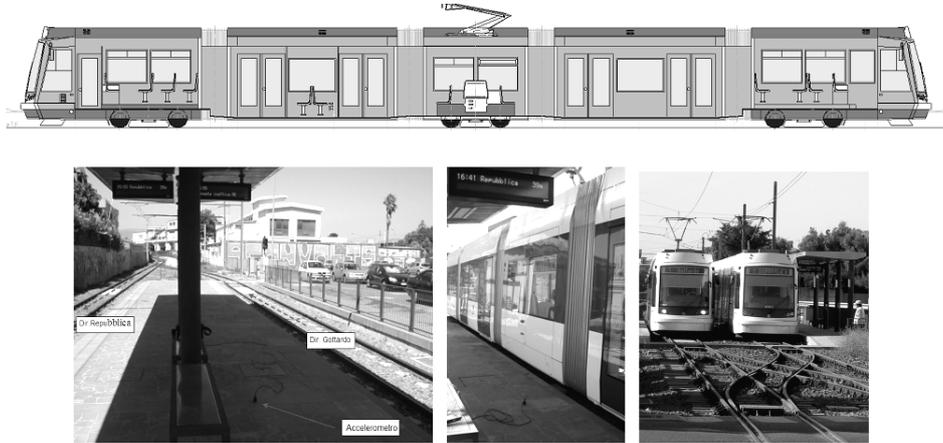


Figura 14 - La nuova metrotranvia di Cagliari

In tale tratto, della lunghezza di circa 340 m, è stato attuato un intervento di mitigazione mediante la posa in opera di un materassino antivibrante, dello spessore di 25 mm e frequenza naturale 15-25 Hz, posizionato sotto il piano di posa del ballast, in modo tale da garantire l'assenza di qualunque collegamento. Analogo intervento è stato previsto in corrispondenza di una seconda situazione limite in prossimità del largo Gennari. Le misurazioni post operam, effettuate nel luglio 2007, sono state condotte con la più recente normativa UNI 11048. A seguito dei rilievi eseguiti è risultato che i valori richiesti dal capitolato sono stati ampiamente rispettati lungo tutto il tracciato della linea tranviaria.

6. CONCLUSIONI

La notevole incertezza previsionale che caratterizza la simulazione delle vibrazioni, richiede un robusto approccio con tecniche di simulazione difficilmente riconducibili a formulazioni analitiche in forma chiusa, peraltro presenti numerose in letteratura. Nello studio sono state condotte una serie di misurazioni sperimentali che hanno permesso di costruire il profilo di attenuazione delle vibrazioni e validare il modello agli elementi finiti, utilizzato nella seconda fase della ricerca per simulare il fenomeno. Il modello, così testato, è stato successivamente utilizzato per quantificare l'attitudine di 4 tecniche differenti per lo smorzamento delle vibrazioni. Lo studio ha permesso di mettere in evidenza come l'impatto vibrazionale sia influenzato in maniera preponderante dalle caratteristiche geometriche della sezione ferroviaria. L'analisi parametrica condotta variando le caratteristiche del modello e dei materiali evidenzia come ciascuna situazione deve essere attentamente progettata in funzione delle frequenze che si vogliono attenuare. A tal fine risulta indispensabile la caratterizzazione precisa delle forzanti, della geometria del contesto e delle velocità che i convogli assumono nelle diverse tratte. Dallo studio deriva che determinate tecniche di intervento possono limitare in modo molto efficiente solo specifiche frequenze, esaltando viceversa alcune altre. Fondamentali risultano le caratteristiche della

stratificazione geologica e le proprietà meccaniche dei materiali in termini di moduli e capacità dissipative.

I risultati hanno confermato il migliore comportamento della nuova metropolitana rispetto alla situazione preesistente e, in modo meno banale, hanno permesso di quantificare l'attitudine di 4 tecniche differenti per lo smorzamento delle vibrazioni. Una di queste (inserimento di uno strato altamente smorzante) è stata posta in opera in due tratti della nuova metrotranvia. L'intervento ha permesso di ricondurre entro limiti normativi le situazioni limite, segnalate durante il monitoraggio ante operam come potenziali criticità, sulla base degli effetti indotti dal preesistente esercizio ferroviario.

Viene confermata l'estrema sensibilità del modello alle differenti condizioni e la notevole variabilità riscontrabile nelle misurazioni di vibrazione. Ciò si traduce in una incertezza previsionale che potrà essere affrontata più realisticamente in termini semi-probabilistici, attesa l'estrema variabilità delle forzanti e delle condizioni al contesto lungo il tracciato.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano le Ferrovie della Sardegna e l'ing. Alberto Collu, che ha condotto il monitoraggio in fase di collaudo dell'opera, per la disponibilità manifestata nello sviluppo della ricerca

BIBLIOGRAFIA

- [1] T. G. Gutowski, C.L. Dym – Propagation of Ground Vibration: a Review, *Journal of Sound and Vibration*, 1976, 42 (2), pag. 179-193.
- [2] ANSYS User's Manual, Revision 5.5.2, Volume IV: Theory. Swanson Analysis Systems Inc., 1999
- [3] G. Cofano – L'impatto acustico come criterio di valutazione nella progettazione di un sistema di metropolitana leggera nell'area urbana di Cagliari, Tesi di Laurea Università degli Studi di Cagliari, 1996/1997.
- [4] R. Lamberti, M. Crispino, F. Ruocco - Infrastrutture di trasporto ferroviario: analisi dei problemi di inquinamento da vibrazioni, *Sistemi di Trasporto*, pagg. 9-23, Aprile/Giugno 1997.
- [5] MATLAB, Operation Guide, Rev. 5.5, 1999.
- [6] Sanò T., De Sortis A., Rinaldis D., Experimental and numerical study on traffic-induced soil vibrations, *International Conference on Noise and Vibration*, Leuven, Belgio, settembre 1998.
- [7] Proceedings of the Fifth International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics, University of Southampton (UK), 17-23 July 1994.
- [8] A. Ditzel, G. C. Herman, "The influence of a rail embankment on the vibrations generated by moving trains" *Journal of Sound and Vibration*, Volume 271, Issues 3-5, 6 April 2004, Pages 937-957