

## **RUMORE E VIBRAZIONI DI SISTEMI DI TRASPORTO INNOVATIVI A FUNE**

Franco Cotana, Michele Goretti

Università degli Studi di Perugia – Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Via G. Duranti, 67 – 06125 PERUGIA

### **SOMMARIO**

Il miglioramento delle condizioni ambientali urbane può essere conseguito mediante l'adozione di interventi di "mobilità sostenibile", che consentano di ridurre le emissioni inquinanti, acustiche ed atmosferiche, derivanti dal traffico veicolare. Il sistema di trasporto a fune, attualmente in costruzione a Perugia, è un'opera originale che introduce soluzioni innovative nel settore del trasporto pubblico. Il moto è trasmesso da una fune di acciaio ad anello, mossa da un motore elettrico, sulla quale si ammassano vetture prive di motore proprio e dotate di ruote gommate, per cui la rumorosità del sistema è teoricamente molto contenuta.

Verifiche sperimentali e simulazioni dinamiche in fase di elaborazione del progetto hanno suggerito l'opportunità di apportare alcune modifiche strutturali allo schema originale, finalizzate a ridurre le vibrazioni a cui è sottoposta l'opera. Le modifiche introdotte innalzeranno la frequenza propria flessionale principale delle strutture e ciò potrebbe comportare l'emissione di rumore nel campo dell'udibile da parte delle travi in acciaio che sostengono la via di corsa. Il presente studio riporta i risultati di una campagna di misure fonometriche ed accelerometriche in cantiere, volta a caratterizzare la sorgente e ad individuare le frequenze di risonanza delle strutture realizzate.

### **INTRODUZIONE**

L'esigenza di tutelare l'ambiente naturale e urbano e di migliorare la qualità della vita nelle città induce amministratori e tecnici a cercare soluzioni innovative, in grado di ridurre i costi ambientali, sociali ed economici.

La riduzione delle emissioni di rumore e di gas di scarico di auto private e mezzi di trasporto pubblici può essere ottenuta per mezzo di efficaci interventi di "mobilità sostenibile", tra i quali si pongono i sistemi di trasporto a fune, azionati da motori elettrici.

A tale proposito appare significativo il caso della città di Perugia, nella quale è in corso la realizzazione di un originale sistema di mobilità alternativa, denominato "Minimetrò", destinato a collegare la periferia urbana al centro storico. Una fune di acciaio ad anello, mossa da un motore elettrico, trasporterà una serie di vetture prive di motore proprio e dotate di ruote gommate.

La configurazione finale delle strutture della via di corsa, costituite da travi di acciaio continue su pile in cemento armato, è stata definita a seguito di sperimentazioni e simulazioni.

Analisi preliminari condotte mediante simulazioni hanno evidenziato, nella configurazione originale di progetto, possibili problemi di interazione dinamica tra vetture e struttura portante, con condizioni di risonanza delle travi portanti in prossimità della velocità massima delle vetture. Per incrementare il margine di sicurezza rispetto all'insorgenza di amplificazioni dinamiche è stato necessario incrementare la frequenza propria delle travi. Le soluzioni costruttive individuate consistono nel creare una testata di appoggio sulle pile, tale da ridurre la luce libera delle campate del progetto iniziale, e nell'ampliare la dimensione trasversale delle pile, per aumentarne la rigidezza flessionale.

Le modifiche progettuali introdotte offrono maggiori garanzie ai fini della stabilità dell'opera, ma tendono a spostare le frequenze di risonanza delle strutture verso valori più elevati. Sebbene le caratteristiche del sistema di trasporto a fune garantiscano livelli di rumorosità al di sotto dei normali valori ambientali, l'innalzamento delle frequenze naturali di vibrazione può comportare fenomeni di emissione acustica nel campo dell'udibile.

Allo scopo di caratterizzare le sorgenti di rumore e vibrazioni, costituite dalle strutture in costruzione a Perugia, è stata effettuata una campagna di misure fonometriche ed accelerometriche in cantiere con sollecitazione delle travi. Gli spettri dei livelli di vibrazione e di pressione sonora emessi dalle strutture metalliche, rilevati in prossimità di esse, hanno consentito di caratterizzare le emissioni della sorgente e di valutare le frequenze proprie di risonanza delle opere realizzate. Si precisa che allo stato attuale, e in particolare alla data delle misure, la messa in opera della via di corsa non risulta ancora ultimata: ulteriori verifiche saranno effettuate a lavori completati.

### **SISTEMA DI TRASPORTO A FUNE "MINIMETRÒ"**

Il sistema "Minimetrò" è una metropolitana leggera che collegherà la periferia al centro storico di Perugia, da Pian di Massiano a Pincetto-Centro.

L'opera rappresenta un esempio di mobilità alternativa ai sistemi tradizionali di trasporto collettivo. Il "Minimetrò" sarà costituito da 25 vetture, con una capacità di 50 passeggeri ciascuna, che si muoveranno su rotaie di acciaio. Una fune di acciaio conformata ad anello sarà azionata da un motore situato nel *terminal* Pincetto Centro, costituito da gruppi sincroni alimentati a corrente elettrica, e trasmetterà il moto

alle vetture, vincolate ad essa mediante morse elettromeccaniche. Le vetture non hanno motore proprio e sono dotate di ruote gommate, costituiranno un sistema di trasporto “semicontinuo” transitando con una frequenza inferiore al minuto e si sganceranno dalla fune per l’ingresso nelle stazioni, dove saranno affidate a travi di decelerazione e di accelerazione.

Il “Minimetrò” garantirà rapidità di spostamenti, assenza di inquinamento ambientale, sicurezza, affidabilità, flessibilità alle variazioni della domanda di trasporto, decongestione della rete viaria urbana dal traffico veicolare. Secondo le previsioni, tale sistema di trasporto all’avanguardia consentirà di ridurre il numero di veicoli circolanti di circa 2-3 milioni di unità all’anno, contribuendo in misura rilevante al miglioramento delle condizioni ambientali urbane, soprattutto nelle aree a più alta densità di traffico attraversate.

La progettazione dell’opera è stata sottoposta a procedura di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA), ottenendo il giudizio favorevole di compatibilità ambientale della Regione Umbria (Determinazione Dirigenziale n. 8115 del 4/10/2000) e l’autorizzazione della Soprintendenza ai Beni Ambientali, Artistici e Storici dell’Umbria.

Il nuovo progetto di trasporto pubblico alternativo ai sistemi tradizionali su gomma si inserirà in una rete di collegamenti intermodale, integrandosi con parcheggi di scambio, ferrovie, scale mobili, ascensori ed altri percorsi meccanizzati, coerentemente con gli obiettivi del Piano Regolatore Generale di Perugia.

## ANALISI DEL PROGETTO

### Analisi dinamiche delle strutture

Il progetto del sistema di trasporto a fune “Minimetrò” è stato elaborato effettuando analisi dinamiche delle strutture in diverse fasi. La metodologia di indagine adottata ha previsto le seguenti attività:

- schematizzazione a trave della via di corsa e delle pile di sostegno;
- calcolo delle frequenze proprie e dei relativi modi di vibrare;
- calcolo della risposta dinamica della via di corsa sollecitata dalla massa della vettura a pieno carico (7.000 kg), con velocità variabile fino ad 8.5 m/s e l’applicazione di una forzante armonica di frequenza pari a quella per giro delle ruote (calcolo mediante approccio modale). Il livello della forzante per giro è stato stimato in base ai risultati di verifiche sperimentali effettuate presso il circuito di prova realizzato a Vipiteno, dotato di caratteristiche analoghe a quelle del “Minimetrò” di Perugia [1];
- valutazione della risposta dinamica in termini di accelerazione del veicolo e di amplificazione dinamica del moto della via di corsa (*impact-factor*).

Il modello di calcolo scelto per simulare il transito delle vetture integra nel tempo le equazioni del moto del sistema via di corsa-vettura (massa mobile), considerando la forzante armonica e le masse mobili lungo la struttura, con la velocità; ciò implica la presenza di termini in funzione del tempo nelle matrici di massa, rigidità e smorzamento. Lo smorzamento strutturale adottato nelle simulazioni è stato cautelativamente posto pari allo 0.2%, trattandosi di una struttura metallica.

Le simulazioni sono state effettuate considerando differenti schemi strutturali e differenti altezze delle pile.

### Analisi della soluzione originale

L’ipotesi originale della struttura della via di corsa prevedeva una lunghezza massima delle campate pari a 28 m. L’analisi preliminare dell’interazione tra vettura e struttura ha evidenziato una possibile eccitazione in risonanza del primo modo di vibrare del viadotto, nei tratti in campata di tali dimensioni, con la frequenza generata dal veicolo per velocità prossime a quella di progetto, pari a 7 m/s [1].

Il calcolo è stato effettuato considerando la configurazione iniziale con appoggi su pile, con frequenza flessionale pari a 3.9 Hz, in corrispondenza della quale si ha un massimo al centro di tutte le campate di 28 m. Le massime accelerazioni della massa mobile si hanno alla velocità di 6.5 m/s: i valori *rms* e i massimi degli spettri, in funzione della velocità di transito, hanno indicato un’amplificazione per 6.5 m/s, quindi all’interno del campo di velocità, da 0 a 7 m/s, della vettura [1].

Il moto della vettura risultava fortemente amplificato per la condizione di risonanza tra la forzante armonica per giro e la frequenza propria dell’insieme via di corsa-vettura, con conseguenze negative sia per il comfort di marcia sia per la struttura, che si trovava sottoposta a livelli elevati di accelerazione, oltre  $1 \text{ m/s}^2$  [1].

### Analisi della soluzione modificata

Le possibili soluzioni legate alla modifica della disposizione delle pile e dell’altezza delle travi, per ottenere una maggiore rigidità flessionale, avrebbero implicato una riprogettazione del tracciato. È stata invece ipotizzata una soluzione progettuale che modifica lo schema strutturale introducendo un elemento rigido (pulvino), realizzato in cemento armato o in acciaio, tale da realizzare un doppio appoggio centrato sulla pila [2].

Lo schema statico del nuovo sistema strutturale mantiene la tipologia di trave continua su più appoggi, riducendo la luce libera delle campate da 28 m a 24-4-24 m (Fig. 1). Inoltre è stato proposto di incrementare il momento di inerzia della sezione della pila, portando la dimensione trasversale da 1.2 m a 1.5 m e mantenendo lo spessore di 0.25 m.

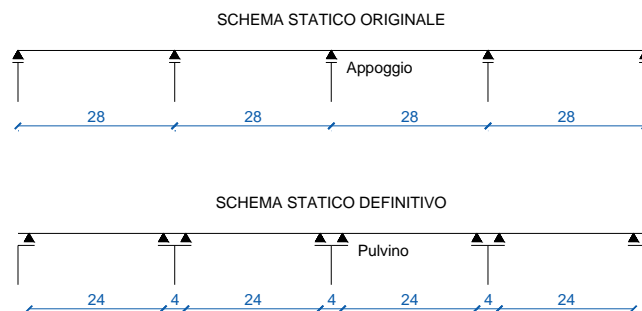


Fig. 1 – Schema statico originale con appoggi su pile (luci di 28 m) e schema statico definitivo con pulvini (luci di 24-4-24 m)

Le analisi svolte hanno indicato che lo schema costituito da pulvini sulle pile e sbalzi alle estremità (per riprodurre meglio le condizioni al contorno del tratto a trave continua) riporta in tutti i casi un incremento della frequenza propria di circa il 15% rispetto alla frequenza di eccitazione di 3.9 Hz trasmessa dalla vettura, variazione più significativa rispetto ad altre soluzioni progettuali a costi inferiori [1], [2]. I risultati hanno

mostrato un primo modo flessionale a 4.4 Hz, caratterizzato da una deformata con ventre al centro per ogni campata.

La presenza della vettura sulla singola campata incide sensibilmente sul valore della frequenza propria di flessione verticale. Quando la vettura transita sulle campate, la frequenza del sistema è inferiore a quella calcolata per la sola via di corsa.

I calcoli relativi alla struttura modificata [1] mostrano inoltre che l'altezza delle pile di sostegno incide in modo significativo sul comportamento flessionale delle travi portanti. Per ampliare il margine di sicurezza nei confronti dell'insorgenza di amplificazioni dinamiche, è necessario portare la frequenza propria flessionale principale oltre i 5 Hz, in modo tale da ridurre l'amplificazione dinamica.

Nel caso di pila con dimensione trasversale pari a 1.2 m, la velocità massima di 7 m/s si trova già nella zona di amplificazione dinamica, mentre se la pila ha dimensione trasversale di 1.5 m si è ancora ai margini [1]. Considerando infine le incertezze dei dati di calcolo rispetto a quelli reali della struttura in opera, si è ritenuta necessaria tale modifica delle pile.

## CAMPAGNA DI MISURE FONOMETRICHE ED ACCELEROMETRICHE

Le soluzioni suggerite dall'analisi dinamica e recepite dai progettisti mirano ad incrementare la frequenza propria flessionale principale al fine di ridurre l'amplificazione dinamica. Se da un lato gli interventi proposti salvaguardano la stabilità strutturale del sistema, dall'altra l'innalzamento delle frequenze naturali di risonanza delle opere di sostegno potrebbe generare emissioni acustiche nel campo delle frequenze udibili.

Al fine di caratterizzare le emissioni delle sorgenti di rumore e vibrazioni, individuando le componenti tonali eventualmente presenti negli spettri, è stata effettuata una campagna di misure fonometriche ed accelerometriche presso le opere realizzate in cantiere [3].

Si precisa che allo stato attuale le strutture dell'impalcato non sono ultimate. In particolare alla data delle misure e delle verifiche di cui al presente studio non era ancora stata completata la messa in opera delle rotaie, dei controventi, dei grigliati e dei relativi sostegni.

Ulteriori verifiche saranno eseguite a lavori ultimati, anche al fine di valutare presso i ricettori sensibili gli effettivi livelli di rumore e di vibrazione generati dalla sollecitazione delle strutture definitive ed immessi nell'ambiente circostante.

### Sorgenti di rumore e vibrazioni

L'esercizio del sistema "Minimetron" sarà fonte di sollecitazioni dinamiche sulle strutture e nel terreno e di sollecitazioni acustiche nell'ambiente circostante.

Le cause di tali sollecitazioni sono da ricondurre all'interazione tra vettura e struttura di sostegno. Il contatto ruota-rotai, peraltro mitigato dalla scelta di effettuare il trasporto su gomma, si tradurrà in una sorgente di vibrazioni e di rumore: la via di corsa, pertanto, si comporterà come una sorgente acustica e vibrazionale di tipo lineare, che eserciterà un impatto, sia pure di modesta entità, sui ricettori situati nelle immediate vicinanze.

La linea, a doppia via, costituisce il supporto fisico del sistema di trasporto, le cui vetture transiteranno su rotaie di acciaio collegate alle opere civili mediante opportuni supporti

elastici.

I viadotti sono costituiti da quattro travi in acciaio a doppia T elettrosaldate continue su più appoggi, unite a formare due impalcati paralleli; tali travi realizzano il piano di appoggio delle rotaie.

Si è definito impalcato A il gruppo di due travature situato a sinistra rispetto all'asse del viadotto a quattro travi (con progressive crescenti da Pian di Massiano verso Pincetto Centro) e impalcato B il gruppo a destra.

Le travature che compongono gli impalcati A e B sono collegate nel piano orizzontale attraverso un sistema di controventi (croci di S. Andrea) e di trasversi che ne limitano l'inflessione laterale; inoltre, nelle curve, i viadotti sono resi solidali tra loro con altre strutture trasversali di irrigidimento che unificano il comportamento dell'intera struttura (impalcato A e impalcato B) per quanto attiene alle sollecitazioni di flessione laterale e torsione.

Per quanto riguarda le altre sorgenti di disturbo da rumore, il tipo di fune previsto consente di minimizzare l'emissione acustica proveniente dal contatto con la puleggia e verifiche effettuate presso l'impianto sperimentale di Vipiteno non hanno evidenziato particolari problemi in tal senso.

L'effettivo livello di rumore complessivamente emesso dal sistema che si sta realizzando a Perugia sarà funzione anche delle condizioni ambientali e dei dettagli costruttivi della realizzazione e pertanto potrà essere valutato solo attraverso misure fonometriche effettuate ad impianto funzionante.

### Punti di misura

Come mostrato nel particolare della planimetria del tracciato, presentato in Fig. 2, sono stati individuati tre punti di misura lungo la via di corsa del "Minimetron", nel tratto compreso tra la pila n. 30 e la pila n. 32, presso Via del Fosso, dove il percorso si sviluppa ad una quota prossima al piano di campagna e nelle vicinanze di alcuni ricettori sensibili (abitazioni):

- Punto P1, all'esterno dell'impalcato B, lato destro, tra la pila n. 30 e la pila n. 31 (Fig. 3);
- Punto P2, all'interno dell'impalcato B, lato destro, tra la pila n. 31 e la pila n. 32 (Fig. 4);
- Punto P3, all'interno dell'impalcato A, lato destro, tra la pila n. 31 e la pila n. 32 (Fig. 5).

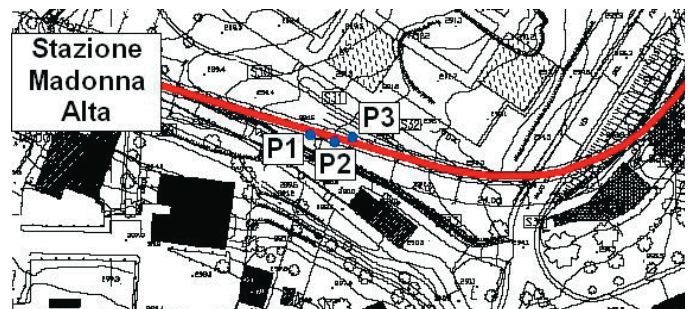


Fig. 2 – Particolare della planimetria del tracciato e posizione dei punti di misura (P1, P2, P3)

In corrispondenza di ognuno di tali punti sono stati posizionati (Fig. 6):

- un accelerometro, fissato sull'ala inferiore della trave d'acciaio a doppia T sollecitata;
- un microfono, posto a distanza maggiore di 1 m dalla

stessa struttura.



Fig. 3 – Punto di misura P1



Fig. 6 – Posizionamento dell'accelerometro e del microfono



Fig. 4 – Punto di misura P2



Fig. 5 – Punto di misura P3

vibrazioni prodotti dalla sollecitazione della struttura del “Minimetrò”.

### Caratteristiche della strumentazione

Le misure dei livelli di rumore e di vibrazione sono state effettuate con un analizzatore bicanale, modello Symphonie 01dB-Stell, che consente di acquisire ed elaborare segnali provenienti da microfoni ed accelerometri. Sono stati utilizzati un microfono Gras 40AR ed un accelerometro 393C PCB Piezotronics (Fig. 6).

Tutta la strumentazione di misura impiegata è dotata di certificato di taratura effettuato presso un centro autorizzato SIT, ai sensi della Legge 11/8/91, n. 273.

La strumentazione, i calibratori, i filtri di banda e la catena di misura sono conformi ai requisiti definiti dagli standard IEC, EN e CEI.

I *softwares* di analisi utilizzati sono dB TRIG 32, dB TRAIT 32 e dB FA 32, prodotti da 01dB.

### Metodologia di misura adottata

Il transito delle vetture del sistema di trasporto a fune Minimetrò determinerà uno stato di vibrazione delle strutture che sostengono la linea: allo scopo di determinare le frequenze di risonanza delle strutture della via di corsa, sono state opportunamente sollecitate le travi d'acciaio sulle quali si appoggiano le rotaie. In corrispondenza dei tre punti fissati sono stati misurati:

- gli spettri di rumore e di vibrazione;
- i livelli continui equivalenti di rumore ponderato “A” ( $L_{Aeq}$ ) mediante microfono;
- i livelli equivalenti di accelerazione ( $L_{eq}$ ) mediante accelerometro.

I rilievi svolti hanno permesso di effettuare le analisi spettrali necessarie a caratterizzare le proprietà delle sorgenti acustiche in emissione.

In base alle disposizioni del Decreto 16/03/98 “*Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico*”, il microfono è stato posizionato ad una distanza maggiore di 1 m dalle strutture sollecitate ed è stato munito di cuffia antivento. La differenza tra i valori delle calibrazioni, effettuate prima e dopo il ciclo di misura, è risultata inferiore a 0,5 dB, pertanto, ai sensi del Decreto 16/03/98, le misure fonometriche eseguite sono valide.

La scelta delle posizioni di misura è significativa ai fini della valutazione degli spettri di emissione di rumore e di

Per quanto riguarda l'analisi della componente vibrazioni, le rilevazioni accelerometriche sono state eseguite secondo le raccomandazioni delle norme UNI 9614 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo" e UNI 9916 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici". Durante le misure l'accelerometro è stato posizionato sull'ala inferiore della trave d'acciaio a doppia T sollecitata.

Le misure si sono svolte in condizioni di tempo sereno, in assenza di precipitazioni atmosferiche, nebbia e neve. Il tempo di riferimento è stato quello diurno (dalle 6:00 alle 22:00) e le misure sono state effettuate durante gli intervalli di tempo nei quali sono state sollecitate le strutture.

## Risultati delle misure

I livelli di vibrazione e di pressione sonora in emissione non sono rilevanti ai fini dell'analisi delle caratteristiche spettrali delle sorgenti in esame; tuttavia, a titolo informativo, i valori dei livelli misurati sono riportati nelle Tabb. 1 e 2.

A seguire sono presentati gli spettri dei livelli di rumore (Figg. 7, 9, 11) e di vibrazione (Figg. 8, 10, 12) rilevati in ciascun punto nel corso della campagna di misure effettuata.

Tab. 1 – Risultati delle misure: livelli di emissione acustica

Punto	$L_{Aeq}$ medio istantaneo misurato (dBA)	$L_{Aeq}$ medio istantaneo corretto arrotondato (dBA)
P1	87.8	88.0
P2	86.0	86.0
P3	76.2	76.0

Tab.2 – Risultati delle misure: livelli di vibrazione

Punto	$L_{eq}$ medio istantaneo misurato (dB)
P1	138.5
P2	124.0
P3	116.4

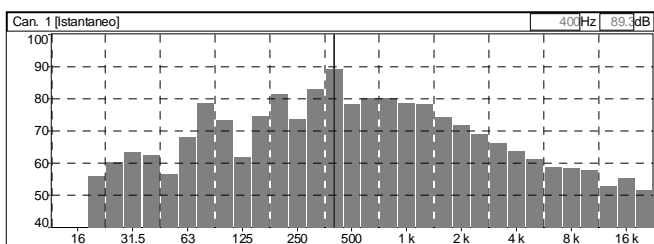


Fig. 7 – Spettro del livello di pressione sonora Misura 1 (Punto P1 – Can. 1 – Microfono)

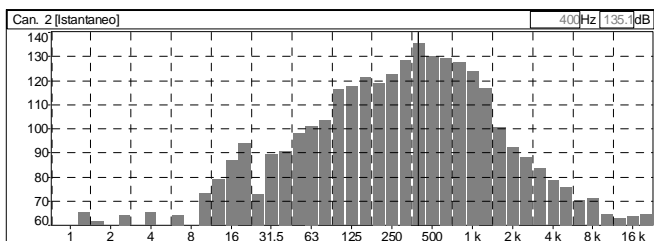


Fig. 8 – Spettro del livello di accelerazione Misura 2 (Punto P1 – Can. 2 – Accelerometro)

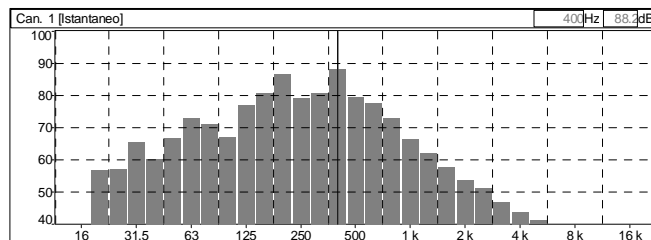


Fig. 9 – Spettro del livello di pressione sonora Misura 3 (Punto P2 – Can. 1 – Microfono)

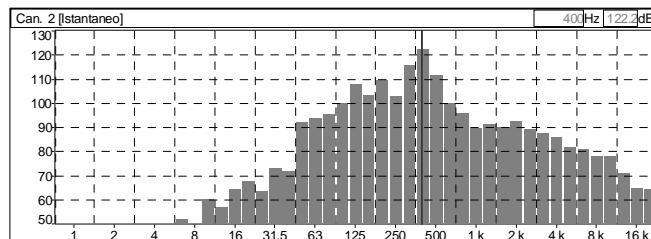


Fig. 10 – Spettro del livello di accelerazione Misura 4 (Punto P2 – Can. 2 – Accelerometro)

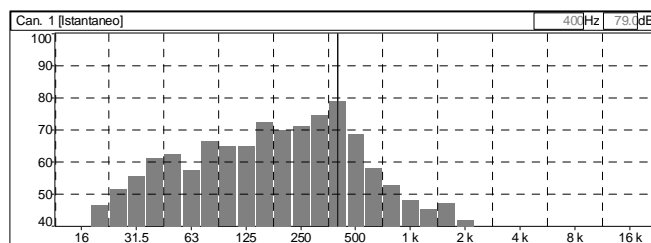


Fig. 11 – Spettro del livello di pressione sonora Misura 5 (Punto P3 – Can. 1 – Microfono)

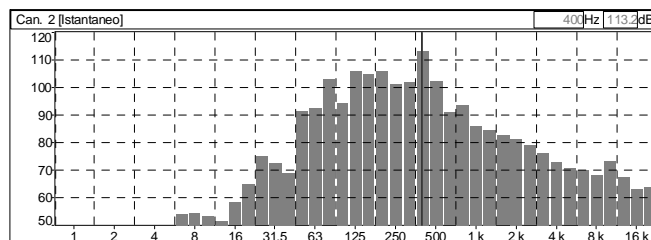


Fig. 12 – Spettro del livello di accelerazione Misura 6 (Punto P3 – Can. 2 – Accelerometro)

## CONCLUSIONI

Simulazioni dinamiche effettuate sul progetto originale delle strutture del "Minimetò" di Perugia hanno mostrato interazioni tra vettura e struttura, capaci di determinare condizioni critiche sia per il comfort di marcia, sia dal punto di vista del livello di accelerazione sulla struttura.

Ulteriori simulazioni hanno evidenziato che modifiche introdotte nello schema strutturale, riducendo la luce di campata mediante l'inserimento di pulvini, consentono di innalzare le frequenze naturali di vibrazione e di evitare che la velocità massima di progetto produca una condizione di risonanza; per avere un margine di sicurezza sufficiente nei riguardi dell'amplificazione dinamica, conseguente al transito della vettura, è inoltre necessario incrementare la rigidità flessionale delle pile, aumentandone la dimensione trasversale.

L'innalzamento delle frequenze naturali di vibrazione delle strutture modificate può generare emissioni sonore nel campo

delle frequenze udibili. Rilevazioni fonometriche ed accelerometriche effettuate lungo il tracciato del sistema di trasporto a fune "Minimetrò", a Perugia, indicano la presenza, sia nei rilievi accelerometrici sia in quelli fonometrici, di una componente a 400 Hz, che corrisponde alla frequenza propria di risonanza delle strutture realizzate; le analogie tra i rispettivi spettri evidenziano che le sollecitazioni dinamiche a cui è sottoposta la linea di "Minimetrò" si traducono non soltanto in vibrazioni della struttura, ma anche in onde sonore che si propagano nell'ambiente circostante.

Le misure effettuate hanno permesso di caratterizzare le sorgenti di rumore e vibrazioni, costituite dalle strutture di sostegno della via di corsa, verificando la presenza di componenti tonali negli spettri rilevati in emissione; l'effettiva entità dell'impatto vibrazionale ed acustico prodotto, invece, potrà essere valutata effettuando misure accelerometriche e fonometriche dei livelli di immissione presso ricettori sensibili nelle reali condizioni di esercizio dell'opera, ovvero a strutture

ultimate ed impianto funzionante.

Per ottimizzare il contatto tra fune e puleggia, il comportamento a vibrazione della fune e ridurre il rumore generato da tali componenti, è opportuno prevedere vincoli costituiti da dispositivi elastici e smorzanti, come supporti delle pulegge, almeno nei punti critici.

#### **RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI**

1. G. Diana, Analisi dinamica del veicolo "Minimetrò" transitante sui viadotti della linea metropolitana di Perugia, Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano, 2003.
2. F. M. Ciuffini, M. Baglioni, Analisi dinamica nuova soluzione viadotto – Relazione di calcolo, 2003.
3. F. Cotana et al., Misure di rumore e di vibrazioni relative alla linea di Minimetrò – Via del Fosso – Perugia, 2004.