

Le vibrazioni possono recare, oltre a un disturbo per gli occupanti di un edificio, una riduzione della loro efficienza operativa, un malfunzionamento o danneggiamento delle apparecchiature utilizzate e, oltretutto, rischi per la stessa integrità strutturale o architettonica della struttura

LE VIBRAZIONI DEGLI EDIFICI INDOTTE DALLE FERROVIE SOTTERRANEE

Massimo Chiarelli*

Negli ultimi anni il problema delle vibrazioni degli edifici ha assunto sempre maggiore importanza, sia in relazione alla diversa tipologia strutturale delle costruzioni moderne legate a un più razionale utilizzo dei materiali con caratteristiche meccaniche superiori, sia in relazione al moltiplicarsi delle fonti di vibrazione e, in special modo, quelle generate dalle attività umane.

Le onde perturbatrici possono avere origine da sorgenti generiche costituite da impianti fissi, quali macchinari, o da fonti occasionali, quali infissione di pali o scavi in genere, o anche e soprattutto da traffico veicolare e ferroviario, superficiale e sotterraneo.

Gli effetti principali di sorgenti eccitanti sono il rumore e le vibrazioni. Tali fenomeni, pur avendo medesima origine, presentano caratteristiche, modalità di propagazione ed effetti notevolmente diversi. Il rumore (air-borne vibrations) è dovuto alla propagazione aerea di onde a frequenza maggiore di 50 Hz, le vibrazioni (ground-borne vibrations) sono riconducibili invece alla propagazione, per via solida, di onde ad ampio contenuto in frequenza e con un quantitativo energetico significativo per quanto riguarda quelle prodotte a basse frequenze.

Le vibrazioni possono recare, oltre a un disturbo per gli occupanti di un edificio, una riduzione della loro efficienza operativa, un malfunzionamento o danneggiamento delle apparecchiature utilizzate e, oltretutto, rischi per la stessa integrità strutturale o architettonica della struttura. Tutti gli organismi soggetti al disturbo delle onde perturbatrici sono definiti ricevitori.

Dal punto di vista geotecnico-strutturale le onde, investendo le costruzioni, producono due effetti dannosi che si esaltano enormemente per particolari frequenze di vibrazione: il primo è l'assestamento del terreno sottostante la fondazio-

ne investita, con i conseguenti cedimenti della fondazione stessa; il secondo è la propagazione delle vibrazioni dalla fondazione alle strutture in elevazione.

Poiché le ampiezze di vibrazione si riducono allontanandosi dalla sorgente, può succedere che i cedimenti prodotti in una fondazione vicina alla causa perturbatrice non siano uniformi ma variabili lungo ad essa, producendo quindi dissesti e inclinazioni della sovrastruttura. Il secondo effetto è in generale meno dannoso poiché difficilmente l'energia messa in gioco può comprometterne la stabilità.

Ciò non toglie che se la costruzione si trova in uno stato di tensione gravoso che può lambire la soglia della resistenza in alcune parti, per esempio gli stati di coazione o gli aggravamenti di sollecitazioni dovuti a carichi non previsti, possano manifestarsi per l'intervento delle vibrazioni dei segni di dissesto. Questo è tanto più vero se il terreno si trova in fase plastica.

E' noto come il comportamento del terreno sia differente nel caso si trovi prima o oltre il limite elastico (snervamento): nel primo caso (fase elastica), a ogni sollecitazione corrisponde una ben definita deformazione che tende ad annullarsi una volta rimosso il carico; nel secondo caso (fase plastica), le deformazioni sono la somma di quelle elastiche e plastiche che non si annulleranno completamente allo scarico (deformazioni residue).

Un minimo incremento di tensione, se il terreno interessato dalle vibrazioni si trova in fase plastica, può provocare deformazioni non trascurabili che una struttura in uno stato di tensione gravoso non sarà in grado di assorbire.

Le ferrovie sotterranee

Per salvaguardare le strutture o parti di esse, nonché i relativi occupanti, è necessario quantificare le vibrazioni prodotte attraverso la determinazione di alcune caratteristiche, come l'ampiezza massima degli spostamenti o delle accelerazioni, e confrontare tali valori con quelli ritenuti ammissibili per ciascun tipo di ricevitore dagli opportuni riferimenti normativi e, all'occorrenza, cercare di ridurre gli effetti di tale fenomeno. Per determinare il livello di vibrazione causato dal passaggio di treni in sotterraneo sono state sviluppate una serie di procedure basate su esperienze e osservazioni che, benché differenti nei dettagli, condividono una medesima struttura:

Sorgenti di vibrazioni	Gamma di frequenza (Hz)
Traffico (su strada e rotaia)	da 1 a 80
Esplosioni	da 1 a 300
Battitura di pali	da 1 a 100
Macchine esterne all'edificio	da 1 a 300
Macchine interne all'edificio	da 1 a 1.000
Attività umane	
-interessanti indirettamente l'edificio	da 0,1 a 100
-interessanti direttamente l'edificio	da 0,1 a 12
Vento	da 0,1 a 10

Tabella 1.1. - Le gamme di frequenza: caratteristiche per diverse sorgenti di vibrazioni

- ◆ Il livello di vibrazione è determinato per i sistemi di armamento più comuni;
- ◆ Per favorire la correzione per attenuazione geometrica e smorzamento del materiale sono introdotte leggi di propagazione o curve di attenuazione dedotte empiricamente in vari siti;
- ◆ L'interazione terreno-struttura è tenuta in conto per mezzo di espressioni empiriche che permettono di determinare il livello di vibrazione sulla fondazione.

Ciò nonostante, queste procedure non sono applicabili a tutte le situazioni reali che si presentano, soprattutto nei casi di situazioni stratigrafiche complesse e geometrie articolate dei manufatti.

Nel modello analitico proposto da Chua & Balendra sono considerati due tipi di sollecitazioni: la componente pseudostatica e la componente dovuta alla rugosità.

La prima è dovuta alla trasmissione del carico tra ruota e binario ed è costituita dal peso proprio del convoglio; è definita pseudostatica poiché, pur trattandosi di un carico in movimento, è applicata in forma permanente. La seconda componente è dovuta all'interazione tra ruota e binario ed è costituita essenzialmente dalla forza di inerzia indotta dal "saltellamento" della ruota sul binario. Le due componenti sovrapposte costituiscono il carico complessivo agente sul binario.

La modellazione è sviluppata per due tipi di armamento (track support systems):

1. Binari direttamente fissati sulla soletta dell'arco rovescio della galleria;
2. Binari fissati su tavola flottante.

Per ridurre il livello di vibrazione, in entrambi i casi vengono sistemati dei cuscinetti (rail pads) tra binario e supporto inferiore che, a sua volta, nel caso di tavola flottante poggia attraverso cuscinetti elastomerici sulla soletta dell'arco rovescio della galleria.

Nella determinazione del livello complessivo di vibrazione intervengono, seppure in maniera differente, una serie di meccanismi che provocano eccitazioni in diverse bande di frequenza. Tra tutti questi possono essere menzionati:

1. Il carico trasmesso dalla ruota al binario, e da questo attraverso le traversine all'armamento (componente statica);
2. L'irregolarità binario-ruota;
3. Gli effetti dovuti ai giunti tra i binari.

Mentre le ultime due sorgenti sono suscettibili di riduzioni, il carico trasmesso dalla ruota al binario è sempre presente e a nulla valgono, se non in minima parte, gli interventi di mitigazione delle vibrazioni. Per tale motivo, si considerano solo i contributi relativi a tale meccanismo, assumendo che ruota e binario siano in condizioni ideali e che quindi non generino alcuna eccitazione.

L'origine dell'eccitazione è dovuta alla deformazione del binario al di sotto di ciascuna ruota (Figura 1.1.). Le componenti vibratorie delle suddette eccitazioni operano in un range di frequenza al di sotto dei 50 Hz, e precisamente intorno al valore fornito dal rapporto tra la velocità del convoglio ferroviario e la distanza media tra le traversine.

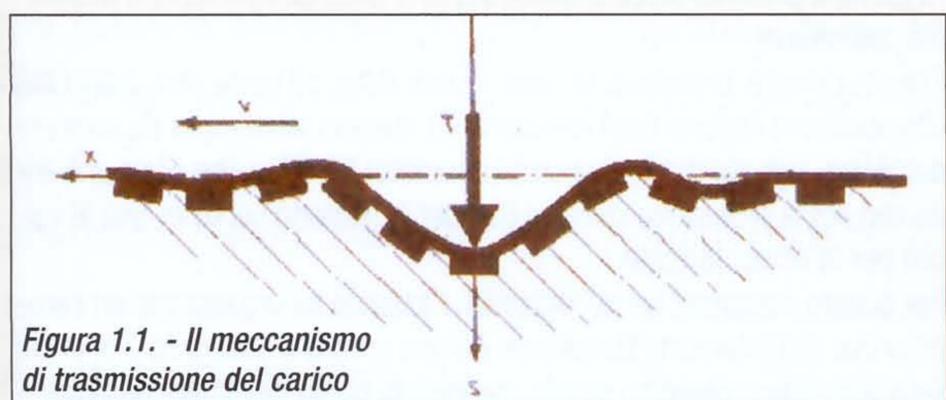


Figura 1.1. - Il meccanismo di trasmissione del carico

Le vibrazioni prodotte dipendono quindi dalle proprietà elastiche del terreno, dell'armamento e dall'intensità del carico.

Lo spostamento subito dall'armamento tende a esaurirsi dopo pochi cicli: ciò dipende naturalmente dalle proprietà elastiche e smorzanti del sistema armamento-terreno e dall'intensità del carico.

Alcune prove sperimentali hanno evidenziato come gli effetti dinamici giochino un ruolo maggiore a elevate velocità. La lunghezza d'onda dedotta per un treno a velocità di 90 km/h risulta essere di circa 3,5 m.

La normativa

Le norme di riferimento più importanti sono tre e precisamente la UNI 9916, la DIN 4150 e la ISO 4866.

La prima può essere riassunta in quattro punti fondamentali:

1. Riconoscimento del problema;
2. Verifiche e controllo;
3. Diagnostica;
4. Previsione.

Essa dà indicazioni per la scelta di appropriati metodi di misura, di trattamento dei dati e di valutazione dei fenomeni vibratorii, obiettivi che richiedono diversi metodi di approccio.

Si considerano gamme di frequenza variabili da 0,1 a 150 Hz. Tale intervallo interessa una grande casistica di edifici e di elementi strutturali sottoposti a eccitazione naturale (vento, terremoti, ecc.), nonché a eccitazione causata dall'uomo (traffico, attività di costruzione, ecc.).

La valutazione non può prescindere da considerazioni riguardanti la durata e la distribuzione nel dominio della frequenza delle risposte misurate, da riferire alle caratteristiche dinamiche della struttura (come frequenze naturali e smorzamenti associati).

La seconda norma, la DIN 4150, fornisce indicazioni circa l'ammissibilità delle vibrazioni. A tal fine sono determinanti le tensioni indotte nell'opera stimate attraverso il calcolo e la misurazione.

Tramite la misurazione si ottengono i valori di vibrazione che consentono di determinare immediatamente, attraverso il legame costitutivo, le tensioni corrispondenti. Dalla misurazione della vibrazione, inoltre, possono essere determinate le linee di deformazione e la frequenza delle vibrazioni, dalle quali si possono calcolare le forze di inerzia agenti sulle masse strutturali. Note le forze di inerzia è possibile determinare le sollecitazioni. La verifica si effettua confrontando le tensioni calcolate con la tensione ammissibile determinata nel caso di carico dinamico supplementare. Particolare attenzione si rende necessaria per le vibrazioni prodotte da processi d'urto, in particolare dagli scoppi. L'ammissibilità è accertata confrontando la velocità massima misurata con quella ritenuta ammissibile.

Classe del fabbricato	Tipo di fabbricato	Velocità ammissibile (mm/s)
I	Rovine, fabbricati danneggiati sotto il patrocinio dei beni culturali	2
II	Fabbricati con danni visibili	4
III	Fabbricati senza danni con buono stato tecnico	8
IV	Fabbricati ben realizzati	10 fino a 40

Tabella 1.2. - I valori dei limiti ammissibili

Infine, le norme ISO 4866 stabiliscono i principi di base per la misurazione delle vibrazioni provocate negli edifici.

La valutazione degli effetti negli edifici si ottiene principalmente calcolando la risposta della struttura, includendo metodi analitici in cui possano essere determinate frequenza, durata e ampiezza.

* *Ingegnere Progettista e Consulente esterno*