

La misura delle vibrazioni indotte dal traffico

Roberto Folchi – NITREX Srl
roberto.folchi@nitrex.it

Luca Ferraglio – NITREX Srl
luca.ferraglio@nitrex.it

Introduzione

L'intenso traffico veicolare pesante determina vibrazioni e rumore che possono causare disagio ed, in alcuni casi, anche danni ai fabbricati (foto 1). L'insorgenza di danni è correlata alla "sensibilità" dei fabbricati alle vibrazioni, ovvero alla resistenza degli elementi strutturali ed architettonici e delle fondazioni. La quasi totalità del patrimonio immobiliare italiano ha elevata sensibilità alle vibrazioni sia per vetustà, che per l'impostazione progettuale sviluppata in un'epoca con traffico minore di quello attuali.

In questa nota sono trattate le problematiche legate alle vibrazioni indotte dal traffico nei fabbricati. In particolare sono qui descritti: il fenomeno fisico e gli effetti indotti all'intorno dal traffico, le modalità per l'esecuzione di un'efficace misura ed analisi del fenomeno vibratorio, e quindi delle sollecitazioni, con riferimento alla normativa specialistica.

Le vibrazioni indotte dal traffico

Parte dell'energia degli automezzi in moto viene trasmessa alla strada e, da questa, ai terreni circostanti. Maggiore è l'irregolarità del manto stradale e maggiore è l'energia indotta all'intorno. Infatti è la presenza di elementi di discontinuità quali tombini, giunti, buche, ecc. (foto 2), a determinare la quota d'energia del veicolo che si trasmette al terreno sotto forma di deformazione elastica, propagandosi in onde che, per analogia con quelle prodotte dai terremoti, sono appunto dette "sismiche".

Quando le onde sismiche raggiungono i manufatti producono su questi vibrazioni, alle vibrazioni sono associate sollecitazioni dinamiche. Le sollecitazioni dinamiche si vanno a sommare a quelle statiche a cui è soggetto il manufatto (es. il peso proprio, il carico di esercizio, ecc.), alterando le condizioni di equilibrio tra forze agenti e forze resistenti.

Quando il manufatto è raggiunto dall'onda sismica inizia ad oscillare con la frequenza caratteristica dell'onda (vibrazione diretta) e, anche una volta esaurito il fenomeno vibratorio transiente indotto dal traffico, il manufatto continua ad oscillare con la sua frequenza propria (vibrazione indiretta). A titolo di esempio si pensi ad un diapason colpito da un martel-

letto che vibra per il colpo (vibrazione diretta) e che continua ad oscillare di moto proprio producendo la caratteristica nota "La" (vibrazione indiretta).

La frequenza caratteristica dell'onda sismica che sollecita il manufatto è molto importante per la definizione del nesso di causalità tra danni e vibrazioni. A parità d'ampiezza dell'oscillazione prodotta dal traffico, minore è la frequenza predominante del transiente sismico e maggiore è la sollecitazione indotta nel manufatto.

Tale circostanza appare evidente dall'analisi della tabella 1 delle norme DIN 4150 "Le vibrazioni nelle costruzioni - parte 3: effetti sui manufatti", a cui fa riferimento la UNI 9916 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici". Da queste normative si rileva che i valori di soglia per l'insorgenza di non danno aumentano all'aumentare della frequenza caratteristica dell'onda sismica transiente che impatta il manufatto. Le vibrazioni transienti a bassa frequenza possono indurre sollecitazioni maggiori anche in relazione ai fenomeni di risonanza prodotti nei manufatti (le frequenze tipiche dei manufatti sono generalmente basse).

Molto importante è anche il numero di reiterazioni dei transienti sismici, in quanto continue vibrazioni, anche se di modesta entità, potrebbero causare danni per l'innesco di fenomeni di fatica.

Un caso reale

Per l'inquadramento delle problematiche viene qui presentato un esempio da un caso reale. Le conclusioni sono estensibili a tutte le attività di monitoraggio strumentale di vibrazioni da sorgenti meccaniche e da traffico.

Si tratta di un caso in cui gli abitanti di un comune hanno lamentato danni e disagio per il traffico veicolare:

- innesco ed estensione di uno stato fessurativo nelle murature portanti e nelle tamponature;
- disagio per le vibrazioni e per il rumore, soprattutto la notte, e di giorno nelle fasce a maggior intensità di transito.

Le contestazioni, di carattere qualitativo, hanno dunque reso necessaria la definizione quantitativa dell'impatto indotto mediante una campagna di

monitoraggio. Dai risultati della misure sarebbe stato inoltre possibile mirare gli eventuali interventi di mitigazione dell'impatto indotto per vibrazioni e rumore, senza alterare il livello funzionale del segmento viario.

Mediante il monitoraggio è stato possibile quantificare la velocità di vibrazione indotta, i parametri significativi delle onde sismiche indotte, e quindi, il livello di correlazione tra vibrazioni, danni ai manufatti e disagio agli abitanti.

Impostazione del monitoraggio

In una analisi preliminare è stata caratterizzata la sorgente (*donor*): strada con traffico, ed i recettori (*acceptor*): i manufatti. Per l'analisi i manufatti sono stati ubicati su cartografia 1:500. È stato inoltre realizzato un database con foto, piante, sezioni, dati sulla tipologia e sulle condizioni di manutenzione, stato di fessurazione, e caratteristiche architettoniche di ciascun manufatto. Quindi è stato redatto un progetto di monitoraggio strumentale individuando alcuni "segmenti campione" (es. in prossimità di pronunciate irregolarità del manto stradale, di presenza di sottoservizi con tombini a quota piano strada, di manufatti in condizioni critiche di statica, ecc).

Per il rilievo delle vibrazioni indotte dal traffico sono state utilizzate stazioni di misura con registrazione digitale automatica, equipaggiate con trasduttore triassiale di velocità di vibrazione per la misura delle componenti xyz, ovvero delle componenti orizzontale radiale, orizzontale trasversale e verticale, e con un microfono per la misura dell'onda di sovrappressione aerea (tabella 1).

Presso ciascun segmento campione sono stati individuati due punti di misura sulla muratura di fregio lato strada: uno in prossimità delle fondazioni al livello del piano di strada oppure al di sotto, l'altro in elevazione, al livello del solaio più alto. L'impatto sismico indotto dal traffico veicolare è stato rilevato direttamente su componenti strutturali in continuità statica di cui una con oscillazione vincolata, per il confinamento conseguente all'interramento, l'altra con oscillazione libera (configurazione tipo piano incastrato da un lato).

L'installazione delle due stazioni di monitoraggio è stata eseguita in conformità alle UNI 9916, alle DIN 4150 parte 1 e parte 3 ed allo stato dell'arte [Harris Cyril M. *Shock and Vibration Handbook*. McGraw-Hill, 1995]. L'affidabilità di ogni punto di misura, ovvero la continuità del punto di misura alle componenti strutturali del manufatto, è stata verificata mediante preliminare saggio con martello di gomma e quindi con caratterizzazione dinamica mediante risposta dinamica del punto di misura a carico impulsivo.

In ognuno dei punti di misura è stato effettuato il monitoraggio continuativo per una durata rappresentativa delle condizioni di massima intensità stagionale del traffico (generalmente mai inferiore ad un mese).

Risultati ed analisi

Dalle analisi delle caratterizzazioni dei punti di misura è stato rilevato che questi, energizzati con carico impulsivo (della durata di circa 30 microsecondi), oscillano con frequenze predominanti proprie sempre superiori ai 100 Hz, ovvero a frequenze assai maggiori di quelle che sono risultate caratteristiche dei transienti sismici per il traffico. Tale circostanza ha consentito quindi di considerare come non rilevante l'influenza del punto di misura sul monitoraggio sismico del traffico effettuato.

La quasi totalità delle registrazioni ha valori di picco inferiore ad 0,50 mm/s. Vista l'ampiezza dei valori misurati, dal confronto con la DIN 4150 parte 3, capitolo 4.4, è stato possibile escludere l'insorgenza di fenomeni di fatica sui manufatti anche in presenza di reiterazioni della sollecitazioni con oltre 10 picchi al minuto (secondo le DIN la verifica della sicurezza rispetto al cedimento a fatica non è necessaria se la sollecitazione dinamica indotta è inferiore al 10% del valore della sollecitazione sopportabile dalla struttura).

Tutti transienti sismici indotti sui manufatti dovuti all'esercizio della strada, hanno presentato caratteristiche similari:

- componente armonica predominante nell'onda sismica tra i 10 Hz ed i 20 Hz;
- durata dell'impulso indotto compresa tra 2 e 6 secondi, con il valore di picco grossomodo a metà transiente;
- generale prevalenza della componente orizzontale trasversale all'asse della strada (e quindi dell'asse maggiore del corpo di fabbrica) per le misure effettuate in alto.

Dall'analisi delle registrazioni effettuate in prossimità della sorgente è stata rilevata la netta prevalenza della componente verticale, con una frequenza predominante intorno ai 17 Hz, con valori significativi dei picchi delle componenti armoniche tra 10 e 20 Hz, ed uno spettro quasi piatto per le componenti orizzontali (figura 2).

Dall'analisi delle registrazioni effettuate in postazioni a maggiore distanza dal punto di energizzazione, è stato rilevato che pur rimanendo generalmente predominante la componente verticale del transiente i valori di ampiezza delle due componenti orizzontali, e le frequenze predominanti associate, tendono ad omologarsi a quella della componente verticale.

Tale circostanza induce a ritenere come verosimile il graduale trasferimento dell'energia dalla componente verticale alle componenti orizzontali.

Con riferimento alla prevalenza della componente orizzontale trasversale ortogonale all'asse della strada sia per la misura in elevazione che per la misura in cantina, questa può essere spiegata con il maggior grado di libertà all'oscillazione che il componente strutturale muratura ha in questa direzione (tipo piastra incastrata da un lato).

Ad alcuni degli eventi registrati non sono associate registrazioni acustiche, ad altri, di ampiezza sismica confrontabile, sono invece associate registrazioni acustiche. La mancanza di registrazioni acustiche evidenzia una sorgente (*donor*) "silenziosa", ad esempio, automobile a velocità (per velocità elevata e massa non elevata); la presenza di registrazioni acustiche evidenzia invece una sorgente (*donor*) "rumorosa", ad esempio un autocarro (velocità non elevata e massa elevata). L'elevato spessore delle murature al piano di strada / cantina ed il confinamento dovuto al contrasto con la fondazione stradale e, verosimilmente la causa di una frequenza predominante superiore ai 30 Hz.

Conclusioni

Dalle misurazioni sono stati rilevati valori di ampiezza di vibrazione mai superiori a 0,50 mm/s, con corrispondenti spostamenti massimi di 6 micron, ovvero di 0,006 mm ed accelerazioni massime pari a 0,01g,

dove g, accelerazione di gravità è uguale a 9,81 m/s² (figure 1, 2 e 3).

La stazione di monitoraggio ha registrato il passaggio degli automezzi che hanno indotto una vibrazione del manufatto con velocità superiore a 0,25 mm/s. Per questi è stata rilevata una distribuzione media oraria con massimo di 112 passaggi/ora nella fascia oraria tra le ore 20 e le 21 (figure 5 e 6).

È stato possibile escludere il nesso di causalità tra danni e vibrazioni vista la modesta ampiezza di queste, anche se ripetute nel tempo.

La presenza di sollecitazioni di ampiezza superiore alla soglia di percettibilità (0,30 mm/s [Goldmann D.E. *A review of subjective response to vibration motion of the human body in the frequency range of 1 to 70 cps*" Naval Medical Res. Inst. Rept. N. 1, Project VM 004001, 1948] e l'elevato numero di ripetizioni ha comunque indotto la proprietà della strada a ritenere come necessario, un intervento di riqualificazione dell'asse viario per la minimizzazione del disagio.

Dai risultati del monitoraggio e dall'analisi è stato dunque possibile effettuare una progettazione mirata degli interventi mitigatori dell'impatto sismico. La soluzione adottata per la riqualificazione ha previsto la regolarizzazione del manto, lo spostamento dei sottoservizi affioranti, e la riduzione della velocità nel tratto di strada interessato.

Tabella 1. Caratteristiche tecniche della stazione di monitoraggio (MiniGraph 7000-x8, della NO-MIS Inc., U.S.A.)

| | |
|--|--|
| Risposta in frequenza | <ul style="list-style-type: none"> • da 2 a 400 Hz a 1024 campioni/secondo. • filtraggio <i>antialiasing</i> (risposta in frequenza sino a 1 Hz) • errore massimo del 2% per frequenze superiori a 30 Hz e del 3% per frequenze inferiori a 30 Hz |
| Sensibilità sismica | 0,03 mm/s |
| Trasduttore sismico | velocimetro triassiale (componente verticale, orizzontale longitudinale ed orizzontale trasversale) |
| Trasduttore sovrappressione aerea | ad elemento ceramico tarato sino a 150 dB |
| Temperatura di funzionamento | tra -15°C e 50°C. |

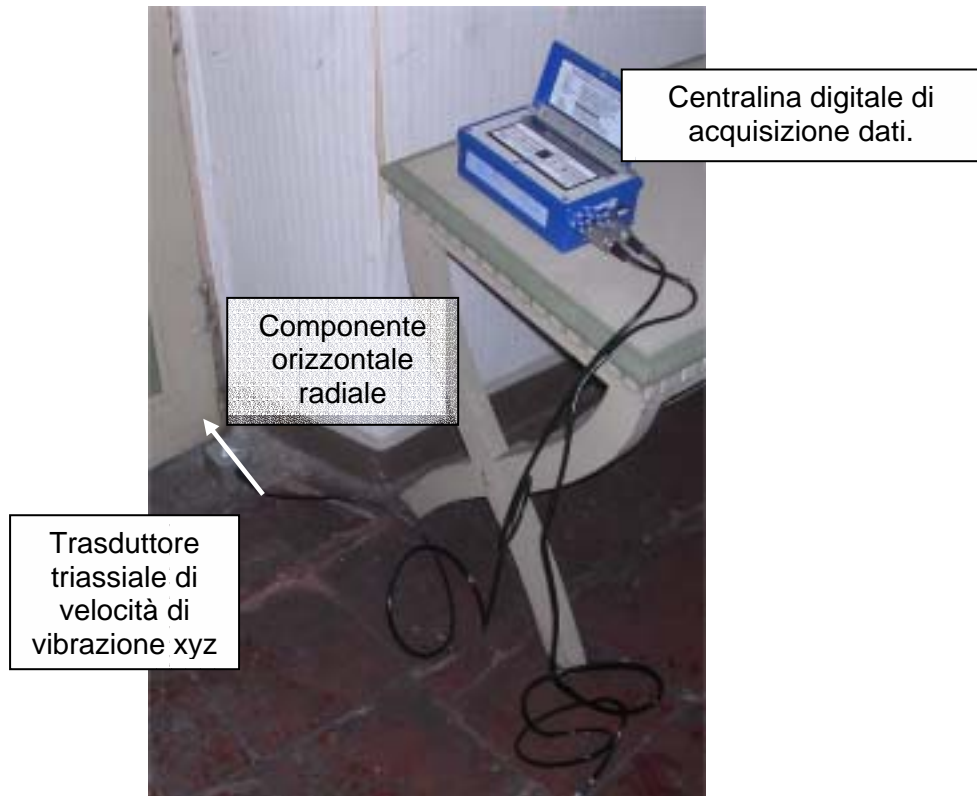
Foto 1. Manufatto ad elevata sensibilità alle vibrazioni.



Foto 2 - Traffico veicolare transitante sulla strada confinante con le case ed irregolarità del manto stradale



Punto di misura 1 – Manufatto civico 22 – Solaio , sulla terza elevazione dal p.c., in prossimità della porta-finestra con la componente radiale ortogonale all'asse della strada



Punto di misura 2 – Manufatto civico 24 - Cantina, all'interno della cantina, sotto al livello della strada con la componente radiale parallela all'asse della strada.



Punto di misura 3 – Manufatto civico 23 - Solaio, sulla terza elevazione dal p.c., in prossimità della finestra con la componente radiale ortogonale all’asse della strada.



Il trasduttore è posizionato al di sotto del sacco di sabbia così da minimizzarne l'effetto microfono.

Figura 1. Analisi sulle misure – Confronto con la normativa DIN 4150-3 Tabella 1. Restituzioni grafiche delle tre componenti R (radiale, V (), della velocità di vibrazione,) Confronto dei valori di picco della velocità di vibrazione con il valori di soglia dati dalla normativa

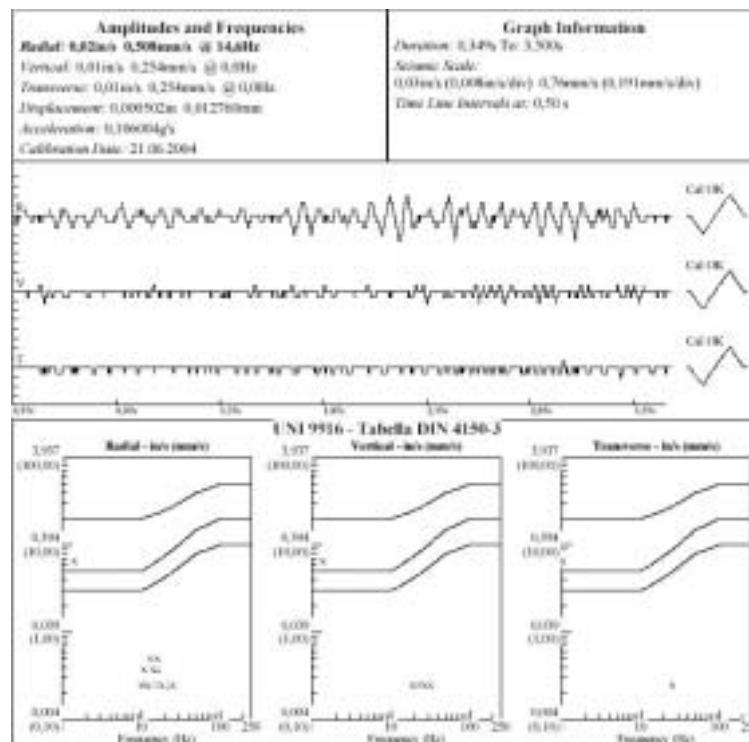


Figura 2. Analisi sulle misure – Trasformata di Fourier (FFT), Accelerazioni e Spostamenti. Nella componente radiale (ortogonale al piano della muratura) l'energia è concentrata tra 10 e 20 Hz. Nelle componenti verticali e trasversali l'energia è concentrata tra 10 e 30 Hz

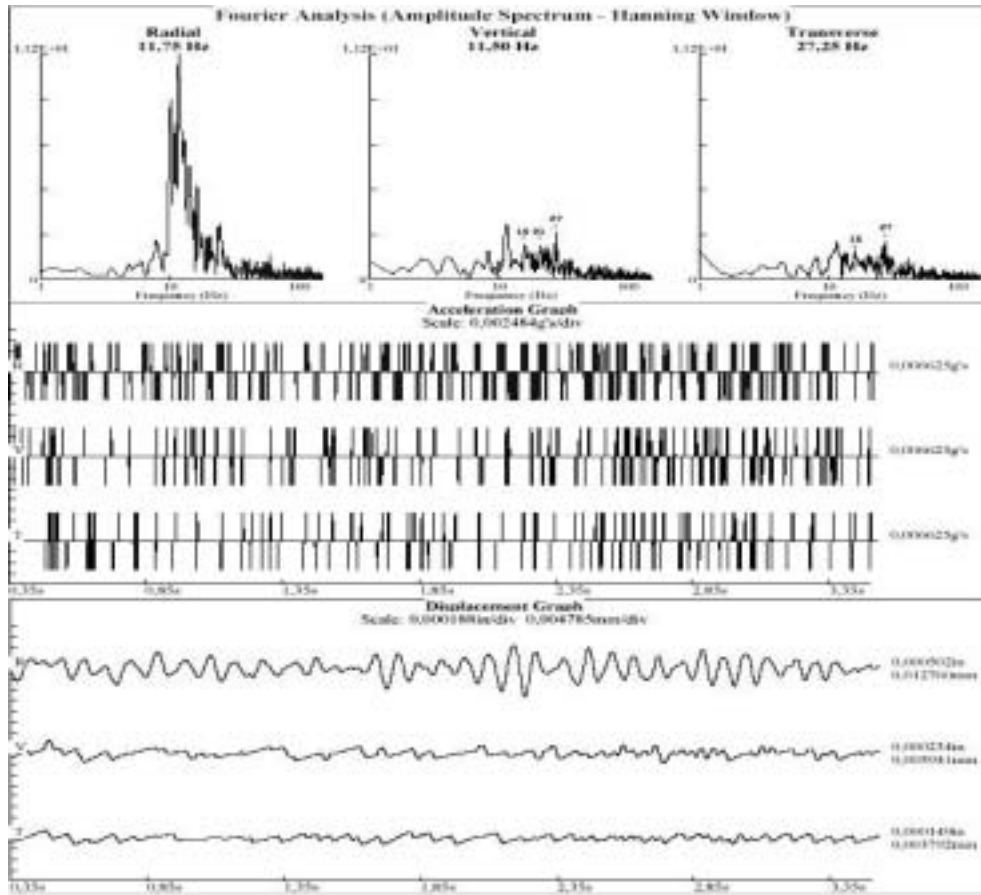


Figura 3. Analisi sulle misure – Spettro di risposta con smorzamento 5%, smorzamento 10% e Forma d'onda di risposta con smorzamento 10% e frequenza 2Hz

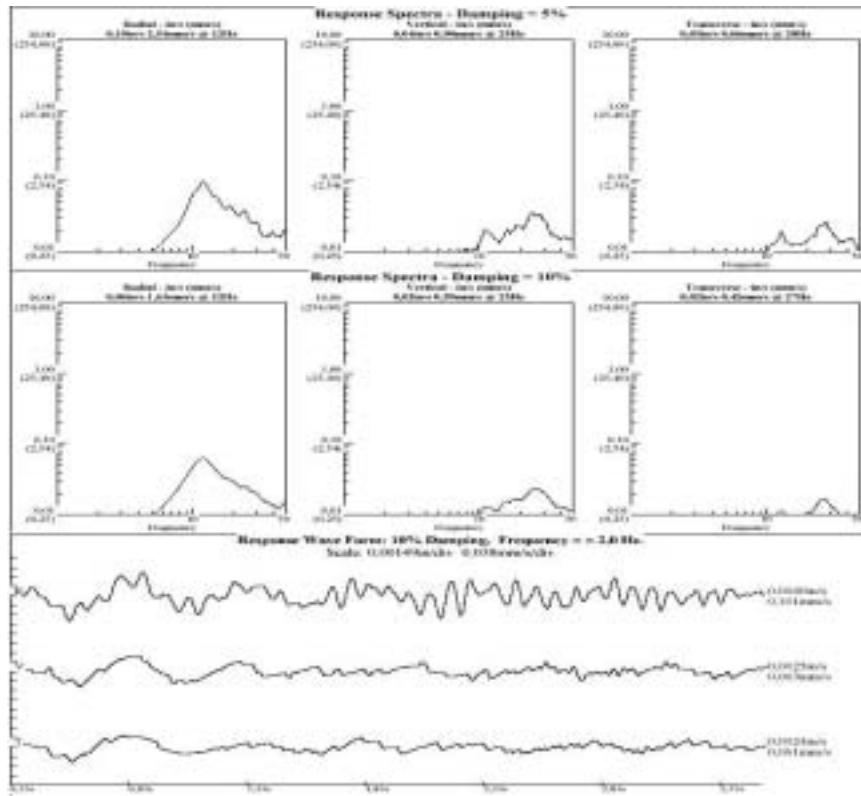


Figura 4. Analisi sulle misure – Forma d’onda di risposta con smorzamento 10% - frequenze 5Hz, 10Hz e 15Hz

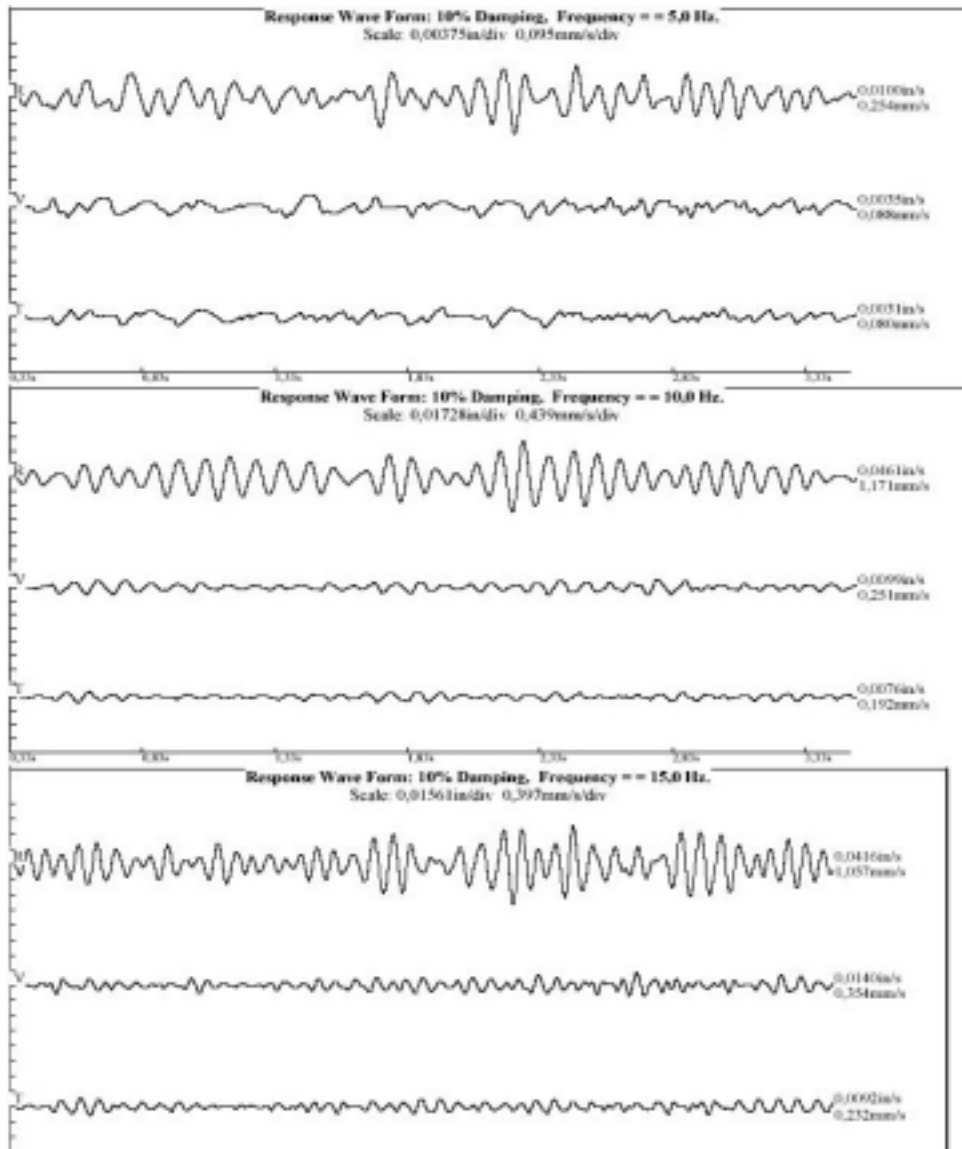


Figura 5. Media del numero di registrazioni effettuate dalla stazione di monitoraggio installata nel punto di misura 1 per fasce orarie

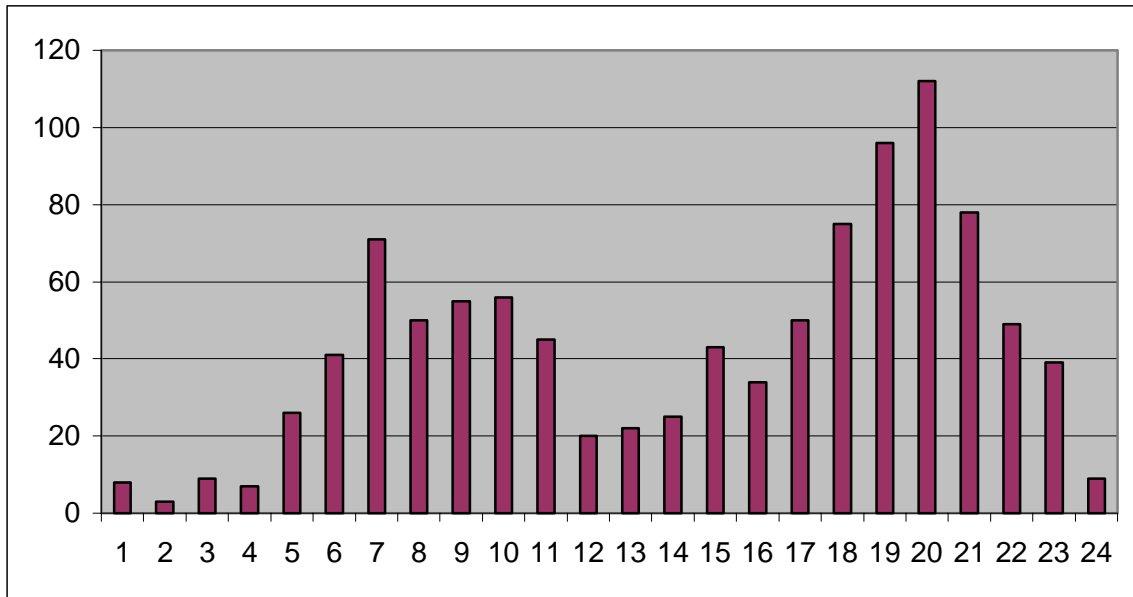


Figura 6. Media del numero di registrazioni effettuate dalla stazione di monitoraggio installata nel punto di misura 2 per fasce orarie

