

---

## **VIBRAZIONI DA TRAFFICO IN AREE URBANE: EFFETTI SUGLI EDIFICI E TECNICHE DI ATTENUAZIONE**

---

*Simone A.*

*Professore associato - Università di Bologna - [andrea.simone@mail.ing.unibo.it](mailto:andrea.simone@mail.ing.unibo.it)*

*Lantieri C.*

*Dottorando - Università di Bologna - [claudio.lantieri@mail.ing.unibo.it](mailto:claudio.lantieri@mail.ing.unibo.it)*

*Vignali V.*

*Assegnista di ricerca - Università di Bologna - [valeria.vignali@mail.ing.unibo.it](mailto:valeria.vignali@mail.ing.unibo.it)*

### **SOMMARIO**

Le vibrazioni indotte dal traffico costituiscono un problema diffuso, soprattutto nei centri storici di molte città italiane, a causa degli effetti indesiderati che possono generare a lungo termine sui fabbricati e sulle persone. L'intensità di questi fenomeni dipende da numerosi fattori tra cui le caratteristiche dei mezzi (massa, tipo di sospensioni, ecc...), le relative velocità, la regolarità del piano viabile, le proprietà del terreno di sottofondo, la struttura degli edifici esposti e, soprattutto, le caratteristiche meccaniche della pavimentazione. Appare quindi opportuno individuare criteri progettuali e tecnologie costruttive mirate alla mitigazione di questi fenomeni senz'altro fastidiosi ma, a certi livelli, anche nocivi. A tal fine, mediante un codice di calcolo alle differenze finite, è stata sviluppata un'approfondita analisi numerica mirata alla valutazione della propagazione delle vibrazioni generate dal traffico su due edifici del centro storico di Bologna adiacenti alla sede stradale. E' così stato possibile, in relazione ai materiali della pavimentazione ed alle condizioni al contorno, ottenere indicazioni utili alla progettazione di alcune tecniche di attenuazione delle vibrazioni.

### **ABSTRACT**

Vibration phenomena produced by road traffic are very interesting in terms of induced annoyance in human body and in buildings, especially in urban historical areas. Road infrastructure designers and constructors should mainly be oriented to a search for adequate design criteria and constructive technologies aimed at guaranteeing a reduction in these harmful undesired events. These purposes depend on heavy vehicles characteristics (speed, weight, suspended masses, tire features), road surface conditions, stratification of subgrade, buildings characteristics but especially pavement materials properties. So the careful study of vehicle-pavement-building interaction becomes a primary requirement. The authors, by means of a finite differences technique, have developed a numerical analysis with the aim to evaluate the propagation and the reduction of traffic-induced vibration on two historical palaces placed in the centre of Bologna. In this way they provide results that are particularly significant for vibration reduction techniques design.

*Keywords: vibrazioni da traffico, tecniche di attenuazione, edifici storici*

## 1. INTRODUZIONE

Le vibrazioni indotte dal traffico sugli edifici adiacenti alla sede stradale costituiscono un problema diffuso in molte città del mondo in quanto sono fonte di fastidio per le persone, possono causare danni architettonici o strutturali ai fabbricati e compromettere il funzionamento di delicati dispositivi elettronici. Il problema, poi, assume particolare rilevanza nei centri storici, per gli effetti a lungo termine che si possono verificare su edifici di elevato valore artistico ed architettonico.

Le costruzioni civili, infatti, per effetto delle ripetute sollecitazioni prodotte dal passaggio dei veicoli, subiscono nel corso della loro vita utile una progressiva alterazione dei materiali che le costituiscono, dalla quale deriva una perdita delle caratteristiche di integrità e quindi di resistenza meccanica.

Lo sforzo dei progettisti e dei costruttori di infrastrutture stradali è fortemente orientato verso l'individuazione di adeguati criteri progettuali e di tecnologie costruttive che possano garantire l'attenuazione di questi fenomeni indesiderati ed, a certi livelli, anche nocivi. Tra i diversi provvedimenti che possono essere adottati si ricordano (Dondi et al., 2006):

- il controllo della regolarità superficiale delle pavimentazioni, mediante un'efficace manutenzione periodica;
- il miglioramento delle caratteristiche meccaniche del terreno di sottofondo;
- il controllo del flusso del traffico, del peso e della velocità dei veicoli transitanti;
- la schermatura delle vibrazioni tramite barriere o trincee, ubicate tra la sorgente e gli edifici da salvaguardare;
- l'adozione di pavimentazioni antivibranti, ottenute agendo sulle proprietà smorzanti dei materiali che le costituiscono o inserendo appositi materassini antivibranti al loro interno.

Il raggiungimento di questi obiettivi dipende da numerosi fattori tra cui (Bucchi et al., 1998; Dondi et al., 2005):

- le caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti la sovrastruttura e la sua regolarità superficiale (presenza di irregolarità discrete quali buche, fessure, chiusini);
- le specifiche dei mezzi transitanti (peso, velocità, tipo di sospensioni);
- le proprietà e la stratificazione del terreno di sottofondo;
- le caratteristiche dell'edificio esposto.

Il fattore più significativo, però, è rappresentato dalla presenza di irregolarità discrete sul piano viabile, le quali, al passaggio dei veicoli, in particolar modo quelli pesanti, causano forze di reazione che inducono un moto oscillatorio verticale del mezzo stesso e delle sue sospensioni. Di conseguenza si generano forze dinamiche che creano discomfort per l'utente, fatica negli organi meccanici del veicolo, un più rapido deterioramento del piano viabile ed, infine, vibrazioni che si propagano nella sovrastruttura stradale e nel sottosuolo. Queste ultime possono raggiungere le fondazioni degli edifici adiacenti, causando sia l'assestamento del terreno sottostante sia la propagazione delle vibrazioni alle strutture in elevazione (Domenichini et al., 1998).

## 2. L'INDAGINE SPERIMENTALE NEL CENTRO STORICO DI BOLOGNA

### INTRODUZIONE

L'indagine sperimentale è stata condotta con l'obiettivo di approfondire gli effetti causati dalle vibrazioni indotte dal traffico veicolare sul degrado degli edifici di elevato pregio artistico ed architettonico. Sono stati analizzati, in particolare, due palazzi storici del centro di Bologna adiacenti a due importanti vie di comunicazione della città.

Il primo, Palazzo Rangoni-Machiavelli, situato in via Farini, presenta una pianta rettangolare sviluppata su sei livelli, cinque in elevazione ed uno interrato (figura 1). Il piano terra è caratterizzato da un porticato situato a ridosso della sede stradale, che ha subito nel tempo un notevole dissesto statico. Nel 1987, in particolare, le cinque campate che lo costituiscono sono state rinforzate con opere provvisorie atte a scongiurare il collasso strutturale, consistenti in un incamicciamento di una colonna lesionata con un pilastro cerchiato in c.a. ed in un puntellamento delle arcate mediante muratura di mattoni (figura 2).



Figura 1 - Palazzo Rangoni-Machiavelli



Figura 2 - Tamponamenti in muratura e particolare della colonna incamicciata

Il secondo, l'ex Convento di San Mattia, situato in via Sant'Isaia, è costituito dalla chiesa con annessi convento e chiostro e presenta una pianta trapezoidale sviluppata su quattro livelli, uno interrato, uno ammezzato e due in elevazione (Dezi et al., 2006). Dal 1974, anno in cui si è provveduto al restauro ed alla rifunzionalizzazione del complesso, è destinato a scuola elementare, centro civico di quartiere e museo pedagogico. L'edificio presenta un notevole degrado degli elementi architettonici che si evidenzia in corrispondenza di porzioni di muratura con intonaco disgregato o parzialmente staccato, pareti con tinteggiatura alterata cromaticamente, bancali delle finestre e colonne del portico corrosi (figura 3).

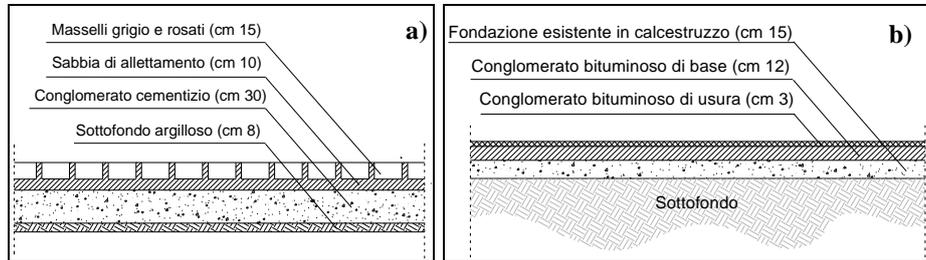


**Figura 3 – Ex Convento di San Mattia: degrado della facciata e delle colonne**

I due edifici storici presi in considerazione differiscono tra loro per:

- caratteristiche geometriche della struttura: Palazzo Rangoni-Machiavelli si sviluppa in altezza e prevede delle cantine sotto al portico, mentre l'ex Convento di San Mattia è distribuito prevalentemente in lunghezza ed ha un piano interrato che non si allunga fino alla parte porticata;
- quota rispetto al piano viabile della pavimentazione alla veneziana del portico: per Palazzo Rangoni-Machiavelli è posta a circa 1 m, mentre per l'ex convento di San Mattia si trova a circa 15 cm;
- tipo di sovrastruttura stradale adiacente all'edificio: Palazzo Rangoni-Machiavelli si affaccia su via Farini che è realizzata in masselli di granito grigio e rosato (figura 4a), mentre l'ex convento di San Mattia è distribuito lungo via Sant'Isaia caratterizzata da una pavimentazione in conglomerato bituminoso (figura 4b).

In questo modo è stato possibile effettuare un'indagine approfondita sull'influenza di diversi fattori sulla propagazione delle vibrazioni da traffico negli edifici adiacenti alla sede stradale, ottenendo indicazioni utili alla progettazione delle relative tecniche di mitigazione ed abbattimento.



**Figura 4 – Sovrastrutture stradali adiacenti ai due edifici storici**

### **L'INDAGINE NUMERICA ALLE DIFFERENZE FINITE**

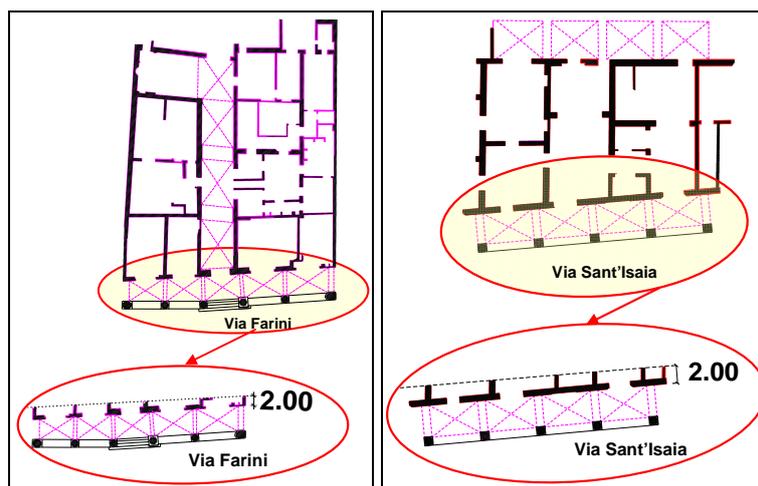
L'indagine numerica alle differenze finite è stata condotta in tre fasi distinte:

- quella iniziale, mirata alla creazione di una griglia in grado di descrivere al meglio la geometria dei due edifici in tempi di calcolo ragionevoli;
- quella intermedia, finalizzata alla simulazione del carico dinamico trasmesso dai veicoli alle strutture;
- quella finale, che ha previsto la modellazione di diversi interventi di attenuazione delle vibrazioni, al fine di ricercare indicazioni utili alla loro progettazione.

### **LA MODELLAZIONE DEGLI EDIFICI STORICI**

Per ottenere una griglia in grado di descrivere al meglio i due edifici in tempi di calcolo ragionevoli, dopo aver esaminato il loro rilievo completo, sono state apportate alcune semplificazioni alla geometria reale:

- è stata modellata soltanto la porzione di struttura che risente maggiormente delle vibrazioni da traffico, composta dal portico e dai primi due metri di fabbricato (figura 5);

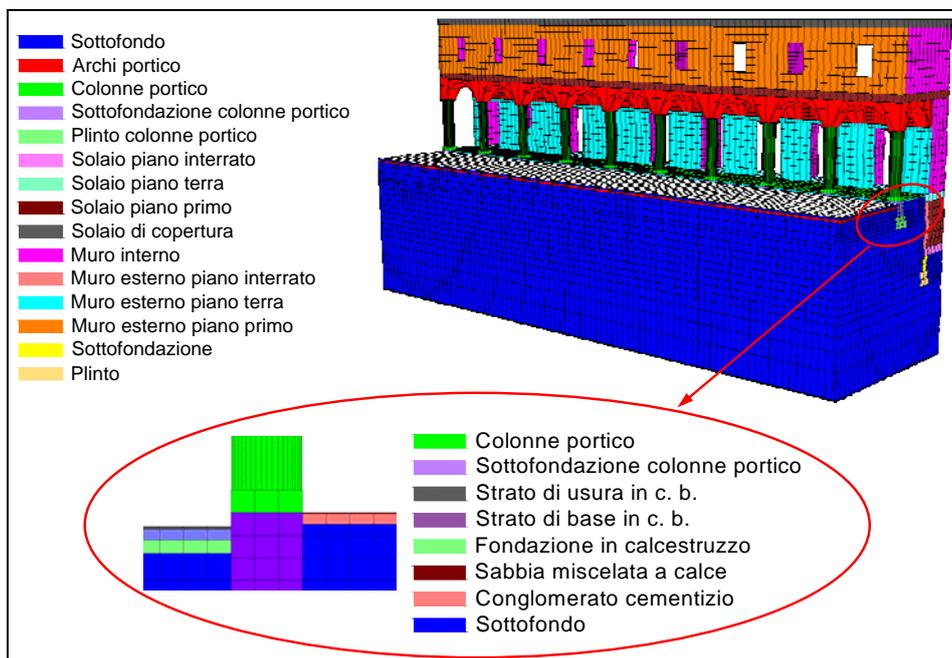


**Figura 5 – Porzione di fabbricato modellato**

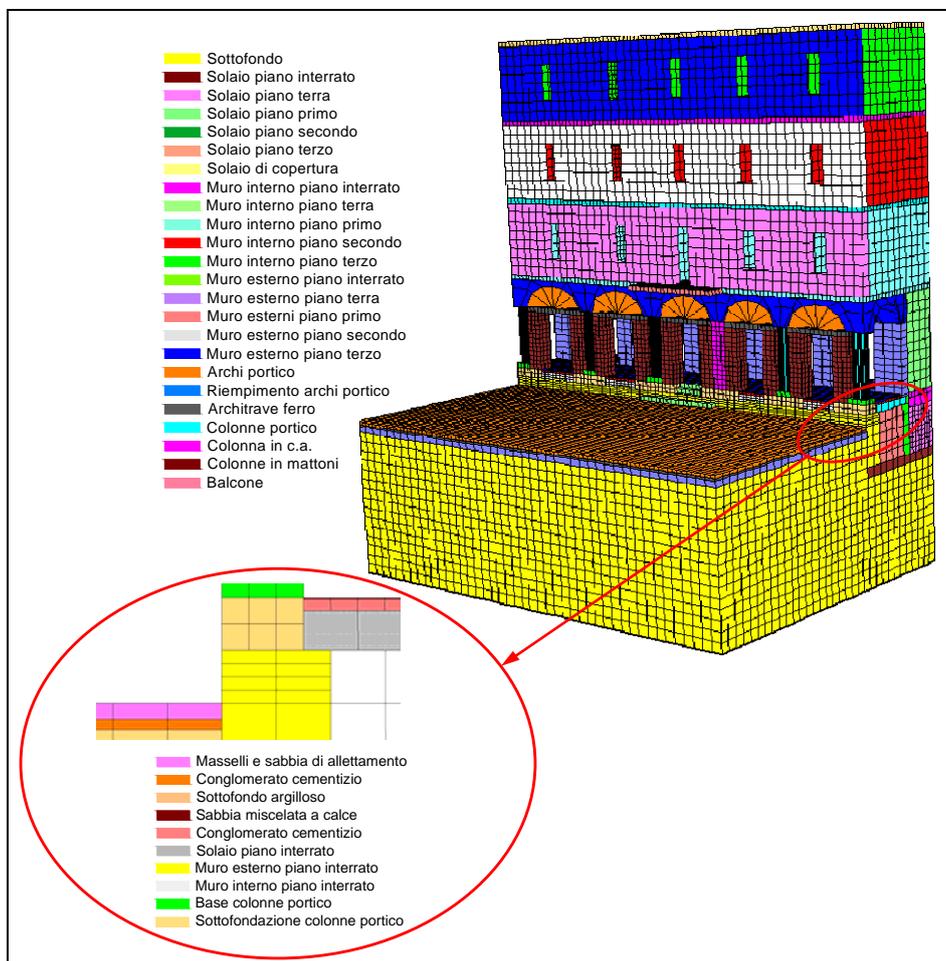
- il tetto a falde inclinate è stato sostituito da una copertura piana sulla quale agisce un opportuno sovraccarico;
- gli spessori degli allineamenti orizzontali e verticali sono stati ricondotti a valori costanti, al fine di ottenere una mesh regolare e continua in ogni punto.

Poiché l'analisi si prefigge non solo di analizzare la propagazione delle vibrazioni, ma anche di valutare l'efficacia di diversi interventi di attenuazione del fenomeno, la dimensione delle maglie della griglia nelle vicinanze della sorgente di disturbo è stata opportunamente ridotta, al fine di ottenere una maggiore accuratezza nella modellazione. Il raffittimento è stato effettuato utilizzando numeri multipli, in modo da conservare una migliore continuità nel posizionamento dei nodi e quindi della propagazione degli sforzi. A causa delle esigenze del programma di calcolo utilizzato, si è proceduto dapprima ad una soluzione statica del modello, poi all'applicazione dinamica del carico. Si è fatto ricorso ad ipotesi di *free field* ai limiti verticali della griglia e di *quiet boundary* alla base inferiore, per evitare la riflessione delle onde ai bordi e favorirne quindi la dispersione.

Nelle figure 6 e 7 si riporta il modello ottenuto per i due edifici con particolare attenzione alla schematizzazione della pavimentazione stradale (figura 4) e di quella alla veneziana dei portici. Quest'ultima è costituita da uno strato superiore, di spessore pari a 1.5 cm, realizzato in sabbia lavata, ghiaia o pietrisco mescolato a frammenti di coppi o mattoni con calce grassa e da un sottofondo, di spessore pari a 11 cm, in conglomerato cementizio.



**Figura 6 – Ex convento di San Mattia: particolare della pavimentazione stradale e di quella alla veneziana del portico**



**Figura 7 – Palazzo Rangoni-Machiavelli: particolare della pavimentazione stradale e di quella alla veneziana del portico**

### 2.2.2 LA FUNZIONE DI CARICO

Il carico dinamico trasmesso dai veicoli è stato valutato partendo dai dati di traffico forniti dal Comune di Bologna, che hanno rivelato una notevole percentuale di mezzi pesanti, in particolare pubblici. È stato considerato il peso di un autobus a pieno carico, seguendo una legge di tipo semisinusoidale, sulla base di altre esperienze che confermano la migliore risposta del modello all'applicazione di tale forzante (Unterberger et al., 2002; Dondi et al., 2006). La frequenza di applicazione è stata assunta pari a 20 Hz, sulla base della velocità media di passaggio dei veicoli e tenuto conto anche delle eventuali ristrettezze della sezione di transito. Il carico complessivo è stato distribuito sugli assi dell'autobus caricando il 65% del peso sull'asse posteriore, con una forza risultante su singola ruota pari a 78 kN. Nel caso della pavimentazione in

masselli, per simulare gli effetti dinamici dovuti alle maggiori irregolarità, si è incrementato il carico di circa il 20% (Cebon, 1999).

### 2.2.3 I RISULTATI OTTENUTI

Per verificare il corretto funzionamento dei due modelli realizzati, inizialmente è stata indagata la diffusione delle vibrazioni da traffico sia sulla pavimentazione alla veneziana del portico, sia nei vari piani dei due edifici storici. In particolare è stato applicato il carico sulla sovrastruttura stradale in un punto antistante i due palazzi (punto 3, figure 8 e 9) ed è stato monitorato l'andamento della velocità di picco.

Per entrambi i casi modellati i risultati evidenziano che quest'ultima si diffonde secondo una distribuzione radiale con valore massimo in prossimità della sorgente di disturbo, che diminuisce passando dal piano terra a quelli in elevazione (figure 8 e 9).

Il confronto tra i picchi dei vettori velocità nei due casi modellati evidenzia, inoltre, l'influenza della geometria della struttura sulla propagazione delle vibrazioni da traffico negli edifici adiacenti alla sede stradale. Palazzo Rangoni-Machiavelli, infatti, a differenza dell'ex Convento di San Mattia, è caratterizzato dalla presenza della cantina direttamente sotto al portico, che influenza gli effetti del fenomeno vibratorio.

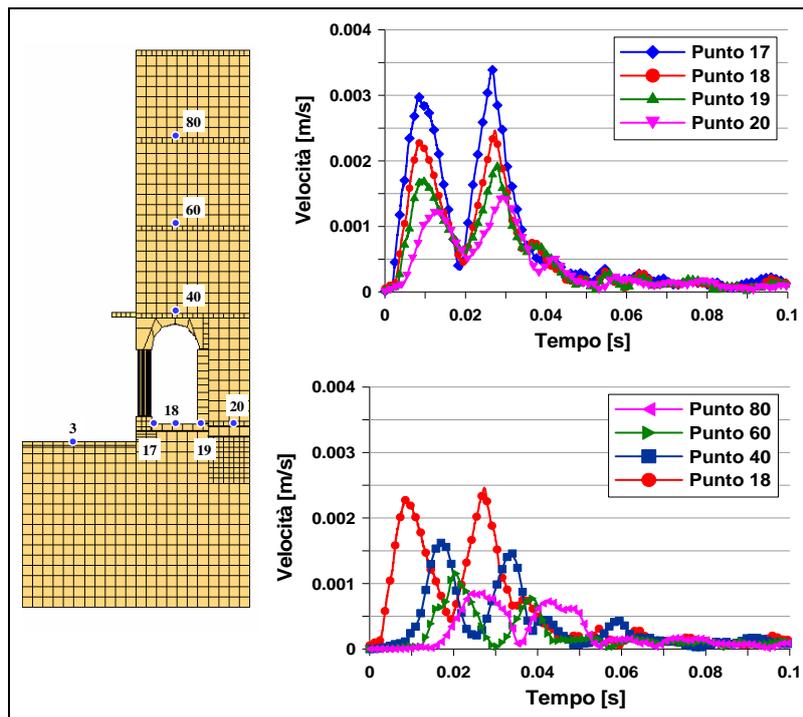
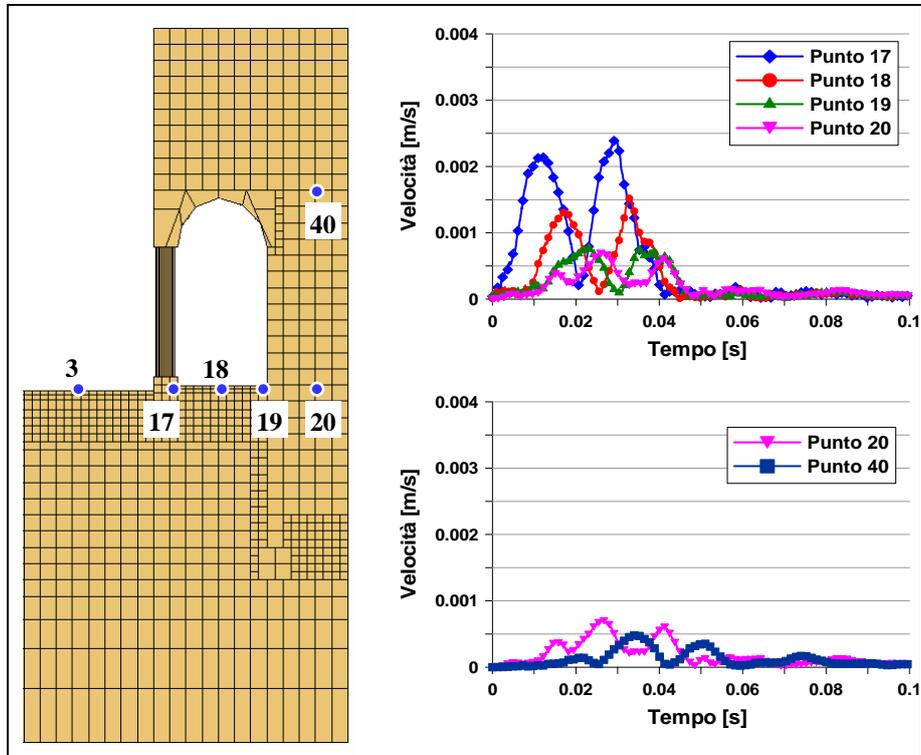


Figura 8 – Palazzo Rangoni-Machiavelli: andamento delle velocità di picco



**Figura 9 – Ex convento di San Mattia: andamento delle velocità di picco**

Un'ulteriore conferma del corretto funzionamento dei due modelli è stato ottenuto dall'esame della pavimentazione adiacente alla bocca di lupo, ovvero l'apertura che dà aria e luce ad un locale seminterrato.

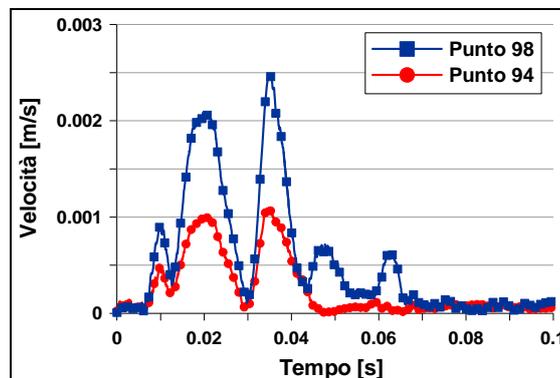
Da un'analisi effettuata nel centro storico di Bologna sono state frequentemente riscontrate delle lesioni in prossimità delle diagonali delle aperture (figura 10); si è ritenuto quindi opportuno verificare sul modello se la loro presenza o assenza provocasse un eventuale innalzamento della velocità di picco e quindi una maggior probabilità di lesione.



**Figura 10: Lesioni presenti in prossimità delle bocche di lupo**

È stato applicato il carico in corrispondenza di una lastra sia con bocca di lupo, sia senza, sollecitate in ugual maniera. I punti di controllo della velocità di picco sono stati scelti sulla diagonale dell'apertura nel caso con (punto 94) e senza (punto 98) bocca di lupo, scelta supportata dall'analisi visiva precedentemente accennata; sono stati inoltre scelti anche i punti simmetrici di entrambi, in modo da evidenziare un eventuale comportamento analogo.

Come mostrato in figura 11, emerge con chiarezza che il punto 94 registra valori di velocità nettamente superiori rispetto al 98, con un picco 2.5 volte più elevato e un tempo di smorzamento pari a circa il 30% in più; analogo è stato il comportamento dei punti simmetrici.



**Figura 11: Andamento delle velocità di picco in corrispondenza delle lesioni**

Si può quindi supporre che la presenza di bocche di lupo nella lastra della pavimentazione porti alla formazione di zone più facilmente lesionabili.

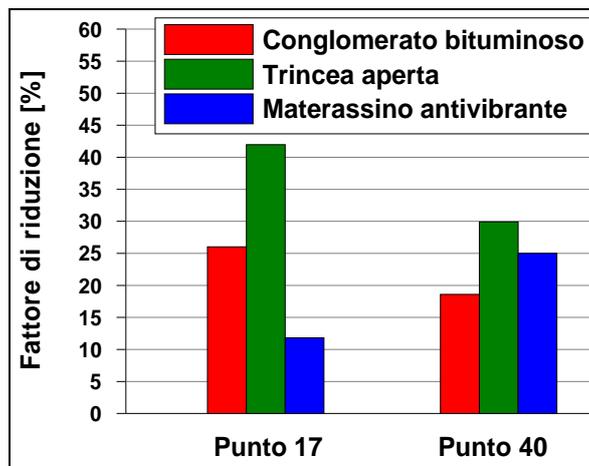
Il modulo della velocità di picco nei punti monitorati (figura 8 e 9) è stato poi confrontato con il valore di riferimento indicato nella normativa UNI 9916 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici" per costruzioni di tipo D (monumenti storici) sottoposte ad esposizione permanente e frequenze comprese tra 8 e 30 Hz, come per il traffico su strada. Siccome il valore di soglia suggerito dalla norma è superato per entrambi gli edifici considerati, è stata valutata l'efficacia di alcune possibili tecniche di attenuazione delle vibrazioni da traffico consistenti in:

- sostituzione dello strato superficiale in masselli con uno in conglomerato bituminoso;
- inserimento a fianco della pavimentazione, davanti ai due palazzi storici, di una trincea aperta di profondità e larghezza pari rispettivamente a 0.55 m e 0.50 m;
- introduzione all'interno della sovrastruttura esistente di un materasso smorzante in aggregato poliuretano, risvoltato sui fianchi della stessa. Quest'ultimo, in particolare, è posizionato al di sotto dello strato di fondazione ed è stato caratterizzato mediante test eseguiti in precedenza (Dondi et al., 2006).

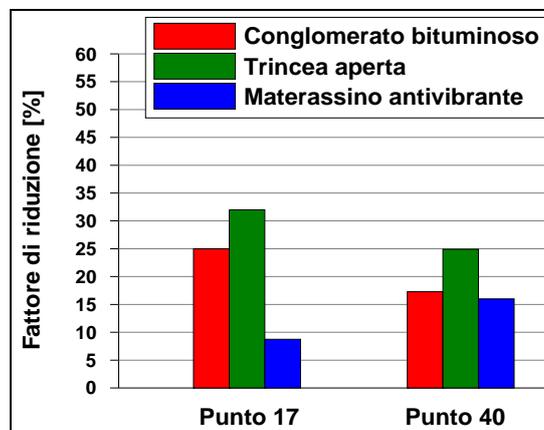
Per meglio quantificare l'efficacia dei vari sistemi di attenuazione, si è ritenuto opportuno riportare i risultati in forma di fattori di riduzione percentuale della velocità di picco rispetto al caso standard privo di interventi (figure 12 e 13). Il fattore di riduzione ( $R_f$ ) è definito dalla seguente espressione:

$$R_f = (1 - A_r) \cdot 100 \quad (1)$$

dove  $A_r$  è il rapporto tra la velocità di picco registrata nello stesso punto in presenza ed in assenza di intervento. Sono stati considerati, in particolare, alcuni punti significativi dei due edifici, in corrispondenza del primo piano (punto 40) e nel punto più vicino alla sorgente di disturbo (punto 17).



**Figura 12 – Palazzo Rangoni-Macchiavelli: fattori di riduzione percentuale della velocità di picco**



**Figura 13 – Ex convento di San Mattia: fattori di riduzione percentuale della velocità di picco**

Lo studio effettuato mette in evidenza come le pavimentazioni in conglomerato bituminoso garantiscano una maggiore mitigazione delle vibrazioni rispetto a quelle in masselli indipendentemente dalla sorgente. Queste ultime, inoltre, sono caratterizzate da numerose irregolarità discrete le quali al passaggio dei veicoli, in particolare quelli pesanti, causano forze di reazione che a loro volta possono raggiungere le fondazioni degli edifici adiacenti alla strada propagandosi alle strutture in elevazione. Il maggior effetto attenuatore del conglomerato bituminoso è evidente soprattutto nei punti a breve distanza dalla sorgente di disturbo e va diminuendo allontanandosi dalla zona di eccitazione. L'interesse per questo tipo di soluzione, però, è spesso condizionato da esigenze estetiche ed architettoniche, che per le applicazioni nei centri storici rendono più idonea l'adozione di pavimentazioni ad elementi.

Per entrambi i modelli il sistema che garantisce la maggiore mitigazione delle vibrazioni è la realizzazione di una trincea a fianco della sovrastruttura, parallelamente al suo asse. L'efficacia di tale metodo è dovuta ai fenomeni di riflessione, diffusione e diffrazione dell'energia d'onda causata dalla presenza della discontinuità costituita dalla barriera. Il beneficio si riscontra soprattutto al di là della trincea stessa (punto 17), dove cioè si viene a creare una zona protetta la cui ampiezza è funzione della profondità della barriera. L'interesse per questo tipo di soluzione, però, è soprattutto speculativo poiché si tratta di un intervento di difficile realizzazione pratica in ambito urbano, in quanto il sottosuolo è sede di numerosi sottoservizi.

L'inserimento di un materassino antivibrante all'interno della sovrastruttura stradale esistente, invece, ha un effetto attenuatore crescente con la distanza dalla sorgente il disturbo: i fattori di riduzione, infatti, si presentano maggiori quanto più il punto di rilievo è distante dalla zona di eccitazione.

### 3. CONCLUSIONI

Dall'esame dei risultati ottenuti si possono dedurre le seguenti conclusioni:

- la metodologia di modellazione utilizzata si è dimostrata un utile strumento per lo studio dei meccanismi di propagazione delle vibrazioni da traffico negli edifici

adiacenti alla sede stradale e per l'analisi dell'efficacia di alcuni possibili sistemi di attenuazione del disturbo derivante da queste ultime. Consentendo una semplice schematizzazione dei fenomeni reali, ne riproduce la dinamica con buona precisione in termini sia quantitativi che qualitativi;

- i fattori di riduzione percentuale della velocità di picco ottenuti ribadiscono l'efficacia degli interventi di attenuazione considerati, i quali consentono di ottenere un significativo abbattimento dell'intensità del fenomeno vibratorio;
- le prestazioni migliori si conseguono con l'introduzione di una trincea a fianco della pavimentazione, parallelamente al suo asse. Quest'ultima, in particolare, analogamente a quanto accade inserendo uno strato superficiale in conglomerato bituminoso, esplica un effetto attenuatore maggiore nei punti a breve distanza dalla sorgente di disturbo. Nelle regioni lontane dalla zona di eccitazione, invece, i benefici maggiori si ottengono prevedendo un materassino antivibrante all'interno della sovrastruttura stradale;
- in numerose simulazioni effettuate è stato superato il limite inferiore del livello del danno di soglia proposto dalla normativa per gli edifici particolarmente sensibili. Sebbene esistano ancora notevoli incertezze sull'univoca individuazione di un valore di soglia rispetto a cui cautelarsi, tale risultato dovrebbe indurre una riflessione sulle azioni da intraprendere per limitare il rischio di danno negli edifici di elevato valore artistico ed architettonico.

#### **4. BIBLIOGRAFIA**

- Bucchi A., Dondi G., Bonini A. (1998), Generazione e propagazione delle vibrazioni indotte dal traffico in aree urbane, Atti del Convegno SIIV "Adeguamento funzionale e manutenzione delle infrastrutture viarie", Milano, Italia;
- Cebon D. (1999), Handbook of vehicle-road interaction, Swets & Zeitlinger B.V. Lisse, the Netherlands;
- Dezi G. & Lantieri C. (2006), Analisi dell'effetto delle vibrazioni da traffico sugli edifici storici bolognesi: contributo allo studio delle tecniche per la conservazione della pavimentazione del portico dell'ex-convento di San Mattia e del palazzo Rangoni-Machiavelli, Inarcos, n. 675, pp. 863-866;
- Domenichini L., Crispino M., D'Apuzzo M. & Ferro R. (1998), Vibrazioni indotte dal traffico stradale, Quaderno AIPCR del XXIII Convegno Nazionale Stradale, Verona, Italia;
- Dondi G. & Simone A. (2005), Soluzioni tecniche innovative per la mitigazione delle vibrazioni da traffico stradale, Atti della Conferenza Nazionale sulla Politica Energetica in Italia, Bologna, Italia;
- Dondi G., Grandi F. & Vignali V. (2006), Traffic induced vibration theoretical-experimental study of dumping pavements, 10th International Conference on Asphalt Pavement, august 12-17, Quebec, Canada;
- Dondi G., Grandi F. & Vignali V. (2006), Vibrazioni da traffico: metodi di mitigazione in ambito urbano, Atti del XVI Convegno Nazionale SIIV, 20-22 settembre, Cosenza, Italia;
- Unterberger W., Honeger C., Preh A. (2002), Advanced application of FLAC analysis in traffic vibration prediction, iC Consulente, Vienna, Austria.