

## **VALUTAZIONE PREVISIONALE DELLE VIBRAZIONI DAL SOTTOATTRAVERSAMENTO DELLA LINEA AV NELLA CITTÀ DI FIRENZE**

Carlo Baistrocchi (1), Luciano Rocco (2)

- 1) Scuola di Architettura, Università degli Studi di Firenze
- 2) Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Firenze

### **1. Premessa**

Il passaggio di treni Alta Velocità in galleria sotto aree urbane comporta l'immissione di vibrazioni nelle costruzioni soprastanti, vibrazioni che possono produrre sia disturbo alle persone sia danni agli edifici. Il sottoattraversamento della città di Firenze che interesserà una parte del centro storico richiede, per la presenza di edifici monumentali, un esame previsionale volto a individuare eventuali situazioni critiche, particolarmente sotto l'aspetto di danni alle strutture, in modo da poter adottare adeguate soluzioni durante la costruzione. Per una valutazione preliminare si può utilizzare un modello matematico empirico semplificato di provata attendibilità, del quale si riportano una sintetica descrizione e alcuni esempi di calcolo.

### **2. Caratteristiche dell'attraversamento**

Il Passante AV prevede la costruzione di una coppia di nuovi binari che si svilupperanno in galleria, per circa 5 km, nel tratto urbano tra le attuali stazioni ferroviarie di Firenze Campo di Marte e di Firenze Rifredi, lungo il quale è anche prevista in posizione baricentrica la nuova stazione AV in sotterraneo.

Il sistema delle gallerie naturali di linea è costituito da due gallerie a semplice binario che corrono affiancate dagli imbocchi alla stazione, con sezione circolare, diametro interno 8,3 m e diametro esterno 9,4 m. Il rivestimento definitivo è in conci prefabbricati in c.a. spessi 40 cm impermeabili, formanti anelli universali (6 conci + chiave), di lunghezza media pari a 1,50 m.

Il tracciato del sottoattraversamento è indicato in figura 1 con linea rossa tratteggiata.

### **3. Geologia**

Lo scavo delle gallerie naturali interesserà tre unità sedimentarie che, dalle più antiche alle più recenti, sono:

1. le argille turchine del Supersistema del Lago Firenze-Prato-Pistoia: sedimenti di origine lacustre, sovraconsolidati, costituiti prevalentemente da argille sabbiose o limose o da limi argillosi, contenenti frequenti inclusi ghiaiosi di origine calcarea
2. i depositi del Supersistema di Firenze, nei quali si possono distinguere due litofacies:
  - argille sabbiose e limose, o limi argillosi, a consistenza semisolida, con livelli ghiaiosi sabbiosi addensati e con contenuto variabile di limo
  - ghiaie eterometriche con ciottoli, in matrice da limoso argillosa a limoso sabbiosa; a volte sono intercalati livelli limoso argillosi o limoso sabbiosi (di spessore massimo intorno al metro)
3. i depositi del Supersistema dell'Arno: costituiti in prevalenza da ghiaie sabbiose addensate e in misura minore da argille limose compatte e limi argillosi di media plasticità. Possono presentare inclusi ciottoli arenacei [1]

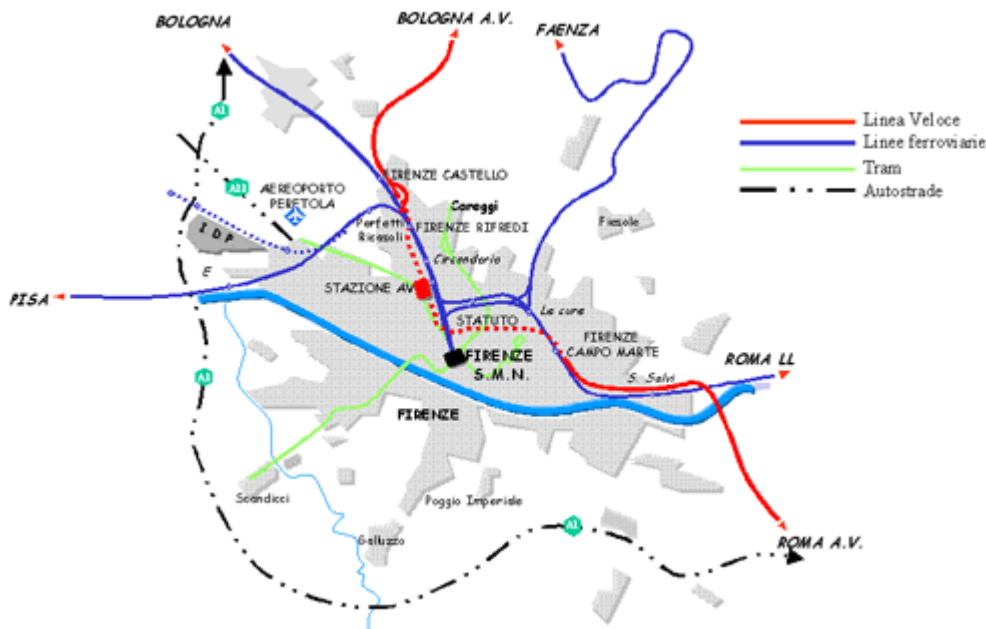


Figura 1 - La mappa del passante AV: il tratto in galleria è indicato con linea rossa tratteggiata (fonte RFI)

#### 4. Il modello di calcolo semplificato

Per la valutazione delle vibrazioni si è utilizzato il modello di calcolo analitico/empirico descritto nella referenza [2]. Si tratta di un modello semplificato utile per prevedere sin dalle prime fasi di studio dei percorsi di linee ferroviarie AV in galleria i livelli delle vibrazioni indotte dal passaggio dei treni sulle strutture degli edifici soprastanti per valutare se possono essere causa di disturbo sulle persone e di danni alle strutture. Di seguito se ne riporta una sintetica descrizione.

##### 4.1 Caratterizzazione delle vibrazioni della galleria

Le vibrazioni nel terreno si originano, al passaggio dei treni, dalle vibrazioni delle pareti della galleria, la quale si può considerare perfettamente accoppiata con il terreno circostante.

La grandezza qui assunta per esprimere l'entità della vibrazione è il Livello di accelerazione della vibrazione  $L_a$  così definito:

$$(1) \quad L_a = 20 \lg \frac{a_{rms}}{a_0} \quad [\text{dB}]$$

dove  $a_{rms}$  è il valore dell'accelerazione e  $a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$  è il valore della accelerazione di riferimento. La grandezza è espressa in funzione di bande di 1/3 di ottava per un campo di frequenza da 12,5 Hz a 315 Hz.

Si considerano rotaie continue saldate e struttura della galleria in calcestruzzo.

La massa delle pareti della galleria esprimibile mediante il loro spessore medio  $d_m$  influenza il livello di vibrazione delle stesse. È stato rilevato da misure in opera che partendo da uno spessore medio di circa 0,4 m il livello di accelerazione della vibrazione delle pareti subisce un decremento  $\Delta' L_a$ , con l'aumentare dello spessore medio  $d_m$ , pari a:

$$(2) \quad \Delta' L_a = -56 \lg \frac{d_m}{0,4} \quad [\text{dB}]$$

In tabella 1 è riportato lo spettro dell'accelerazione sulle pareti di una galleria aventi spessore medio 0,6 m. Esso è stato calcolato mediante la (2) a partire da rilievi sperimentali condotti sulle pareti, di spessore medio 0,75 m, di una galleria di una linea a doppio binario percorsa da treni a velocità media di 70 km/h.

Tabella 1 – Livelli di accelerazione della vibrazione strutturale delle pareti della galleria per uno spessore medio pari a 0,6 m

Livello di accelerazione di vibrazione (re $10^{-6} \text{ m/s}^2$ ) $L_a$ (dB)	Frequenza c.b. 1/3 ottava (Hz)														
	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315
	66	67	67	73	80	89	95	94	93	87	88	88	90	91	90

Il carico massimo per asse della linea AV in esame è di 25 t pari a  $2,45 \cdot 10^5 \text{ N}$  circa il doppio del carico asse massimo di riferimento, pari a  $1,2 \cdot 10^5 \text{ N}$ , per cui i valori dei Livelli di accelerazione della vibrazione delle pareti della galleria della tabella 1 vanno aumentati di 3 dB.

L'adattamento dello spettro per velocità superiori a 70 km/h si ottiene incrementando il livello di accelerazione di ciascuna banda della quantità  $\Delta'' L_a$  data dalla seguente relazione:

$$(3) \quad \Delta'' L_a = 0,107v - 7,5 \quad [\text{dB}]$$

dove  $v$  è espresso in km/h.

#### 4.2 Attenuazione delle vibrazioni nella propagazione attraverso il terreno

Nel percorso delle onde di vibrazione nel terreno si manifestano tre tipi di attenuazione.

Il primo tipo è l'attenuazione per divergenza o geometrica  $A_g$  che è data da:

$$(4) \quad A_g = 10 \lg \frac{r_0 + r}{r_0} \quad [\text{dB}]$$

dove  $r_0$  è il raggio esterno della galleria in metri e  $r$  la distanza del punto di misura dalle pareti della galleria.

Quest'attenuazione è la stessa per tutti i tipi di terreno ed è indipendente dalla frequenza.

Il secondo tipo è l'attenuazione per perdita interna  $A_{il}$  (internal loss) o smorzamento del mezzo viscoelastico. In terreno formato da roccia con fattore di perdita interna basso ( $\eta = 0,01$ ) lo smorzamento può essere trascurato. Per gli altri tipi di terreno (sabbia, argilla, ghiaia, gesso, ecc.), con un fattore medio di perdita interna  $\eta = 0,3$ , l'attenuazione per perdita interna a varie distanze dalla parete della galleria in funzione della frequenza, è riportata nella tabella 2.

Tabella 2 – Attenuazione per perdita interna  $A_{il}$  in terreno con fattore medio di perdita interna  $\eta = 0,3$

Distanze	Frequenza c.b. 1/3 ottava (Hz)														
	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315
3 m dB	0,5	0,5	0,7	1	1	1	1,2	1,5	2	2,1	2,5	3	3,5	4	4,5
7,5 m dB	2	2	2	2,5	2,7	3	4	4,5	5	6	8	9,5	12	13	15
15 m dB	4	4,2	4,7	5,2	6	7	8	9,5	11	13	15	18	22	26,5	34
30 m dB	6	6,5	7,5	9	10	11,5	14	15,5	18,5	22	27	40	-	-	-

Il terzo tipo è l'attenuazione  $A_c$  dovuta al cambio del tipo di terreno, espressa dalla seguente equazione:

$$(5) \quad A_c = 10 \lg \left( \frac{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} \right)^2 \quad [\text{dB}]$$

dove  $\rho_1 c_1$  e  $\rho_2 c_2$  sono rispettivamente le impedenze caratteristiche del primo terreno e del secondo terreno;  $\rho$  e  $c$ , rispettivamente densità e velocità di propagazione delle onde longitudinali, sono riportate nella tabella 3 per alcuni terreni tipici.

Tabella 3 – Proprietà di tipici terreni

Terreno	Velocità onde longitudinali (m/s)	Densità (kg/m <sup>3</sup> )
Argilla, terreno argilloso	1500	1700
Sabbia, limo, ghiaia	600	1600
Roccia	3500	2650

#### 4.3 Attenuazioni delle vibrazioni nell'accoppiamento terreno-edificio

Un'altra perdita di energia di vibrazione avviene nella trasmissione dal suolo all'edi-

ficio ed è detta attenuazione per perdita di accoppiamento  $A_{cl}$  (Coupling Loss). Essa dipende principalmente dal tipo e dalla profondità delle fondazioni, ma anche dal tipo delle strutture del fabbricato. Essa può essere ricavata dalla tabella 4 per le fondazioni a pali nel terreno e a plinti. L'attenuazione può essere considerata pari a 0 per fondazioni a platea di calcestruzzo armato (fino alla frequenza di risonanza di questa) e per fondazioni a pali su roccia.

Tabella 4 – Attenuazione per perdita di accoppiamento  $A_{cl}$  fra terreno e edificio

Edificio	Frequenza c.b. 1/3 ottava (Hz)														
	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315
Edifici in muratura su pali nel terreno (dB)	5,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10	11	12	13	14	14,5	14,5	15	14
Edifici in muratura su plinti (dB)	12	13	13,5	14,5	15	15	15	15	14	13	13,5	13	12,5	12	11,5
Edifici in muratura di 2+4 piani su plinti (dB)	10	11	11,5	12,5	13	13	13	13	12,5	12,5	12	11	9,5	8,5	8

#### 4.4 Attenuazione all'interno dell'edificio

L'attenuazione  $A_b$  (building) dei livelli di vibrazione in edifici multipiano (in muratura con o senza intelaiatura) nel passaggio da un piano a quello superiore può essere stimata pari a circa 3 dB in media (campo 1÷4 dB/piano), mentre per edifici in muratura leggeri non si ha alcuna variazione della attenuazione con l'altezza.

#### 4.5 Attenuazione complessiva

Partendo dallo spettro del livello di accelerazione di vibrazione delle pareti della galleria e utilizzando il modello di calcolo empirico-analitico sopra descritto è possibile determinare lo spettro delle vibrazioni, indotte nelle strutture all'interno dell'edificio dal passaggio di treni in galleria, con la seguente equazione dove i simboli hanno il significato già visto in precedenza:

$$(6) \quad L_a(\text{struttura edificio}) = L_a(\text{galleria}) - A_g - A_{il} - A_c - A_{cl} - A_b \quad [\text{dB}]$$

In base al confronto fra i risultati di calcoli e di misure, il metodo proposto è conservativo ( $\Delta > 10$  dB)

Il livello di accelerazione così ottenuto può essere utilizzato per la valutazione del disturbo secondo la UNI 9614:1990 [3] e per la valutazione degli effetti sugli edifici secondo la UNI 9916:2014 [4].

Gli intervalli di frequenza da considerare sono, per la UNI 9614 (Prospetto I) da 1 a 80 Hz e per la UNI 9916 (Prospetto A.1), per traffico su strada e rotaia, da 1 a 300 Hz.

Dalle misure fatte per la verifica del modello risulta che l'intervallo previsto dalla UNI 9614 trascura componenti significative del fenomeno nel caso dell'alta velocità.

Per la valutazione del disturbo i livelli di accelerazione per banda di 1/3 ottava devono essere corretti con le attenuazioni del Prospetto I; la somma logaritmica delle componenti corrette dà il livello dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza  $L_w$  da confrontare con i riferimenti dell'Appendice A1 della norma [3].

Per la valutazione degli effetti sugli edifici occorre calcolare la velocità di picco di una componente puntuale *p.c.p.v.* in mm/s, ossia il valore massimo del modulo di una

delle tre componenti ortogonali misurate simultaneamente in un punto o ottenute mediante integrazione [4]. A tal fine si può ricavare dalla (1) il valore *rms* dell'accelerazione in  $m/s^2$ ; calcolare la velocità dall'accelerazione con la seguente formula che trascura la correlazione di fase fra le due grandezze:

$$(7) \quad v = \int a dt = \frac{a}{2\pi f} \quad [m/s^2]$$

Il valore cercato si ottiene quindi approssimativamente moltiplicando *v* per  $\sqrt{2}$ .

I risultati si confrontano con il Prospetto D.1 [4].

Perché le vibrazioni possano arrecare danni strutturali è necessario che esse raggiungano livelli tali da causare, prima, fastidio e disturbo agli occupanti. [4]

### 5. Esempio di applicazione del modello al sottoattraversamento AV di Firenze

Il modello sopra descritto è stato applicato a titolo di esempio a tre edifici di carattere storico monumentale che si trovano lungo il tracciato del sottoattraversamento; essi sono:

- 1) edifici in fregio a Piazza della Libertà (1865-1875, architetto Giuseppe Poggi) (figura 2)
- 2) Fortezza da Basso (1534-1537, architetto Antonio da Sangallo il Giovane) (figura 3)
- 3) Centrale termica e cabina apparati centrali della stazione ferroviaria Firenze Santa Maria Novella (1932-1934, architetto Angiolo Mazzoni) (figura 3)

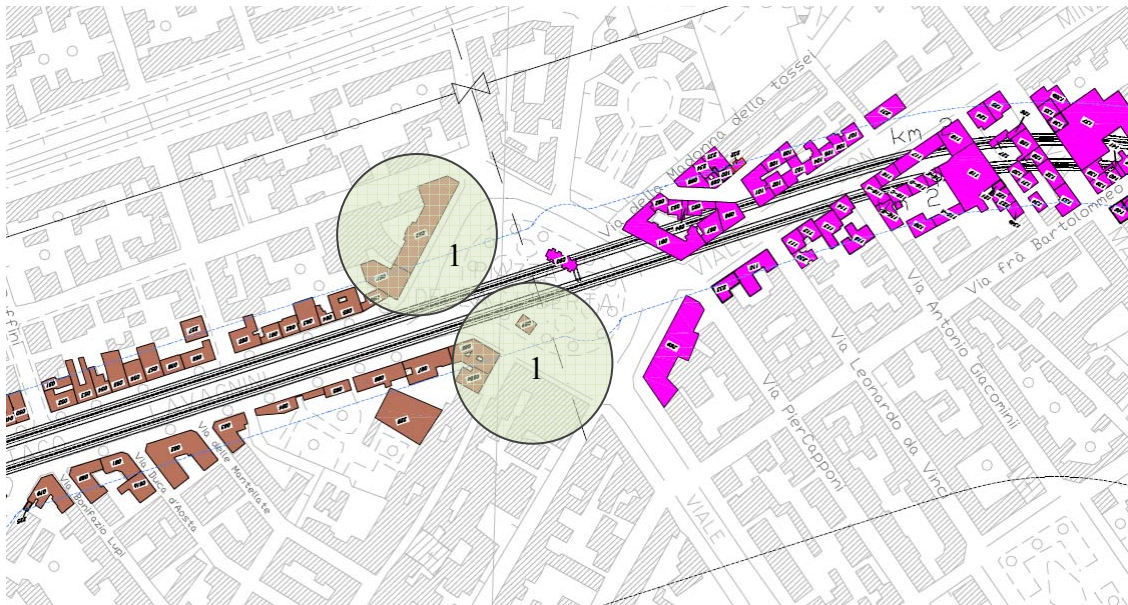


Figura 2 – Edifici oggetto di verifica: Piazza della Libertà (elaborato da corografia RFI)





Figura 3 – Edifici oggetto di verifica: Fortezza da Basso e Centrale termica FFS (elaborato da corografia RFI)

Per la caratterizzazione delle vibrazioni delle gallerie si è considerata la velocità dei treni pari a 100 km/h.

Come distanza  $r$  del punto di misura dalle pareti della galleria, si è considerata quella minima dell'edificio ricettore, piano strada, dall'asse della coppia di gallerie, pari a 39 m per l'edificio 1, 30 m per l'edificio 2 e 28 m per l'edificio 3. Le quote dei binari sono state ricavate dalla figura 4.

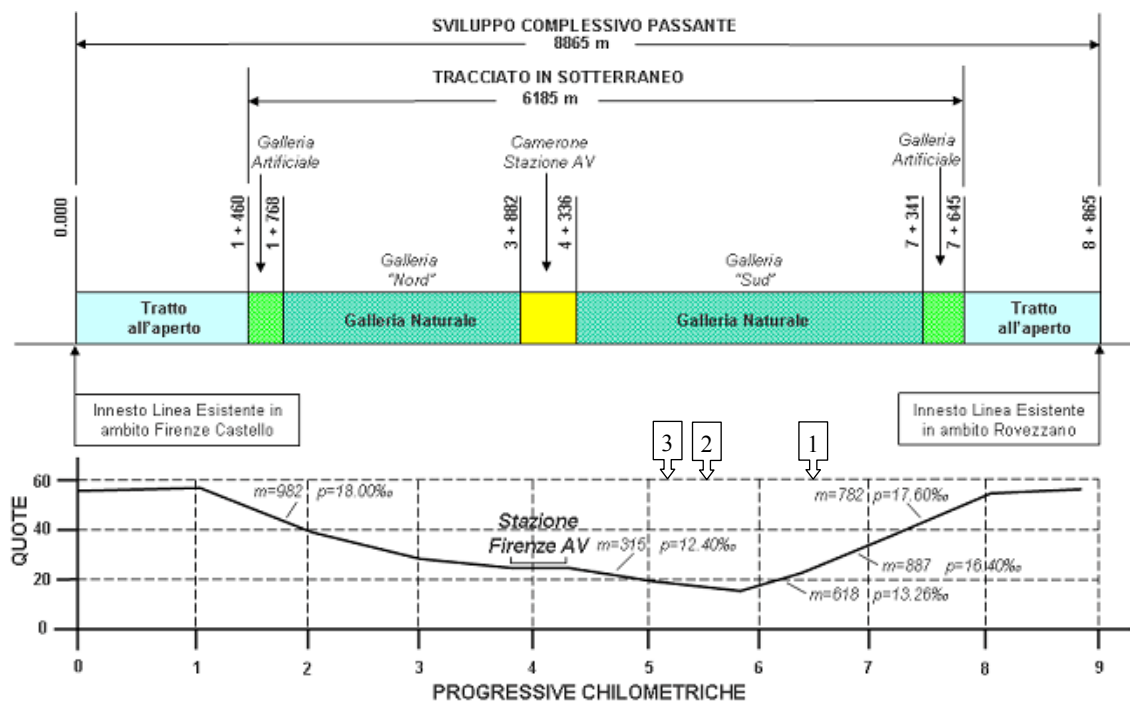


Figura 4 – Quote e distanze del sottoattraversamento (fonte RFI); sono indicate con frecce le posizioni degli edifici 1-3 oggetto di verifica

Per tutti e tre i punti si è considerato conservativamente un terreno argilloso omogeneo ( $A_c = 0$ ).

## 6. Risultati e conclusioni

Applicando il modello ai tre edifici in esame si ottengono i risultati di tabella 5. Nella seconda colonna è riportato il livello di accelerazione per l'intervallo 12,5÷315 Hz; nella terza colonna il livello di accelerazione per l'intervallo 12,5÷80 Hz; nella quarta colonna il livello ponderato in frequenza, valido per l'asse z nell'intervallo 12,5÷80 Hz, da confrontare con i livelli del Prospetto II della UNI 9614, il minore dei quali è pari a 74 dB (aree critiche).

Tabella 5 – Risultati

Edificio	$L_a$ 12,5÷315 Hz	$L_a$ 12,5÷80 Hz	$L_w$ 12,5÷80 Hz
1. Piazza Libertà	78 dB	71 dB	<b>57 dB</b>
2. Fortezza da Basso	79 dB	72 dB	<b>58 dB</b>
4. Centrale termica	79 dB	72 dB	<b>58 dB</b>

Essendo ampiamente rispettati i valori di riferimento per il disturbo, si può escludere senza ulteriori calcoli, secondo la UNI 9916, che le vibrazioni possano arrecare danni strutturali agli edifici esaminati.

## 7. Bibliografia

- [1] <http://www.tunnelbuilder.it/News/ItaliaToscana-Passante-AV-di-Firenze.aspx>
- [2] C. BAISTROCCHI, L. ROCCO, *Transito di treni A.V. in galleria: metrologia e calcoli previsionali delle vibrazioni indotte negli edifici*, Atti 41° Convegno AIA 2014, Pisa
- [3] UNI 9614:1990 - *Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo*
- [4] UNI 9916:2014 - *Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici*