



Valutazione del rumore indotto e delle vibrazioni delle piattaforme flottanti negli scambi con fissaggio diretto posti lungo le estensioni "Haidari & Anthoupoli" delle linee 2 e 3 della metropolitana di Atene

Noise and vibration evaluation of a floating slab in direct fixation turnouts in "Haidari & Anthoupoli extensions" of Athens metro lines 2 and 3

Dott. Ing. Patrick CARELS^(), Dott. Ing. Koen OPHALFFENS^(**), Prof. Ing. Konstantinos VOGIATZIS^(*)*

SOMMARIO – Il presente articolo descrive le opere eseguite per le ultime due estensioni delle linee 2 e 3 della Metropolitana di Atene: (a) l'estensione della linea 3 da Aegaleo ad Haidari e (b) l'estensione della linea 2 da Agios Antonios ad Anthoupoli, e sui rispettivi scambi (TO-Turnouts) 3-02,3-03 & 2-55,2-66. Scopo della valutazione del rumore e delle vibrazioni trasmessi dal suolo presentata di seguito, è determinare le misure di mitigazione necessarie a garantire, in corrispondenza di ogni scambio lungo le succitate tratte, livelli accettabili di rumore e vibrazioni trasmessi attraverso il suolo agli edifici sensibili circostanti. A tal fine, nell'ambito dello studio R&V iniziale, le tratte sono state suddivise in segmenti omogenei, ossia sezioni lungo le quali gallerie, tipi di suolo, profondità e distanza dagli edifici circostanti e la presenza o meno di uno scambio possono essere considerate una costante, con particolare cura in relazione alle porzioni comprendenti scambi con fissaggi diretti allo scopo di determinare i livelli di rumore e vibrazioni previsti durante il funzionamento della metropolitana. Successivamente, al fine di verificare se vengono rispettati i valori prescritti, è stato eseguito un programma di misurazioni nella rete della Metropolitana di Madrid per valutare l'emissione di vibrazioni in tratte contenenti scambi con caratteristiche simili e sulla base dei risultati ottenuti, è stata quindi valutata una soluzione di binario su platea flottante (FST-Floating slab track) per le tratte della Metropolitana di Atene (AM) contenente scambi, atta a garantire una completa attenuazione di R&V trasmessi dal suolo con una perdita di inserimento di -20dBV rispetto al livello di eccitazione predominante (da 40 a 125 Hz). Per la soluzione con platea FST, è stato calcolato il livello stimato di vibrazione previsto sulla superficie del suolo che si è rivelato considerevolmente più basso del criterio prefissato.

SUMMARY - This paper describes the work performed for the last two extensions on lines 2 and 3 of the Athens Metro: (a) extension of line 3 from Aegaleo to Haidari and (b) extension of line 2 from Agios Antonios to Anthoupoli, and on the respective turnout (TO) locations 3-02,3-03 and 2-55,2-66. The aim of the ground borne noise and vibration evaluation presented hereafter is to determine the required mitigation measures in order to guarantee, in each turnout location along these extensions, allowable ground borne noise and vibration levels in nearby sensitive buildings. In order to reach this objective, within the initial N&V study the whole extensions were divided into homogeneous sections, i.e. sections along which the tunnel and soil types, depth and distance from nearby buildings and presence or not of a switch can be considered as constant, with particular emphasis on section with turnouts on direct fixation in order to assess the expected noise and vibration levels from Metro operation. Then in order to achieve the requested criteria, a vibro-acoustic measurement programme was executed in Madrid Metro network in order to evaluate the vibration emissions in similar TO implementation and then based on those results a Floating slab track (FST) solution was evaluated in the above Athens Metro (AM) TO locations ensuring a complete ground borne and vibration attenuation with an insertion loss of -20dBV with respect to the predominant excitation (40 to 125 Hz). For the proposed FST implementation solution the estimated expected noise level at the soil surface were calculated and proven considerably lower from the given criterion.

1. Introduction - The project

This paper describes the work performed for the

^(*) Università della Tessaglia, Dipartimento di Ingegneria Civile, Laboratorio di Acustica Ambientale del Trasporto, Grecia.

^(**) CDM Group, Belgio.

^(*) Università della Tessaglia, Dipartimento di Ingegneria Civile, Laboratorio di Acustica Ambientale del Trasporto, Grecia.

^(**) CDM Group, Belgio.

Nota del traduttore: Nel presente articolo si fa riferimento al termine “ground born noise and vibration”: dato che nella terminologia tecnica italiana tale termine indica il rumore aereo dovuto a trasmissione meccanica, per non appesantire la traduzione, nel seguito si farà riferimento al solo termine “vibrazioni”, intese come somma dei livelli vibratori e dei loro fenomeni indotti. Nell’articolo per “R&V” si intende “Rumore e vibrazioni”.

1. Introduzione – Il progetto

Il presente articolo descrive le opere eseguite per la mitigazione di rumore e vibrazioni in corrispondenza degli scambi lungo le ultime due estensioni sulle linee 2 e 3 della AM (fig. 1):

1. estensione della linea 3 da Aegaleo ad Haidari;
2. estensione della linea 2 da Agios Antonios ad Anthoupoli in corrispondenza dei rispettivi scambi (TO) 3-02,3-03 & 2-55,2-66.

Scopo della valutazione delle vibrazioni trasmesse dal suolo presentata di seguito, è determinare gli interventi di mitigazione necessari a garantire, in corrispondenza di ogni scambio (fig. 2) lungo le succitate estensioni, che vengano rispettati i livelli prescritti di R&V trasmessi agli edifici sensibili circostanti attraverso il suolo.

noise and vibration protection in TO locations at the latest two extensions on lines 2 and 3 of the AM (fig. 1):

- a) extension of line 3 from Aegaleo to Haidari;
- b) extension of line 2 from AgiosAntonios to Anthoupoli

on the respective turnout (TO) locations 3-02,3-03 and 2-55,2-66.

The aim of the ground borne noise and vibration evaluation presented hereafter is to determine the required mitigation measures in order to guarantee, in each TO location under examination (fig. 2) along these extensions, that the allowable ground borne noise and vibration levels in nearby buildings are met.

In order to reach this objective, the extensions were divided into homogeneous sections, i.e. sections along which the tunnel and soil types, depth and distance from nearby buildings and presence or not of a switch can be considered as constant, with particular emphasis on sections with TO on direct fixation. For each section and each sensitive building, the ground borne noise and vibration levels were numerically predicted, based also on results from an extensive vibro-acoustic measurement campaign in similar TO locations in Madrid Metro.

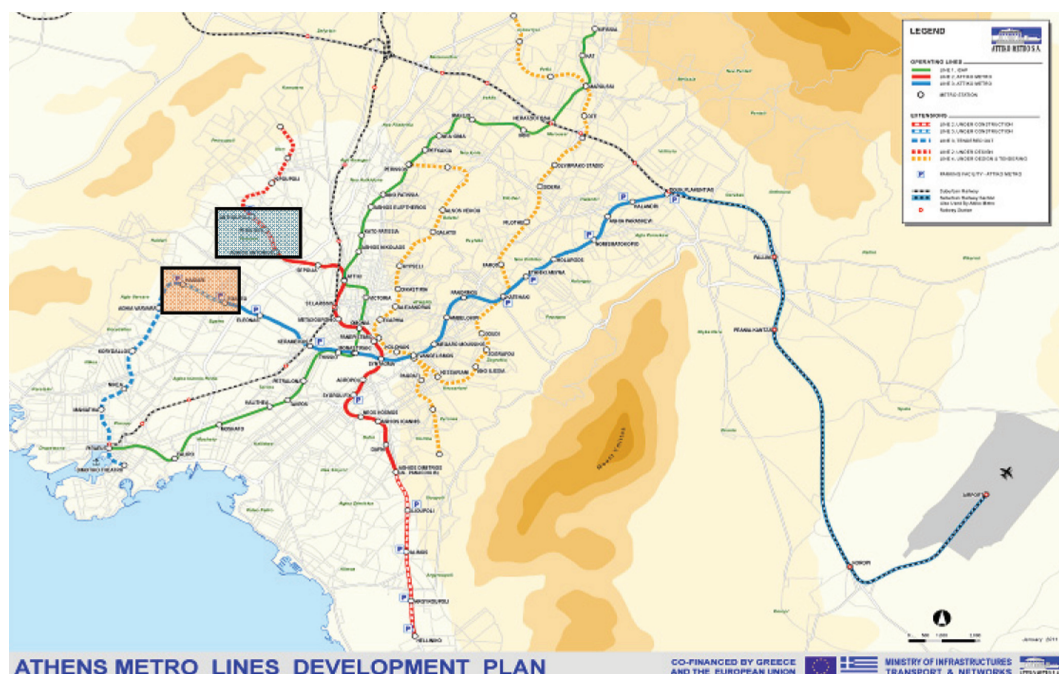


Fig. 1 - Estensioni della Metropolitana di Atene [1]. *Athens MetroExtensions* [1].

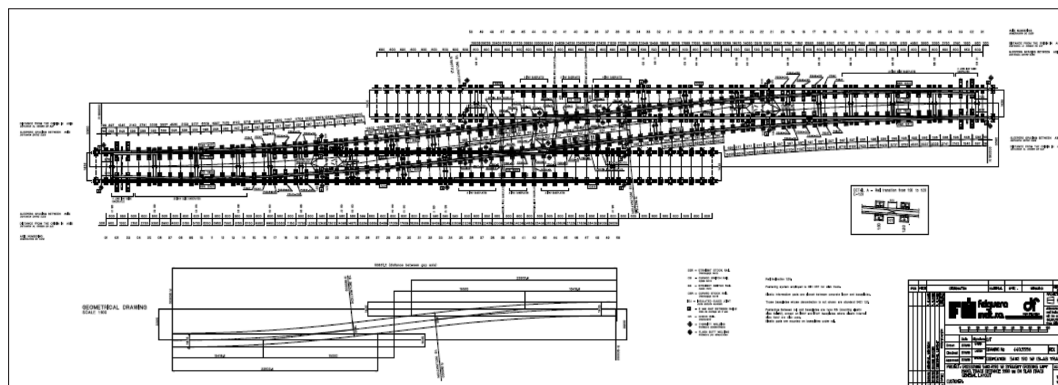


Fig. 2 - Disposizione degli scambi. TO's layout.

A tal fine, ciascuna estensione è stata divisa in segmenti omogenei, ossia sezioni lungo le quali la galleria, i tipi di suolo, la profondità e la distanza dagli edifici circostanti e la presenza o meno di uno scambio possono essere considerate una costante, con particolare cura rispetto alle tratte comprendenti scambi con fissaggi. Per ciascun segmento e ciascun edificio sensibile i livelli di vibrazioni trasmessi dal suolo sono stati previsti numericamente anche sulla base dei risultati ottenuti nel corso di un'estensiva campagna di misurazioni vibro acustiche condotta sulle linee della Metropolitana di Madrid aventi caratteristiche simili.

2. Studio delle vibrazioni: Specifiche generali – criteri R&V – Risultati preliminari

Negli studi R&V iniziali per ambedue le estensioni:

- Tratta Aegaleo-Haidari*: lunga 1,42 km con NATM 2 e 3 sezioni di binario in galleria e 1 stazione C&C, cioè la stazione Haidari.
- Tratta Agios Antonios-Anthoupoli*: lunga 1,43 km con TBM, NATM 2 e 3 sezioni di binario in galleria & due stazioni C&C, cioè Peristeri & Anthoupoli.

sono stati considerati i seguenti parametri generali [2], [3]:

- piattaforma con traverse bi-blocco e rotaie UIC54;
- l'interasse tra le traverse è 700 mm;
- massa non sospesa di 1822 kg/asse;
- per gli scambi (Turnouts-TO) viene proposta la soluzione con fissaggio diretto;
- ulteriori dati relativi a binario e materiale rotabile sono i seguenti: l'interasse traverse è pari a circa 600 mm; il carico assiale del veicolo = 14 t (max); e il passo del carrello è 2 m.

In mancanza di normative precise nell'ordinamento greco in materia di controllo del rumore, nell'ambito del relativo studio EIA erano stati precedentemente fissati i

2. N&V study: General specifications - N&V criteria - Preliminary results

In the initial N&V (Noise and Vibration) study for both extensions:

- Extension Aegaleo-Haidari*: 1,42 km length with NATM 2 and 3 tracks tunnel sections and one C&C station, i.e. Haidari station.
- Extension Agios Antonios-Anthoupoli*: 1,43 km length with TBM, NATM 2 and 3 tracks tunnel sections and two C&C stations, i.e. Peristeri and Anthoupoli stations.

the following general parameters were considered [2], [3]:

- slab track with twin bloc sleepers and UIC54 rails;
- the basic sleeper spacing is 700 mm;
- an un-sprung mass of 1822 kg/axle;
- as basic TO concept on direct fixation principle is proposed;
- additional track and rolling stock related data are as follows: spacing of the discrete support system is about 600 mm; axle load of vehicle = 14 t (max); and bogie axle to axle distance 2 m.

In absence of any relevant Greek specifications or legal texts, maximum values of ground borne noise and vibration from train operations were recommended within the relevant Environmental Impact Assessment (EIA) study as follows:

1. Ground borne Noise: in dB(A)

- for all residential buildings 40 dB(A);
- for other sensitive buildings (such as education i.e. Universities, Schools, Libraries, and also Hospitals, Churches Theatres and Archaeological Sites): 35 dB(A);
- for Concert Halls and TV/Radio studios: 25 dB(A).

livelli massimi di R&V generati dai treni in servizio trasmessi attraverso il suolo come segue:

1. Rumore indotto negli edifici attraverso il suolo: in dB(A)

- a) per tutti gli edifici residenziali 40 dB(A);
- b) per altri edifici sensibili (ad es. sedi culturali quali Università, Scuole, Librerie, e anche Ospedali, Chiese, Teatri e Siti Archeologici: 35 dB(A);
- c) per le sale da concerto & sale di registrazione TV/Radio: 25 dB(A).

2. Vibrazioni: max ppv(z) in mm/sec:

- a) 0,5 mm/sec per edifici ed edifici sensibili;
- b) 0,2 mm/sec per siti archeologici;
- c) in caso di piattaforma flottante il criterio di 25 $\mu\text{m/sec}$ deve essere rispettato anche all'interno degli edifici protetti (nota: nell'ambito di questo studio tale criterio per i siti archeologici era stato fissato anche come valore massimo accettabile).

Tuttavia, nell'ambito dello studio iniziale di R&V per le tratte di cui sopra – anche se compresi entro i sopracitati criteri EIA – secondo il documento di AM «Specificazione tecnica di progetto e prestazione per le opere ferroviarie» e in assenza di leggi riguardo i livelli di R&V, verrà adottato in tutto il progetto il valore massimo di rumore indotto dal passaggio dei treni trasmesso dal suolo raccomandato dall'APTA (American Public Transport Association). Tali livelli accettati internazionalmente ed espressi in dB(A), sono riportati nella tabella 1.

Al fine di poter prevedere i livelli di rumore desumendoli dalle normali condizioni di operatività del treno in servizio, è stato realizzato (come per lo studio su R&V originale, vedere rif. 2 e 3) un modello di previsione del rumore in 3D (galleria, edifici circostanti e ricettori più vicini), per ciascuna estensione (senza misure di mitigazione aggiuntive – soluzione STEDEF standard) introdu-

2. Vibration: max ppv(z) in mm/sec:

- a) 0,5 mm/sec for buildings and relevant sensitive buildings;
- b) 0,2 mm/sec for archaeological sites;
- c) in case of floating slabs the criterion of 25 $\mu\text{m/sec}$ is also to be met inside the protected building (note: this criterion was also assessed within this study also for the archaeological sites for a worst case scenario approach).

However within the initial N&V study for the above extensions – even if covered by the above EIA enforced criteria – according to the AM's relevant «Design and performance technical specification for track work » and in absence of any relevant Greek law concerning permissible levels of noise and vibration, the maximum values of ground borne noise from train operations which are recommended by the American Public Transport Association (APTA) shall be adopted throughout the design and performance of the track work.

These internationally accepted levels in dB(A) are given in the table 1.

In order to predict noise levels from normal train operation a 3D noise model (tunnel, surrounding media and closest receptor) was executed (as per the N&V original study, see ref. 2 and 3) for each extension (with no add. mitigation measures – standard STEDEF solution) introducing segments with similar soil categories. Segments of each extension where TO are present, are marked with an X. The noise model in TO sections assume direct fixation as per the "Felquera proposal" (table 2).

Based on all available geotechnical data, the following soil categories have been defined for the dynamic soil modulus for all N&V studies for AM (table 3).

TABELLA 1 – TABLE 1

LIVELLO MASSIMO DI RUMORE INDOTTO DAL PASSAGGIO DEI TRENI TRASMESSO DAL SUOLO [dB(A)]
MAXIMUM PERMISSIBLE GROUND BORNE NOISE LEVELS FROM METRO OPERATIONS [dB(A)]

Categoria Area Comunitaria <i>Community Area Category</i>	Abitazioni monofamiliari <i>Single Family Dwellings</i>	Abitazioni plurifamiliari <i>Multi-Family Dwellings</i>	Hotel/Motel <i>Hotel/Motel Buildings</i>
Residenziale Bassa Densità <i>Low Density Residential</i>	30	35	40
Residenziale Media Densità <i>Average Residential</i>	35	40	45
Residenziale Alta Densità <i>High Density Residential</i>	35	40	45
Commerciale <i>Commercial</i>	40	45	45
Industriale/Autostrada <i>Industrial/Highway</i>	40	45	50

cendo segmenti con categorie di suolo simili. I segmenti di ciascuna estensione in cui sono presenti degli scambi TO, sono contrassegnate con una X. Il modello di previsione del rumore nelle sezioni con deviatori, presume il fissaggio diretto come per la "proposta Felquera" (tabella 2).

Sulla base dei dati geotecnici disponibili, sono state determinate le seguenti categorie di suolo per la definizione del modulo di suolo dinamico per tutti gli studi R&V condotti per conto di AM (tabella 3).

Entrambe le tratte sono state suddivise in segmenti omogenei, ossia sezioni lungo le quali gallerie, tipi di suolo, profondità e distanza dagli edifici circostanti e la presenza o meno di uno scambio possono essere considerate una costante, con particolare attenzione rispetto alle porzioni comprendenti scambi con fissaggi diretti in modo da determinare i livelli R&V previsti durante il funzionamento della metropolitana (tabella 4).

Sulla base della classificazione ivi riportata per ciascun tipo di stazione e galleria, viene eseguita la modellazione di una sezione di galleria lunga 35 m con il metodo degli elementi finiti. Di seguito sono illustrati i modelli degli elementi finiti per le gallerie NATM 2 binari, NATM 3 binari, stazioni TBM e C&C 2 binari [2], [3].

Il percorso di trasmissione delle vibrazioni all'ambiente circostante e in particolare ad un edificio posto nelle vicinanze può essere schematizzato come segue:

TABELLA 2 - TABLE 2
LIVELLO MASSIMO DI RUMORE INDOTTO DAL SUOLO IN SPECIFICI TIPI DI EDIFICI [dB(A)] - MAXIMUM PERMISSIBLE GROUND BORNE NOISE LEVELS IN SPECIFIC TYPES OF BUILDINGS [dB(A)]

Tipo di edificio o Sala <i>Type of Building or Room</i>	Livello massimo consentito di rumore trasmesso dal suolo per singolo evento <i>Single Event Maximum Permissible Ground Borne Noise Level</i> [dB(A)]
Sale da Concerto <i>Concert Halls</i>	16
Studi di registrazione Radio/TV <i>Radio and TV Studios</i>	25
Musei, Auditori e Sale Musicali <i>Museums, Auditoriums and Music Rooms</i>	30 ^(*)
Chiese e Teatri <i>Churches and Theaters</i>	35
Sale operatorie e camere di degenza ospedaliera <i>Hospital Operation and Sleeping Rooms</i>	35-40
Tribunali e Parlamento <i>Courtrooms and Parliament</i>	35
Scuole e Librerie <i>Schools and Libraries</i>	40
Edifici universitari <i>University Buildings</i>	35-40
Uffici <i>Offices</i>	35-45
Edifici Commerciali <i>Commercial Buildings</i>	45-55

^(*) In caso di aree archeologiche & musei, in aggiunta al valore massimo consentito indicato, si applicherà inoltre un livello di vibrazione massimo consentito di 25 µm/s rms. In case of archaeological areas and museums, in addition to the maximum ground borne noise indicated, a maximum vibration level of 25 µm/s rms shall apply

TABELLA 3 - TABLE 3
CATEGORIE DI SUOLO SULLE TRATTE AEGALEO - HAIDARI & AGIOS ANTONIOS - ANTHOUPOLI. SOIL CATEGORIES AT AEGALEO - HAIDARI AND AGIOS ANTONIOS - ANTHOUPOLI EXTENSIONS

Categoria di suolo <i>Soil Category</i>	Modulo dinamico di suolo min <i>Min. dynamic soil modulus</i> [GPa]
1	0.1
2	0.4
3	0.9
4	5,5
5	18

Both extensions were divided into homogeneous sections, i.e. sections along which the tunnel and soil types, depth and distance from nearby buildings and presence or not of a switch can be considered as constant, with particular emphasis on sections with TO on direct fixation in order to assess the expected noise and vibration levels from Metro operation (table 4).

Based on the classification therein for each type of station and tunnel, a 35 m length tunnel section is modelled with the finite element method. The finite element models are shown hereafter for NATM 2 tracks tunnel, NATM 3 tracks tunnel, TBM and C&C 2 tracks station [2], [3].

The transmission path of vibrations to the surrounding community and particularly to a nearby building can be scheduled as follows:

TABELLA 4 - TABLE 4

SEZIONI OMOGENEE DEL MODELLO DI PREVISIONE DI RUMORE NELLE TRATTE AEGALEO-HAIDARI & AGIOS ANTONIOS-ANTHOUPOLI. NOISE & VIBRATION PREDICTION MODEL'S HOMOGENEOUS SECTIONS, AT AEGALEO-HAIDARI AND AGIOSANTONIOS-ANTHOUPOLI METRO EXTENSIONS

(a) Aegaleo-Haidari

Sezione Section	Progressive chilometriche Chainages	Tipologia galleria Tunnel type	TO	Tipologia suolo Soil cat.	Profondità min min. depth [m]	Distanza orizz. min min. hor.distance [m]	Lunghezza tratta Section length [m]
1	0+000-0+050	NATM 3 binari - tracks		3	28	0	50
2	0+050-0+100	NATM 3 binari - tracks		3	27	0	50
3	0+100-0+140	NATM 3 binari - tracks		3	25	0	40
4	0+140-0+188	NATM 3 binari - tracks		3	23.5	1.95	48
5	0+188-0+250	NATM 2 binari - tracks		3	22	2.45	62
5a					22	9	
6	0+250-0+290	NATM 2 binari - tracks		3	21	13	40
7	0+290-0+330	NATM 2 binari - tracks		3	20	10	40
8	0+330-0+450	NATM 2 binari - tracks		2-3	19	6	120
9	0+450-0+520	NATM 2 binari - tracks		2-3	18.5	5.8	70
9a					18.5	23	
9b					18.5	24	
10	0+520-0+560	NATM 2 binari - tracks		3	18	7	40
11	0+560-0+684.704	NATM 2 binari - tracks		2-3	18	7	125
12	0+684.704-0+720	NATM 2 binari - tracks	X	2-3	17.5	11	35
13	0+720-0+735.450	NATM 2 binari - tracks	X	3	17.5	13	15
14	0+735.450-0+790	NATM 2 binari - tracks		3	17.5	10	55
15	0+790-0+820	NATM 2 binari - tracks		2-3	17.5	15.7	30
16	0+820-0+890	NATM 2 binari - tracks		2-3	17.5	3.4	70
17	0+890-0+935	NATM 2 binari - tracks		3	19	0	45
17a					19	13.9	
18	0+935-1+045	Stazione - Station C&C		3	20	0	110
19	1+045-1+060.878	NATM 2 binari - tracks		3	26	0	26
20	1+060.878- 1+122.608	NATM 2 binari - tracks	X	3	26	0	51
20A							30
21	1+122.208-1+225	NATM 2 binari - tracks		3	26	0	103
22	1+225-1+270	NATM 2 binari - tracks		3	24.5	0	45
23	1+270-1+310	NATM 2 binari - tracks		3	24.5	0	40
23a					24.5	24	
24	1+310-1+350	NATM 2 binari - tracks		3	25	1.3	40
25	1+350-1+418.557	NATM 2 binari - tracks		3	26	0	69
25a					26	11.5	

(b) Agios Antonios - Anthoupoli

1	1+370-1+500	NATM		2	19.4	7	130
2	1+500-1+600	NATM		2 o 3	17.7	6	100
3	1+600-1+681.29	NATM		1 o 2	17.8	8	81.29

(segue)

TABELLA 4 - TABLE 4
(continuazione)

4	1+681.29-1+791.29	Stazione - Station PERISTERI		1 o 2	18.3	9	110
5	1+791.29-1+850	CAC		1 o 2	20	10	58.71
6	1+850-2+250	TBM		1 o 2	16.4	8	400
7	2+250-2+300,751*	TBM	X	1-3	16	9	50
8	2+300,751-2+350	TBM		3	15.7	10	50
9	2+350-2+450	Stazione - Station ANTHOUPOLI		1 o 2	15.9	9	100
10	2+450-2+502,470	TBM		2 o 3	16.8	9	50
11	2+502,470-2+553,220	TBM	X	2 o 3	17.4	7	65
12	2+553,220-2+751.49	TBM		2 o 3	18	0	186.49
13	2+751.49-2+800	CAC		2 o 3	19.3	38	48.51



La previsione del livello di rumore e vibrazioni trasmesse dal suolo negli edifici posti nelle vicinanze consiste nelle fasi brevemente descritte di seguito:

- modellizzazione con il metodo degli elementi finiti del tipo di galleria situato nella sezione in esame, inclusa l'adeguata rigidità del suolo e le caratteristiche del sistema ruota-rotaia, in modo da calcolare i livelli di vibrazione della parete della galleria generati dal contatto ruota-rotaia;
- propagazione delle vibrazioni attraverso il suolo dalla galleria agli edifici posti nelle vicinanze;

The prediction of ground borne noise and vibration levels in nearby buildings consists of the following steps, described briefly hereafter:

- finite element modelling of the tunnel section type located in the considered section, including the adequate soil stiffness and the wheel-rail system characteristics, in order to calculate the tunnel wall vibration levels generated by the wheel-rail contact excitation;
- propagation of the vibration levels from the tunnel to nearby buildings through the ground;

- accoppiamento suolo-struttura a livello di fondazioni;
- amplificazione dei livelli delle vibrazioni ad alcune frequenze (a causa della risonanza di muri e pavimenti);
- calcolo del rumore generato nelle stanze dalla vibrazione di pareti e pavimenti.

Modellizzazione ad elementi finiti della galleria. La metodologia utilizzata nel presente studio parte dal presupposto che tutti i segmenti sono divisi in sezioni (come illustrato di seguito) e per ciascuna sezione sono stati considerati i seguenti parametri:

- tipo di galleria e tipo di stazione;
- rigidità reale del suolo intorno alla galleria;
- categorizzazione del suolo;
- velocità massima del treno;
- effetto scambio;
- profondità di galleria e stazione;
- distanza della fondazione dalla parete della galleria;
- funzione di trasferimento amplificazione degli edifici di Atene;
- irradiazione del rumore nell'edificio.

In questi modelli (fig. 3):

- l'arco rovescio è modellato come elemento tridimensionale;
- le pareti della galleria sono modellate come elementi spaziali a conchiglia.

Nel modello R&V vengono applicate le seguenti proprietà dei materiali:

Per il calcestruzzo:

Modulo di Young:	$E = 3.216 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Coefficiente di Poisson:	$\nu = 0.25$
Massa Volumica:	$\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$

Per le rotaie UIC54:

Modulo di Young:	$E = 21 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Coefficiente di Poisson:	$\nu = 0.3$
Massa volumica:	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
Sezione:	$A = 69.34 \text{ cm}^2$
Momento quadratico di inerzia:	$I_y = 2346 \text{ cm}^4$

Per i pannelli sotto rotaia:

rigidezza statica verticale:	$k_z = 100 \times 10^6 \text{ N/m}$
rigidezza dinamica verticale:	$k_z = 200 \times 10^6 \text{ N/m}$

Per i pannelli sotto traversa:

rigidezza statica verticale:	$k_z = 15 \times 10^6 \text{ N/m}$
rigidezza dinamica verticale:	$k_z = 25 \times 10^6 \text{ N/m}$

È stata inoltre considerata una massa non sospesa di 1822 kg/asse. Quattro masse concentrate di 911 kg vengo-

- soil-structure coupling at basement levels;
- amplification of the vibration levels at some frequencies (due to resonances of walls and floors);
- calculation of noise generated in the rooms by vibration of walls and floors.

Finite element models of the tunnel. The methodology used in this study takes into account that all segments are divided into sections (as presented here above) and for each section the following parameters were considered:

- type of tunnel and type of station;
- real stiffness of ground surrounding the tunnel;
- soil categorization;
- maximum train velocity;
- switch effect;
- depth of tunnel and station;
- distance from foundation to tunnel wall;
- athenian building amplification transfer function;
- noise radiation in the building.

In these models (fig. 3):

- the tunnel invert is modelled as three-dimensional elements;
- the tunnel walls are modelled as spatial shell elements.

The following material properties are applied in the N&V model:

for concrete:

Young's modulus:	$E = 3.216 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Poisson's coefficient:	$\nu = 0.25$
Volumic mass:	$\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$

for UIC54 rails:

Young's modulus:	$E = 21 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Poisson's coefficient:	$\nu = 0.3$
Volumic mass:	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
Section:	$A = 69.34 \text{ cm}^2$
Bending inertia:	$I_y = 2346 \text{ cm}^4$

for rail pads:

static vertical stiffness:	$k_z = 100 \times 10^6 \text{ N/m}$
dynamic vertical stiffness:	$k_z = 200 \times 10^6 \text{ N/m}$

for sleeper pads:

static vertical stiffness:	$k_z = 15 \times 10^6 \text{ N/m}$
dynamic vertical stiffness:	$k_z = 25 \times 10^6 \text{ N/m}$

We also consider an un-sprung mass of 1822 kg/axle. Four lumped masses of 911 kg are applied on four nodes of the rails, corresponding with a bogie longitudinally centred in the model. All the nodes at both ends of the

no applicate su quattro nodi delle rotaie, corrispondenti ad un carrello centrato longitudinalmente nel modello. Tutti i nodi ad entrambi gli estremi del modello sono fissati (ossia impediti i sei gradi di libertà). Per eliminare modi indesiderati delle rotaie, vengono vincolati alcuni gradi di libertà dei nodi delle rotaie e le traverse. Per simulare la rigidità del suolo, a tutti gli elementi a conchiglia posti a contatto con il suolo, è applicato radialmente un vincolo assimilabile ad una serie di molle. Per determinare l'ampiezza di questa rigidità radiale, è stato creato un modello tridimensionale della galleria e del suolo. Per tener conto del suolo circostante, alcuni gradi di libertà sono vincolati agli estremi del modello. Vengono applicati quattro carichi statici verticali di 1 kN sull'arco rovescio, in una sezione centrata longitudinalmente, in corrispondenza delle quattro rotaie. Vengono calcolati gli spostamenti statici di cui al presente caso di carico. Lo stesso calcolo statico viene poi effettuato sul modello qui descritto, senza il binario. La rigidità radiale sulle pareti della galleria viene quindi aggiornata per raggiungere la stessa ampiezza degli spostamenti statici calcolati su entrambi i modelli. Si calcola la forza dinamica generata al contatto ruota-rotaia per ruote e rotaie in condizioni di normale manutenzione. Per una rotaia resiliente, la velocità critica può essere descritta come:

$$V_{CR} = \sqrt{ga \left(1 + \frac{M}{m}\right) \sqrt{1 + \frac{m\beta}{\rho l^2}}}$$

dove:

g costante di gravità [m/s²];

a raggio della ruota [m];

M porzione della massa sospesa del veicolo supportato da una ruota;

m massa non sospesa della ruota;

ρl massa per unità di lunghezza della rotaia;

$$\beta = \left(\frac{K}{4EI}\right)^{1/4}$$

dove:

K rigidità statica delle fondazioni per unità di lunghezza della rotaia;

E modulo di Young della rotaia;

I momento di inerzia dell'incrocio della rotaia.

È possibile calcolare la rigidità delle fondazioni per unità di lunghezza della rotaia per il Sistema bi-blocco in esame. La velocità critica è dunque di 17.8 m/s (pari a 64 km/h). La velocità critica è un fattore importante dal momento che l'impulso (Im) causato dal disturbo di un appiattimento della ruota, aumenterà con l'aumentare della velocità fintanto che la velocità di avanzamento è inferiore alla velocità critica. Per velocità superiori alla velocità

model are fixed (six degrees of freedom). To eliminate undesirable modes of the rails, nodes of rails and sleepers have some degrees of freedom fixed. To simulate the stiffness of the soil, a spring density is applied radially to all the shell elements in contact with the soil. In order to determine the amplitude of this radial stiffness, a three-dimensional model of the tunnel and the soil has been created. In order to take into account the surrounding soil, some degrees of freedom are fixed on the boundaries of this model. Four vertical static loads of 1 kN are applied on the invert, in a longitudinally centred section, at the location of the four rails. The static displacements under this load case are calculated. The same static calculation is then carried out on the model described here, without the track. The radial stiffness on the tunnel walls is then updated in order to reach the same amplitude for static displacements calculated on both models. The dynamic force generated at the wheel-rail contact is calculated for normally maintained wheels and rails. For a resilient rail, the critical speed can be written as:

$$V_{CR} = \sqrt{ga \left(1 + \frac{M}{m}\right) \sqrt{1 + \frac{m\beta}{\rho l^2}}}$$

where:

g gravity constant [m/s²];

a wheel radius [m];

M portion of spring-mounted car mass supported by a wheel;

m wheel unsprung mass;

ρl mass per unit length of the rail;

$$\beta = \left(\frac{K}{4EI}\right)^{1/4}$$

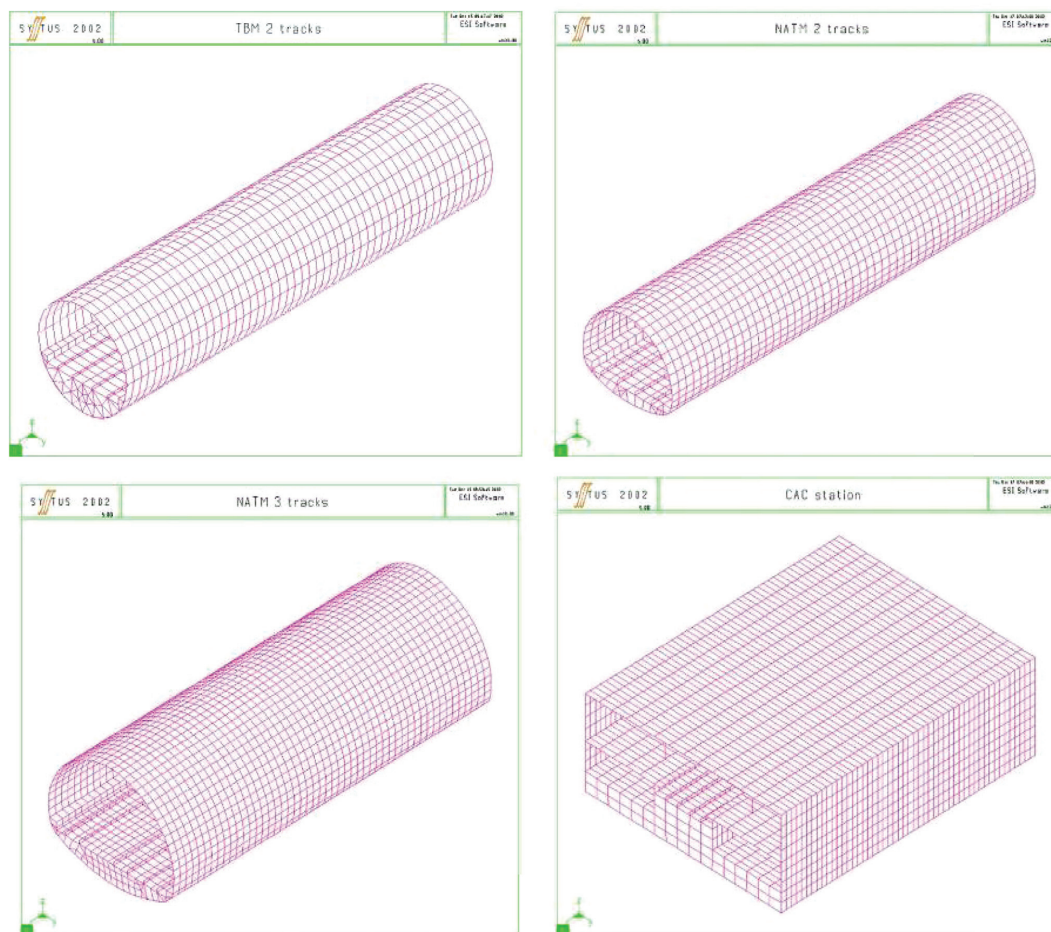
where:

K static foundation stiffness per unit length of the rail;

E young's modulus of the rail;

I moment of inertia of the rail cross section.

The foundation stiffness per unit length of the rail can be calculated for the considered bibloc system. The critical speed is then 17.8 m/s or 64 km/h. The critical speed is an important factor since the impulse (Im) of a wheel flat will increase with increasing speed as long as the forward speed is smaller than the critical speed. For speeds above the critical speed the impulse is constant. Since we are going to consider a speed of 80 km/h, we will consider maximum impact amplitude in each section. All wheel and rail irregularities giving impact force excitation are integrated in one 'equivalent' wheel flat. An equivalent wheel flat of 40 mm is considered. This is a length which is typical for a normally maintained metro network. For such a wheel flat and for a wheel radius of 0.43 m, the

Fig. 3 - Modelli di gallerie per le estensioni AM. *Tunnel models for AM extensions.*

critica, l'impulso è costante. Dal momento che ci accingiamo a prendere in considerazione una velocità di 80 km/h, si prenderà in considerazione l'ampiezza di impatto massima in ogni sezione. Tutte le irregolarità di ruota e rotaia che danno forza di eccitazione vengono integrate in un appiattimento "equivalente" della ruota. Viene preso in considerazione un appiattimento equivalente di 40 mm. Questa è la lunghezza tipica normalmente impiegata nella rete metropolitana. Per tale appiattimento e per un raggio della ruota di 0,43 m, la differenza di altezza h può essere stimata in 0,465 mm. Poiché l'impedenza della ruota è maggiore di quella della rotaia, l'impulso è causato dal movimento verso l'alto della rotaia libera. La rotaia è qui rappresentata come una massa equivalente. L'impulso per velocità superiori alla velocità critica può essere descritto come:

height difference h can be calculated to be 0.465 mm. Because the wheel impedance is greater than the rail impedance, the impulse is caused by the upward movement of the free rail. The rail is hereby represented as an equivalent mass. The impulse for speeds above the critical speed can be written as:

$$I_m = 2Y_0 m_{eq} \omega_0 \sin\left(\sqrt{\frac{2h}{Y_0}}\right)$$

where:

- Y_0 static deflection of the rail under wheel load;
- ω_0 resonant frequency of the resiliently supported rail (not loaded);
- h height difference of the wheel flat;

$$I_m = 2Y_0 m_{eq} \omega_0 \sin\left(\sqrt{\frac{2h}{Y_0}}\right)$$

dove:

Y_0 cedimento statico della rotaia sotto il carico della ruota;

ω_0 frequenza di risonanza della rotaia resiliente supportata (non caricata);

h differenza di altezza dell'appiattimento;

m_{eq} massa di contatto equivalente della rotaia resiliente supportata.

Per valori tipici di K ed EI , la massa equivalente è molto ben approssimata da: $m_{eq} \approx 0.4\rho l$

Il cedimento statico sotto il carico della ruota e la frequenza di risonanza della rotaia resiliente supportata ma non caricata, sono ottenuti attraverso un calcolo ad elementi finiti. Con la rigidità del pannello sotto rotaia considerata, arriviamo ad un cedimento statico massimo della rotaia di 2,5 mm. Come ipotesi conservativa, riteniamo che i livelli di vibrazioni generati sull'arco rovescio, appena sotto le quattro eccitazioni di contatto, si propagano integralmente nel suolo circostante. Al fine di calcolare il vettore di velocità dell'arco rovescio in bande di 1/3 di ottava da 10 a 200 Hz (incluse le frequenze da 8,9 a 225 Hz), è stato innanzitutto necessario calcolare, per ogni modello, le frequenze caratteristiche ed i rispettivi vettori caratteristici associati. Vengono quindi calcolate le risposte armoniche per i quattro nodi posti sull'arco rovescio appena sotto le quattro eccitazioni di contatto. Questo calcolo viene fatto con uno smorzamento modale del 5% per ogni modo, e 10 passi di frequenza per ogni banda di 1/3 di ottava.

L'energia della vibrazione viene trasmessa attraverso il suolo come onde sismiche e onde di superficie. Le onde sismiche consistono in onde di compressione e taglio, quelle di superficie sono costituite dalle onde di Rayleigh e Love. Ad una prima approssimazione, le pareti vibranti della galleria possono essere considerate come una sorgente cilindrica. L'energia di vibrazione diminuisce gradualmente con l'aumentare della distanza dalla fonte perché l'energia si diffonde su una superficie ad ampiezza crescente. Oltre a questo smorzamento geometrico, l'energia della vibrazione viene dissipata per effetto dello smorzamento del materiale. La velocità di vibrazione ad una distanza d dalla parete della galleria può essere descritta come:

$$v(d) = v_t \sqrt{\frac{r_0}{r_0 + d}} e^{-\frac{\omega \eta d}{2c}}$$

dove:

v_t velocità di vibrazione radiale della parete della galleria [m/s];

m_{eq} equivalent impact mass of the resiliently supported rail.

For typical values of K and EI , the equivalent mass is very well approximated by: $m_{eq} \approx 0.4\rho l$

The static deflection under wheel load and the resonant frequency of the resiliently supported but not loaded rail are obtained by a finite element calculation. With the considered rail pad stiffness, we arrive at a maximum static rail deflection of 2.5 mm. As a conservative assumption, we consider that the vibration levels generated on the invert of the tunnel, just under the four impact excitations, are integrally propagated to the surrounding soil. In order to calculate the velocity vector of the tunnel invert in the 1/3 octave bands from 10 to 200 Hz (including frequencies from 8.9 to 225 Hz), it was first necessary to calculate, for each model, the eigen frequencies and their associated eigenvectors. Harmonic responses are then calculated for the four nodes located on the tunnel invert just under the four impact excitations. This calculation is done with a modal damping of 5 % for each mode, and 10 frequency steps for each 1/3 octave band.

Vibration energy is transmitted through the soil as body and surface waves. Body waves consist in compression and shear waves, surface waves consist of Rayleigh and Love waves. As a first approximation, vibrating tunnel walls can be considered as a cylindrical source. The vibration energy gradually decreases with increasing distance from the source because the energy spreads over an increasing large area. In addition to this geometrical damping, vibration energy is dissipated as a result of material damping. Vibration velocity at a distance d from the tunnel wall can be written as:

$$v(d) = v_t \sqrt{\frac{r_0}{r_0 + d}} e^{-\frac{\omega \eta d}{2c}}$$

where:

v_t radial vibration velocity of tunnel wall [m/s];

r_0 radius of the tunnel [m];

ω $2\pi f$ with f the frequency [rad/s];

η soil loss factor;

c wave propagation speed [m/s].

Making the assumption that the building basement is located 5 m under ground level and defining all distances, the distance d between the building basement and the tunnel was then calculated. Furthermore regarding the coupling of the building foundation and propagation through the standard Athenian building structure, a worst case scenario of "no coupling loss transfer function (TF) soil-basement-upper floors" was taken into account in order to evaluate the most critical locations including crossovers locations.

The vibrating walls and floors radiate noise which is

- r_0 raggio della galleria [m];
 $\omega = 2\pi f$ con f frequenza [rad/s];
 η fattore di perdita del suolo;
 c velocità di propagazione dell'onda [m/s].

Ipotizzando che il basamento dell'edificio è situato 5 m sotto il livello del suolo e definendo tutte le distanze, è stata dunque calcolata la distanza d tra il basamento dell'edificio e la galleria. Inoltre, per quanto riguarda l'accoppiamento della fondazione dell'edificio e la propagazione attraverso la struttura standard degli edifici ateniesi, è stata presa in considerazione l'ipotesi limite accettabile di "funzione di trasferimento in assenza di disaccoppiamento (TF) di suolo - basamento - piani superiori" per valutare i punti più critici compresi gli incroci.

Le pareti e i pavimenti vibranti irradiano rumore chiamato "ground borne noise" (rumore trasmesso per via solida). Il rapporto tra la vibrazione delle superfici della stanza ed i livelli di rumore dipende dalla quantità di assorbimento nella stanza, la dimensione e forma della stessa, e la distribuzione dei livelli di velocità delle vibrazioni sulle superfici della stanza. È stata implementata la seguente relazione⁽⁴⁾ tra il rumore e le vibrazioni del pavimento:

$$L_p = L_v - 22$$

con:

L_p livello di pressione sonora (in dBLin);

L_v livello di velocità di vibrazione del pavimento (in dB ref. 1e-9 m/s).

Sulla base dei risultati dei modelli è emerso che in corrispondenza di tutti gli scambi TO i livelli R&V previsti erano ben più alti dei criteri presentati sopra (tabella 5).

La forza dinamica di contatto ruota-rotaia negli scambi TO è stata originariamente considerata superiore di 10 dB alla forza corrispondente per i binari in retto. Tuttavia una valutazione analitica aggiuntiva relativa allo scenario del caso peggiore basata sui risultati di uno specifico studio di acustica «Studio del rumore e delle vibrazioni per le platee flottanti in scambi con fissaggio diretto – Caso analitico: galleria NATM

called ground borne noise. The relationship between the vibration of the room surfaces and the noise levels depends on the amount of absorption in the room, the room size and shape, and the distribution of the vibration velocity levels on the room surfaces. The following relationship [4] between noise and floor vibration levels was implemented:

$$L_p = L_v - 22$$

with:

L_p sound pressure level (in dBLin);

L_v vibration velocity level of floor (in dB ref. 1e-9 m/s).

Based on the models results it was resulted that in all TO locations the predicted N&V levels were far above the criterion presented above (table 5).

In TO locations the dynamic wheel-rail impact force was considered originally to be 10 dB higher than the corresponding force for straight tracks (standard tracks, no turnout). However an additional parametric evaluation introducing a worst case scenario based on the results from a special acoustic study «Noise and vibration study for floating slab in direct fixation turnouts – Case study: NATM tunnel Soil II – Segment 33 – Stavros extension - Finite Element simulation: Static and dynamic behaviour of turnout - Analysis performed with SYSTUSTM

TABELLA 5 - TABLE 5

LIVELLI DI RUMORE E VIBRAZIONI PREVISTI IN CORRISPONDENZA DEGLI SCAMBI – N&V PREDICTED LEVELS AT TO LOCATIONS

Sezione Section	Tipo di edificio Type of building	TO	Criterio Criterion L_{pA} [dB(A)]	Livelli stimati L_{pA} [dB(A)] Scenario peggiore Estimated levels L_{pA} [dB(A)] Worst case scenario
(a) Aegaleo-Haidari TO 3-02 & 3-03				
12 suolo2 12 soil2	Residenziale Residential	X	40 ⁽¹⁾	55,4
13	Misto Mixed	X	40 ⁽¹⁾	51,6
20	Commerciale Commercial	X	45-55 ⁽²⁾	51,7
20A	Residenziale Residential	X	40 ⁽¹⁾	47,6
(b) Agios Antonios - Anthoupoli				
7	Misto Mixed	X	40 ⁽¹⁾	67,0
11 suolo 2 11 soil 2	Misto Mixed	X	40 ⁽¹⁾	58,6
11 suolo 3 11 soil 3	Misto Mixed	X	40 ⁽¹⁾	67,1

⁽¹⁾ Criterio valore massimo secondo lo studio EIA & APTA. Criterion max value according to EIA study and APTA.

⁽²⁾ Criterio valore massimo secondo APTA. Criterion max value according to APTA.

Suolo II – Segmento 33 – Tratta Stavros – Simulazione degli elementi finiti – Analisi eseguita con SYSTUS™ (TT&E SA- D2S International Aprile 2003) [5], mostrava che i livelli stimati potrebbero essere molto al di sopra del criterio fissato. Pertanto è stata suggerita ad AM un'implementazione con platea FST per assicurare un'attenuazione delle vibrazioni trasmesse dal suolo, dato che i livelli di rumore indotto previsti sono considerevolmente più alti del criterio adottato. È inoltre utile mettere in evidenza che simili risultati sono stati ottenuti anche in corrispondenza di altri scambi TO lungo la rete AM esistente durante il normale funzionamento [6].

3. Campagna di misurazione Vibro-Acustica in situ su scambi TO con caratteristiche simili

Al fine di convalidare le previsioni teoriche di cui sopra, per un dato scambio TO (con fissaggio diretto come da figura sotto riportata) di cui era prevista l'implementazione lungo le tratte sopra menzionate, è stata effettuata una campagna di misurazioni dei livelli R&V trasmessi dal suolo su scambi TO con caratteristiche simili durante le normali condizioni di esercizio.

Lo scambio TO deve essere installato nelle nuove tratte della linea della AM Anthoupoli & Haidari alle seguenti progressive chilometriche (come risultati R&V iniziali presentati nella tabella 5):

– *Aegaleo – Haidari*

C/O 3-03 KP 0+684.658 - 0+735.496

C/O 3-02 KP 1+060.788 - 1+111.626

– *Ag. Antonios - Anthoupoli*

C/O 2-55 KP 2+264.035 - 2+314.872

SC/O 2-56 KP 2+502.424 - 2+553.261

Al fine di stabilire tutte le condizioni ed i parametri di misurazione compatibili, è stata scelta una galleria TBM della Metropolitana di Madrid (Stazione: Barrio del Puerto), dove era già stato installato uno scambio TO simile e che attualmente opera a pieno regime. Sono state eseguite le misurazioni contemporaneamente in 3 diversi punti sia sull'arco rovescio che sulle pareti durante il funzionamento con un veicolo AnsaldoBreda Metro dedicato, avente approssimativamente le stesse caratteristiche di massa non sospesa del materiale rotabile della linea AM (vedere dati sopra). Le misurazioni della velocità delle vibrazioni sono state eseguite su entrambe le pareti della galleria in direzione "Estadio Olimpico" & "Hospital Henares" contemporaneamente durante l'operatività dedicata del treno e per 10 passaggi in entrambe le direzioni e sugli scambi TO (ossia 31 passaggi a diverse velocità). Le misu-

(TT&E SA- D2S International April 2003) [5], showed above estimated levels far above the given criterion.

Therefore a FST implementation ensuring an adequate ground borne and vibration attenuation was suggested to AM given that the expected noise level are considerably higher the criterion. It is also useful to highlight that similar results were concluded also in other TO locations in the existing - in operation - AM network [6].

3. Vibro-Acoustic In situ Measurement Campaign on similar TO

In order to validate the above theoretical predictions, for a given TO (with direct fixation see figure here-after) expected to be implemented in the above extensions, it was decided to validate the N&V levels in normal operating conditions via a vibro-acoustic measurement campaign of ground borne noise and vibration levels on a similar TO.

The given TO is to be installed at AM extensions of Anthoupoli and Haidari at the following locations (as the initial N&V study results presented in table 5):

– *Aegaleo – Haidari*

C/O 3-03 KP 0+684.658 - 0+735.496

C/O 3-02 KP 1+060.788 - 1+111.626

– *Ag. Antonios - Anthoupoli*

C/O 2-55 KP 2+264.035 - 2+314.872

SC/O 2-56 KP 2+502.424 - 2+553.261

In order to establish all necessary compatible measurement conditions and parameters a TBM tunnel at Metro Madrid (Station: Barrio del Puerto) was selected, where a similar TO has already been installed and is actually in full operation. Three (3) different locations in both tunnel invert and walls were simultaneously measured during the operation of a dedicated AnsaldoBreda Metro vehicle with approx. the same un-sprung mass characteristics as the rolling stock in AM (see data above). Vibration velocity measurements were performed on both tunnel walls towards "Estadio Olimpico" and "Hospital Henares" simulta-

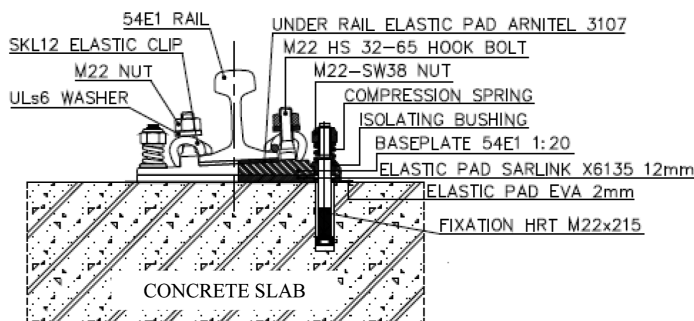


Fig. 4 - Sezione di un attacco elastico per le nuove tratte AM. Cross section of elastic fastening for AM extensions.

razioni della velocità delle vibrazioni sono state eseguite anche sull'arco rovescio (nelle zone di intersezione) contemporaneamente negli stessi punti sulle pareti della galleria di cui sopra (figg. 5 e 6) e alle seguenti condizioni di setup:

- i. *Setup delle misurazioni sulle pareti della galleria:* sono stati utilizzati due (2) accelerometri WILCOXON 731A con amplificatori P31 per registrare l'accelerazione verticale sulle pareti della galleria. La sensibilità dell'accelerometro era di 100 o 10 V/g. L'amplificatore ha un filtro passa basso a 450 Hz. L'emissione di ciascun accelerometro è stata registrata con un registratore dati digitale National Instruments a 4 canali.
- ii. *Setup delle misurazioni nell'arco rovescio:* è stato inoltre contemporaneamente utilizzato un (1) accelerometro WILCOXON 731A aggiuntivo con amplificatori P31 per registrare l'accelerazione verticale sull'arco rovescio nelle aree di intersezione in corrispondenza dello scambio TO. In totale sono stati registrati 31 passaggi in diverse velocità e in entrambe le direzioni e negli incroci TO) come segue:
- iii. *Serie di misurazioni:*
 - a) 1^a serie di misurazioni: 10 passaggi della Metro in direzione Hospital Henares – Posizione degli accelerometri: (a) Parete della galleria destinazione Hospital Henares (b) Arco rovescio in mezzo allo scambio TO e (c) parete della galleria destinazione Estadio Olimpico;
 - b) 2^a serie di misurazioni: 10 passaggi della Metro nelle aree di intersezione – Posizione degli accelerometri: come sopra;

neously during dedicated train operation and for 10 train pass-bys in both directions and TO crossing (i.e. 31 pass-bys at different speeds). Vibration velocity measurements were also performed on the tunnel invert (at intersection area) simultaneously at both the above tunnel wall locations (fig. 5 and 6) and the following setup specifications:

- i. *Tunnel Wall measurement's setup:* Two (2) WILCOXON accelerometers 731A with P31 power amplifiers were used in order to record vertical acceleration on the tunnel wall. The voltage sensitivity of the accelerometer on the tunnel wall was 100 or 10 V/g. The power amplifier has a 450 Hz low pass filter. The output of each accelerometer was recorded by a digital 4 channel National Instruments data recorder.
- ii. *Tunnel Invert measurement's setup:* One (1) additional WILCOXON accelerometer 731A with P31 power amplifiers was also simultaneously used in order to record vertical acceleration on the tunnel invert at the TO's intersection area. In total 31 pass-bys were recorded in various velocities and both directions and TO crossing) as follows:
- iii. *Series of measurements:*
 - a) 1st series of measurements: 10 Metro passages towards destination Hospital Henares - Location of accelerometers: (a) Tunnel wall destination Hospital Henares (b) Tunnel invert in the middle of the TO and (c) Tunnel wall destination Estadio Olimpico;
 - b) 2nd series of measurements: 10 Metro passages towards at intersection area - Location of accelerometers: as above;



Fig. 5 - Punti di misurazione delle vibrazioni nella Metro di Madrid (Barrio del Puerto) – Vista del veicolo normalmente utilizzato nella campagna di misurazioni. *Vibration measurement locations at the tunnel wall and invert of Madrid Metro (Barrio del Puerto) – View of the typical vehicle used in the measurement campaign.*

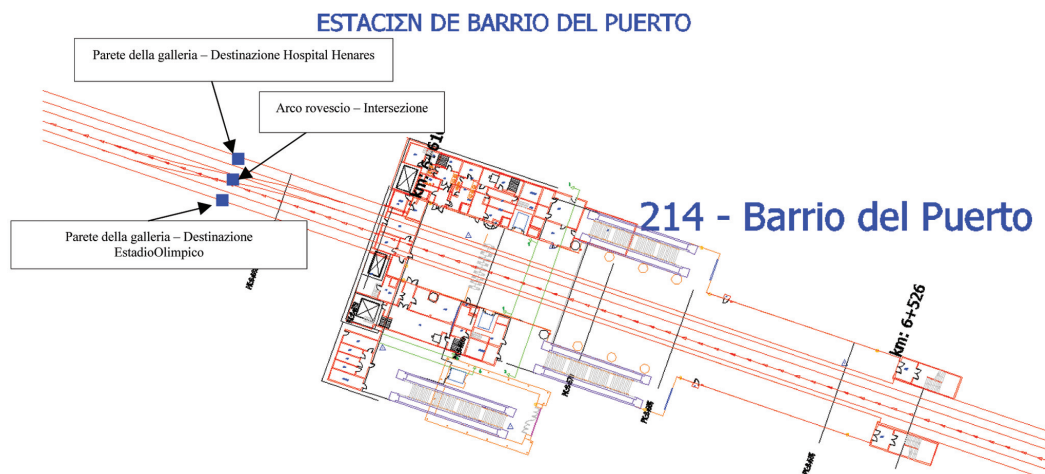


Fig. 6 - Schema dei punti di misurazione nella Metro di Madrid (Barrio del Puerto). *Measurement's locations layout at Madrid Metro (Barrio del Puerto)*

- c) 3^a serie di misurazioni: 11 passaggi della Metro in direzione Estadio Olímpico - Posizione degli accelerometri: come sopra.

I relativi risultati sono presentati nel diagramma di fig. 7.

Sulla base dei risultati misurati nella fig. 7, (per tutte le serie di misurazioni) unitamente al massimo dei valori mediati calcolati per tutte le frequenze (che rappresenta lo scenario del caso peggiore), viene mostrato che tutti i livelli R&V trasmessi dal suolo registrati in fase operativa sugli scambi TO nella Metro di Madrid, sono significativamente bassi, soprattutto quando si osservano le frequenze più alte che influenzano principalmente i livelli dB(A). È importante notare che nel precedente programma di estensioni delle tratte della linea AM, era stato implementato un diverso tipo di scambio TO (con 2 diverse piastre di fissaggio - vecchia e nuova), su una piattaforma FST adatta che rispondesse a tutti i criteri ambientali necessari [7]. Tuttavia, nelle attuali estensioni la Joint Venture delle costruzioni desiderava valutare in ogni possibile aspetto e - in caso di risultati positivi - implementare un nuovo tipo di scambio TO (come per la Metro di Madrid - vedi fig. 4) confrontando, a tale scopo, tutti i dati disponibili delle misurazioni vibro acustiche di AM e i risultati delle misurazioni della campagna Metro Madrid, unitamente ai dati calcolati dal relativo modello di previsione del rumore. Tale confronto ha dimostrato che le prestazioni di isolamento R&V raggiunte dalle soluzioni alternative "vecchia" e "nuova" dello scambio TO introdotto nelle precedenti estensioni della AM (senza misure di mitigazione aggiuntive), erano inferiori se paragonati ai risultati ottenuti nella Metro di Madrid (vedere i risultati nella fig. 8 di seguito). È inoltre importante sottolineare in questa

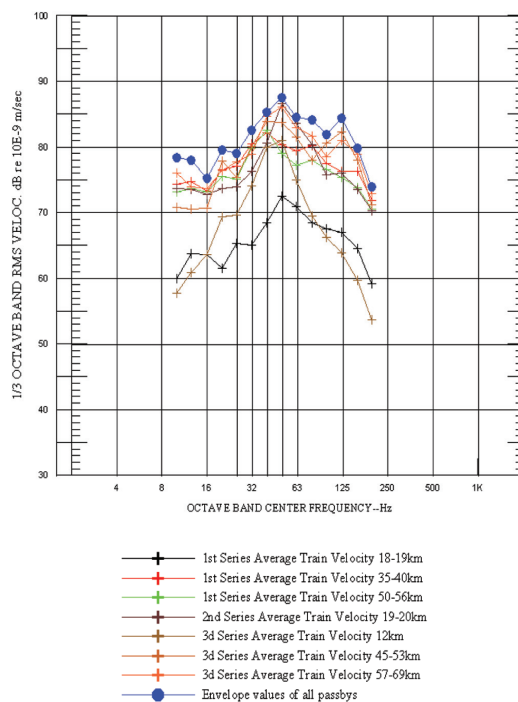


Fig. 7 - Stazione Barrio del Puerto: Arco rovescio & Parete livello di velocità di vibrazione in banda 1/3 di ottava per tutti i treni. *Calcolo dei valori mediati per tutti i passaggi per frequenza. Station Barrio del Puerto: Tunnel Invert and Wall 1/3 Octave band Vibration Velocity level for all train velocities - Calculation of envelope values for all pass-bys per frequency.*

sede che le misurazioni relative agli scambi TO delle precedenti estensioni della linea AM erano state eseguite su galleria tipo NATM3 suolo 2 e che non vi erano dati dettagliati in galleria tipo TBM per la sezione nella Metro di Madrid.

Come mostrato nell'analisi comparativa (fig. 8), si conclude che tutti i livelli R&V trasmessi dal suolo registrati durante il servizio sullo scambio TO nella Metro di Madrid (condizioni della galleria TBM), sono risultati significativamente più bassi (soprattutto riguardo le frequenze più alte che influenzano i calcoli del livello di dB(A) e pertanto il relativo criterio). Ai fini dell'analisi comparativa, i risultati derivanti dell'implementazione di un sistema di scambi TO con fissaggio diretto modificato in base alle condizioni locali presenti nella linea della AM (ossia NATM3), sono inclusi nella fig. 8.

In conclusione, l'implementazione del sistema di scambi TO della Metro di Madrid, con emissioni di rumore trasmesso dal suolo ancora inferiori, non è sufficiente a garantire la piena conformità ai criteri dati, pertanto occorre introdurre una soluzione appropriata con platea FST che assicuri le necessarie caratteristiche dinamiche adattate alle rispettive posizioni della Metro di Atene.

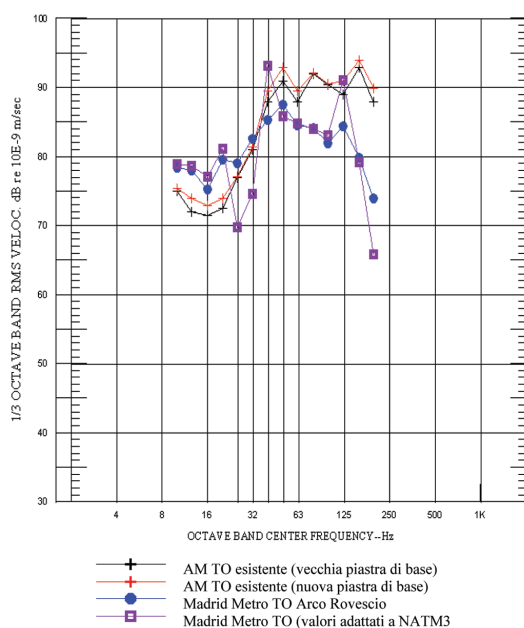


Fig. 8 - Confronto a bande di 1/3 di ottava dei dati di velocità di vibrazione misurati per uno scambio TO implementato sulla linea di AM e uno scambio TO della Metro di Madrid. Comparison of 1/3 frequency analysis of vibration velocity measured data for AM implemented TO and Madrid Metro TO.

- c) 3rd series of measurements: 11 Metro passages towards Estadio Olimpico - Location of accelerometers: as above.

The relevant results are presented hereafter in fig. 7.

Based on the relevant measured results in the fig. 7 above (for all series of measurements) and the calculated max envelope of values for all frequencies (representing the worst case scenario) it is shown that all recorded levels of ground borne noise and vibration levels for the given TO operation in Metro Madrid, are very low, especially when looking at the higher frequencies that influence mostly the dB(A) levels. It is important to note that in previous executed AM extensions program, a different TO type (with 2 different direct fastening plates named hereafter as "old" and "new" types) was implemented, on a suitable FST ensuring compliancy with all necessary environmental criteria [7]. However in the current extensions the construction Joint Venture wished to extensively evaluate and - if results proven positive - to implement a new type of TO (as per Madrid Metro and fig. 4) comparing, for that purpose, all available AM vibro-acoustic measurement data the relevant Metro Madrid campaign results along with the calculated date from the relevant noise model.

This comparison proved that N&V isolation performance, achieved by the - "old" and "new" alternatives - of the TO introduced in the previous AM extensions (with no additional mitigation measures), was lower compared to Madrid Metro relevant results (see fig. 8 hereafter). Furthermore it is important to underline that the relevant measurements results in of the previous AM extensions were executed in NATM3 soil 2 conditions and that no detailed data were available for TBM tunnel section in Metro Madrid.

As shown in the comparative analysis (fig. 8), it is clear that all recorded ground borne noise levels for the given TO operation in Metro Madrid (in TBM tunnel conditions), were found significantly lower (especially in higher frequencies that influence dB(A) level calculation and therefore the relevant criterion). For comparative analysis purposes, the relevant results from the implementation of a similar TO direct fixation system (corrected for local NATM3 conditions) is also included in fig. 8.

However, in conclusion, the implementation of this "even less ground borne emitting" Madrid Metro TO system, is not enough to ensure full compatibility with the given criteria, and an appropriate FST application needs to be introduced ensuring the necessary adapted dynamic characteristics, at the above TO respective locations of Athens Metro.

4. The proposed Floating slab with elastic mat "CDM-FSM-L10/RR": Technical Specifications and noise attenuation predictions

The typical proposed FST for the above TO locations in both extensions consists of a 55 m long x 6 m wide slab in reinforced concrete C30/37 with thickness of 310 mm. The slab is installed on an elastic mat of thickness

4. La platea flottante con materassino elastico "CDM-FSM-L10/RR" proposta: Specifiche Tecniche e previsioni di attenuazione del rumore

La tipica soluzione con platea FST proposta per le sezioni in corrispondenza di scambi TO per entrambe le tratte, consiste in una piattaforma lunga 55 m e larga 6 m realizzata in cemento armato C30/37 con uno spessore di 310 mm. La piattaforma viene installata su un materassino elastico dello spessore di 40 mm (CDM-FST-L10/RR [8] con due strati di superficie ondulata 20/10 appartenente alla famiglia di prodotti elastomerici CDM-RR, approvato e già utilizzato da parte di AM fin dalle prime estensioni realizzate) e munito di stopper di contenimento laterale per la stabilità sismica. La configurazione dello scambio TO in base all'incrocio illustrato sopra consiste in:

- rotaia UIC 54 con fissaggio diretto su piattaforma in cemento (altezza = 159 mm, larghezza = 140mm);
- pannello elastico sottorotaia Arnitel 3107 : 170x140x6 mm, con C-stat = 94 MN/m, e C-dyn = 138MN/m;
- piastra metallica con le dimensioni appropriate;
- pannello elastico con piastra di base Sarlink X6135 : 290x160x12 mm, con rigidità C-stat = 24 MN/m, e rigidità C-dyn = 70 MN/m;
- pannello di isolamento elettrico EVA (con dimensioni appropriate), spessore 2 mm, con C-stat = 410 MN/m, e C-dyn= 549 MN/m.

La platea FS con il materassino elastico è rappresentata nella fig. 9.

Il suddetto materassino FSM ha c-stat = 10 (+/- 10%) MN/m/m2 e c-dyn < 20 MN/m/m2 nel tipico campo di carico:

- il carico g permanente (circa 310 mm RC) = circa 10 kPa (0.010 MPa);
- il carico dinamico: carico assale massimo della metro 140 kN che rappresenta circa 15 kPa;
- pertanto, il campo di carico σ per il materassino resiliente è $0.010 \text{ MPa} < \sigma < 0.025 - 0.03 \text{ MPa}$.

Per l'isolamento laterale e la stabilità sismica, occorrono degli stopper di contenimento laterali di 200x200x12 mm posizionati ogni 3m. Il materiale per questi stopper è il CDM-97012 appartenente alla famiglia di elastomeri CDM-PF. Occorrono circa 40 stopper per ciascuno scambio.

L'implementazione della soluzione con platea FST nel modello ha risultati eccellenti che vengono illustrati nel diagramma di fig. 10 e nella tabella 6.

Sulla base dei valori di isolamento sopra riportati, vengono di seguito presentati i valori previsti dei livelli di

40 mm (CDM-FST-L10/RR [8] with 2 layers of wavy surface 20/10 part of the CDM-RR elastomer family, approved by and in use in AM since former extensions) and equipped with lateral stop bearings for seismic stability. The TO configuration as per the cross section presented above consists of:

- Rail UIC 54 with direct fixation on the concrete slab (h=159 mm, width = 140mm);
- Elastic RailpadArnitel3107: 170x140x6 mm, with C-stat = 94 MN/m, and C-dyn = 138MN/m
- Metallic plate with appropriate dimensions;
- Elastic Baseplate Pad SarlinkX6135 : 290x160x12 mm, with C-stat stiffness = 24 MN/m, and C-dyn stiffness = 70 MN/m;
- Electrical isolation shim pad EVA (with appropriate dimensions), thickness 2 mm, with C-stat = 410 MN/m, and C-dyn= 549 MN/m.

The FS with the elastic mat is presented in the fig. 9.

The said FSM mat has c-stat = 10 (+/- 10%) MN/m/m2 and c-dyn < 20 MN/m/m2 in the typical load windows:

- The permanent load g (approx. 310 mm RC) = approx. 10 kPa (0.010 MPa);
- The dynamic load: metro max. 140 kN axle load representing approx. 15 kPa (see: "S-DFMA-L10-E TECHNICAL SPECIFICATION Including QAP SUPPLY OF ELASTIC MATS CDM-DFMA-L10/RR 2 layer " by CDM);
- Thus, the load window σ for the resilient mat is $0.010 \text{ MPa} < \sigma < 0.025 - 0.03 \text{ MPa}$.

For lateral isolation and seismic stability, lateral stop bearings of 200x200x12 mm are required every 3m. The material for these bearings is CDM-97012 from the CDM-PF elastomer family. Approximately 40 bearings were needed per distinct turnout.

The implementation of the above FST solution in the model has excellent results that are presented in the following table 6 and diagram in fig. 10.

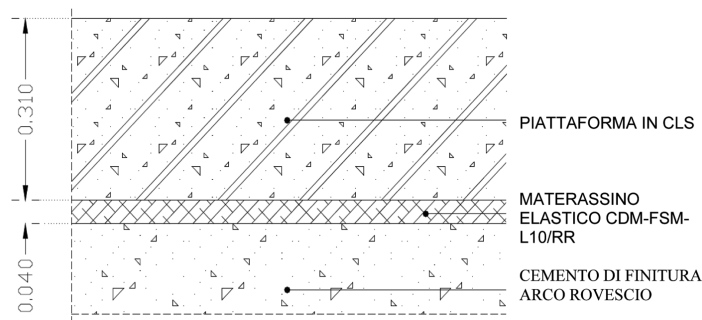


Fig. 9 - Platea FS sotto TO con fissaggio diretto per le tratte della AM. FS under direct fixation TO for AM extensions.

TABELLA 6 – TABLE 6

LIVELLI DBV CALCOLATI NELLE ESTENSIONI PER LA AM IN CORRISPONDENZA DEGLI SCAMBI TO
PER IL PRODOTTO CDM – FSM – L10/RR - CALCULATED DBV LEVELS AT AM EXTENSIONS TO LOCATIONS
FOR THE CDM – FSM – L10/RR

Frequency (Hz)	Emitted vibration with no isolation (dBv)	Emitted vibration with CDM-DFMA- L10/RR isolation (dBv)	Insertion Loss CDM-DFMA- L10/RR (dBv)
10	78,5	84,2	5,7
13	78,0	89,1	11,1
16	75,3	84,6	9,3
20	79,6	79,5	-0,1
25	79,1	72,6	-6,5
32	82,6	70,8	-11,8
40	85,4	68,8	-16,6
50	87,6	67,6	-20,0
63	84,6	55,7	-28,9
80	84,2	52,0	-32,2
100	81,9	44,9	-37,0
125	84,5	41,2	-43,3
160	79,9	41,0	-38,9
200	74,1	39,1	-35,0

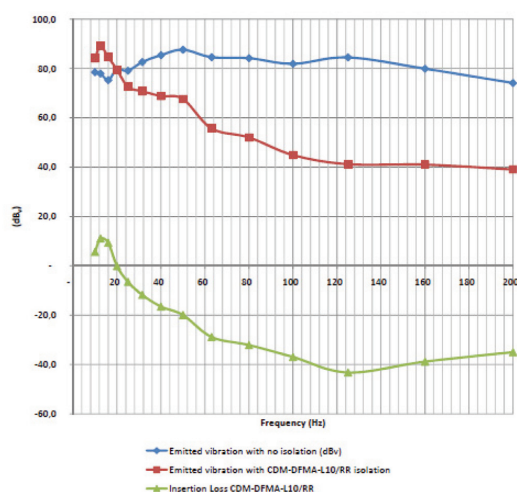


Fig. 10 - Confronto a bande di 1/3 di ottava dei dati di velocità di vibrazione misurati con e senza isolamento con la soluzione FS proposta negli scambi TO lungo la AM. Comparison of 1/3 frequency analysis of vibration velocity measured data for with and without isolation with the proposed FS at AM TO locations.

L_{pA} in corrispondenza di tutti gli scambi TO che si dimostrano molto al di sotto dei criteri fissati (tabella 7).

5. Conclusioni

Gli scambi TO nella linea della AM sono abitualmente fonte di lamentela a causa del rumore e delle vibrazioni generati; di conseguenza AM sta concentrando l'attenzione su adeguate misure di mitigazione per ciascuno scambio installato

Based on the above predicted isolation values, the expected results values of L_{pA} levels in all TO locations are presented in the following table proven to be well beneath the given criterion (table 7).

5. Conclusions

TO systems in AM are typical sources of N&V complaints; as a result AM is focusing in depth attention on

lungo tutta la propria rete. Nei casi delle estensioni realizzate lungo le Linee 2 e 3, il concetto di fissaggio dei sistemi per gli scambi TO è stato modificato rispetto a quelli installati precedentemente e pertanto AM ha richiesto un ulteriore studio per progettare le infrastrutture relative agli scambi in grado di rispondere ai requisiti R&V. Al fine di stabilire tutte le necessarie condizioni di misurazione e parametri compatibili, è stata selezionata una galleria TBM della Metro di Madrid (Stazione Barrio del Puerto), dove era già installato- pur se con diverse condizioni di suolo - e in pieno servizio, un analogo sistema di scambi TO. È stata condotta una campagna di misurazioni con risultati molto interessanti che hanno fornito una base dati adeguata per la realizzazione di un modello FE completo e la verifica dei livelli di rumore e vibrazioni attesi. L'analisi contenuta nel presente articolo porta alla conclusione che occorre implementare una soluzione con platea FST per gli scambi TO aventi caratteristiche simili lungo la linea della metro AM. Il sistema di mitigazione R&V suggerito è una platea FST installata su materassi resilienti tipo "CDM-FSM-L10".

SLABTRACK MODELLO DI SIMULAZIONE

1. Il modello di mobilità

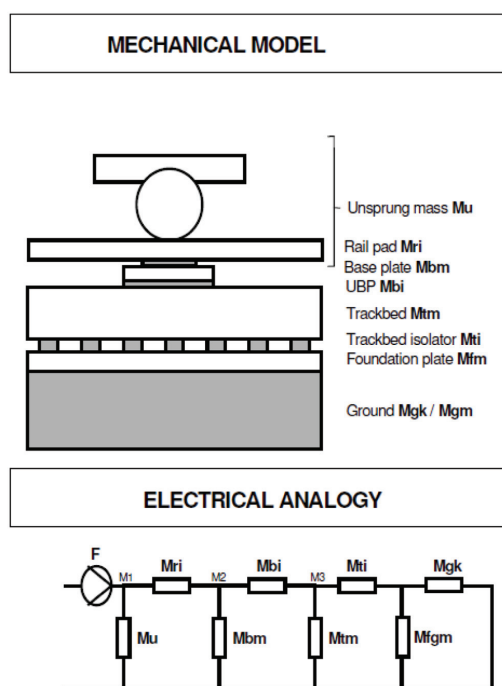


Fig. 11 – Modello di simulazione semplificato per platea flottante. Simplified slab track simulation model.

adequate N&V mitigation treatments for every TO installed in their network. In the case of Line 2 and 3 extensions, the fastening concept of TO system was modified compared to the ones installed before and therefore AM has requested an additional study to design the TO track infrastructure meeting the N&V criteria. In order to establish all necessary compatible measurement conditions and parameters a TBM tunnel at Metro Madrid (Station: Barrio del Puerto) was selected, where a similar TO has already been installed -but with different soil conditions- and was actually in full operation. A full N&V measurement campaign was executed with very interesting results providing an adequate data basis for a full FE model and a comprehensive assessment of the expected noise and vibration levels. The analysis within this article concluded that an FST solution is required for the same TO type in AM extensions program. The suggested and finally implemented

N&V mitigation concept is a FST installed on resilient mats type "CDM-FSM-L10".

TABELLA 7 - TABLE 7

LIVELLI R&V PREVISTI IN CORRISPONDENZA DEGLI SCAMBI TO N&V PREDICTED LEVELS AT TO LOCATIONS

Sezione <i>Section</i>	Tipo di edificio <i>Type of building</i>	TO	Criterio / <i>Criterion</i> L_{pa} [dB(A)]	Livelli L_{pa} [dB(A)] stimati con piattaforma FS <i>Estimated levels L_{pa} [dB(A)] with FS implementation</i>
(a) Aegaleo-Haidari TO 3-02 & 3-03				
12 suolo 2 / 12 soil 2	Residenziale / Residential	X	40 ⁽¹⁾	21,7
13	Misto / Mixed		45-55 ⁽²⁾	21,4
20	Commerciale / Commercial			
20A	Residenziale / Residential			
(b) Agios Antonios - Anthoupoli				
7	Misto / Mixed	X	40 ⁽¹⁾	24,2
11 suolo 2-3 / 11 soil 2-3	Misto / Mixed			24,2

⁽¹⁾ Criterio valore massimo secondo lo studio EIA & APTA. Criterion max value according to EIA study and APTA

⁽²⁾ Criterio valore massimo secondo APTA. Criterion max value according to APTA.

Elenco delle abbreviazioni

TO	Turnout
N&V	Noise and Vibration
FST	Floating Slab Track
AM	Attiko Metro (Athens Metro)
NATM	New Austrian Tunnelling Method
C&C	Cut and Cover
TBM	Tunnel Boring Machine
EIA	Environmental Impact Assessment
APTA	American Public Transport Association
TF	Transfer Function
FS	Floating Slab

List of abbreviations

TO	Turnout
N&V	Noise and Vibration
FST	Floating Slab Track
AM	Attiko Metro (Athens Metro)
NATM	New Austrian Tunnelling Method
C&C	Cut and Cover
TBM	Tunnel Boring Machine
EIA	Environmental Impact Assessment
APTA	American Public Transport Association
TF	Transfer Function
FS	Floating Slab

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] <http://www.ametro.gr/page/default.asp?id=15>.
- [2] TT&E Consultants Ltd.– D2S International: “AM Line 3 Extension: Aegaleo – Haidari - Ground borne Noise and Vibration Study”, J/V Alpine MayrederBau GmbH - TERNA S.A. - Pantheniki S.A. - Powell Electrical Systems Inc., January 2008.
- [3] TT&E Consultants Ltd.– “AM Line 2 Extension: Agios Antonios-Anthoupoli - Ground borne Noise and Vibration Study” Attiko Metro November 2005.
- [4] SAURENMAN H.J., NELSON J.T. and WILSON G.P., in their “Handbook of urban rail noise and vibration control”, U.S. Department of Transportation Administration, report No UMTA-MA-06-0099-82-1, 1982.
- [5] TT&E Consultants SA. - D2S International – “Noise and Vibration Study for Floating Slab in direct fixation Turnouts – Case Study: Natm Tunnel Soil II – Segment 33 – Stavros Extension” - Finite Element simulation: Static and dynamic behaviour of turnout - Analysis performed with SYSTUS™ April 2003.
- [6] K. VOGIATZIS, Dr. P. VANHONACKER, “Noise and Vibration Evaluation of a Floating Slab in Direct Fixation Turnouts in Stavros extension of Athens Metro”, ICASTOR Journal of Engineering, Vol. 2, No. 3(2) (2009), Indian Centre for Advanced Scientific and Technological Research.
- [7] TT&E Consultants SA “Work Execution Contract CON-02/003: Design, Procurement, Installation and Commissioning of Electromechanical Infrastructure Equipment and Track Work for the Extensions of Athens Metro Lines 2 and 3: Trackworks - Noise and vibration measurements”, C.J.V. AKTV – E/M Metro, December 2004.
- [8] <http://www.cdm.eu>.

Sommaire

EVALUATION DU BRUIT ENDUIT ET DES VIBRATIONS DES PLATEFORMES FLOTTANTES DANS LES ÉCHANGEURS À FIXATION DIRECTE SITUÉS LE LONG DES EXTENSIONS "HAIDARI & ANTHOUPOLI" DES LIGNES 2 ET 3 DU MÉTRO D'ATHÈNES

Cet article décrit les œuvres réalisées pour les deux dernières extensions des lignes 2 et 3 du métro d'Athènes. On présente ici de suite l'évaluation effectuée du bruit et des vibrations transmis par le sol au fin de déterminer les mesures de mitigation nécessaires à garantir, en correspondance de chaque échangeur le long des lignes susmentionnées, des niveaux acceptables de bruit et de vibrations transmis à travers le sol aux immeubles sensibles à proximité. En suite, au fin de vérifier si les valeurs prévues sont respectées, un programme de mesures a été exécuté dans le réseau du métro de Madrid pour évaluer l'émission de vibrations le long des lignes contenant des échangeurs avec caractéristiques similaires et sur la base des résultats obtenus a donc été évaluée une solution à rail sur plateforme flottante (FST-Floating slab track) pour les segments du métro d'Athènes contenant des échangeurs, solution sensée de garantir une atténuation complète de R&V transmis au niveau du sol avec une perte d'insertion de -20dBV par rapport au niveau de sollicitation prédominante (entre 40 et 125 Hz).

Zusammenfassung

VERLÄNGERUNG DER LINIEN 2 UND 3 DER U-BAHN ATHEN ZWISCHEN HAIDARI & ANTHOUPOLI. BEWERTUNG DES GERAUSCH- UND SCHWINGUNGSPEGEL ERZEUGT VON WEICHEN AUF FESTEN FAHRBAHN GELEGT.

Kurze Beschreibung des Ausbaus der Linien 2 & 3 in Athen, mit besonderer Aufmerksamkeit auf Weichen der Typen 3-02,3-03 und 2-55,2-66. Messung von Schwingungs- und Geräuschpegel auf Nebengebäude.

Verteilung der Linien in homogenen Teilstrecken nach deren Ausrüstung und Elastizität Merkmalen. Ausführung einer vorläufigen Verifizierung in U-Bahn Madrid, wo ähnliche Weichen auf FST (Floating Slab Track) in Betrieb sind. Die gewonnenen Resultaten erlaubten die Wahl einer Festen Fahrbahn für Athen. Diese FF ermöglicht eine -20dBV Verminderung in Schwingungsfeld 40÷125 Hz. Mit dieser wurde auch ein Schwingungspegel am Bodenniveau berechnet, der unter dem vorgeschriebenen Wert lag.



S.p.A.

Sede Legale e Direzione Generale

Via del Tuscolano 15 - 40128 - Bologna

Tel. 051/329111 Fax.051/321106

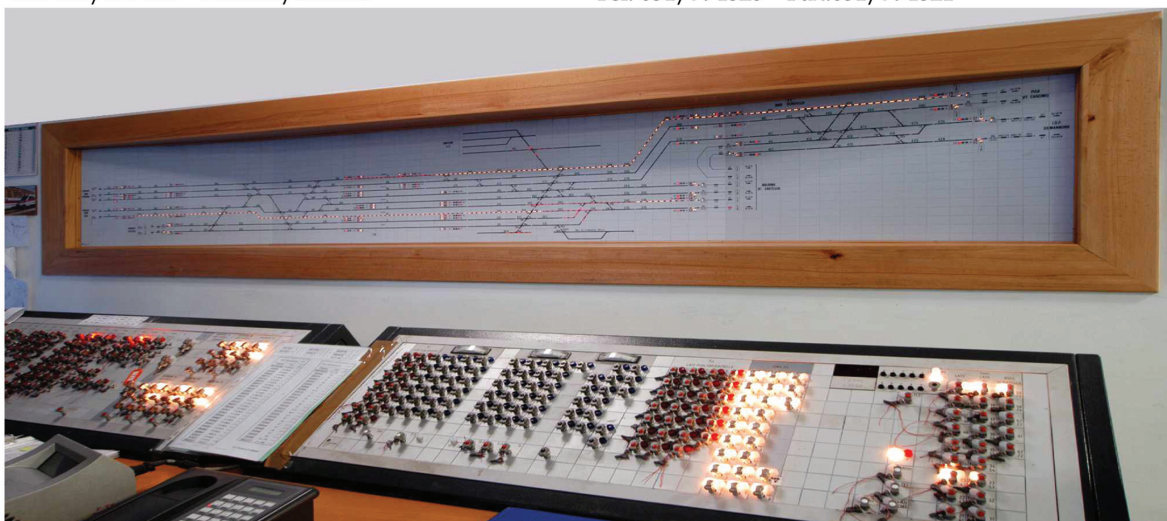
SITO: www.sitespa.it

MAIL: site@sitespa.it

Divisione Trasporti (ex DLK Srl)

Via della Chimica 3 - 40064 - Ozzano dell'Emilia (BO)

Tel. 051/794820 Fax.051/794821



Realizzazione apparati di sicurezza, impianti di Blocco Automatico a correnti codificate e impianti di telecomunicazioni per Ferrovie e Metropolitane.

Fornitura di componenti e dispositivi per la sicurezza ferroviaria.