



Metodologia di analisi delle vibrazioni strutturali dovute al traffico ferroviario: caso di studio dell'area archeologica del Colosseo

An analysis methodology for studying the structural vibrations caused by rail traffic: a case study of the archaeological area around the Colosseum in Rome

Prof. Ing. Gianfranco VALENTE^(), Dott. Ingg. Gino D'OVIDIO^(**), Francesco CRISI^(**)*

SOMMARIO - L'articolo presenta una nuova metodologia per l'analisi dinamica dell'interazione suolo-struttura connessa al traffico ferroviario.

I risultati sono utilizzabili sia per il controllo delle vibrazioni deboli da traffico che per il miglioramento della resistenza sismica delle strutture.

La metodologia proposta prevede l'utilizzo di due modelli tridimensionali funzionalmente congiunti e confrontabili con i dati sperimentali.

Il primo modello "veicolo-via" fornisce istantaneamente le forze negli attacchi rotaie-traversine dovute al transito di veicoli/convogli, al variare delle condizioni di carico e di esercizio. Tali forze sono utilizzate come input nel secondo modello di interazione "suolo-struttura" per determinare le vibrazioni delle strutture in esso ricomprese.

Tale metodologia di analisi è applicata, come caso di studio, nella zona archeologica di Roma, comprendente il Colosseo e l'arco di Costantino, interessata dal collegamento ferroviario sotterraneo di tipo metropolitano.

Relativamente al transito unidirezionale di un veicolo ferroviario in esercizio sulla linea metro alla fine degli anni '80, si ottengono le caratteristiche del moto $s(t)$, $v(t)$ ed $a(t)$ per tutti i nodi e le caratteristiche tensoriali $\epsilon(t)$ e $\sigma(t)$ per tutti gli elementi finiti (EF) del modello; tali risultati sono commentati per un "concio campione" del Colosseo.

ABSTRACT - The article presents a new methodology for analysing dynamic soil-structure interaction connected to rail traffic.

The results can be used to monitor the weak vibrations caused by traffic and to improve the resistance of structures to earthquakes.

The proposed methodology entails the use of two three-dimensional models functionally connected and comparable with experimental data.

The first model, a "wagons-track" model, instantaneously provides the strengths in the rail-sleeper connections created by the transit of wagons/trains, which vary according to load and use. These strengths are the input for the second model which evaluates "soil-structure" interaction to evaluate the structural vibrations.

This analysis methodology was applied to the archaeological zone of Rome comprising the Colosseum and the Arch of Constantine which is affected by the underground railway.

The characteristics of motion $s(t)$, $v(t)$ and $a(t)$ for all of the nodes, and the tensorial characteristics $\epsilon(t)$ and $\sigma(t)$ for all of the finite elements (EF) of the model are obtained for the unidirectional transit of a railway wagon running along this line at the end of the 1980's. The results are discussed for a "sample pillar" of the Colosseum.

1. Introduzione

L'accresciuta sensibilità ambientale, con particolare riferimento alle aree urbane, impone forme sofisticate di monitoraggio continuo ed azioni preventive verso qualsiasi for-

1. Introduction

A growing environmental awareness, especially within urban areas, has resulted in sophisticated forms for monitoring the pollution generated by transport systems (road

^(*) Università di l'Aquila, Facoltà di Ingegneria, Area Strutture.

^(**) Università di l'Aquila, Facoltà di Ingegneria, Area Trasporti.

^(*) University of Aquila, Faculty of Engineering, Structure Area.

^(**) University of Aquila, Faculty of Engineering, Transports Area.

ma di inquinamento da traffico prodotto sia da autoveicoli che da sistemi di trasporto di massa (su gomma e ferro).

Alle forme d'inquinamento da traffico più note ed intuitive, relazionabili a fattori di tipo chimico, elettromagnetico ed acustico, occorre aggiungere un ulteriore rumore ambientale di tipo vibrazionale dovuto essenzialmente all'interazione ruota-suolo. Tale rumore rappresenta una forma altamente inquinante e spesso dannosa per il patrimonio immobiliare nonché per quello monumentale.

Per quanto concerne il patrimonio edificato, la prevenzione dei danni da rumore ambientale e/o da sisma impone prescrizioni tecniche sempre più restrittive al crescere del valore del patrimonio stesso e del tempo di conservazione atteso.

La corretta definizione delle azioni di conservazione e salvaguardia strutturale del patrimonio edificato, soggetto a rumore vibrazionale, necessita di strumenti di calcolo che consentano di controllare le vibrazioni strutturali sino al miglioramento del PGA (Peak Ground Acceleration) di collasso sismico che, come noto, rappresenta la problematica più restrittiva.

Tale analisi, da eseguirsi con l'ausilio della Meccanica dei Geomateriali (MdG), richiede la conoscenza di tutte le caratteristiche meccaniche dei materiali [19, 21].

Generalmente per i monumenti, sempre molto fratturati e danneggiati, ricavare tali caratteristiche costituisce un lavoro oneroso in termini di tempi e costi, per cui quasi sempre si preferisce utilizzare metodi alternativi di tipo approssimato.

Per valutare le conseguenze prodotte da rumori ambientali di diversa natura ed intensità usualmente, gli studiosi di ingegneria fanno ricorso a modelli strutturali che riproducono il manufatto nella sua parte in elevazione direttamente incastrato alla base.

Su tali schemi statici si eseguono:

- l'analisi elastica;
- l'analisi limite col metodo dei meccanismi (MdM), corrispondente alla verifica al ribaltamento di corpi rigidi soggetti all'azione statica del sisma;
- l'identificazione dinamica.

In passato, l'azione sul terreno veniva anche analizzata tramite una funzione di trasferimento semiempirica alle strutture superiori del manufatto, valida nel dominio delle frequenze [5, 8].

Tali approcci manifestano però palesi approssimazioni in quanto il vincolo dell'incastro, comportando una separazione strutturale, esclude la trasmissione delle vibrazioni dal suolo all'elevazione dell'edificio.

Di contro quanto sopra può essere superato dal metodo d'indagine da noi proposto che si basa sull'analisi di un modello d'interazione terreno-struttura, derivata dalla disciplina di Geofisica, che comporta la continuità strutturale tra suolo, fondazione ed edificio.

traffic and rail) and the implementation of prevention policies.

In addition to the chemical, electro-magnetical and acoustical pollution generated by traffic, a further problem that needs to be taken into consideration is the vibration caused by the interaction of the wheel with the ground. The noise generated represents a significant form of pollution, often resulting in damage to buildings and monuments.

The prevention of damage from vibrations and/or earthquakes damage requires a technical approach which becomes more complex with the increasing cultural value of the affected buildings and monuments and the expected time of conservation.

Deciding upon the right course of action for the conservation and structural safeguarding of the building patrimony subject to vibration noise requires calculation instruments that allow the monitoring of structural vibrations up to seismic collapse PGA. In addition all of the mechanical characteristics of the materials need to be established with the use of Geomaterials Mechanics (GM) [19, 21].

As a rule, obtaining this information for buildings that are particularly fractured or damaged is a time consuming and costly process hence alternative, more approximate methods are usually adopted.

In fact, engineers often use structural models of the building to evaluate the consequences of environmental noise of varying nature and intensity. These static schemes are used for:

- elastic analyses;
- limit analyses using the Limit Analysis Method (LAM) which assesses the reaction of rigid bodies to earthquakes;
- dynamic identification.

In the past, the action on the ground was also analyzed using a semi-empirical transfer function to the upper structure of the building valid in the frequency domain [5, 8].

These approaches were clearly extremely approximate as the fixed joint constraint implying a structural separation, excludes the transmission of vibrations from the ground to the building.

These problems however are overcome in the investigative method we propose here, based on the analysis of ground-structure interaction using a geophysical model which ensures structural continuity between the ground, the foundations and the building.

This methodology, applicable to any ground-building interaction, allows dynamic identification and hence a numerical and experimental comparison of structural behaviour in the frequency domain to determine elasticity modules, and damping coefficients in the time domain.

This analysis methodology is applied, in a case study, to an archaeological area of Rome comprising the Colos-

Tale metodologia, applicabile a qualsiasi problema d'interazione suolo-struttura, consente anche di eseguire l'identificazione dinamica che comporta il confronto numerico-sperimentale delle vibrazioni della struttura, nel dominio delle "frequenze" per determinare i moduli di elasticità, e nel dominio del "tempo" per ricavare i coefficienti di dissipazione dinamica.

Come caso di studio, la metodologia di analisi proposta è applicata all'area archeologica di Roma, comprendente il Colosseo e l'arco di Costantino, che, com'è noto, è interessata dalla linea metropolitana (linea B).

L'articolo non prende in considerazione le difettosità del binario sebbene siano disponibili modellazioni adeguatamente rappresentative e gli effetti non siano talora trascurabili sull'ambiente strutturale al contorno.

2. L'area di studio

L'area di studio coincide con la zona archeologica (circa 36 Ha di estensione) su cui insistono il Colosseo e l'arco di Costantino; tale area è interessata anche dal passaggio della linea metro sotterranea e dalla relativa sottostazione.

Il terreno sottostante l'area in esame presenta diverse stratificazioni quali depositi antropici, Olocene, Pleistocene, sabbia e Pliocene.

L'analisi stratigrafica evidenzia inoltre che la parte settentrionale del Colosseo poggia su uno strato più rigido del Pleistocene mentre quella meridionale insiste su depositi alluvionali più soffici, riferiti all'Olocene, in un alveo ben confinato del paleotevere.

Il progetto e la realizzazione (fig. 1) della linea metro, risalenti agli anni '30 [1], risentono ovviamente della sensibilità dell'epoca alla preservazione dei monumenti [9, 17], molto distante, comunque, da quella attuale.

Nello specifico, per quanto concerne la linea Metro:

- il tracciato, attraverso una doppia curva inversa con raggio di 250 m, sfiora le fondazioni del Colosseo e dell'arco di Costantino;
- la galleria è di tipo superficiale realizzata con scavi a sezione aperta;
- la fermata, ubicata a ridosso delle fondazioni del Colosseo, ha una pendenza del 10‰, ed un estradosso a contatto con la pavimentazione della piazza sovrastante.

2.1. Misure e studi pregressi

Data la particolare importanza storico-monumentale del sito, numerosi studiosi hanno effettuato in passato una serie nutrita di misurazioni vibrazionali al fine di monitorare i parametri critici e valutare possibili alterazioni strutturali dovute alle vibrazioni da traffico.

Le misure sono state rilevate nel Colosseo, nell'arco di Costantino e nella galleria della Metro ed hanno riguardato

seum e l'Arch of Constantine affected by the underground transport system (line B).

This article does not take into account the defects in the rail tracks although there are a number of suitable models and the effects are sometimes not completely negligible on the surrounding structural environment.

2. The Study area

The study area covers the archaeological zone (approximately 36 hectares) on which the Colosseum and the Arch of Constantine stand; this area is affected by the underlying Metro line and station.

The soil underlying the study area presents different stratifications: anthropic, Holocene, and Pleistocene deposits, gravel and Pliocene deposits.

Stratigraphical analysis shows that the northern side of Colosseum rests on a harder Pleistocene layer, while to the south of the site there are more weak, alluvial deposits, corresponding to the Holocene period in the river bed of the Paleotiber.

The design and building (fig. 1) of the Metro line back in the '30s [1], obviously reflects the sensitivity of that era towards conservation [9, 17], be it far different from that of today. In particular:

- the path of the Metro line skims the foundations of the Colosseum and the Arch of Constantine through a double inverse curve with a ratio of about 250 m;
- the tunnel is close to the surface and was built by open air excavation;
- whilst the station, near the foundations of the Colosseum, have a slope of 10‰, and its extrados is in contact with the pavement of the square above.

2.1. Measurements and previous studies

Given the historical importance of the site, numerous studies have taken a series of traffic vibration measurements in order to monitor critical parameters.

Over 200 point measurements have been taken in different positions and on different levels from the Colosseum to the Constantine Arch, and in the tunnel; movement, speed and acceleration over short and long periods were recorded.

The principal vibration measurements taken between 1985 and 2008 have been the object of studies by the following authors whose work we briefly describe including the Norms they quoted:

1) CLEMENTE et al. [3] investigated the northern travertine wall of the Colosseum, carried out tests (1985), processed the spectral analysis, evaluated the FFT (Fourier Transform), PSD (Power Spectral Density), CSD (Cross Spectral Density) and RMS (Root Mean Square Value); they

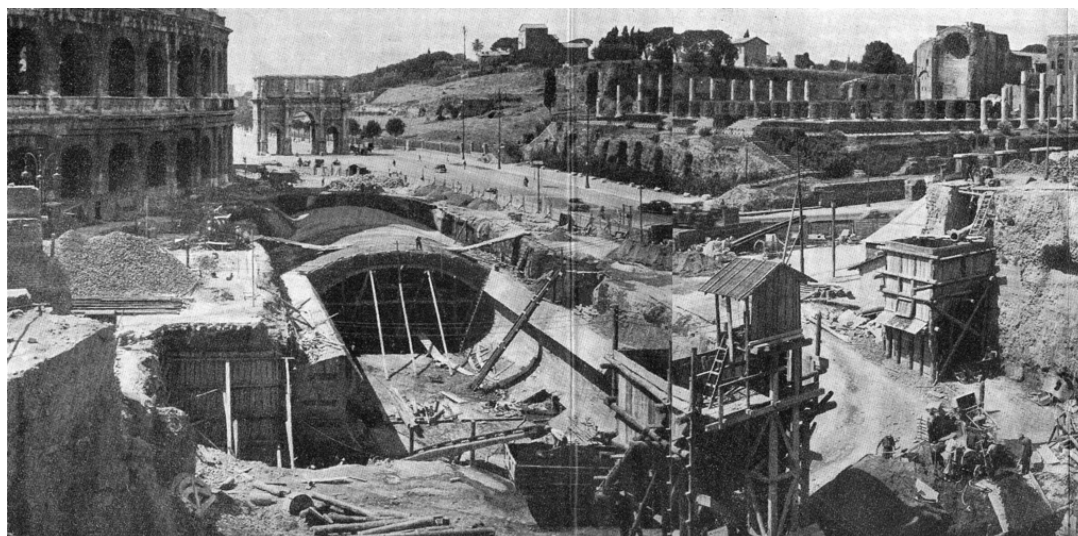


Fig. 1 - Scavi per costruzione della metro (1939) in prossimità del Colosseo e dell'arco di Costantino. *The excavations for the construction of the Metropolitan system (1939), close to the Colosseum and the Arch of Constantine.*

diversi punti (oltre 200) diversamente posizionati in direzione e livello; in particolare sono stati registrati spostamenti, velocità ed accelerazioni su tempi brevi e lunghissimi.

Le principali registrazioni vibrazionali, eseguite fra il 1985 ed il 2008, sono state oggetto di studio dei seguenti autori, riportiamo le Norme richiamate da essi:

1) CLEMENTE et al. [3] investigano la parete in travertino a Nord del Colosseo, eseguono le prove (1985), elaborano l'analisi spettrale, valutano FFT (Fourier Transform), PSD (Power Spectral Density), CSD (Cross Spectral Density), RMS (Root Mean Square Value); determinano fasi e coerenze, trovano le frequenze di risonanza sperimentali (1,46 1,70 2,75 Hz) con significative deformate modali alla base; negli accelerogrammi il segnale del treno è distinguibile alla base lato Ovest; si riscontra che il valore efficace ($v < 0,12$ mm/sec) e quello di picco ($v < 0,32$ mm/sec) sono comunque inferiori a quelli prescritti dalle norme DIN 4150 e pari a $2 \div 3$ mm/sec;

2) PASQUALI [5] esegue misure fra il 1986 ed il 1993 sui monumenti, in galleria vicino al Colosseo ed all'arco di Costantino, aggiunge captatori dei cedimenti dei binari rispetto alla parete che misurano rispettivamente 1,2 mm e 1,5 mm; rappresenta la spettrografia ad 1/3 di ottava per il Colosseo e l'arco di Costantino in vari settori e piani; nel piano interrato è evidente l'effetto del passaggio dei treni rispetto alle vibrazioni ambientali; riscontra una amplificazione delle vibrazioni del Colosseo e dell'Arco di Costantino per il passaggio dei treni nel campo di frequenze fra 20÷70 Hz; individua le amplificazioni del Colosseo, in corrispondenza del lato Metro, a circa 10,80 Hz (direzione verticale), a 1,30÷1,60 Hz (direzione orizzontale) a 2,80÷3,40 Hz in dire-

determinati phases e coherencies, and found that the experimental resonance frequencies, 1.46, 1.70 and 2.75 Hz produced significant modal displacements at the base; in the accelerograms the train signal is distinguishable at the base of the west side; the efficacy value ($v < 0.12$ mm/sec) and the peak value ($v < 0.32$ mm/sec) were nevertheless found to fall within those established by DIN 4150 (equal to $2 \div 3$ mm/sec);

2) PASQUALI [5] took measurements between 1986 and 1993 in the tunnel near the Colosseum and the Arch of Constantine and measured the displacements between rail and the tunnel wall which measure 1.2 mm e 1.5 mm respectively; he represented the spectrograph at 1/3 of eight for the Colosseum and the Arch of Constantine in various sectors and levels; in the underground level the effect of the passage of trains with respect to environment vibrations is clear; he discovered an amplification of the vibrations for the Colosseum and the Arch of Constantine for the passage of trains in frequency domains between 20÷70 Hz; he identified Colosseum amplifications, on the Metro side, at about 10.80 Hz (vertically), 1.30÷1.60 Hz (horizontally), and 2.80÷3.40 Hz (North-South of the opposite side to Metro); he recorded efficacy values of $v=0.012$ mm/sec and $v=0.05$ mm/sec for the Colosseum and the Arch of Constantine respectively; he discovered that the effect of the road traffic was greater than that of the Metro and lower than the limit of 2.7 mm/sec established by UNI 9916; he evaluated the transferring functions as the ratio between the velocity measurement on the monument and the strengths on the tunnel armament;

3) BOZZANO et al. [6] investigated the northern wall of the Colosseum; they evaluated the spectral ratios of the

zione Nord-Sud nel lato opposto alla Metro; misura i valori efficaci ($v=0,012$ mm/sec e $v=0,05$ mm/sec) rispettivamente per il Colosseo e l'arco di Costantino; riscontra che l'effetto del traffico veicolare è superiore a quello della Metro ed inferiore al limite di 2,7 mm/sec prescritto dalle norme UNI 9916; valuta le funzioni di trasferimento come rapporto fra la velocità misurata sul monumento e la forza sul solettone;

3) BOZZANO et al. [6] investigano la parete Nord del Colosseo, valutano i rapporti spettrali degli spostamenti orizzontali prodotti dal rumore ambientale, misurati alla sommità ed alla base e trovano due picchi per le frequenze (1,7 e 2,8 Hz);

4) NAKAMURA et al. [12] eseguono le prove nel 1998, investigano la vulnerabilità del Colosseo con la tecnica dei microtremitori mediante la loro teoria originale dei QTS Quasi-Transfer Spectra relativa all'energia delle onde di Rayleigh; comprovano la validità dei microtremitori analizzando i danni noti prodotti dal sisma del 1349; analizzano le frequenze predominanti (1,5 e 3,0 Hz), i fattori di amplificazione, i modi di vibrazione; ipotizzano che in corrispondenza dello sperone Stern si potrebbero avere seri danni per un sisma del VI-VII grado MM;

5) VESTRONI et al. [23] eseguono le prove nel 2008 ed investigano la parete più alta del Colosseo; ne misurano le vibrazioni prodotte dai rumori ambientali, trovano le frequenze di risonanza sperimentali (1,03 1,30 1,49 1,60 1,75 Hz); trovano che i valori di RMS dell'accelerazione in direzione orizzontale sono più piccoli di quelli verticali; le zone più vulnerabili sismicamente corrispondono ai due speroni; trovano accelerazioni efficaci minori di 0,2 m/sec² e che le componenti verticali delle velocità sono più significative di quelle orizzontali; valutano una velocità verticale efficace minore di 0,2 mm/sec; valutano FFT, PSD, RMS.

Da quanto sopra risulta chiaro che, da una parte i lavori sopracitati hanno fornito risultati sperimentali esaurienti, dall'altra le analisi sono state elaborate tramite l'utilizzo di modelli agli EF con struttura incastrata alla base, la cui adozione comporta le approssimazioni ed i limiti precedentemente evidenziati.

In alternativa, alcuni ricercatori di Geofisica [8] hanno realizzato l'analisi su una sezione Nord-Sud del Colosseo, con un modello del terreno in 2D (982 m in lunghezza e 117 m in altezza), alle differenze finite, soggetto ad un'onda di taglio sinusoidale smorzata (di tipo Gabor, fig. 2), applicata al bedrock (superficie orizzontale da ipotizzarsi infinitamente rigida e posta alla base del modello) sotto forma di spostamenti impressi:

$$s(t) = \exp[-(\omega_p(t-t_s)/\gamma)^2] \cos[\omega_p(t-t_s) + \psi] \quad (1)$$

con

$$\omega_p = 2 \pi f_p \text{ sec}^{-1}, \quad t_s = 0,45 \gamma / f_p, \quad t \in < 0,2 t_s >$$

ci si riferisce ai valori costanti

$$\gamma = 9,50 \quad f_p = 2,40 \text{ sec}^{-1}, \quad \psi = 1,57080 \quad t_s = 1,78035 \text{ sec.}$$

Pur con incertezze dei moduli di elasticità del 200%, il problema è stato risolto nel dominio delle frequenze, trovan-

horizontal displacements produced by the environmental noise, measured at the top and at the base and they found two peaks for the frequencies (1.7 e 2.8 Hz);

4) NAKAMURA et al. [12] carried the tests in 1998; they investigated the vulnerability of the Colosseum using the micro-tremor technique and their own QTS (Quasi-Transfer Spectra) theory concerning the energy of Rayleigh waves; they proved the validity of the micro-tremors technique by analyzing the known damage produced by the earthquake in 1349; they analyzed the predominant frequencies (1.5 and 3.0 Hz), amplification factors and vibration modes; and hypothesized that Stern buttress would be seriously damaged in a VI-VII level MM earthquake;

5) VESTRONI et al. [23] carried out tests in 2008 and investigated the highest part of the Colosseum's wall; they measured the vibrations produced by environmental noises and found experimental resonance frequencies of 1.03 1.30 1.49 1.60 1.75 Hz. They found that the RMS values of acceleration in a horizontal direction were lower than the vertical ones; the most vulnerable earthquake zones were found to be the two buttresses; efficacy accelerations recorded were lower than 0.2 m/sec² and they noted that the vertical components of the velocity were more significant than the horizontal ones; they recorded a vertical efficacy velocity of less than 0.2 mm/sec; FFT, PSD and RMS were also evaluated.

From the results above it is clear that although studies have been exhaustive, all of the analyses have been carried out using FE models with structures fixed at the base, the use of which, as we mentioned earlier is limited and can only give approximate results.

Alternative analyses have also been carried out: some geophysics researchers [8] analyzed a North-South section of the Colosseum with a 2D soil model (982 m long and 117 m high), in finite differences, subjected to a damped sinusoidal shear wave (Gabor type, fig. 2), applied to the bedrock (the horizontal surface was assumed to be infinitely rigid and placed at the base of the model basement) by means of applied displacements:

$$s(t) = \exp[-(\omega_p(t-t_s)/\gamma)^2] \cos[\omega_p(t-t_s) + \psi] \quad (1)$$

with

$$\omega_p = 2 \pi f_p \text{ sec}^{-1}, \quad t_s = 0,45 \gamma / f_p, \quad t \in < 0,2 t_s >$$

we are referring to the constant values

$$\gamma = 9,50 \quad f_p = 2,40 \text{ sec}^{-1}, \quad \psi = 1,57080 \quad t_s = 1,78035 \text{ sec.}$$

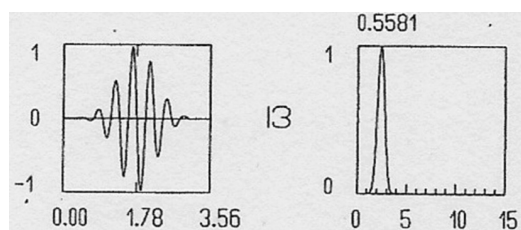


Fig. 2 - Forzante di Gabor e sua FFT. Gabor input and its FFT.

do un'amplificazione da 4 a 7 volte, sia del moto che della durata, in corrispondenza dell'Olocene. Ciò fa supporre che i danni sul monumento, concentrati nella zona meridionale, siano riconducibili sia alla particolare stratigrafia che ai terremoti, con intensità superiore al VII MCS, del passato [7, 8].

Risultati analoghi sono stati evidenziati da VALENTE et al. [20], utilizzando un modello 3D agli EF, tramite il metodo d'interazione suolo-struttura, risolto nel dominio del tempo.

3. Descrizione della metodologia di analisi proposta

Il nostro metodo di indagine si basa sull'analisi dinamica dell'interazione suolo-struttura prodotta da azioni esterne, riconducibili al transito dei treni [24].

Anziché l'utilizzo di metodi che implicano modelli di strutture in elevazione incastrate alla base o che, in alternativa, analizzano il fenomeno bidimensionalmente, nel solo dominio delle frequenze, proponiamo un metodo di analisi nel dominio del tempo e delle frequenze, fondato sull'uso di modelli tridimensionali.

La metodologia utilizza due modelli 3D funzionalmente congiunti e confrontabili con i dati sperimentali di cui al paragrafo 2.1.

Si assume che il veicolo/convoglio sia una fonte di rumore modellabile, con variabilità contenute e note inerenti principalmente le condizioni di marcia, i carichi e l'usura del contatto ruota-rotaia.

Le ipotesi di calcolo adottate tengono conto di tutte le rigidità coinvolte nel sistema quali quelle delle rotaie, traverse, ballast, suolo e strutture.

In particolare, il modello veicolo-via, del tipo multi-body dynamic analysis, fornisce istantaneamente le forze $F_{ix}(t)$, $F_{iy}(t)$, $F_{iz}(t)$, dovute al transito di un determinato veicolo/convoglio che viaggia, in diverse condizioni di carico e di marcia, lungo la tratta ferroviaria in esame.

Tali forze sono calcolate in corrispondenza dei nodi posti al centro degli n attacchi rotaia-traversa.

Per l' i -mo nodo (con $i=1, \dots, n$) della rotaia, in corrispondenza del quale è impedita la rotazione torsionale, viene posto un vincolo elastico lineare nelle tre direzioni XYZ, le cui costanti (k_{ix} , k_{iy} , k_{iz}), calcolate come rapporto tra forze concentrate (P_{ix} , P_{iy} , P_{iz}) ed i corrispondenti spostamenti (δ_{ix} , δ_{iy} , δ_{iz}), sono ricavate dal modello suolo-struttura.

Successivamente le stesse forze $F_{ix}(t)$, $F_{iy}(t)$, $F_{iz}(t)$ vengono riversate nei corrispondenti nodi del modello "suolo-struttura" come input per l'analisi delle vibrazioni strutturali dei manufatti (edifici, monumenti, etc.) ricompresi nel modello stesso.

Come risultato, l'analisi fornisce, per entrambi i modelli, i valori delle componenti spaziali (X, Y, Z) delle caratteristiche del moto $s(t)$, $v(t)$, $a(t)$ per tutti i nodi, e i tensori $\varepsilon(t)$, $\sigma(t)$ per tutti gli elementi.

Even with uncertainties for the elasticity modules around 200%, the problem was solved in the frequency domain, finding an amplification between 4 and 7, both for movements and time length, for the Holocene layer. This leads us to suppose that damage to the monument in the southern zone may be the result of the underlying stratification or an VII MCS (or higher) earthquake [7, 8].

Similar results were highlighted by VALENTE et al [20], using a 3D FE model and the soil structure interaction method, solved in the time domain.

3. Description of the analysis methodology proposed

Our method is based on the dynamic analysis of the soil-structure interaction produced by external action, in this case, the passage of underground trains [24]. Instead of models which entail the use of elevation structures fixed at the base or models that analyze the phenomenon bi-dimensionally in one frequency domain, we propose a time and frequency domain analysis method, based on the use of three dimensional models. The methodology entails the use of two, 3D models linked functionally; the experimental data for these models is reported in paragraph 2.1.

It is assumed that the convoy is a source of mouldable noise, within known ranges that vary with running conditions, loads and amount of wear in the wheel-rail contact.

The hypotheses adopted for the calculations take into account the stiffness in the system including that of the rails, sleepers, ballast, soil and structure.

The multibody dynamic analysis of the wagons-track model instantaneously provides the strengths $F_{ix}(t)$, $F_{iy}(t)$, $F_{iz}(t)$, from the transit of a given convoy travelling along a given stretch of rail, in relation to the load and running.

These strengths are calculated for the nodes situated at the centre of the n rail-sleeper connections.

For the i -th node ($i=1, \dots, n$) of the rail, where torsional rotation is fixed, an elastic linear constraint is introduced in three directions XYZ, the constant coefficients of which (k_{ix} , k_{iy} , k_{iz}), calculated as the ratio between applied strengths (P_{ix} , P_{iy} , P_{iz}) and the corresponding displacements (δ_{ix} , δ_{iy} , δ_{iz}), are derived from the soil-structure model.

The same strengths $F_{ix}(t)$, $F_{iy}(t)$, $F_{iz}(t)$ are then transferred into the corresponding nodes of the "soil-structure" model and act as input for the analysis of the structural vibrations of the constructions (buildings, monuments, etc.) included in the same model.

As a result, the analysis provides the values of the spatial components (X, Y, Z) for the movement characteristics $s(t)$, $v(t)$, $a(t)$ for all the nodes, and the tensors $\varepsilon(t)$, $\sigma(t)$ for all the elements for both models.

Pertanto la metodologia di analisi proposta consente di calcolare le forze agenti sul suolo e ricavare le caratteristiche vibrazionali di tutti gli elementi del modello di interazione suolo-struttura, al variare delle modalità di traffico.

3.1. Modello "veicolo-via"

Il modello tridimensionale "veicolo-via" riproduce fedelmente le seguenti componenti di sistema:

- convoglio ferroviario con motrici Fiat-Ferroviana/Breda-Ansaldo in esercizio tra il 1985 ed il 1990, a cui si riferiscono le misurazioni vibrazionali richiamate al paragrafo 2.1 [18];
- l'andamento plano-altimetrico dei binari appartenenti alla linea metropolitana che insiste nell'area di studio [1,18], come in fig. 8.

L'interazione dinamica tra le suddette componenti consente di ricavare istantaneamente le forze di interazione dinamica tra ruota-rotaia, al variare delle condizioni di carico e di marcia del convoglio.

Più in dettaglio il contatto ruota-rotaia, illustrato in fig. 3, è stato analizzato tramite un modello che riproduce le caratteristiche tecnico-prestazionali del cerchione e della rotaia posate su traversine in legno ad interasse 70 cm.

Pur non essendoci limitazioni operative, nel modello non sono state introdotte le difettosità del binario, comunque essenziali per un'analisi ancor più accurata, in quanto occorrerebbero misure e dati sperimentali non ancora a disposizione degli Autori in questa fase di studio.

In merito al caso di studio occorre evidenziare che sia l'armamento che il materiale rotabile hanno subito un'evoluzione temporale a partire dagli anni '50 [1]. Inoltre le prove sperimentali dinamiche sui monumenti sono state realizzate in un arco temporale superiore a 20 anni (CLEMENTE 1985 [3], PASQUALI 1986-1993 [5], NAKAMURA 1998 [12], VESTRONI 2008 [23]).

Al fine di introdurre nel nostro modello anche un profilo di usura dell'armamento compatibile con il profilo

Therefore the proposed analysis methodology can be used to calculate the strengths acting on the soil, and to extract the vibration characteristics of all the elements of the soil-structure interaction.

3.1. Model "wagons-track"

The three-dimensional "wagons-track" model faithfully reproduces the following system components:

- a rail convoy with Fiat-Ferroviana/Breda-Ansaldo engines used between 1985 and 1990, to which the vibrations measurements in paragraph 2.1 [18] refer;
- the plano-altimetric route of the Metro line in the study area [1,18], (fig. 8).

The dynamic interaction between the aforementioned components can be used to instantaneously obtain the strengths of the dynamic interaction between the wheel and the track under varying types of loading and running.

The contact between the wheel and the track illustrated in fig.3 was analyzed using a model that reproduced the technical and performance characteristics of the wheel and the track laid on wooden sleepers, at a distance of 70 cm.

Although it would have been possible to incorporate track defects into the model for a more accurate analysis, this was not done at this phase as the experimental measurements and data were not available.

It must be pointed out that in this case study, both the armament and wheel material have evolved since the 1950s [1]. In addition, the experimental dynamic tests on the monuments were carried out over a period of 20 years (CLEMENTE 1985 [3], PASQUALI 1986-1993 [5], NAKAMURA 1998 [12], VESTRONI 2008 [23]).

Lastly, in order to introduce a wearing profile of the armament into our model, compatible with the S1002 wheel profile, we adopted a rail profile similar to the standard UNI60 with a 1/20 inclination, rather than the standard UNI50 currently used [18].

The wagon model (fig. 5), the characteristics of which are shown in Table 1, consists of a box (compartment) resting on roller bearings 11.00m apart, on two classical bogies (fig. 4).

The box was modelled as a hollow prism (2.85 m in depth and 19.10 m long, height from the wagon floor and the roof with respect to the track level (T.L.) was 1.15 m and 3.55 m respectively).

The calibration of the depths of the walls in the box model allows the real characteristics of the vehicle to be reproduced: the centre of gravity, rota-

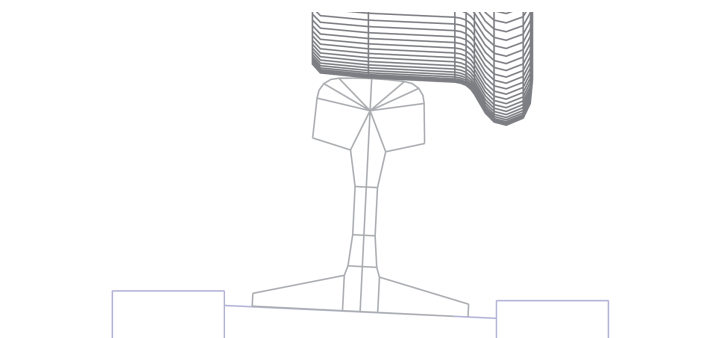


Fig. 3 - Mesh del cerchione S1002, rotaia UNI60, attacco ed estradosso traversa. Mesh of the S1002 wheel, UNI60 rail, connection and upper side of the sleeper.

della ruota S1002, si è preferito adottare un profilo di rotaia assimilabile allo standard UNI60 con posa 1/20, anziché lo standard UNI50 attualmente in opera [18].

Il modello del veicolo (fig. 5), le cui caratteristiche peculiari sono riportate in tabella 1, consta di una cassa (abitacolo) che poggia, tramite apposite ralle con interperno di 11,00 m, su due carrelli (fig. 4) di concezione classica.

La cassa è stata modellata come un prisma cavo (larghezza di 2,85 m, lunghezza 19,10 m, altezza del pianale e del tetto rispetto al P.F. pari a 1,15 m e 3,55 m rispettivamente).

La calibrazione dello spessore delle pareti del modello della cassa consente di riprodurre fedelmente le caratteristiche reali del veicolo quali: posizione del baricentro, inerzie traslazionale e rotazionali. Il carico pagante (passeggeri seduti ed in piedi) è modellato mediante due prismi che si compenetrano nell'abitacolo riproducendo i pesi e le posizioni dei baricentri, con densità costanti.

Nella fig. 4 le sospensioni sono simbolicamente rappresentate da due tipi di cilindroidi di cui 4 (sospensioni

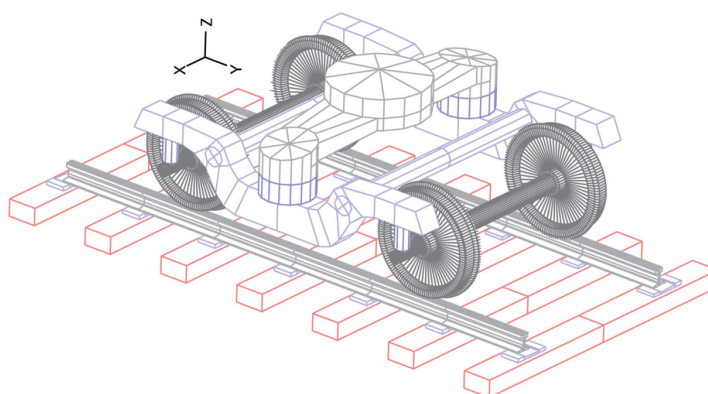


Fig. 4 - Mesh del carrello con binario, attacchi e traverse. The boogie (roller bearing, frame, wheels), railway, connections, sleepers.

tional and translational inertia, mass (M). The paying load (standing and seating passengers) is modelled using two prisms both enclosed inside the compartment reproducing the loads and the centres of gravity, with constant densities.

In fig. 4 the suspensions are represented symbolically with two types of cylindroids, 4 of which (primary suspensions) are placed between the axils and the frame and 2 (secondary suspensions) between the frame and the roller boogie. This is a simplified model in that suspensions are analytically modelled by "spring dumper" or symbolic connecting spatial elements between two or more structural bodies.

Table 2 lists the values of the longitudinal, transversal and vertical components of stiffness coefficients (K), damping coefficients (C) and allowed displacements for the primary and secondary suspensions, used in the model with reference to a local tern (xyz) welded to the roller boogie.

The model can also be used to evaluate the rotational inertia through the dynamic identification of the wagon and its type of vibration as illustrated in fig. 5a.

The convoy is made up of a number of carriages, each one is long 19.4 m, as shown in fig. 6.

PESI DEL VEICOLO
WAGON LOADS

TABELLA 1
TABLE 1

Elementi Elements	n.	P [kN]	n·P [kN]
Sala Axle	4	12,87	51,48
Ralla Fifth wheel	2	4,84	9,68
Telaio Frame	2	5,0	10,0
Motore Engine	2	9,60+4,90	29,0
Scatola ponte Ratio axle box	4	22,0	88,0
Braccio p.rid. Actuating arm	4	0,25	1,0
Guida boccola Axle box	8	0,50	4,0
Albero ponte Main shaft	4	0,30+0,73	4,12
Semialbero card. Cardanic semishaft	4	0,19+0,21	1,60
Cassa Box	1	160,0	160,0
Passeggeri seduti Seating passengers	48	0,7	33,6
Passeggeri in piedi Standing passengers	195	0,7	136,5

TABELLA 2
TABLE 2

CARATTERISTICHE DELLE SOSPENSIONI DEL CARRELLO
THE SUSPENSIONS CHARACTERISTICS OF THE BOOGIE

Sospensioni: primaria Suspensions: primary	Rigidità K Stiffness K [N/m]	Smorzamento C Damping C [N/(m sec)]	Fondo-corsa Allowed displ. [mm]
x	$3,36 \times 10^5$	$1,7 \times 10^4$	±20
y	$3,36 \times 10^5$	$1,7 \times 10^4$	±20
z	$7,47 \times 10^5$	$3,0 \times 10^4$	±40
secondaria - secondary			
x	$2,25 \times 10^5$	$2,33 \times 10^4$	±22
y	$2,25 \times 10^5$	$2,33 \times 10^4$	±22
z	$3,10 \times 10^5$	$0,635 \times 10^4$	-45/+40

primarie) sono posti tra gli assili ed il telaio e 2 (sospensioni secondarie) sono allocati tra il telaio e la ralla. Tale grafia è di tipo semplificativo in quanto le sospensioni sono analiticamente modellate tramite "spring dumper" ovvero elementi informi di connessione spaziale tra due o più corpi strutturali.

La tabella 2, con riferimento ad una terna locale (xyz) solidale al carrello, elenca i valori, utilizzati nel modello, delle componenti longitudinali, trasversali e verticali (x,y,z) dei coefficienti di rigidità (K), smorzamento (C) e fondo-corsa delle sospensioni primarie e secondarie.

Il modello consente inoltre di valutare le inerzie rotazionali attraverso l'identificazione dinamica del veicolo nonché la valutazione dei modi propri di vibrazione, così come illustrato in fig. 5a.

Il convoglio risulta costituito dall'accoppiamento di più carrozze, reciprocamente distanziate di 19,40 m, come in fig. 6.

La modellazione in questione, pur assai complessa e laboriosa, comunque si presta ad ulteriori e più approfondite integrazioni di dettaglio (difettosità della via, possibilità di costituzione del convoglio ferroviario, etc.) che in questa sede sono state omesse poiché l'intento primario è quello di validare la bontà dello strumento metodologico e non già di realizzare studi mirati a singoli interventi progettuali di tipo applicativo.

3.2. Modello "suolo-struttura"

Il modello di interazione "suolo-struttura", agli EF, riproduce fedelmente l'area di studio, il sottosuolo, i monumenti e l'infrastruttura della linea metropolitana (comprensiva di traverse, ballast, etc.), così come indicato nelle figg. 7÷12.

L'elaborazione si basa sui rilievi effettuati sul Colosseo (aereofotogrammetrico [13], materiali e danneggiamenti [14], ipogei [4, 10, 16, 17] e documentazione varia [2, 9]), sull'Arco di Costantino [11], sulla metro [1] e sul terreno [6].

L'accuratezza dei rilievi è ovviamente più spinta per le strutture in elevazione e la galleria e meno dettagliata per la stratigrafia del sottosuolo.

Tale modello (costituito da circa 100.000 nodi, 300.000 g.d.l. e 200.000 EF) è contenuto in una specie di "vasca", con pareti infinitamente rigide, sufficientemente ampia da non altera-

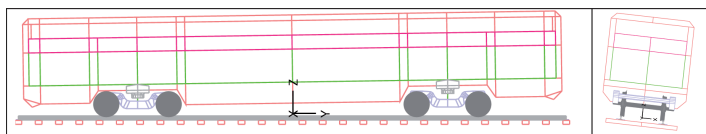


Fig. 5 - Sezioni carrozza con i volumi dei viaggiatori seduti (verde) ed in piedi (rosso): a) longitudinale con il modo n.5 di beccheggio; b) trasversale nella curva V6 con risalto di 16 cm. Sections of the wagon with volumes of seated (green) and standing (red) passengers: a) longitudinal section with mode 5 of pitching; b) transversal section in the curve V6, with rail rise 16 cm.

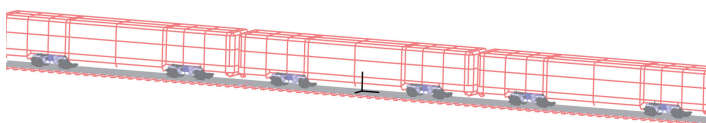


Fig. 6 - Convoglio. Convoy.

The modelling in question is complex and taxing, nevertheless it will allow more in-depth details such as line defects, train convoys etc. to be incorporated. These have not been included at this phase as the main intention was to test the methodology and at a later date apply it in practical studies.

3.2. The "soil-structure interaction" model

The "soil-structure interaction" model with FE, faithfully reproduces the study area, the metro, the monuments and the infrastructure of the metro line (including sleepers, ballast, etc.), as shown in figures 7÷12.

The model is based on surveys of the Colosseum (aerial photograms [13], materials and damage, [14], ipogei [4, 10, 16, 17] and other documentation [2, 9]) on the Arch of Constantine [11] the metro [1] and the soil [6].

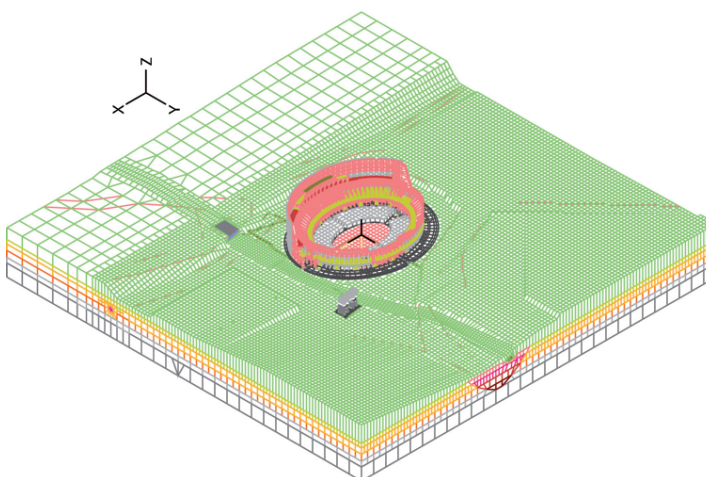


Fig. 7 - Modello 3D ad EF dell'area di studio. 3D FE model of the area.

TABELLA 3
TABLE 3

CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI MATERIALI NEL MODELLO
 "SUOLO-STRUTTURA" (E = Modulo di elasticità; γ = Peso specifico)
 MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE MATERIALS IN THE
 "SOIL-STRUCTURE" MODEL (E = Elastic modulus; γ = density)

N. Tipologie N. Typologies	Zona Zone	E [MPa]	γ [kN/m ³]
20	Elevazione Colosseo Colosseum Elevation	3000÷35000	18÷24
9	Fondazioni Colosseo Colosseum Foundations	15000÷30000	19÷22
6	Arco di Costantino Constantine arch	10000÷25000	18÷20
9	Metro B	3000÷25000	18÷20
1	Depositi antropici Antropic deposit	600	16,5
4 strati	Olocene Holocene	500÷1000	17÷18
3 strati	Pleistocene	700÷2800	19÷20
1	Ghiaia Gravel	3000	20
1	Pliocene	3000	20,5
2	Ballast	400÷600	18
2	Arco sup. Upper Arch	200000÷250000	22
2	Arco rov. Lower Arch	150000÷200000	22
2	Spalle Shoulders	120000÷180000	22
1	Traverse Sleepers	10000÷14000	8,5

re il comportamento meccanico reale in prossimità dei monumenti e con il fondo coincidente con il "bedrock" [8, 20, 22, 24], situato a 72 m sotto l'estradosso delle fondazioni del Colosseo.

Più in dettaglio, la struttura del Colosseo è essenzialmente costituita da quattro tipologie di murature in: travertino, mattoni, tufo e calcestruzzo.

Per tenere conto anche delle diverse tessiture e gradi di danneggiamento strutturale, nel modello sono stati introdotti diversi materiali (oltre 50), le cui caratteristiche meccaniche (modulo di elasticità e peso specifico) sono indicate in tabella 3, corrispondenti a valori medi desunti dalla bibliografia.

Nel modello la dissipazione dinamica è costante e segue la nota legge di Rayleigh ($C=aM+bK$) pari al 5 % per i primi due modi di vibrazione.

La mesh del modello è stata elaborata adottando EF sufficientemente piccoli da non tagliare le frequenze interessanti per i monumenti [20] ai fini dell'analisi dinamica, ed opportunamente connessi per consentire l'analisi non lineare del materiale [20, 22].

The accuracy of the surveys is obviously higher for the elevation structures and the tunnel than for the underground layering.

This model (made up of about 100,000 nodes, 300,000 d.o.f. and 200,000 FE) is contained in a type of "pool", with infinitely stiff walls, wide enough not to change the real mechanical behaviour in proximity to monuments and with a base corresponding to the "bedrock" [8, 20, 22, 24], situated 72 m under the extrados of the Colosseum's foundations.

The Colosseum is essentially made out of four wall types: travertine, clay bricks, tuff and Roman concrete.

Over 50 different materials were introduced into the model to take into account different materials and levels of structural damage.

The mechanical characteristics (elastic modules and density) of these materials are shown in Table 3 and are the mean values obtained from literature.

Dynamic damping is constant in the model according to Rayleigh law ($C=aM+bK$) and is 5 % for the first two vibration modes.

The model mesh was developed by adopting small FE so that the frequencies of interest for the monuments [20] would not be cut for the dynamic analyses, and conveniently joined to allow non-linear material analysis [20, 22].

4. Results

In this paper we have limited ourselves to presenting the results concerning the analysis of a restricted portion of the study area. The time histories, drawn up for the sample sections and significant structural nodes, as they were the object of past measurements [3, 5, 6, 12, 23], concern unidirectional transit of a single wagon modelled on the basis of the characteristics mentioned in the previous paragraph.

The case of a single wagon was analyzed starting from section 7, transiting in section 19 (at the boundary of the FE model), at a distance of 351.5 m from the same station, and arriving in section 21 (Antiquarium) (fig. 8).

In the "wagons-track" model, diagrams of the movement deduced from the tachometric survey (source C.O.T.R.A.L.) are reproduced [18]; the measurements used were: max acceleration 1.0 m/sec², max deceleration

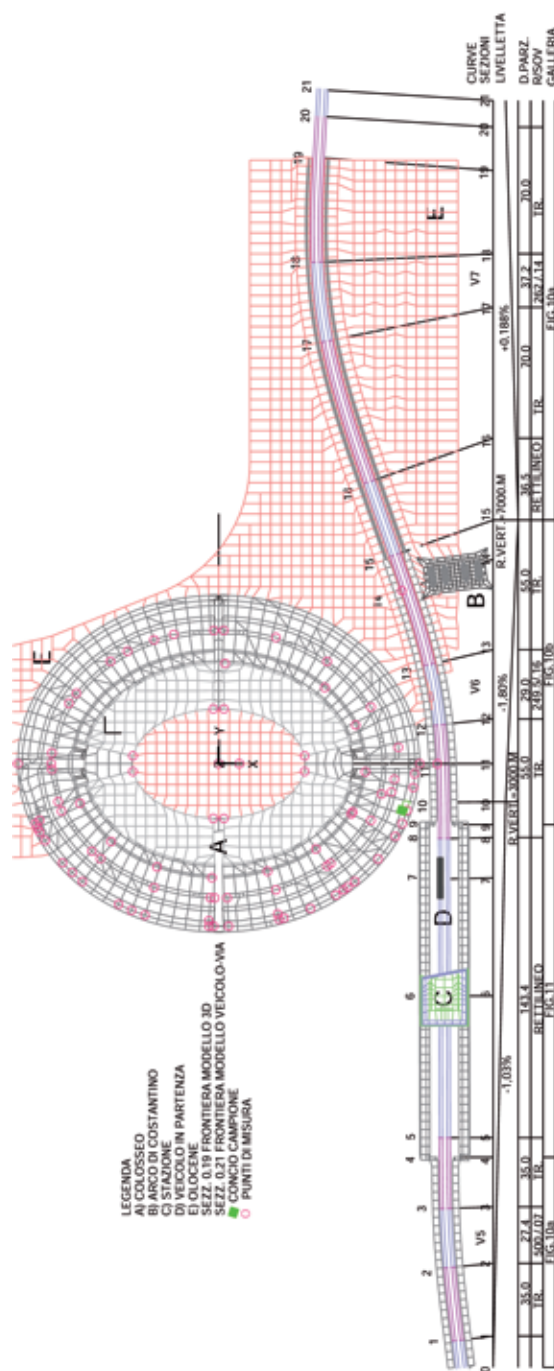


Fig. 8 - Planimetria della mesh. *Plan of the mesh.*

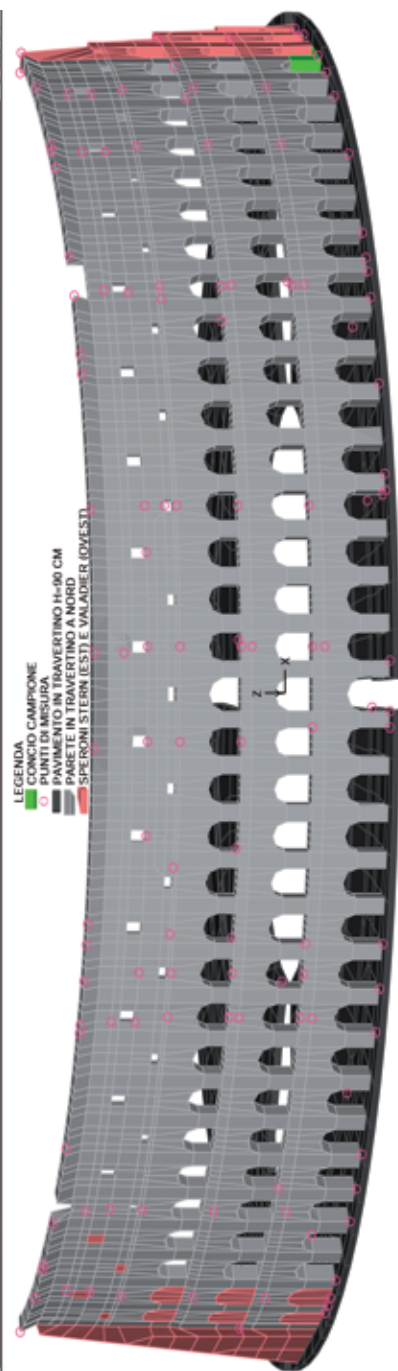


Fig. 9 - Mesh parete Nord del Colosseo. *Mesh of the Northern wall.*

4. Risultati

In questa memoria ci si limita a presentare i risultati relativi all'analisi circoscritta ad una porzione di area di studio. Le time histories, elaborate in corrispondenza di sezioni campione e nodi strutturali significativi in quanto oggetto di misurazioni pregresse [3, 5, 6, 12, 23], sono connesse al transito unidirezionale di un solo veicolo modellato in base alle caratteristiche di cui al paragrafo precedente.

In particolare è stato analizzato il caso di un veicolo isolato che, con riferimento alla fig. 8, parte dalla sezione 7, transita nella sezione 19 (frontiera del modello ad EF), ubicata ad una distanza di 351,5 m dalla fermata stessa, ed arriva nella sezione 21 (Antiquarium).

Nel modello "veicolo-via" sono stati riprodotti i diagrammi del moto desunti dal rilievo tachimetrico (fonte C.O.T.R.A.L.) [18]; le grandezze inserite sono: accelerazione max 1,0 m/sec², decelerazione max 1,2 m/sec², velocità di transito nelle sezioni 11, 14 e 21 rispettivamente pari a 9,8 m/sec, 14,5 m/sec e 18,5 m/sec.

I risultati ottenuti tramite l'utilizzo del modello "veicolo-via" sono sintetizzati nei grafici delle figg. 13÷18, ed in tabella 4.

I calcoli sono stati effettuati adottando un passo di integrazione $\delta t = 2,0 \times 10^{-4}$ sec, nell'ipotesi di considerare il veicolo a pieno carico (viaggiatori seduti ed in piedi).

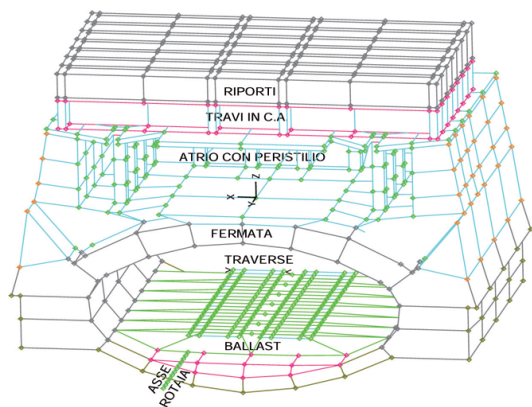


Fig. 12 - Mesh della fermata, con la stazione, corrispondente alla sezione 6. Station FE; tunnel between sections 4 and 9 of fig. 4.

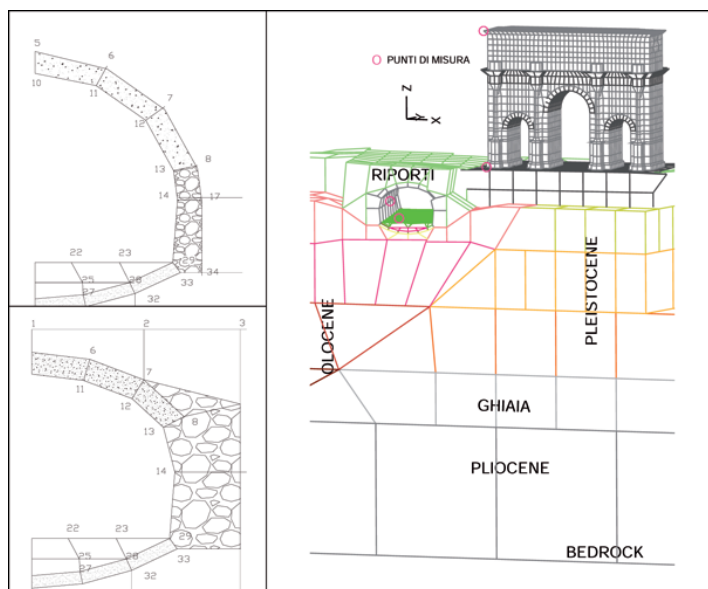


Fig. 10 - Mesh galleria ordinaria, e ribassata (fra le sezioni 9-15). Mesh of the current tunnel, and lowered (between sections 9-15).

Fig. 11 - Sezione 14 della mesh: arco di Costantino, stratigrafia. Section 14 of the mesh: Constantine arch, stratigraphy.

1.2 m/sec², transit velocities in the sections 11, 14 e 21 respectively equal to 9.8 m/sec, 14.5 m/sec and 18.5 m/sec.

The results obtained using the "wagons-track" model are summarized in the graphs in figs. 13÷18, and in Table 4.

The calculations were performed by assuming an integration step $\delta t = 2.0 \times 10^{-4}$ sec, in the hypothesis that the wagon was fully loaded (seated and standing travellers).

Figures 13 and 14 show the course of the components (X,Y,Z) with respect to displacement $s(t)$ and velocity $v(t)$, with reference to the centre of gravity of the wagon.

Fig. 15 shows the graphs of the action $Q_x(t)$, $Q_y(t)$ e $Q_z(t)$, in a time interval of 0 to 33 sec, exercised on the primary posterior left suspension of the second boogie, for

TABELLA 4

TABLE 4

TRANSITO DEL BARICENTRO DEL VEICOLO
ATTRAVERSO LE SEZIONI 11, 14, 21
TRANSIT OF THE WAGON'S CENTRE OF GRAVITY
THROUGH

Sez. Sec.	Monumento Monument	T [sec]	Spostamento [m] Displacement [m]			Velocità [m/sec] Velocity [m/sec]		
			s_x	s_y	s_z	v_x	v_y	v_z
11	Colosseo Colosseum	10.98	0,52	54,7	-0,68	0,37	9,8	-0,14
14	A. Costantino Constantine a.	17.83	18,8	146,0	-2,18	5,0	14,5	-0,15
21	Antiquarium Antiquarium	31.82	57,8	375,0	-2,25	1,33	18,5	0,03

Più in dettaglio, le figg. 13 e 14 riportano l'andamento delle componenti (X,Y,Z) rispettivamente dello spostamento $s(t)$ e della velocità $v(t)$, riferite al baricentro del veicolo.

Con riferimento ad un intervallo di tempo compreso tra 0 e 33 sec, la fig. 15 illustra i grafici delle azioni $Q_x(t)$, $Q_y(t)$ e $Q_z(t)$, esercitate nella sospensione primaria posteriore sinistra del secondo carrello, in corrispondenza del passaggio del veicolo nelle diverse sezioni di fig. 8, nella trama locale xyz della sospensione.

Il grafico di fig. 16, ricavato dalla fig. 15, riporta l'andamento della $Q_z(t)$ in un intervallo di tempo compreso tra 2,0 e 2,1 sec; esso evidenzia che la sollecitazione media è pari a circa 53 kN alla quale si sovrappone una perturbazione periodica di ampiezza ± 2 kN, con frequenza crescente con la velocità del veicolo. Tale perturbazione, sensibile al passo d'integrazione del modello, per la modesta entità e l'alta frequenza (superiore ai 70Hz) è influente per le vibrazioni dei monumenti stessi.

Tutti i valori delle componenti (X, Y, Z) delle forze $F_{ix}(t)$, $F_{iy}(t)$, $F_{iz}(t)$, (circa 3000), calcolati tramite il modello "veicolo-via", sono riversati, in automatico, sui corrispondenti nodi del modello "suolo-struttura", al fine di calcolarne tutte le time histories indipendenti, del moto nei nodi (circa 1.000.000) e tensoriali negli EF (circa 9.000.000).

Le figg. 17 e 18 riportano le componenti $F_{ix}(t)$, $F_{iy}(t)$, $F_{iz}(t)$, calcolate in corrispondenza degli attacchi rotaia-traversina di due sezioni campione (11 Colosseo e 14 arco di Costantino), negli intervalli temporali rispettivamente di 10,12 sec e 17,18,5 sec.

Tali figg. 17 e 18 evidenziano 4 valori di picco della forza $F_{iz}(t)$ corrispondenti al transito delle 4 ruote a sinistra del veicolo nelle sezioni 11 e 14, rispettivamente; più in dettaglio, si rileva il passaggio di differenti parti del veico-

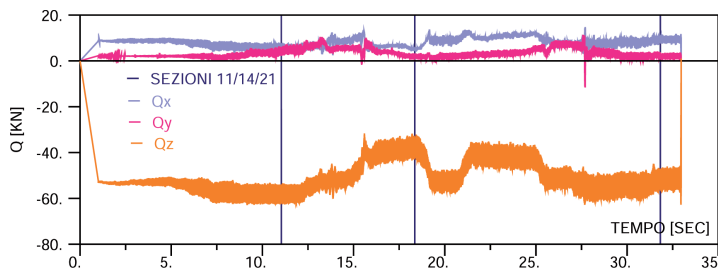


Fig. 15 - Forze $Q_x(t)$, $Q_y(t)$, $Q_z(t)$ sulla sospensione primaria posteriore sinistra del secondo carrello. Strengths $Q_x(t)$, $Q_y(t)$, $Q_z(t)$ in the primary posterior left suspension of the second bogie.

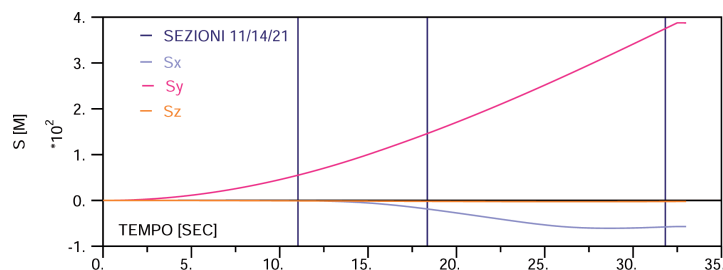


Fig. 13 - Componenti (X, Y, Z) dello spostamento $s(t)$ del baricentro del veicolo. Components (X, Y, Z) for the displacement $s(t)$ of the centre of gravity of the wagon.

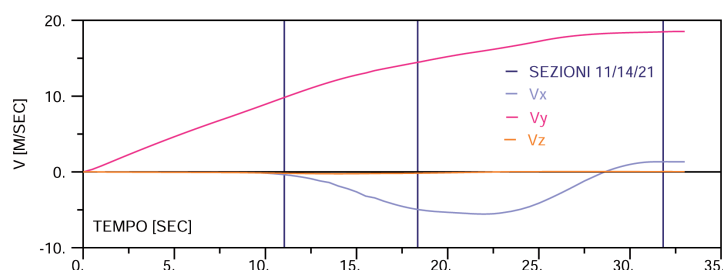


Fig. 14 - Componenti (X, Y, Z) della velocità $v(t)$ del baricentro del veicolo. Components (X, Y, Z) for the velocity $v(t)$ of the centre of gravity of the wagon.

the passage of the wagon in the different sections of fig. 8, in the local tern (xyz) of the suspension.

The graph in fig. 16, derived from fig. 15, shows the course of the $Q_z(t)$ in a time interval of between 2.0 and 2.1 seconds; it shows that the medium strength is approximately 53 kN with a periodical perturbation of ± 2 kN, with a frequency that increases with wagon speed. This perturbation which the model detects, does not affect monument vibration, as it is of modest entity and high frequency (over 70 Hz).

All the values of the components (X, Y, Z) for the strengths $F_{ix}(t)$, $F_{iy}(t)$, $F_{iz}(t)$, (approx. 3000), calculated using the "wagons-track", model are automatically reversed for the corresponding nodes of the "soil-structure", model in order to calculate all the independent time histories for the motion of the nodes (approx. 1,000,000) and tensors in the FE (around 9,000,000).

Figures 17 and 18 show the components $F_{ix}(t)$, $F_{iy}(t)$, $F_{iz}(t)$, calculated for the rail-sleeper connections for the two sample sections (11 for the Colosseum and 14 for the Arch of Constantine in time intervals of 10-12 seconds and 17-18.5 seconds respectively).

Figures 17 and 18 highlight 4 peak values for strength $F_{iz}(t)$ correspond-

lo con la successione temporale seguente: 1) il carrello anteriore, 2) il baricentro, 3) il carrello posteriore.

Per ovvi motivi di sintesi, tra i circa 200.000 EF del modello, prendiamo in considerazione un “concio campione” e ne riportiamo le time histories.

Le misurazioni pregresse (paragrafo 2.1) rivelano che le vibrazioni più intense, prodotte dal traffico ferroviario, si riscontrano alla base della pare-

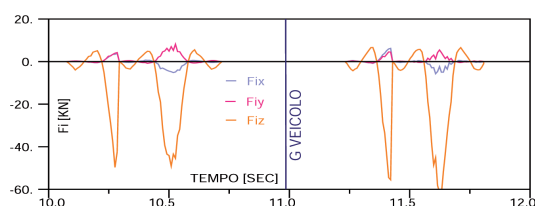


Fig. 17 - Forze $F_{IX}(t)$, $F_{IY}(t)$, $F_{IZ}(t)$ nell'attacco rotaia-traversa nella sezione 11 (Colosseo) nell'intervallo di tempo 10÷12 sec, $|F_{IZ}|_{MAX} = 49,62$ kN. Strengths $F_{IX}(t)$, $F_{IY}(t)$, $F_{IZ}(t)$ in the connection rail-sleeper in the section 11 (Colosseum) in the time interval 10÷12 sec, $|F_{IZ}|_{MAX} = 49,62$ kN.

te esterna del Colosseo in travertino, dal lato Ovest, adiacente al fornice 54, in prossimità della linea ferroviaria.

Il “concio campione”, evidenziato in color verde nelle figg. 8 e 9, corrisponde ad un pilastro al primo ordine, in tale zona.

La fig. 19 riporta, relativamente ad un nodo alla base del “concio campione”, le time histories del moto $v(t)$ ed $a(t)$, nelle componenti XYZ.

La fig. 20 illustra i grafici delle componenti X, Y, Z dei tensori $\epsilon(t)$ e $\sigma(t)$ nel “concio campione”.

Rispetto ai valori medi tensoriali, dovuti alla gravità, l'analisi dei risultati evidenzia che rispetto ai valori della sola gravità, gli scarti massimi prodotti dalle vibrazioni, sono circa $|\Delta\sigma|=1\%$ e $|\Delta\epsilon|=1\%$ rispettivamente per le tensioni e le deformazioni. Tale variabilità dinamica non si sarebbe potuta apprezzare qualora fossero stati adottati modelli con l'elevazione incastrata alla base: in tal caso tutti i grafici delle figg. 19 e 20 sarebbero risultati piatti e costanti; tali variazioni potrebbero amplificarsi se considerassimo il transito dell'intero convoglio.

Il presente lavoro non consente ancora di effettuare un confronto numerico-sperimentale perché i risultati ottenuti si riferiscono al transito di una sola vettura anziché dell'intero convoglio; inoltre le caratteristiche meccaniche del modello suolo-struttura sono quelle grossolane di letteratura.

Tale confronto numerico sperimentale sarà possibile allorquando saranno stati completati i modelli numerici in grado di riprodurre le stesse modalità di esercizio dei treni a cui corrispondono le misurazioni sperimentali ef-

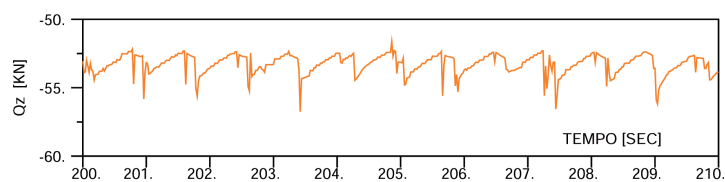


Fig. 16 - Forza $Q_z(t)$ sulla sospensione primaria posteriore sinistra del secondo carrello nell'intervallo di tempo 2,0÷2,1 sec, $\delta t=2,0 \times 10^{-4}$, $Fr=120$ Hz. Strength $Q_z(t)$ on the primary posterior left suspension of the second bogie in the time interval 2.0÷2.1 sec, $\delta t=2,0 \times 10^{-4}$, $Fr=120$ Hz.

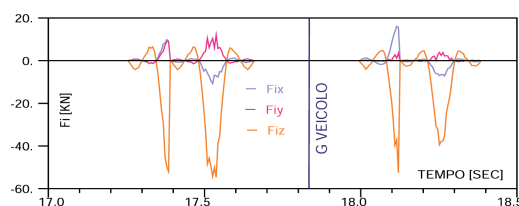


Fig. 18 - Forze $F_{IX}(t)$, $F_{IY}(t)$, $F_{IZ}(t)$ nell'attacco rotaia-traversa nella sezione 14 (arco di Costantino) nell'intervallo di tempo 17÷18,5 sec, $|F_{IZ}|_{MAX} = 40,57$ kN. Strengths $F_{IX}(t)$, $F_{IY}(t)$, $F_{IZ}(t)$ in the connection rail-sleeper in the section 14 (Constantine arch) in the time interval 17÷18.5 sec, $|F_{IZ}|_{MAX} = 40,57$ kN.

ing to the transit of 4 wheels on the left side of the wagon in sections 11 and 14, respectively; the passage of different parts of the wagon is observed in the following time succession: 1) the anterior bogie, 2) the centre of gravity, 3) the posterior bogie.

Between the about 200,000 FE of the model, we only take into account a “sample pillar” for the sake of brevity, and we report the time histories.

Past measurements (paragraph 2.1) reveal that the most intense vibrations produced by trains are at the base of the external travertine wall of the Colosseum, on the west side, near radial opening 54, in proximity to the railway line.

The “sample pillar” highlighted in green in figures 8 and 9, corresponds to a first level pillar in this zone.

Figure 19 shows the time histories of the movements $v(t)$ and $a(t)$, with their components XYZ relative to a node at the base of the “sample pillar”.

The fig. 20 shows graphs of the components X, Y, Z for the tensors $\epsilon(t)$ and $\sigma(t)$ in the “sample pillar”.

The results of the analyses highlight that with respect to the values of the gravity alone, the maximum scatters produced by the vibrations, are around $|\Delta\sigma|=1\%$ and $|\Delta\epsilon|=1\%$ for the tensors and the movements respectively. This dynamic variability would not have been detected in models with the elevation fixed at the base and the graphs in figures 19 and 20 would have been flat and constant; these variations may prove greater if we take into consideration the transit of an entire convoy.

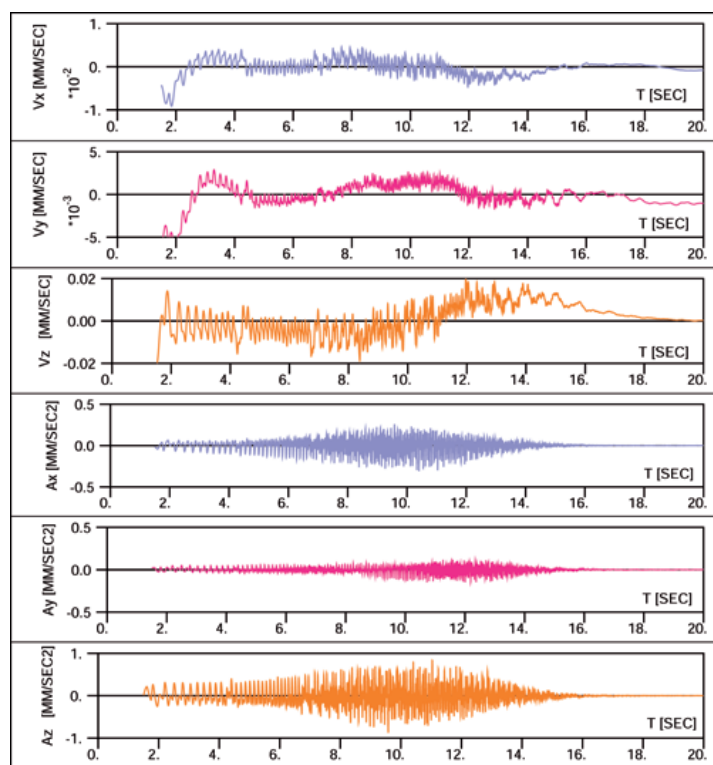


Fig. 19 - Time histories of $v(t)$ ed $a(t)$ in un nodo alla base del "concio campione". Time histories of $v(t)$ and $a(t)$ in a node at the base of the "sample pillar".

fettuate, nonché l'identificazione dinamica del modello suolo-struttura per trovare le mappe dei moduli di elasticità e dei coefficienti di dissipazione dinamica.

Pertanto, allo stato attuale della ricerca, si può affermare che i risultati ottenuti sono compatibili con le misure sperimentali realizzate.

5. Conclusioni e sviluppi futuri

Nell'articolo è stata proposta ed illustrata una metodologia innovativa finalizzata alla determinazione e controllo delle vibrazioni deboli, sulle strutture, prodotte da traffico.

La metodologia prevede l'utilizzo di due modelli tridimensionali funzionalmente congiunti e confrontabili con i dati sperimentali.

Il primo modello "veicolo-via" fornisce istantaneamente le forze sugli attacchi rotaie-traversine dovute al transito di un determinato veicolo/convoglio che viaggia, a diverse condizioni di carico e di marcia, lungo la tratta fer-

This methodology does not yet allow a numerical and experimental comparison because the results obtained refer to the transit of a single wagon and not an entire train. In addition the mechanical characteristics of the soil-structure model are only the approximate ones found in literature.

A numerical and experimental comparison will be possible when the analytical models able to reproduce the same exercise model of the trains corresponding to the experimental measurements and the dynamic characterization of the soil-structure model to find the maps of the elasticity modules and damping coefficients are completed.

Therefore, at the present state of research, we can affirm the results obtained are compatible with the experimental measurements taken.

5. Conclusions and future developments

This paper presents and illustrates an innovative methodology to measure and monitor weak vibrations affecting buildings, produced by traffic.

The methodology proposes the use of two three-dimensional models connected functionally, the results of which can be compared with experimental data.

The first "wagons-track" model instantaneously supplies the strengths on rails-sleeper connections resulting from the transit of a given wagon/convoy under varying conditions, travelling along a given stretch of rail. These strengths are used as input for the second model which evaluates "soil-structure" interaction to calculate the structural vibrations of constructions (buildings, monuments, etc.) within the same model.

This analysis methodology was applied, in a preliminary study case, to the unidirectional transit of a wagon along the metro line in the 1980s in an archaeological zone of Rome comprising the Colosseum and the Arch of Constantine.

The results obtained show how time histories (approx. 10,000,000) can be obtained. These time histories are essential for the implementation of a correct procedure for the monitoring of weak vibrations from traffic.

To summarize, the spatial components (X, Y, Z) of:

- movement characteristics $s(t)$, $v(t)$, $a(t)$;
- $Q(t)$ actions on the primary posterior left suspension of the second boogie: the values for $Q_z(t)$ obtained were between 38÷60 kN;

roviaria in esame. Tali forze sono utilizzate come input nel secondo modello di interazione "suolo-struttura" per analizzare le vibrazioni strutturali dei manufatti (edifici, monumenti, etc.) ricompresi nel modello stesso.

Questa metodologia di analisi, come caso preliminare di studio, è stata applicata, limitatamente al transito unidirezionale di un veicolo in esercizio sulla linea negli anni '80, nella zona archeologica di Roma comprendente il Colosseo e l'arco di Costantino.

I risultati ottenuti hanno evidenziato la possibilità di ricavare, per entrambi i modelli, tutte le time histories (circa 10.000.000) comunque indispensabili per impostare una corretta procedura di controllo delle vibrazioni deboli da traffico.

Per ovvi motivi di sintesi, per quanto concerne il veicolo, sono state presentate le componenti spaziali (X, Y, Z) delle:

- caratteristiche cinematiche $s(t)$, $v(t)$, $a(t)$;
- azioni $Q(t)$ sulla sospensione primaria posteriore sinistra del secondo carrello: i valori $Q_z(t)$ ottenuti sono compresi tra 38÷60 kN;
- azioni $F_i(t)$ sui nodi di connesione tra rotaie e traversine: i valori di picco di $F_{iz}(t)$ sono compresi tra 40÷62 kN.

Per quanto concerne le strutture, è stato preso a riferimento un "concio campione" del Colosseo, corrispondente ad un pilastro alla base della parete esterna in travertino, adiacente al fornice 54, nel lato Ovest, e sono state elaborate le componenti spaziali (X, Y, Z) delle:

- caratteristiche del moto $s(t)$, $v(t)$, $a(t)$, in un nodo alla base;
- caratteristiche tensoriali $\epsilon(t)$ e $\sigma(t)$ nel "concio campione".

Rispetto ai valori medi dovuti alla gravità, i risultati evidenziano che gli scarti massimi, prodotti dalle vibrazioni, sono circa $|\Delta\sigma|=1\%$ e $|\Delta\epsilon|=1\%$ rispettivamente per le tensioni e le deformazioni.

I risultati ottenuti sono compatibili con le misure sperimentali realizzate; un valido confronto numerico sperimentale è rimandato a dopo l'identificazione dinamica in cui si prevede l'approfondimento del grado di definizione dei modelli numerici.

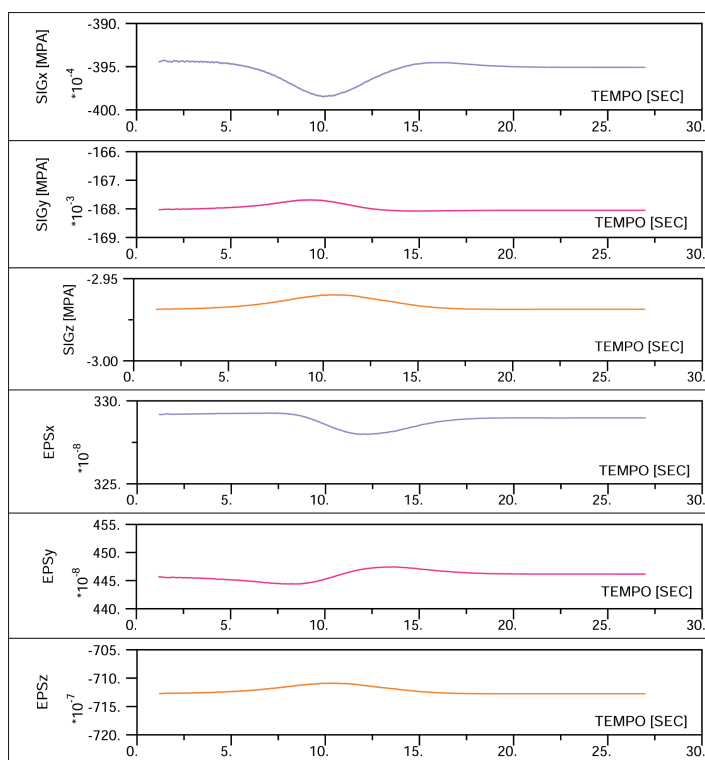


Fig. 20 - Time histories di $\sigma(t)$ ed $\epsilon(t)$ nel "concio campione". Time histories for $\sigma(t)$ and $\epsilon(t)$ of the "sample pillar".

- $F_i(t)$ actions on the connection nodes between rails and sleepers: the peak values for $F_{iz}(t)$ were between 40÷62 kN;

A "sample pillar" of the Colosseum at the base of the external travertine wall, adjacent to the radial opening 54, on the west side was studied and the spatial components (X, Y, Z) were processed to obtain:

- movement characteristics $s(t)$, $v(t)$, $a(t)$, in a node on the base;
- the tensor characteristics $\epsilon(t)$ and $\sigma(t)$ of the "sample pillar"

The results highlight that the maximum scatters produced by the vibrations are about $|\Delta\sigma|=1\%$ and $|\Delta\epsilon|=1\%$, for the tensors and movements respectively compared to the average values due to gravity.

The results obtained are compatible with existing experimental measurements; a valid numerical and experimental comparison will be possible when the dynamic characterization entailing an in-depth study and definition of numerical models is completed.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] V. PERRONE, "La ferrovia Metropolitana a Roma", Trasporti pubblici, nn. 4, 10 1952, nn. 1-2, 9, 11 1953, nn. 5, 7-8 1954.
- [2] G. CROCI, (1990) "Studies and research on the Colosseum (in italian)", Quaderni del Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Rome, Italy.
- [3] P. CLEMENTE, G. BONGIOVANNI, (1993) "Ambient vibration effects on the Colosseum", IABSE Symposium, Rome, pp. 107-114.
- [4] G. SCHINGO, R. REA, (1993) "Il progetto di restauro del Colosseo. I sotterranei: assetto idraulico e interventi strutturali fra XIX e XX secolo", Bollettino di Archeologia, Min. BB.CC.AA. 23-24 settembre-dicembre.
- [5] C. Pasquali, (1994) "Esperienze e risultati delle campagne di misura per la Metropolitana di Roma", Giornate Impatto vibro-acustico e ambientale delle ferrovie Metropolitane.
- [6] F. BOZZANO, R. FUNICIELLO, F. MARRA, A. ROVELLI, G. VALENTE, (1995) "Il sottosuolo dell'area dell'anfiteatro Flavio in Roma", 405-422.
- [7] R. FUNICIELLO, L. LOMBARDI, F. MARRA, M. PAROTTO, (1995) "Seismic damage and geological heterogeneity in Rome's Colosseum area: are they related?", Annali di Geofisica, 927-937.
- [8] P. MOCZO, A. ROVELLI, P. LABAK, L. MALAGNINI, (1995) "Seismic response of the geologic structure underlying the Roman Colosseum and a 2-D resonance of a sediment valley", Annali di geofisica, pp. 939-956.
- [9] R. REA, (1996) "Anfiteatro Flavio", Ministero BB.CC.AA. n. 37.
- [10] D. MERTENS, R. REA, G. SCHINGO, H.J. BESTE, C. PIRAINO, (1998) "Il Colosseo. Lo studio degli ipogei", Bollettino dell'Istituto Archeologico Germanico Sezione romana, Vol. 105.
- [11] P. PENSABENE, C. Panella, (1999) "Arco di Costantino tra archeologia e archeometria", L'Erma editrice.
- [12] Y. NAKAMURA, E.D. GURLER, J. SAITA, A. ROVELLI, S. DONATI, (2000) "Vulnerability investigation of roman Colisseum using microtremor", 12WCEE2000, paper 2660.
- [13] M. DOCCI, R. MIGLIARI, (2000), "Ricerche sulla forma del Colosseo", Dpt di rappresentazione e rilievo dell'Università di Roma "la Sapienza".
- [14] M. CERONE, (2000), "Analisi e documentazione dei dissesti strutturali ed individuazione delle situazioni a rischio", C.I.S.T.E.C., Università la Sapienza di Roma e Min. BB. CC.
- [15] Paul MITIGUY, Arun K. BANERJEEY (2000) "Determination of Spring Constants for Modeling Flexible Beams", MSC.Software, San Mateo, CA 94206.
- [16] R. JAPPELLI, R. REA, G. SCHINGO, (2001) "Artificial openings in the foundation of the Colosseum", Congresso AITES-Ita World Tunnel Congress.
- [17] G. SCHINGO, (2001) "Gli sterri del 1939 per la costruzione della Metropolitana. Dati archeologici inediti dalla valle del Colosseo", Bollettino della Commissione Archeologica Comunale di Roma.
- [18] M. BRUNER, (2001), "Analisi della marcia di un veicolo di Metropolitana", Tesi di laurea, Dpt Trasporti, Università di Roma "La Sapienza".
- [19] G. VALENTE, 2003. "Fracture Mechanics for the reconstruction of Noto Cathedral", Computer Building Materials jrn., Elsevier Science Ltd, UK, 17 (2003) 579-593.
- [20] M. CERONE, A. ROVELLI, G. VALENTE, (2004) "Indagine preliminare per l'identificazione dinamica del Colosseo", XI Congresso nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", ANIDIS, Genova, Italia.
- [21] A. TERTULLIANI, G. VALENTE, (2006) "La meccanica fenomenologica per l'enigma di Noto", CRASC06 Symposium, Messina, Italy.
- [22] G. Valente, (2006) "Influence of a tunnelling for Metro C to Colosseum in Rome", 1st EMAS, Hammamet, Tunisia.
- [23] A. PAU, F. VESTRONI, (2008) "Vibration analysis and dynamic characterization of the Colosseum", Journal of Structural Control, Ed. J. Wiley & Sons.
- [24] F. CRISI, F. DELL'ISOLA, G. D'OVIDIO, G. VALENTE, (2008) "Vibrations analysis of Colosseo due to trains' transit", AGS08, Hammamet, Tunisia.

Sommaire

METHODOLOGIE D'ANALYSE DES VIBRATIONS STRUCTURELLES DERIVEES DE LA CIRCULATION FERROVIAIRE: CAS D'ETUDE DE L'AIRES ARCHEOLOGIQUE DU COLISEE

L'article présente une nouvelle méthodologie pour l'analyse dynamique de l'interaction entre le sol et la structure en contact avec la circulation ferroviaire. Les résultats sont utilisables pour le contrôle des vibrations de faible intensité provoquées par la circulation ainsi que pour l'amélioration de la résistance sismique des structures.

La méthodologie proposée prévoit l'emploi de deux modèles en 3D fonctionnellement liés et comparables aux données expérimentales.

Le premier modèle "véhicule - voie" fournit instantanément les forces, dans les points de contact entre les rails et les barres transversales, dues au transit des véhicules par rapport aux variations des conditions de charge et d'utilisation. Ces forces sont utilisées comme données en entrée dans le deuxième modèle d'interaction "sol - structure" pour déterminer les vibrations des structures prises en compte.

Telle méthodologie d'analyse est appliquée, comme cas d'étude, dans la zone archéologique de Rome, comprenant le Colisée et l'Arc de Constantin, concernée par la liaison de métro souterraine.

Relativement au transit unidirectionnel d'un véhicule ferroviaire en service sur la ligne de métro à la fin des années '80, on obtient les caractéristiques du mouvement (espace, vitesse et accélération en fonction du temps) pour tous les nœuds et les caractéristiques tensorielles $\epsilon(t)$ $\sigma(t)$ pour tous les éléments finis (EF) du modèle; ces résultats sont commentés pour un maquette échantillon du Colisée.

Zusammenfassung

METHODIK ZUR ANALYSE DER VOM BAHNVERKEHR VERURSACHTEN STRUKTURELLEN ERSCHÜTTERUNGEN: FALLSTUDIE ZUM ARCHÄOLOGISCHEN BEREICH DES KOLOSSEUMS

Der Artikel stellt eine neue Methodik zur dynamischen Analyse der Wechselwirkungen zwischen Boden und Struktur im Zusammenhang mit dem Bahnverkehr dar. Die Ergebnisse werden sowohl zur Überwachung der schwachen verkehrsbedingten Erschütterungen als auch zur Verbesserung der seismischen Widerstandsfähigkeit der Strukturen verwendet.

Die vorgeschlagene Methode sieht die Verwendung von zwei dreidimensionalen Modellen vor, die funktionell miteinander verbunden sind und mit den Versuchsdaten verglichen werden können.

Aus dem ersten „Fahrzeug-Schiene“-Modell gehen unmittelbar jene Kräfte hervor, die an den Schienenbefestigungsmitteln von Fahrzeugen/Zügen bei sich ändernden Last- und Betriebsbedingungen verursacht werden. Diese Kräfte werden als Input-Daten für das zweite Modell zur Wechselwirkung „Boden-Struktur“ verwendet, um die Erschütterungen der berücksichtigten Strukturen zu ermitteln.

Diese Methodik wird als Fallstudie im archäologischen Bereich in Rom angewandt, der das Kolosseum und den Bogen von Konstantin einschließt und der von der unterirdischen U-Bahn-Verbindung betroffen ist.

In Bezug auf den Ein-Richtungs-Verkehr eines Schienenfahrzeugs auf der U-Bahnlinie am Ende der Achtziger Jahre ergeben sich die Eigenschaften der Bewegung $s(t)$, $v(t)$ und $a(t)$ für alle Knotenpunkte sowie die Spannungseigenschaften $\epsilon(t)$ $\sigma(t)$ für alle finiten Elemente (FE) des Modells; diese Ergebnisse werden für einen "Musterring" des Kolosseums beschrieben.



ITALIAN BRAKES
E C O B R A K E ®

ORGANIC BRAKE BLOCKS TYPE "LL"
100.000 Km
but I don't look it and without noise

ORGANIC BRAKE PADS
travel fast brake in silence

