



# Modellazione del tempio di Minerva Medica in Roma



Fernando Saitta\*

\* ENEA, Centro Ricerche Casaccia



Software utilizzato



## 1. Introduzione

Il cosiddetto Tempio di Minerva Medica a Roma è stato costruito nel IV secolo d.C. ed è localizzato in prossimità della stazione Termini (Figura 1). La struttura fu costruita in origine in *opus latericium*, comune all'epoca, tecnica basata sull'uso di mattoni romani e malta. Nei secoli successivi la struttura



■ Fig. 1.

fu oggetto di interventi di restauro e di rinforzo, mediante interventi in *opus mixtum*, con blocchi di tufo e mattoni romani. Molte nicchie furono chiuse e qualche parete con funzione di contrafforte venne aggiunta a Sud-Est. Altri interventi sono stati fatti nel 1846 e negli anni 2012-2013. L'ambiente principale ha base decagonale con diametro di circa 25 m e altezza di circa 24 m (dopo il collasso di parte della cupola, in origine 32 m). Sui lati dell'ambiente principale, al primo piano sono presenti delle aperture, mentre al piano terra sono presenti delle absidi.

Oltre alla vicina stazione ferroviaria, sulla via adiacente sono presenti due linee del tram. Queste, in aggiunta al traffico veicolare, sono fonte di vibrazioni cicliche che, anche se di ampiezza contenuta, potrebbero determinare nel lungo periodo danni alla struttura.

Numerose indagini di vario tipo sono state condotte negli ultimi decenni sul monumento [1-7] con l'obiettivo della sua conservazione. Anche recentemente sono state effettuate prove per la caratterizzazione dinamica del monumento [8,9]. Un altro studio [10] ha riguardato la modellazione delle vibrazioni indotte dalla linea tranviaria mediante simulazione di storie temporali di velocità basate su registrazioni sperimentali.

In questo articolo, coerentemente con gli obiettivi della rivista, viene presentata la modellazione e la analisi dinamica del monumento,

discutendo gli aspetti più rilevanti della costruzione della geometria e delle problematiche di generazione della mesh, oltre che di analisi

mediante integrazione al passo delle equazioni del moto in ambiente Midas Gen.

## 2. Definizione geometrica del modello

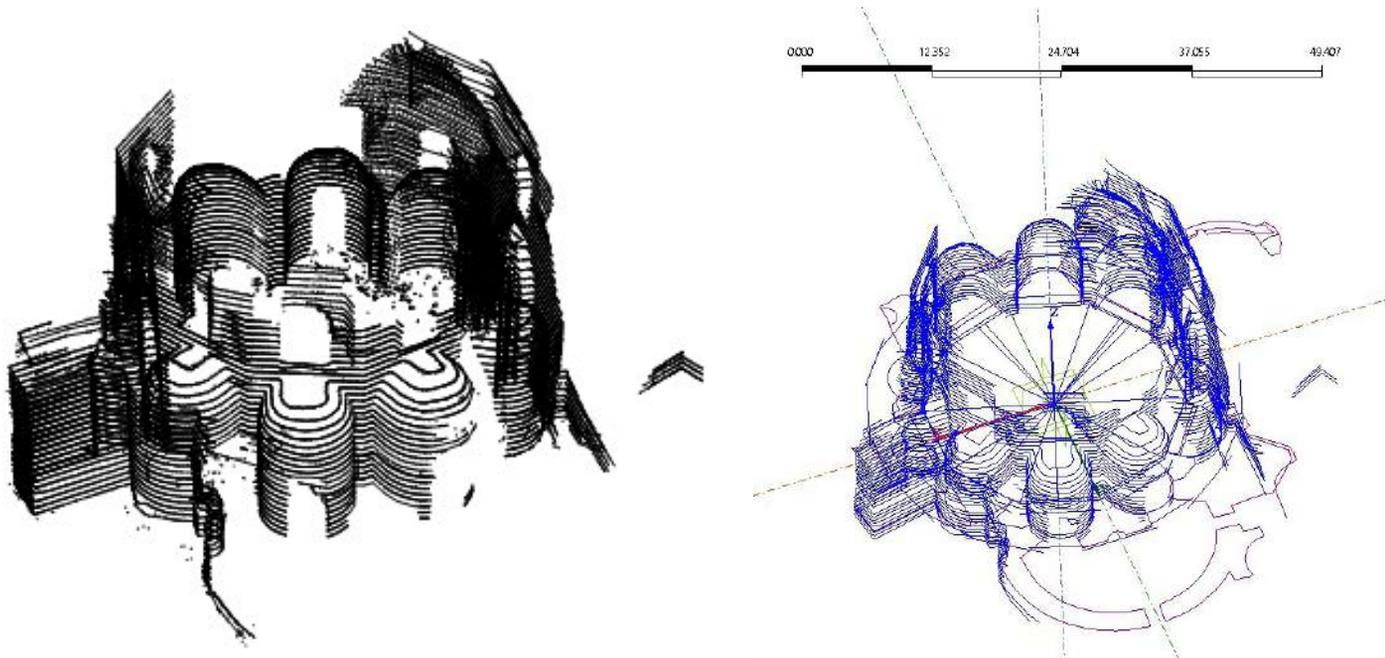
La geometria del modello è stata in parte ricostruita a partire da un rilievo effettuato con laser-scanner ed in parte attraverso documentazione di letteratura. La nuvola di circa 19 milioni di punti in formato stl, è stata importata in Wolfram Mathematica® dove il numero di punti è stato ridotto a circa 200000, eliminando punti troppo vicini. I punti sono stati quindi ordinati secondo coordinate verticali z crescenti in modo da estrarre quelli contenuti in intervalli di piccola dimensione e

definire delle sezioni orizzontali della struttura con passo 0.5 m (Figura 2a), sulle quali definire delle polilinee in ambiente CAD, successivamente importate in Midas FX (Figura 2b).

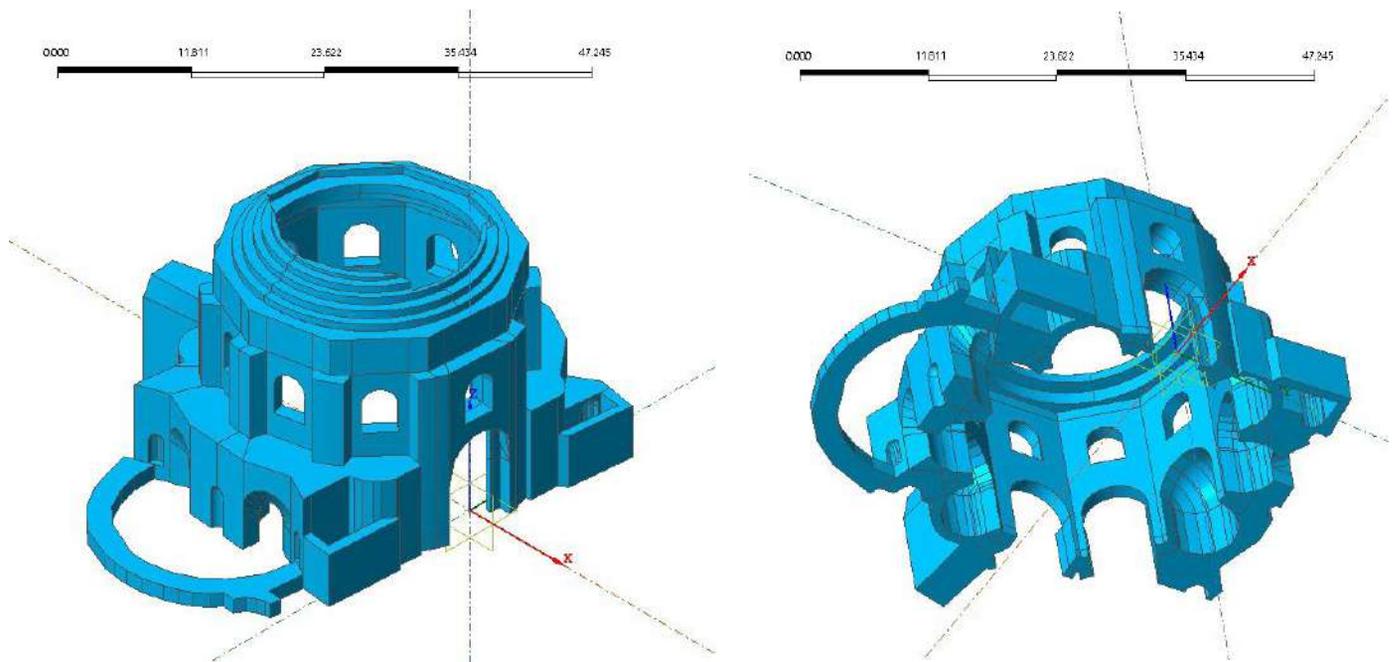
La geometria di base costituita da polilinee è stata utilizzata come supporto per il disegno della geometria del modello su cui generare la mesh. In maggior dettaglio, sono state disegnate in ambiente FX le superfici e quindi i solidi. La geometria iniziale servita da riferimento è stata quindi

eliminata lasciando solamente i solidi (Figure 3a-b).

Invece di comporre il solido in un unico elemento sul quale generare la mesh, sono state mantenute 11 diverse porzioni. Ciò in quanto la generazione automatica con elementi tetraedrici su più parti permette di limitare errori di convergenza che si possono avere con un unico volume. Inoltre è più semplice intervenire per correggere errori nella geometria che possono impedire la generazione della mesh.



■ Fig. 2a-b. Sezioni orizzontali del monumento dai dati di scansione (a) e import in FX (b)

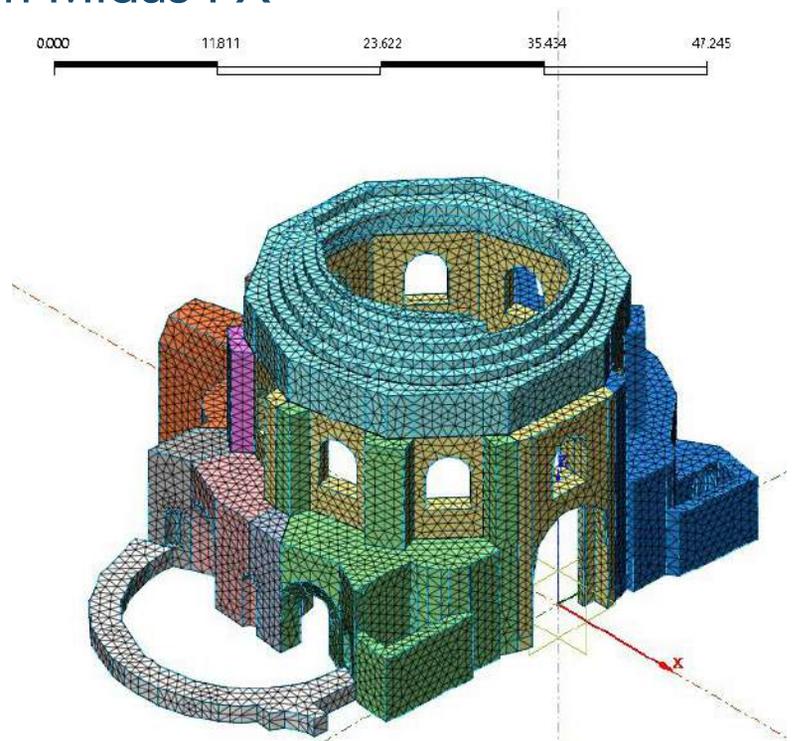


■ Figg. 3a-b. Geometria solida del modello finale

## Generazione della Mesh in Midas FX

È stato definito un materiale omogeneo ed isotropo con modulo elastico  $E=1500$  MPa, tipico di una muratura di mattoni e calce, coefficiente di Poisson 0.2, peso specifico  $19 \text{ kN/m}^3$ . Il modulo è stato poi aggiornato sulla base dei risultati di prove sperimentali ottenendo un valore finale di 744 MPa.

Tale modulo è da intendersi medio, con tutte le incertezze che sono legate alla omogeneità del materiale nei volumi alla base del monumento, oggetto anche di interventi nel corso dei secoli quali la chiusura di nicchie originariamente presenti. L'adozione di un materiale omogeneo, isotropo e elastico lineare nella modellazione, oltre che per la sua semplicità, si spiega con l'obiettivo che era alla base della ricerca di studiare



■ Fig. 4. Mesh finale con evidenziati i volumi di base

il monumento per vibrazioni indotte dal traffico, in particolare quello tranviario, che produce vibrazioni di piccola ampiezza

per cui l'approssimazione lineare può essere lecita. Si è optato per una mesh tetraedrica indicando al programma di unire i nodi con

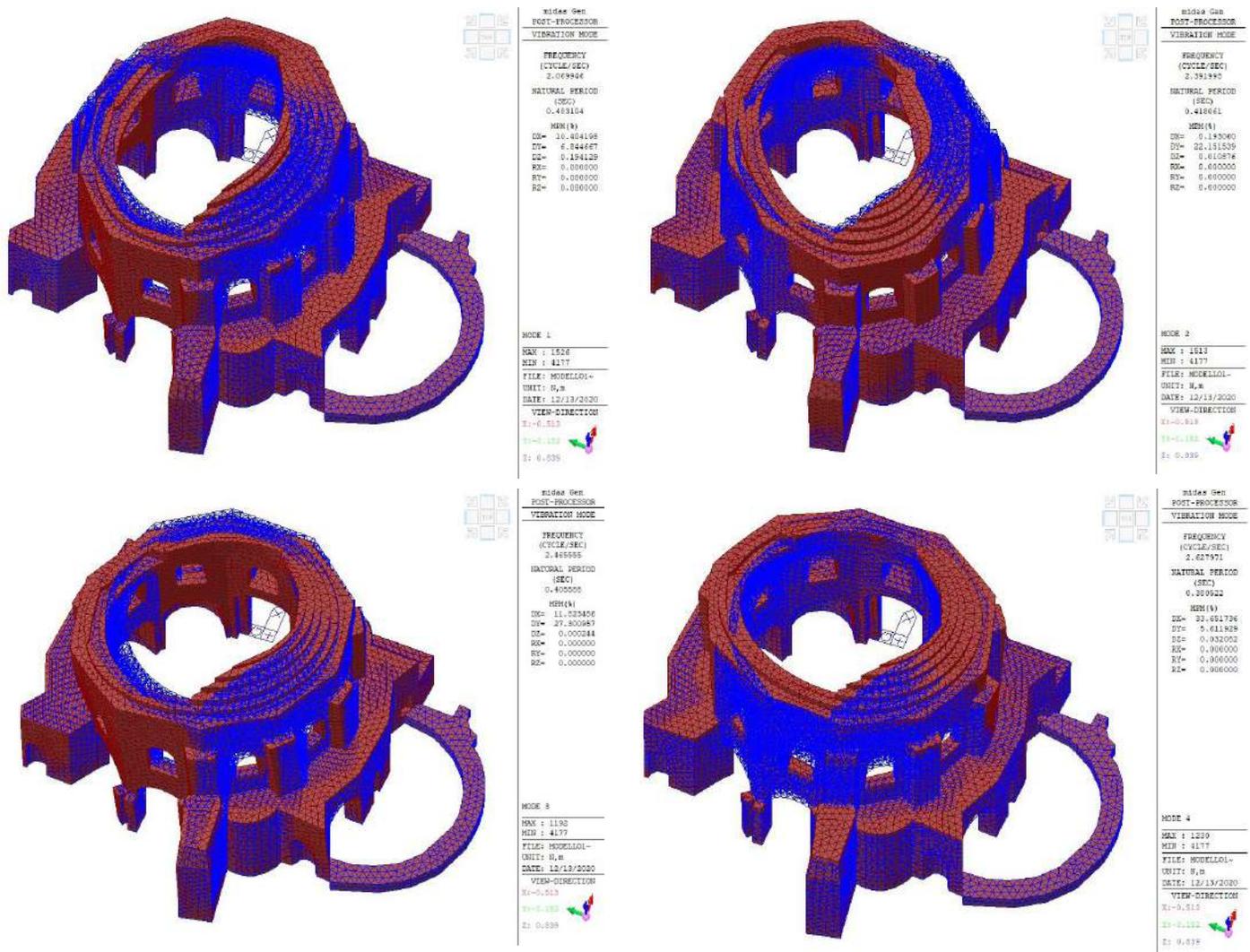
una tolleranza inferiore a 10-8 e di far combaciare i nodi su facce adiacenti. Il modello è stato infine esportato in formato .mgb.

## Analisi modale e updating del modello

Le successive analisi sono state svolte in Midas Gen. Sono stati complessivamente utilizzati 72980 elementi per un numero totale di nodi pari a 19457. L'analisi modale

è stata eseguita modificando il modulo iniziale fino a fare coincidere la prima frequenza del modello con la prima sperimentale. Anche il confronto con le altre

frequenze identificate, oltre che sulle forme modali, ha mostrato un ottimo accordo. Le figure 5a-d seguenti mostrano i primi 4 modi della struttura.



■ Figg. 5a-d. Primi quattro modi della struttura

## Analisi dinamica con Time History simulata

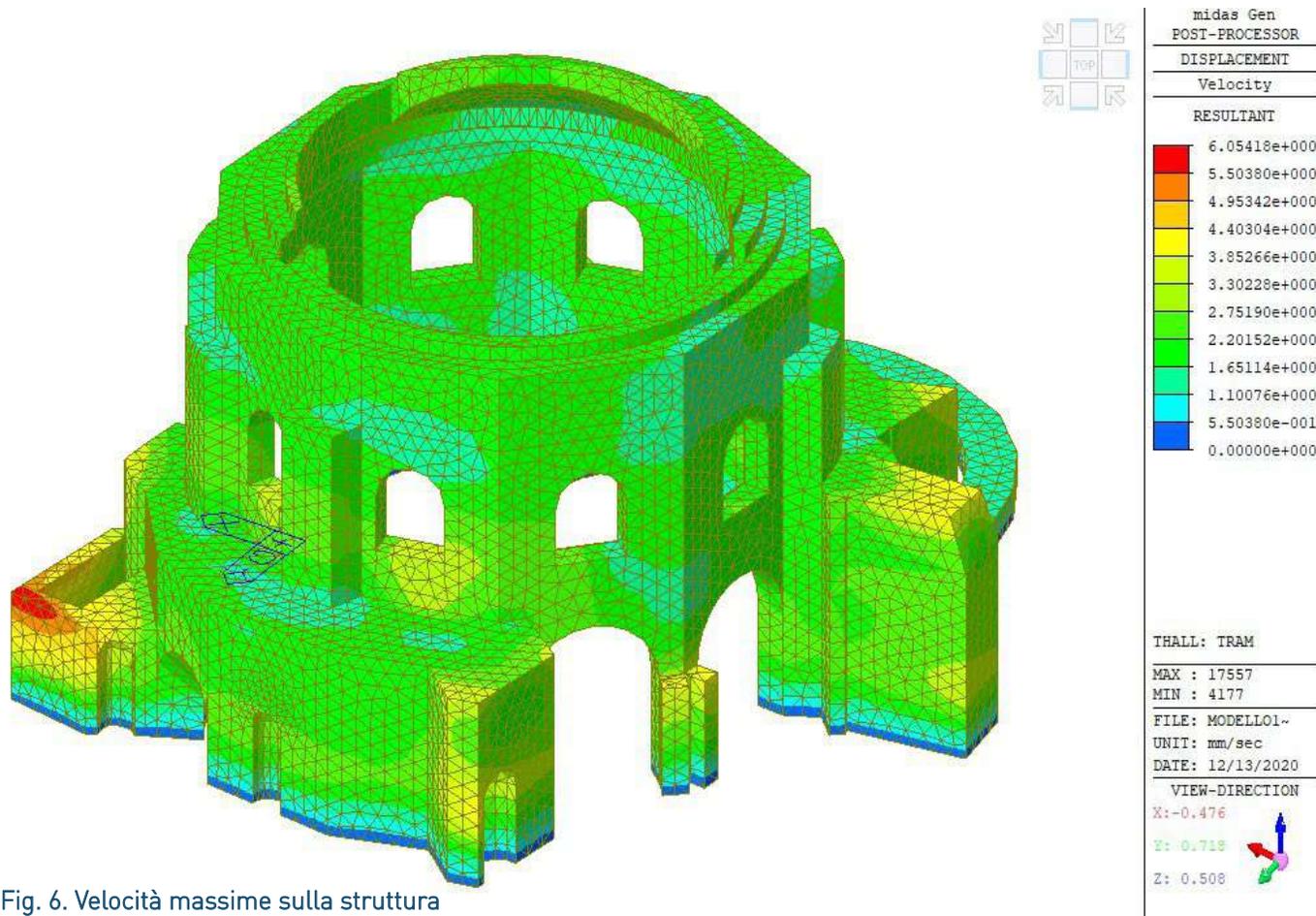
Il modello è stato quindi adottato per valutare la risposta dinamica sotto accelerazioni alla base. Tali accelerazioni sono state valutate mediante la simulazione di terne di storie temporali non stazionarie secondo la tecnica presentata in [10]. Le densità spettrali di potenza evoluzionarie necessarie alla simulazione erano state ottenute a partire da registrazioni di velocità alla base del monumento. Al fine di ridurre l'onere computazionale, assumendo accelerazioni lungo tre direzioni ortogonali, sono stati utilizzati

i vettori di Ritz assumendo quale limite superiore per le frequenze 70 Hz, in modo da considerare l'intervallo significativo per l'input.

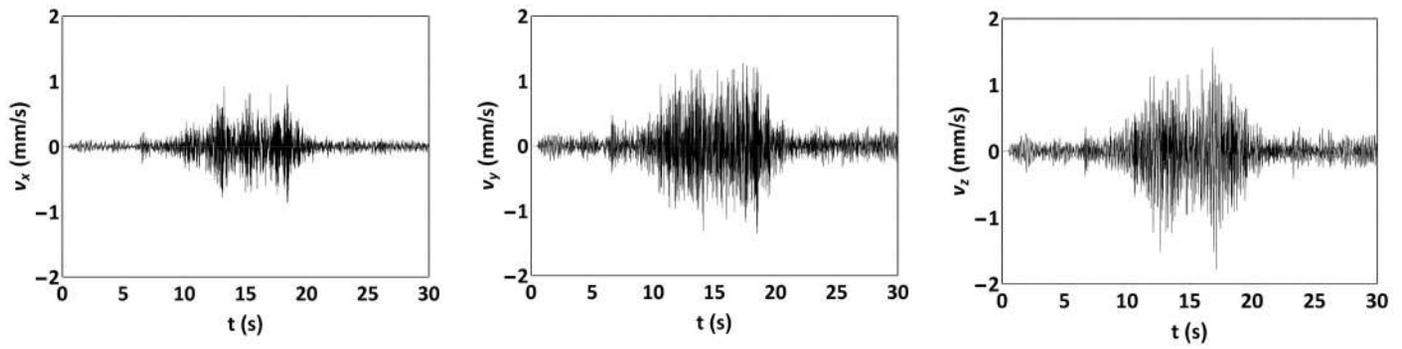
La **Figura 6** seguente mostra le massime velocità ottenute per una simulazione. Le storie temporali relative ad un nodo in testa al monumento sono invece riportate nelle **Figure 7a-c**. Esse sono state scaricate in formato testo dai risultati della analisi. La scelta della velocità quale parametro da considerare è legata al fatto che le norme che si occupano dell'effetto

del traffico sui monumenti, tra cui le DIN, pongono limiti sulla velocità massima.

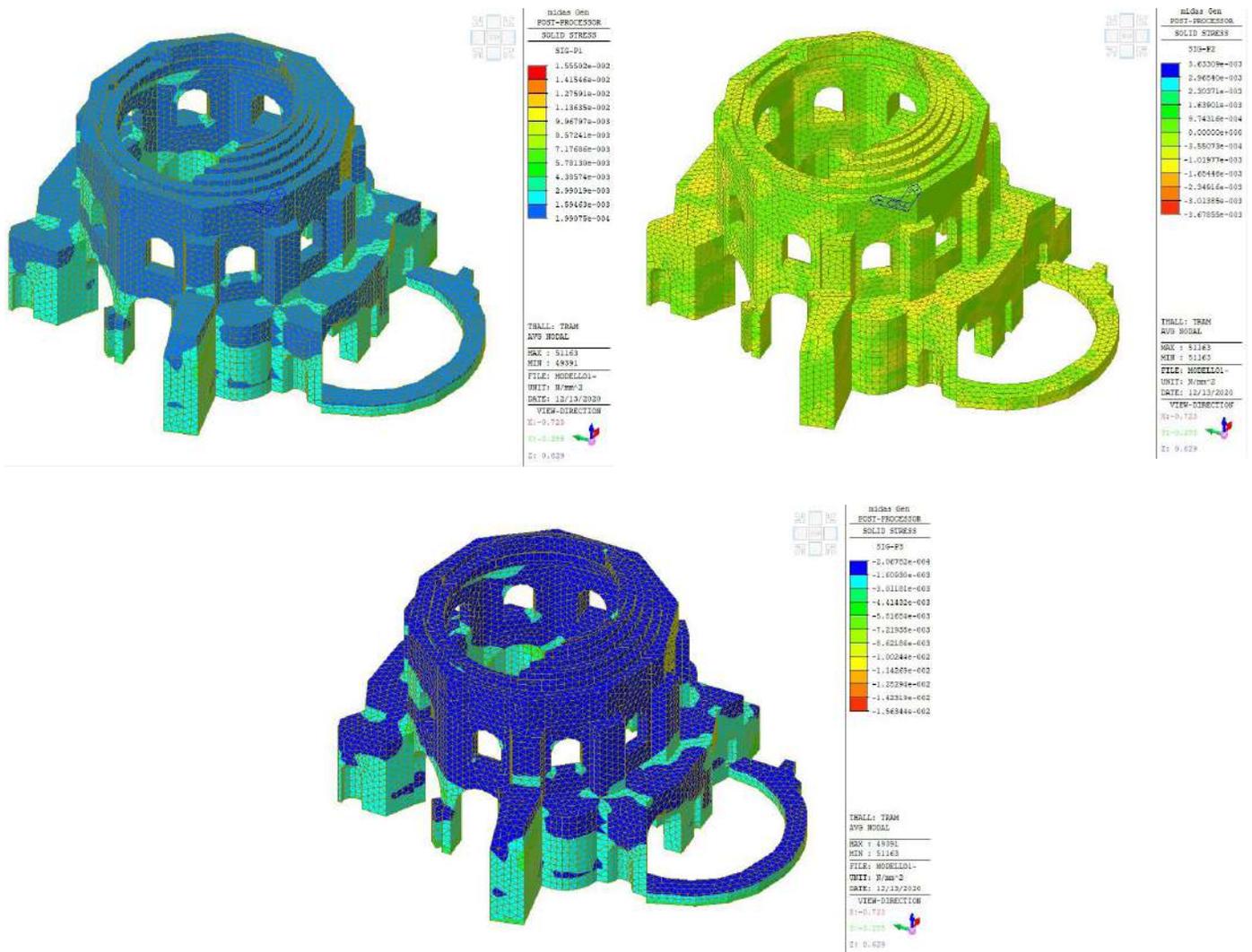
Le tensioni principali riportate nelle **Figure 8a-c**, cui vanno aggiunte quelle relative ai carichi verticali, ovviamente non sono significative dal punto di vista della resistenza ma vanno valutate in un'ottica di lungo periodo e con riferimento alla frequenza dei passaggi tranviari. Un monitoraggio per un periodo temporale più esteso potrebbe permettere una caratterizzazione più accurata della azione dovuta al passaggio tranviario.



■ Fig. 6. Velocità massime sulla struttura



■ Fig. 7a-c. Storie temporali di velocità per un nodo in testa al monumento: componenti x (a), y (b) e z (c)



■ Fig. 8a-c. Tensioni principali

## Conclusioni

In questo articolo è stato presentato lo sviluppo di un modello a elementi finiti in Midas Gen relativo ad un edificio monumentale, il Tempio di Minerva Medica a Roma. A partire dai dati di un rilievo con laser scanner e documenti di letteratura è stata definita la geometria e

la mesh in FX, successivamente esportata in Midas Gen. Il modello, utile per la valutazione della risposta dinamica sotto vibrazioni con ampiezza modesta, dovute al traffico, è stato realizzato assumendo la ipotesi di elasticità lineare. La analisi modale ha

mostrato la ottima corrispondenza con le frequenze identificate sperimentalmente. Infine è stata valutata la risposta dinamica sotto storie di accelerazione non stazionaria simulate in accordo ai passaggi del tram.

## Ringraziamenti

La scansione laser del monumento è stata effettuata da Angelo Tatì di ENEA che ha fornito i dati e al quale va il ringraziamento dell'autore.

Si ringrazia inoltre il collega Ivan Roselli di ENEA, responsabile per il Laboratorio del Progetto SISMI-DTC Lazio.

Per approfondire il profilo di Fernando Saitta:

<https://impatti.sostenibilita.enea.it/people/fernando-saitta>



## Bibliografia

- [1] P. Clemente, D. Rinaldis, G. Bongiovanni, *Dynamic characterization of the 'Tempio della Minerva Medica*, Atti della 10th European Conference on Earthquake Engineering, 1994.
- [2] P. Clemente, Traffic Induced Vibration on Structures, IABSE Symposium, San Francisco, 1997.
- [3] I. Roselli, V. Fioriti, G. De Canio, *Use of the transmissibility function H for ambient vibration measurements of an archeological building*, Atti della 2018 IEEE International Conference of Metrology for Archaeology and cultural heritage (MetroArcheo2018), 2018.
- [4] V. Fioriti, I. Roselli, G. De Canio, *Frequency Domain Analysis of the Minerva Medica Temple by means of the Motion Magnification Methodology*, Atti della 2018 IEEE International Conference of Metrology for Archaeology and cultural heritage (MetroArcheo2018), 2018.
- [5] I. Roselli, A. Tatì, V. Fioriti, I. Bellagamba, M. Mongelli, R. Romano, G. De Canio, M. Barbera, M. Magnani Cianetti, *Integrated approach to structural diagnosis by non-destructive techniques: the case of the temple of Minerva Medica*, ACTA IMEKO 7(3), 13-19, 2018.

- [6] I. Roselli, V. Fioriti, M. Mongelli, I. Bellagamba e G. De Canio, *Mutual Validation between different Modal Analysis Techniques for Dynamic Identification of the so-called Temple of Minerva Medica*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018.
- [7] I. Roselli, V. Fioriti, I. Bellagamba, M. Mongelli, A. Tati, M. Barbera, M., Magnani Cianetti, G. De Canio, *Urban transport vibrations and cultural heritage sites in Rome: the cases of the temple of Minerva Medica and of the Catacomb of Priscilla*, WIT Transactions on Ecology and the Environment 223, 335-343, 2017.
- [8] Baggio C., Sabbatini V., Santini S., Sebastiani C., Fioriti V., Roselli I., Colucci A., Saitta F., Forliti S. *Dynamic Identification of the so-called Temple of Minerva Medica: Comparison of Different Instrumentations and Methods for Mutual Validation of the Results*. Accettato per la 12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions SAHC 2021.
- [9] Ciambella J, Paolone A, Baggio C, Colucci A, De Canio G, Fioriti V, Roselli I, Forliti S, Tati A, Sabbatini V, Saitta F, Santini S, Sebastiani C (2020). *Monitoraggio dinamico. Il caso del Tempio di Minerva Medica in Roma*, in Caravaggi L. (a cura di) *Progetto SISMI-DTC Lazio Conoscenze e innovazioni per la ricostruzione e il miglioramento sismico dei centri storici del Lazio*, Quodlibet Studio.
- [10] Saitta F., Forliti S., Colucci A., Tati A., Roselli I. *Dynamic Modelling of Tram-Induced Vibration on the Temple of Minerva Medica in Rome*. Atti della XI International Conference on Structural Dynamics EUROLYN 2020. M. Papadrakakis, M. Fragiadakis, C. Papadimitriou (a cura di) Atene, Grecia, 23-26 Novembre 2020.