

Influence of cranes in the seismic response of industrial buildings

Influenza del carroponete nella risposta sismica di edifici industriali

A. Belleri¹, S. Labo¹, F. Cornali¹, A. Marini¹, P. Riva¹,

¹ *Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate, Università di Bergamo, Dalmine, Bergamo*

ABSTRACT: The earthquake that significantly hit the Emilia region in 2012 caused extensive damage in industrial buildings, especially in the case of precast concrete structures. Starting from the equations of motion associated to the pendulum load of overhead cranes, the present article aims to investigate the influence of the overhead crane and its suspended load in the seismic response of an industrial building. Finally, the paper provides considerations on how to model the crane and the suspended load for seismic vulnerability analyses. / Il terremoto che ha colpito in modo significativo il territorio emiliano nel 2012 ha provocato ingenti danni in edifici industriali, in particolare nel caso di edifici a struttura prefabbricata. Partendo dalla scrittura delle equazioni del moto del carico appeso di gru a ponte sottoposto a sollecitazioni sismiche, il presente articolo si propone di indagare l'influenza del carroponete nella risposta sismica di un edificio industriale e di fornire indicazioni utili ai fini della modellazione dello stesso nelle analisi di vulnerabilità sismica.

KEYWORDS: Overhang crane; precast buildings; seismic vulnerability / carroponete; strutture prefabbricate; vulnerabilità sismica

1 INTRODUZIONE

Le strutture prefabbricate sono state ampiamente adottate nel territorio nazionale in particolare nel settore industriale e commerciale, con edifici a un piano o a pochi piani caratterizzati da uno schema strutturale semplice: pilastri con comportamento a mensola incernierati a (Psycharis & Mouzakis 2012, Magliulo et al. 2014a, Zoubek et al. 2015) travi precomprese che a loro volta supportano gli elementi prefabbricati della copertura, comunemente denominati tegoli. I pilastri sono posti all'interno di plinti a bicchiere prefabbricati (Osanai et al. 1996) o connessi alla fondazione mediante dispositivi meccanici o soluzioni che prevedono barre di richiamo in camicie d'acciaio riempite con malte a basso ritiro (Belleri & Riva 2012, Haber et al. 2014, Metelli et al. 2011).

I recenti terremoti che hanno colpito il territorio italiano hanno evidenziato la vulnerabilità delle strutture prefabbricate se non progettate secondo i moderni criteri anti-sismici (Belleri et al. 2015a, b, Magliulo et al. 2014b, Bournas et al. 2014). Le principali vulnerabilità osservate sono associate all'inadeguatezza dei meccanismi di trasferimento dei carichi sismici orizzontali tra elementi prefabbricati; ciò ha comportato la perdita dell'appoggio e conseguente caduta sia di elementi strutturali (Belle-

ri et al. 2015b, Magliulo et al. 2016, Babic & Dolsek 2016, Casotto et al. 2015) sia di elementi non strutturali, come ad esempio i pannelli prefabbricati di rivestimento (Belleri et al. 2016, Scotta et al. 2015, Zoubek et al. 2016). Inoltre, carichi aggiuntivi nelle connessioni esistenti sono una conseguenza dell'incompatibilità in termini di spostamento e rotazione tra elementi adiacenti a causa dell'elevata flessibilità delle strutture considerate; ne sono esempio le connessioni tra trave e pilastro (Brunesi et al. 2015), tegoli di copertura e trave portante (Belleri et al. 2014) e pannelli prefabbricati di rivestimento e struttura di supporto (Belleri et al. 2016).

La maggior parte degli edifici industriali che ha subito danni nel corso del terremoto emiliano del 2012 era caratterizzata dalla presenza di carroponete. Da qui l'interesse del presente articolo di indagare l'influenza del carroponete nella risposta sismica globale e locale di edifici industriali prefabbricati (CNR 10021/85, EN 1993/6). In particolare, partendo dalle equazioni del moto del carico appeso, assimilabile al moto di un pendolo, è qui valutata la risposta strutturale di un edificio industriale prefabbricato in presenza e assenza di carroponete e considerando l'influenza della flessibilità della copertura.

2 EQUAZIONI DEL MOTO

2.1 Equazione del pendolo con moto del supporto

L'influenza del carico appeso del carro ponte in un capannone industriale è qui studiata utilizzando il modello a masse concentrate mostrato in Figura 1.

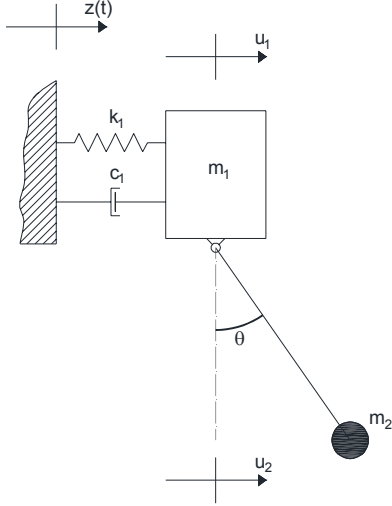


Figure 1. Pendulum system / Sistema a pendolo.

Considerando le coordinate relative, gli spostamenti delle due masse sono definiti da:

$$\begin{aligned}\omega_1 &= u_1 - z \\ \omega_2 &= Tg(\theta)R \approx \theta R \\ \omega_2 &= u_2 - u_1\end{aligned}\quad (1)$$

Rappresentando i diagrammi dei corpi liberi (Fig.2) delle componenti del sistema si ottengono le equazioni di equilibrio verticale e orizzontale per piccoli spostamenti ($\sin(\theta) \approx \theta$, $\cos(\theta) \approx 1$, $\theta^2 \approx 0$):

$$\rightarrow \sum F_2 = m_2 \ddot{\theta} R = +c_2 \dot{\theta} R + T\theta + m_2 \ddot{\theta} R \quad (2)$$

$$\uparrow \sum F_2 = T = mg \quad (3)$$

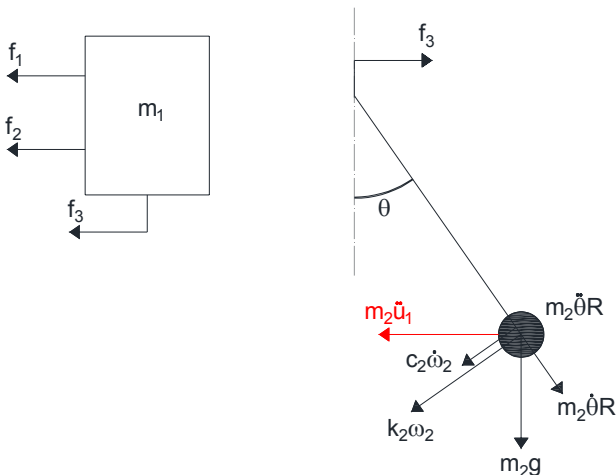


Figure 2. Free body diagrams / Diagrammi di corpo libero.

Scrivendo le due equazioni ottenute per piccoli spostamenti in forma matriciale, si ha:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ m_2 & m_2 R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\omega}_1 \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & -c_2 R \\ 0 & c_2 R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\omega}_1 \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -mg \\ 0 & mg \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega_1 \\ \theta \end{Bmatrix} = -\ddot{z} \begin{Bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Sostituendo $\theta = \omega_2 / R$ si ha:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ m_2 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\omega}_1 \\ \ddot{\omega}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & -c_2 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\omega}_1 \\ \dot{\omega}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -\frac{mg}{R} \\ 0 & \frac{mg}{R} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{Bmatrix} = -\ddot{z} \begin{Bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

2.2 Sistema a 2 gradi di libertà con moto del supporto

Per piccoli spostamenti il sistema a due gradi di libertà del paragrafo precedente è approssimabile al sistema rappresentato in Figura 3. Considerando gli spostamenti relativi, le coordinate sono:

$$\begin{aligned}\omega_1 &= u_1 - z \\ \omega_2 &= u_2 - u_1\end{aligned}\quad (6)$$

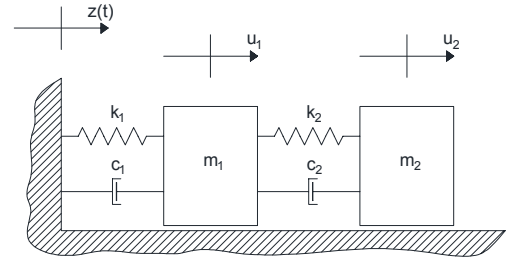


Figure 3. Classical 2 degrees of freedom system / Sistema a 2 gradi di libertà classico.

Per ogni massa in Figura 3 si riportano i diagrammi di corpo libero in Figura 4 con le rispettive forze agenti.

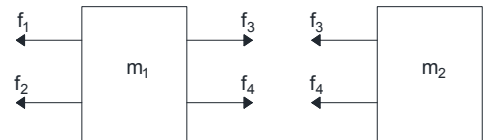


Figure 4. Free body diagrams / Diagrammi di corpo libero.

Utilizzando la seconda legge di Newton è possibile scrivere le equazioni del moto:

$$\begin{aligned}\rightarrow \sum F_1 &= m_1 \ddot{u}_1 = m_1 (\ddot{\omega}_1 + \ddot{z}) = -f_1 - f_2 + f_3 + f_4 \\ \rightarrow \sum F_2 &= m_2 \ddot{u}_2 = m_2 (\ddot{\omega}_2 + \ddot{\omega}_1 + \ddot{z}) = -f_3 - f_4\end{aligned}\quad (7)$$

Dove f_1 e f_3 rappresentano le forze delle molle mentre f_2 e f_4 le forze date dagli smorzatori. In particolare si ha:

$$\begin{aligned} f_1 &= k_1(u_1 - z) = k_1\omega_1 \\ f_3 &= k_2(u_2 - u_1) = k_2\omega_2 \\ f_2 &= c_1(\dot{u}_1 - \dot{z}) = c_1\dot{\omega}_1 \\ f_4 &= c_2(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) = c_2\dot{\omega}_2 \end{aligned} \quad (8)$$

Sostituendo (8) in (7) si ottengono le equazioni del moto delle due masse.

$$\begin{aligned} m_1(\ddot{\omega}_1 + \ddot{z}) &= -k_1\omega_1 - k_2\omega_2 + c_1\dot{\omega}_1 + c_2\dot{\omega}_2 \\ m_2(\ddot{\omega}_2 + \ddot{\omega}_1 + \ddot{z}) &= c_1\dot{\omega}_1 + c_2\dot{\omega}_2 \end{aligned} \quad (9)$$

Scrivendo tali equazioni in forma matriciale:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ m_2 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\omega}_1 \\ \ddot{\omega}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & -c_2 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\omega}_1 \\ \dot{\omega}_2 \end{Bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} k_1 & -k_2 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{Bmatrix} &= -\ddot{z} \begin{Bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

Si osserva come il sistema di equazioni 10 sia formalmente identico al sistema di equazioni 5. In particolare si osserva come nel caso di piccoli spostamenti sia possibile sostituire direttamente al pendolo un sistema massa-molla con massa pari al carico appeso e con rigidità $k_2 = mg/R$.

2.3 Validazione nel caso di portale prefabbricato

L'influenza della presenza del carico appeso del carroponete nella risposta sismica di un portale prefabbricato è stata valutata considerando lo schema di Figura 5.

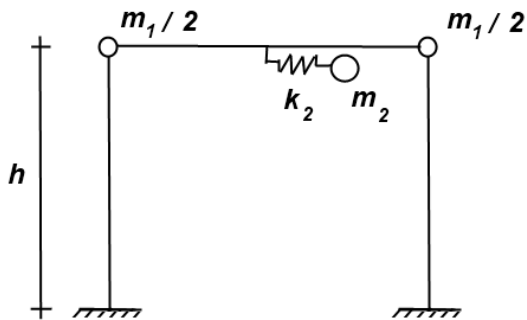


Figure 5. Scheme of the considered portal frame / Schema strutturale del portale considerato.

L'input sismico considerato è quello relativo alle scosse principali registrate a Mirandola il 02.05.2012 (1HNE per la direzione est-ovest e 1HNN per la direzione nord-sud) e il 29.05.2012 (2HNE per la direzione est-ovest e 2HNN per la direzione nord-sud)

Le caratteristiche del portale sono le seguenti:

$$\begin{cases} A_{Pil} = 202500 \text{ mm}^2 \\ I_{Pil} = 3417187500 \text{ mm}^4 \\ E = 37277 \text{ MPa} \\ h = 7200 \text{ mm} \\ m_1 = 117571 \text{ N/g} \\ k_1 = 2(3EI_{Pil})/h^3 = 2.04 \cdot 10^6 \text{ N/m} \\ \xi_{Pil} = 0.05; \quad \xi_{carico} = 0.002; \\ c_1 = 2m\xi_{Pil}\omega = 2m\xi_{Pil}\sqrt{k/m} = 49066 \text{ Ns/m} \end{cases} \quad (11)$$

Lo smorzamento relativo al carico appeso del carroponete (ξ_{carico}) è stato desunto da prove di oscillazione libera del carroponete in dotazione al laboratorio Prove Strutturali dell'Università di Bergamo. Sono state eseguite due analisi per valutare l'influenza della lunghezza R del cavo del carico appeso: R pari a 2.5m e 5m. Per il carroponete con R=2.5m si ha:

$$\begin{cases} m_2 = 30590 \text{ N/g} \\ k_2 = \frac{m_2 g}{R_1} = 120035 \text{ N/m} \\ c_2 = 2m\xi_{carico}\omega = 2m\xi_{carico}\sqrt{k/m} = 206 \text{ Ns/m} \end{cases} \quad (12)$$

Per il carroponete con R=5.0m si ha:

$$\begin{cases} m_2 = 30590 \text{ N/g} \\ k_2 = \frac{m_2 g}{R_1} = 60018 \text{ N/m} \\ c_2 = 2m\xi_{carico}\omega = 2m\xi_{carico}\sqrt{k/m} = 146 \text{ Ns/m} \end{cases} \quad (13)$$

I risultati delle simulazioni ottenute risolvendo numericamente le equazioni del moto sono riportati nelle figure seguenti (Fig.6, 7 e 8) dove si osserva generalmente una riduzione degli spostamenti in sommità del portale nel caso si introduca il carico appeso.

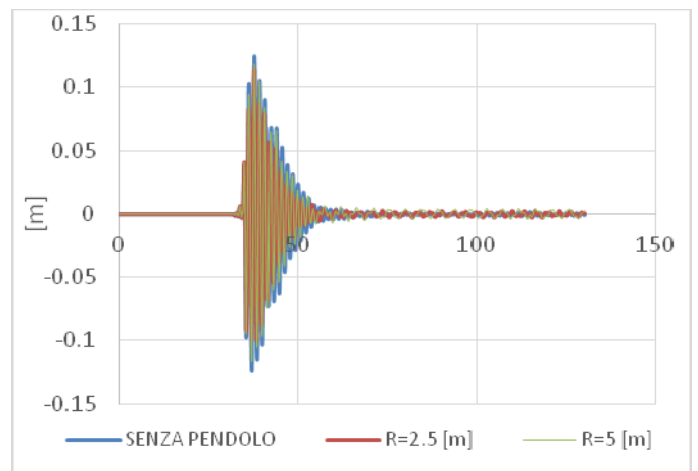


Figure 6. Portal displacement under different suspended load configurations / Spostamento in sommità per varie configurazioni del carico appeso.

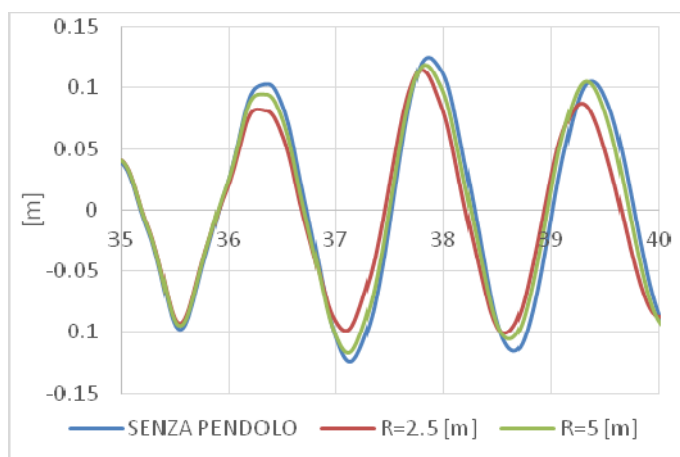


Figure 7. Close-up of Figure 6 / Ingrandimento Figura 6.

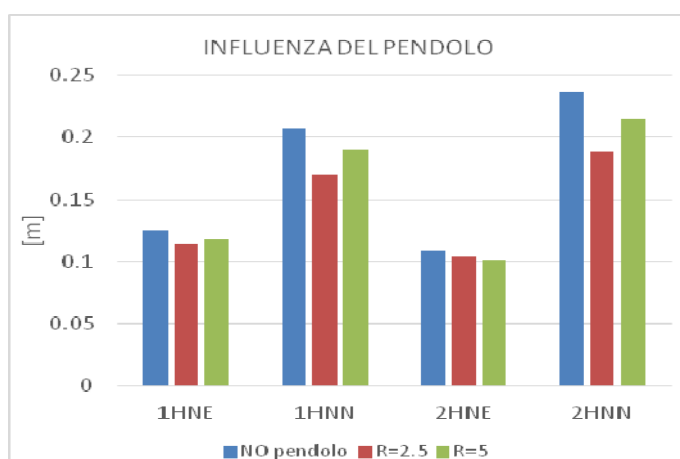


Figure 8. Maximum portal displacement under different ground excitations / Spostamento massimo del portale per varie accelerazioni del terreno.

3 CASO STUDIO

L'influenza del carro ponte in un edificio prefabbricato completo è stata valutata prendendo in considerazione un caso studio rappresentativo di una tipica struttura prefabbricata ad uso industriale (Fig.9).

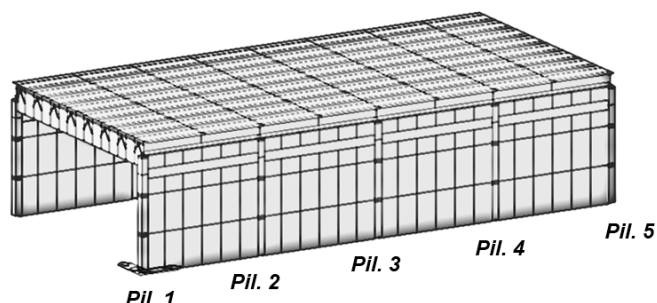


Figure 9. Selected case study / Caso studio selezionato.

La struttura è stata modellata agli elementi finiti utilizzando il programma MIDASGen. L'edificio presenta una pianta rettangolare di 32x15m. I pilastri hanno sezione 45x45cm e sono armati con 12φ18 equamente distribuiti; il modello utilizzato per de-

scrivere il comportamento non lineare è del tipo a fibre. I materiali utilizzati sono C50/60 per il calcestruzzo e B450C per l'acciaio. I valori caratteristici di tali materiali sono stati considerati per descrivere il comportamento non lineare della cerniera plastica. Il peso proprio del carro ponte è stato stimato pari a 184kN mentre il carico appeso considerato è pari a 300kN. Il collegamento tra carico appeso e carro ponte è stato modellato con una molla elastica di rigidità pari a $k = mg / R = 120'035 \text{ N/m}$. Lo smorzamento tra carico appeso e carro ponte è stato trascurato.

Sono state condotte analisi dinamiche non lineari per analizzare la risposta in termini di spostamento in sommità e curvatura massima dei pilastri. L'input sismico utilizzato è quello relativo alla scossa principale registrata a Mirandola il 02.05.2012 nel corso della sequenza sismica emiliana. Sono state considerate entrambe le direzioni dell'accelerogramma, in particolare la direzione est-ovest corrisponde con la direzione longitudinale del modello (Dir.X) mentre la direzione nord-sud corrisponde con la direzione trasversale del modello (Dir.Y).

Per l'edificio in oggetto sono state inoltre considerate varie casistiche: In primo luogo nell'edificio di riferimento è stato inserito il carro ponte in corrispondenza del pilastro centrale (Pilastro 3) e successivamente posizionato nella mezzeria dell'ultima campata (tra i Pilastri 4 e 5). In entrambi i casi è stata dapprima trascurata la massa del carico appeso del carro ponte. Successivamente, le due configurazioni precedenti sono state analizzate considerando anche la presenza del carico appeso del carro ponte, preso pari alla portata dichiarata. Tutte le analisi sono state svolte considerando sia il solaio deformabile, sia infinitamente rigido nel piano.

Si riportano nelle figure seguenti (Fig.10-15) i risultati in termini di spostamento in sommità dei pilastri nelle due direzioni X e Y e di curvatura massima alla base dei pilastri. In tali figure è indicato con il termine "Riferimento" il modello senza carro ponte e senza carico appeso, con il termine "TC_NO Pendolo" il modello con il carro ponte senza carico appeso e con il termine "TC_Pendolo" il modello con carro ponte e con carico appeso. I risultati mostrano come nel caso di assenza di diaframma di copertura la presenza del carro ponte porti a un incremento limitato (3.6%) degli spostamenti in direzione longitudinale (Dir.X); in direzione trasversale (Dir.Y) l'incremento di spostamento è riscontrato soprattutto nel caso di carro ponte eccentrico senza carico appeso (incremento massimo 12.1%); per quanto riguarda la curvatura alla base dei pilastri si osservano incrementi maggiori nel caso di aggiunta di carro ponte senza carico appeso (incremento massimo 58.7%).

Nel caso di solaio di copertura con comportamento a diaframma rigido si osserva un incremento modesto (11.3%) degli spostamenti in direzione longitudinale (Dir.X). In direzione trasversale (Dir.Y) non

si registrano praticamente aumenti degli spostamenti di piano (incremento del 0.1%) mentre si osserva un incremento di curvatura trascurabile solamente nel pilastro centrale nell'analisi con carroponte posizionato in prossimità di tale pilastro e senza il carico appeso (incremento del 1.2%).

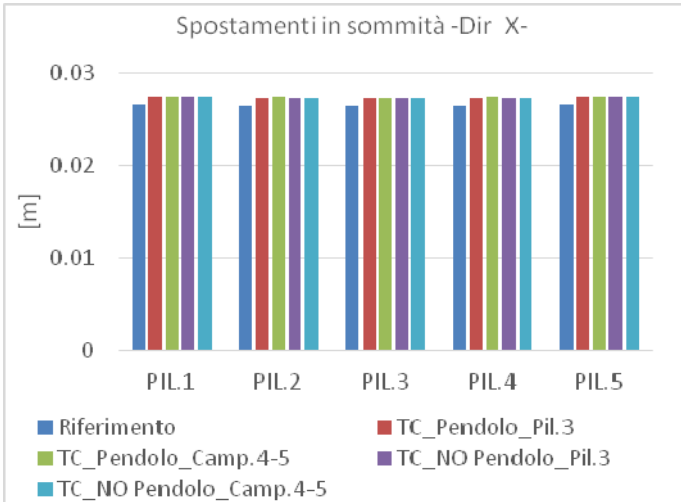


Figure 10. Flexible diaphragm: roof displacement dir.X / Solaio flessibile: spostamento in sommità in dir.X.

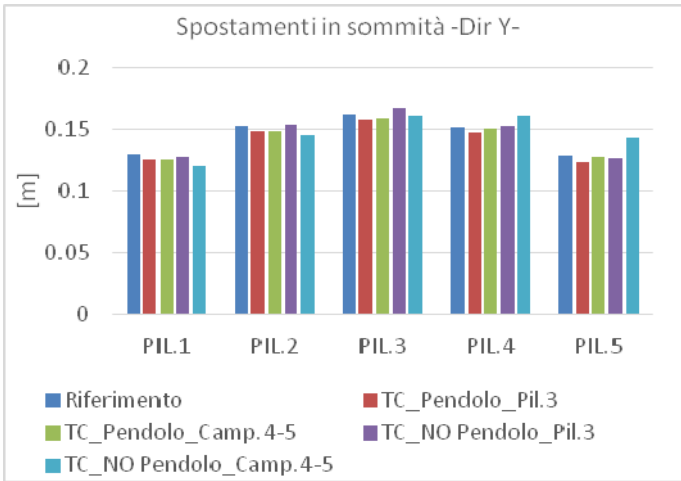


Figure 11. Flexible diaphragm: roof displacement dir.Y / Solaio flessibile: spostamento in sommità in dir.Y.

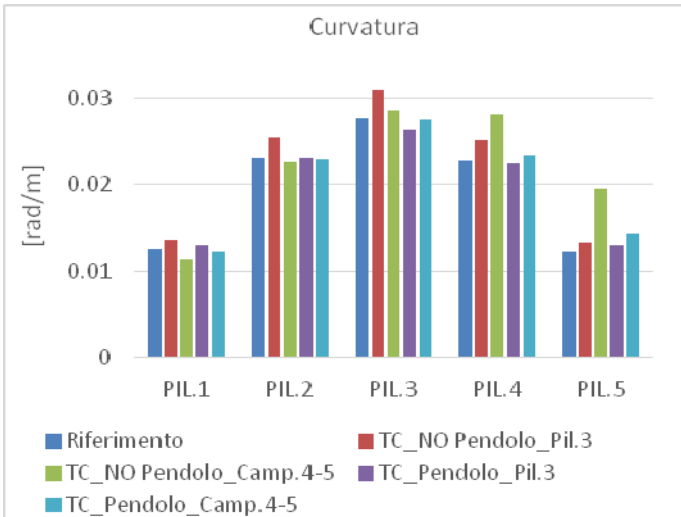


Figure 12. Flexible diaphragm: maximum curvature at the column base / Solaio flessibile: massima curvatura alla base dei pilastri.

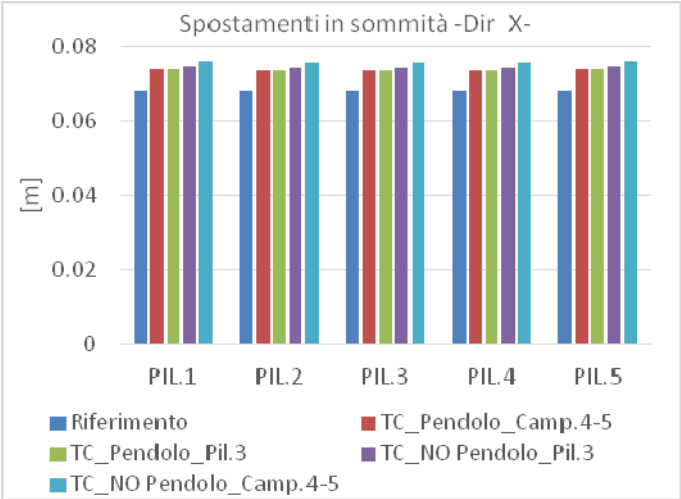


Figure 13. Rigid diaphragm: roof displacement dir.X / Solaio rigido: spostamento in sommità in dir.X.

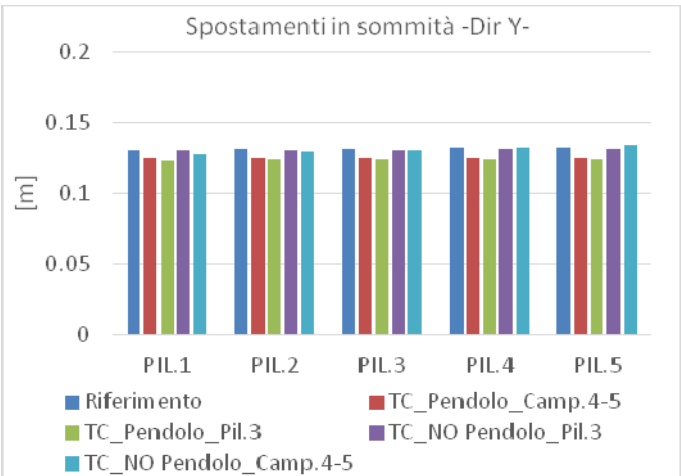


Figure 14. Rigid diaphragm: roof displacement dir.Y / Solaio rigido: spostamento in sommità in dir.Y.

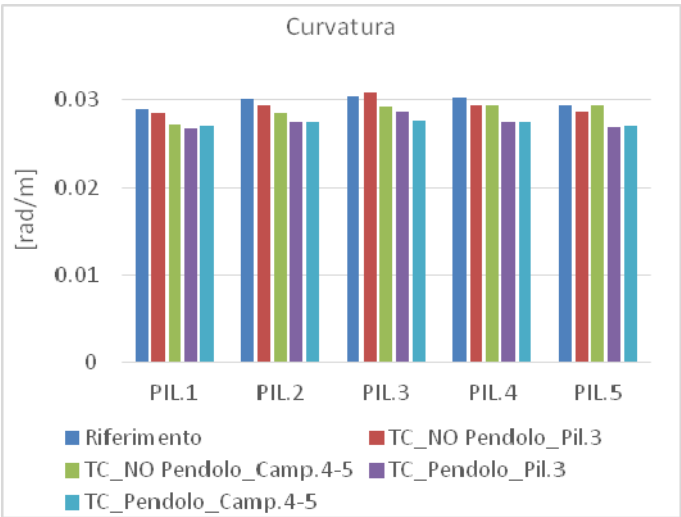


Figure 15. Rigid diaphragm: maximum curvature at the column base / Solaio rigido: massima curvatura alla base dei pilastri.

4 CONCLUSIONI

The present article investigated the influence of the overhead crane in the seismic response of precast industrial buildings. Starting from the equations of motion of a system with two degrees of freedom with a pendulum behavior subjected to the motion of the support, it was possible to find the analogy with a classical two degrees of freedom system. This allowed defining how to model the pendulum system to in the finite element analyses: the behavior of the hanging load is comparable to single degree of freedom system with mass equal to the hanging mass and horizontal stiffness equal to mg/R where R is the length of the cables that connect the load hanging from the crane.

The analyses conducted on a plane portal structure showed that the introduction of the hanging load leads to a reduction of the roof displacements. The time history nonlinear analyses of a portal structure with multiple bays showed that, in the longitudinal direction, the addition of the mass of the crane leads to an increase of the roof displacements independently by the presence of a hanging load. In the transversal direction the response is different in the case of absence or presence of a roof diaphragm: in the first case the increase of displacement has been found especially when the crane is at the end of the longitudinal plan dimension and no hanging load is present; in the second case, no significant increase of the roof displacements was recorded. Regarding changes in the curvature demand at the base of the columns, the higher increase is observed when the overhead crane is added without the hanging load.

Nel presente articolo è stata indagata l'influenza del carro ponte nella risposta sismica di edifici industriali a struttura prefabbricata. Partendo dalla scrittura delle equazioni del moto di un sistema a due gradi di libertà con comportamento a pendolo soggetto al moto del supporto, è stato possibile trovare l'analogia con un sistema classico a due gradi di libertà. Ciò ha permesso di definire le caratteristiche del sistema a pendolo da introdurre nelle analisi a elementi finiti: il comportamento del carico appeso è assimilabile a un sistema a un grado di libertà caratterizzato da una massa pari alla massa del carico appeso e da una rigidità orizzontale pari a mg/R dove R è la lunghezza delle funi che collegano il carico appeso al carro ponte.

Dalle analisi condotte su un singolo portale si osserva come le oscillazioni del carico appeso portano a una riduzione degli spostamenti in testa al portale. Le analisi dinamiche non lineari di una struttura a portale con più campate hanno mostrato come in direzione longitudinale l'aggiunta della massa del carro ponte porta a un incremento degli spostamenti di copertura indipendentemente o meno dalla presenza

del carico appeso, sia nel caso di copertura con comportamento a diaframma rigido sia in assenza di comportamento a diaframma della copertura. In direzione trasversale va distinto il caso di copertura senza e con comportamento a diaframma: nel primo caso l'incremento di spostamento è stato riscontrato soprattutto nel caso di carro ponte eccentrico senza carico appeso; nel secondo caso non sono stati registrati aumenti significativi degli spostamenti di piano. Per quanto riguarda l'incremento della curvatura alla base dei pilastri, si osservano incrementi maggiori nel caso di aggiunta di carro ponte senza carico appeso.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano il supporto finanziario del progetto ReLuis (AQ DPC/ReLuis 2014-2018), Linea: Temi Generali, Settore di Ricerca: Costruzioni in Cemento Armato.

REFERENCES

- Babic, A. & Dolsek, M. 2016. Seismic fragility functions of industrial precast building classes. *Engineering Structures*, 118, 357–370.
- Belleri, A. & Riva, P. 2012. Seismic performance and retrofit of precast concrete grouted sleeve connections. *PCI Journal*, 57(1), 97–109.
- Belleri, A., Brunesi, E., Nascimbene, R., Pagani, M. & Riva, P. 2015a. Seismic performance of precast industrial facilities following major earthquakes in the Italian territory. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(5), 04014135.
- Belleri, A., Torquati, M. & Riva, P. 2014. Seismic performance of ductile connections between precast beams and roof elements. *Magazine of Concrete Research*, 66 (11), 553–562.
- Belleri, A., Torquati, M., Marini, A. & Riva, P. 2016. Horizontal cladding panels: in-plane seismic performance in precast concrete buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(4), 1103–1129.
- Belleri, A., Torquati, M., Riva, P. & Nascimbene, R. 2015b. Vulnerability assessment and retrofit solutions of precast industrial structures. *Earthquakes and Structures*, 8(3), 801–820.
- Bournas, D.A., Negro, P. & Taucer, F.F. 2014. Performance of industrial buildings during the Emilia earthquakes in Northern Italy and recommendations for their strengthening. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(5), 2383–2404.
- Brunesi, E., Nascimbene, R., Bolognini, D. & Bellotti, D. 2015. Experimental investigation of the cyclic response of reinforced precast concrete framed structures. *PCI Journal*, 60, 57–79.
- Casotto, C., Silva, V., Crowley, H., Nascimbene, R. & Pinho, R. 2015. Seismic fragility of Italian RC precast industrial structures. *Engineering Structures*, 94, 122–136.
- CNR 10021/85 Strutture di acciaio per apparecchi di sollevamento
- EN 1993/6, 2007. Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 6: Crane supporting structures, Belgium, Brussels.
- Haber, Z.B., Saiidi, M.S. & Sanders, D.H. 2014. Seismic Performance of Precast Columns with Mechanically Spliced Column-Footing Connections. *ACI Structural Journal*, 111(3), 639–650.

- Magliulo, G., Ercolino, M. & Manfredi, G. 2016. Failure of a precast RC building due to Emilia-Romagna earthquakes. *Engineering Structures*, 118, 262–273.
- Magliulo, G., Ercolino, M., Cimmino, M., Capozzi, V. & Manfredi, G. 2014b. FEM analysis of the strength of RC beam-to-column dowel connections under monotonic actions. *Construction and Building Materials*, 69, 271–284.
- Magliulo, G., Ercolino, M., Petrone, C., Coppola, O. & Manfredi, G. 2014a. The Emilia earthquake: seismic performance of precast reinforced concrete buildings. *Earthquake Spectra*, 30(2), 891–912.
- Metelli, G., Beschi, C. & Riva, P. 2011. Cyclic behaviour of a column to foundation joint for concrete precast structures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15(9):1297-1318
- Osanai, Y., Watanabe, F. & Okamoto, S. 1996. Stress transfer mechanism of socket base connections with precast concrete columns. *ACI Structural Journal*, 93(3):266-276.
- Psycharis, I.N. & Mouzakis H.P. 2012. Shear resistance of pinned connections of precast members to monotonic and cyclic loading. *Engineering Structures*, 41, 413–427.
- Scotta, R., De Stefani, L. & Vitaliani, R. 2015. Passive control of precast building response using cladding panels as dissipative shear walls. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(11), 3527- 3552.
- Zoubek, B., Fischinger, M. & Isakovic, T. 2015. Estimation of the cyclic capacity of beam-to-column dowel connections in precast industrial buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13, 2145–2168.
- Zoubek, B., Isakovic, T. & Fischinger, M. 2016. Cyclic response of hammer-head strap cladding-to-structure connections used in RC precast building. *Engineering Structures*, 119, 135–148.