

Andrea Toni, Fabio Minghini, Antonio Tralli

Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara

Gianluca Loffredo

Libero professionista, Archliving, Laboratorio di Progettazione, Ferrara

La terra romba sotto VM Motori

VM Motori S.p.A. è un'azienda motoristica italiana sita a Cento, in provincia di Ferrara, operante dal 1947 nel campo dei motori diesel, appartenente a Fiat Powertrain Technologies, a sua volta parte di Fiat Chrysler Automobiles.

Il 1 Aprile 2014, l'attività VM Motori viene integrata nel gruppo Fiat Group Automobiles (FGA) ed acquisisce la denominazione di FGA Cento.



Modellazione agli elementi finiti di prove di identificazione strutturale: il caso dello stabilimento VM motori di Cento (FE)



Introduzione

La struttura oggetto di studio è lo stabilimento A della VM motori sito a Cento (FE) in via Ferrarese n° 29: nella Figura 1 è riportata una immagine satellitare dell'intero complesso mentre in Figura 2 è riportata una pianta particolareggiata di esso. A partire dal 1 Aprile 2014, l'attività VM Motori è stata integrata nel gruppo Fiat Group Automobiles (FGA) e ha acquisito la denominazione di FGA Cento.



Figura 1: Immagine satellitare dell'intero stabilimento

A seguito della sequenza sismica del maggio 2012 nello stabilimento A si sono verificati danni alle strutture, però tali da non precludere la produttività dell'azienda. I principali danni strutturali riscontrati consistono nel distacco di alcuni pannelli di rivestimento dovuto al martellamento fra corpi di altezza diversi, Figura 3, e in alcune lesioni delle travi sostenenti i tegoli di copertura nel corpo 18.

La proprietà durante la fase di messa in sicurezza e di progettazione degli interventi di adeguamento sismico, previsti dalle ordinanze della struttura commissariale e dalla legge 122/2012, conversione del decreto legislativo 74/2012, ha incaricato il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara di eseguire prove statiche e dinamiche di identificazione strutturale. Tali prove sono state svolte nell'estate del 2013 con la collaborazione con ELLETIPI S.R.L., laboratorio prove materiali, di Ferrara.

In questa nota vengono presentate le simulazioni agli elementi finiti svolte con il programma Midas Gen [2], presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara, per una corretta interpretazione delle prove. I risultati di tali simulazioni sono riportati nella tesi di laurea di Andrea Toni, marzo 2014 [1].

PLANIMETRIA GENERALE PARTICOLAREGGIATA



Figura 2: Planimetria generale particolareggiata dello stabilimento VM motori con evidenziati diversi edifici presenti

I

Figura 3: Sezione longitudinale dello stabilimento "A" con suddivisione fra i vari corpi.

Descrizione dell'opera

Lo stabilimento A, costruito in epoche successive e con tecniche costruttive diverse, può essere considerato composto da 5 corpi, Figura 4. Il corpo 20 è stato edificato nel 1959 e poi ampliato nel 1962 e nel 1965. I telai principali in c.a. sono costituiti da pilastri gettati in opera, aventi un interasse di 7,50 m, collegati trasversalmente da travi continue a "L".

Figura 4: Suddivisione schematica dello stabilimento A nei diversi corpi

Gli elementi di copertura presenti sono costituiti, Figura 3, da copponi prefabbricati in c.a. a doppia copertura, collegati con una catena di acciaio, e con una sola curvatura, aventi una luce in pianta di circa 15 m. Il corpo 21, realizzato nel 1976, presenta pilastri in c.a. prefabbricati (terminanti con piastrini in acciaio nelle vetrate) collegati con travi continue sia con sezione a "L" gettate in opera (la pilastrata confinante con il corpo 21) che a "I" prefabbricate e a una sola campata, mentre la copertura è realizzata con tegoli a "pi-greco". Il corpo 22, edificato fra il 1977 e il 1980 ha caratteristiche ancora diverse e gli elementi di copertura sono shed con sezione a "pi-greco" alcuni dei quali presentano lucernari. Il corpo 18 costruito contemporaneamente al precedente, Figura 5, presenta caratteristiche geometriche completamente diverse; esso ha una altezza nettamente maggiore oltre 12 m, e una copertura con tegoli e cupolini. Presenta inoltre pesanti pannelli di tamponatura in c.a. dello spessore di 18 cm.

Il corpo A è suddiviso in direzione ortogonale ai telai in 3 parti uguali mediante 2 giunti termici di spessore di circa 1 cm. In Figura 6 è riportato il modello completo realizzato con Midas Gen per l'intero corpo A e, più dettagliato, per la parte compresa fra 2 giunti.



Figura 5: Sezione Trasversale del corpo 18



Figura 6: (a) Modello MIDAS dell'intero corpo A, (b) Modello della parte compresa fra 2 giunti termici

Dopo il sisma in conformità della già citata legge 122 [2] la proprietà ha provveduto a porre in essere i necessari interventi di risoluzione delle carenze che sono principalmente consistiti nell'utilizzo di piastre metalliche bullonate per realizzare i fissaggi tegolo- trave principale, pilastro- trave principale e tegolo-tegolo. Gli interventi sono stati progettati in parte dall'ing. Davide Grandis e in parte dall' ing. Gianluca Loffredo, liberi professionisti in Ferrara. Nei modelli numerici utilizzati si è tenuto conto di tali interventi.

Descrizione delle prove di identificazione strutturale

Per identificare la rigidezza degli elementi strutturali nei diversi capannoni, che dipende oltre che dalle loro caratteristiche geometriche e meccaniche dal grado di vincolo mutuo e con il suolo, oltre alle usuali prove sui materiali in situ e in laboratorio sono state richieste, vista l'eterogeneità e complessità dello stabilimento, prove di identificazione nei diversi capannoni [3.4]. Le prove che si descrivono brevemente in questo paragrafo e di cui si confronteranno i risultati con quelli ottenuti mediante modellazione con il programma Midas Gen [2] vengono sinteticamente definite rispettivamente come prova di "tiro obliquo" e di "tiro verticale".

Prove di tiro obliquo

Le estremità superiori di due pilastri sono state collegate mediante un cavo di acciaio che viene sollecitato mediante un martinetto idraulico. In Figura 7 a e b viene riprodotto lo schema geometrico della prova che è stata ripetuta in diverse posizioni in ogni corpo di fabbrica, mentre in Figura 8 viene mostrata l'esecuzione della prova. Si osservi il collegamento mediante fasce in tessuto sintetico della fune alla testa del pilastro. l'inserimento in serie con la fune di un "fusibile" di acciaio (realizzato con una vite su cui è stato praticato un intaglio allo scopo di produrre la rottura fragile per un valore predefinito del carico) e di un martinetto idraulico. Quando il fusibile raggiunge il carico di rottura si ha il rilascio dell'energia di deformazione e la struttura inizia a vibrare. A rottura avvenuta, le misure di accelerazione sono state effettuate utilizzando fino a 16 accelerometri piezoelettrici prodotti dalla ditta PCB Piezotronics. In particolare sono stati utilizzati i modelli PCB/393B12, in grado di rilevare frequenze di vibrazione comprese tra 0.1 e 1000 Hz con sensibilità di 10 V/g, con g accelerazione di gravità, e PCB/353B04 con sensibilità di 10 mV/g e peso 10.5 grammi. Tutti gli accelerometri sono stati avvitati ad una basetta magnetica che ne ha consentito il posizionamento in corrispondenza di piastre metalliche solidali alla struttura presenti nei punti scelti per le registrazioni. Per l'acquisizione delle misure si è fatto uso del sistema multicanale SINUS Soundbook e del modulo SINUS Expander, con un totale di 16 canali sincronizzati tra loro con campionamento base a 51.2 kHz. I convertitori A/D sono a 24 bit, con gamma dinamica maggiore di 120 dB e linearità dinamica IEC 61672 maggiore di 115 dB. Il sistema è conforme agli Standards IEC 651 e 804 Tipo 1 e IEC 61672 Classe 1. Si è inoltre fatto uso dell'interfaccia software Samurai®. La frequenza di campionamento adottata per le misure è pari a 12.8 kHz (corrispondente ad una banda passante di 5 kHz). In fase di elaborazione delle misure si è fatto uso del software LMS Test.Lab.

A scopo di controllo preliminare degli effetti della coazione indotta sulla struttura, gli spostamenti delle teste dei pilastri durante la fase di carico sono stati misurati tramite un teodolite con precisione di \pm 0.7 mm. Tali spostamenti si sono rivelati di entità trascurabile.



Figura 7: (a) vista assonometrica del modello Midas Gen e (b) vista in pianta della porzione di struttura (Campata 2, corpo 20) in cui è stata eseguita la prova di tiro obliquo

Figura 8: Esecuzione della prova

Prova di tiro verticale

Il giorno 7 agosto 2013 è stata realizzata, nella campata 7 del corpo di fabbrica 18, la prova di tiro verticale il cui schema è illustrato in Figura 9 a e le modalità di realizzazione in Figura 9 b.

Le modalità di esecuzione della prova sono sostanzialmente simili a quelle descritte in precedenza; il cavo di acciaio viene vincolato alla trave in c.a. e viene posto in trazione mediante un martinetto idraulico, in tal modo la trave si deforma e si ha il rilascio dell'energia di deformazione all'atto della rottura del "fusibile di acciaio". Le misure di accelerazione sono state effettuate tramite la stessa strumentazione descritta nel paragrafo precedente. Le maggiori forze in gioco e la necessità di vincolare il cavo a terra rendono più complessa l'esecuzione della prova.





Figura 9: (a) schema della prova, (b) modalità di esecuzione della prova

Simulazione delle prove di identificazione strutturale

Elementi finiti utilizzati. La modellazione della struttura oggetto di studio, Figura 6 a e b, è stata realizzata con il programma di calcolo agli elementi finiti Midas Gen e sono stati utilizzati elementi finiti monodimensionali ("truss" per le catene e i cavi e "beam" per le travi) e bidimensionali tipo "plate" per discretizzare i pannelli, i copponi e i tegoli di copertura.

<u>Condizioni di vincolo.</u> I pilastri sono stati supposti vincolati con incastri perfetti al suolo. Tale condizione di vincolo è giustificata dal fatto che nella realtà sopra i plinti e/o le travi rovesce a cui sono vincolati i pilastri è posto un pavimento industriale

in cemento armato dello spessore di 20 cm. Per simulare i vincoli mutui fra gli elementi strutturali si sono utilizzate le opzioni consentite dal programma "Beam and release ", "Rigid link" e "Elastic link", questi ultimi utilizzati per modellare i collegamenti dei pannelli di tamponamento in calcestruzzo prefabbricato alla struttura portante. **Proprietà meccaniche dei materiali.** Sulla base delle prove di

Proprietà meccaniche dei materiali. Sulla base delle prove di laboratorio e degli elaborati di progetto si sono assunte le caratteristiche meccaniche definite dalle NTC2008 [3] per calcestruzzo di classe C 25/30 e per acciaio di classe B450C.

Prove di tiro obliquo: spostamenti in campo statico

Per brevità si riportano nel seguito solo i risultati relativi alla prova eseguita nella campata 2 del corpo 20, Figura 7 (a) e (b). Con uno strumento ottico si è misurato l'avvicinamento Du di 2 traguardi posti sui pilastri 165 e 143 ad una altezza di 4 m. In corrispondenza di un tiro del martinetto T_1 = 20 kN lo spostamento relativo Du₁ è risultato inferiore a 0,7mm ordine della precisione della catena di misura, in corrispondenza del tiro T_2 = 40 kN si è misurato uno spostamento relativo Du₂ di circa 1 mm. Nella Tabella 1 si riportano i risultati ottenuti modellando la struttura in Figura 7 (a) utilizzando per la copertura elementi monodimensionali (beam) vincolati in modo tale da consentirne all'appoggio la rotazione attorno agli assi orizzontale in direzione del telaio e verticale o discretizzando ogni coppone, supposto semplicemente appoggiato sulla trave a "L", con elementi bidimensionali (plate) di dimensione 30x60 cm e di spessore 6 cm

		ELEMENTI MONODIMENSIONALI				ELEMENTI BIDIMENSIONALI			
		T = 20 kN		T = 40 kN		T = 20 kN		T = 40 kN	
		Pilastro 143	Pilastro 165	Pilastro 143	Pilastro 165	Pilastro 143	Pilastro 165	Pilastro 143	Pilastro 165
ux	[mm]	1.078	1.198	2.160	2.394	0.233	0.327	0.466	0.654
uy	[mm]	0.309	0.304	0.617	0.607	0.005	0.006	0.010	0.012
u	[mm]	1.122	1.235	2.246	2.470	0.233	0.327	0.823	0.654
Δu	[mm]	2.4		4.7		0.6		1.5	





Tabella 1: Confronto fra i risultati delle simulazioni utilizzando per le coperture elementi monodimensionali o bidimensionali.



Nelle Figure 10 (a) e (b) si riportano le deformate del modello dello stabilimento, Figura 6 (b), ottenute discretizzando rispettivamente la copertura con elementi mono o bi-dimensionali. Nel caso in esame la modellazione della struttura di copertura mediante elementi mono-dimensionali porta a sottovalutare in modo drastico la sua effettiva rigidezza e quindi nel seguito si riporteranno risultati ottenuti solo mediante modellazione degli elementi di copertura (copponi, tegoli, shed etc.) mediante elementi plate.

Prove di tiro obliquo: identificazione dinamica

Anche in questo caso si riportano per brevità i risultati relativi ad una sola prova di identificazione di rilascio impulsivo svolta il 12 agosto 2013 nella campata 6 applicando il tiro ai pilastri 51



Nelle simulazioni dinamiche per ridurre l'onere computazionale si è modellata solo una porzione della struttura comprendente anche le due campate e le 2 pilastrate adiacenti a quella ove è avvenuta effettivamente la sperimentazione, Figura 12. Per questo modello si sono considerate due ipotesi limite di comportamento:

- *Ipotesi 0*: il modello è considerato separato dal resto dello stabilimento
- *Ipotesi 1*: Il modello è vincolato rigidamente ortogonalmente ai piani lungo cui è attuata la separazione dal resto dello stabilimento

Il carico dinamico è stato applicato in modo linearmente crescente per un periodo di 30 secondi per poi annullarsi in modo repentino in 0,1 s, come mostrato in Figura 13; inoltre il programma

Figura 12: Modello ridotto utilizzato per la simulazione delle prove di caratterizzazione dinamica. te crescen- Midas Gen richiede come dato di input il coefficiente di smorodo repen- zamento che sulla base delle registrazioni sperimentali è stato



assunto x = 0,06.

Figura 13: Modellazione del carico impulsivo in funzione del tempo in direzione x e y e 75 ad una quota di circa 4 m, Figura 11. Il "fusibile" si è rotto in corrispondenza di una forza di circa 40 kN.



Figura 11: Prova di rilascio dinamico campata 6 corpo di fabbrica 22. (a) geometri a della prova, (b) individuazione della posizione della prova



Durante le prove sperimentali gli accelerometri hanno rilevato le accelerazioni nei punti di misura nel dominio del tempo. Per poter confrontare i dati sperimentali con i risultati delle simulazioni numeriche, occorre dopo avere opportunamente filtrato i segnali per eliminare il rumore di fondo, trasferirli nel dominio delle frequenze applicando la trasformata rapida di Fourier (FFT).

Nelle Figure 14 (a) e (b) vengono riportate le frequenze ottenute col modello numerico sviluppato in Midas Gen assumendo le due ipotesi sopra descritte, le prime tre frequenze calcolate sono confrontate con quelle ricavate sperimentalmente in Tabella 2. Si osservi l'ottimo accordo fra la prima frequenza misurata e quella fornita dai modelli numerici, inoltre c'è una ottima coincidenza nella prima forma modale sia misurata che calcolata corrispondente ad una traslazione nella direzione ortogonale alle pilastrate, Figura 15. Infine le frequenze valute dal modello vincolato secondo l'ipotesi n° 1 risultano sistematicamente superiori a quelle valutate dal modello in assenza di vincoli perimetrali essendo esso più rigido.



Figura 14: Frequenze rilevate dalla modellazione della prova di rilascio dinamico nei diversi punti all'estremità superiore dei pilastri strumentati; (a) ipotesi 0, (b) ipotesi 1

	Da prove in sito	Modello f.e.m. Ip. "0"	Modello f.e.m. Ip. "1"
Modo 1	1.29 Hz	1.11 Hz	1.14 Hz
Modo 2	2.58 Hz	1.71 Hz	2.93 Hz
Modo 3	2.75 Hz	3.00 Hz	3.58 Hz

Tabella 2: Confronto fra le frequenze determinate sperimentalmente e numericamente



Figura 15: Prova di tiro obliquo primo modo di vibrare: (a) ipotesi 0, (b) ipotesi 1.



Prova di tiro verticale: identificazione dinamica

La prova di "tiro verticale " è stata effettuata nella campata 7 del corpo di fabbrica 18, Figura 9, e a parte la diversa modalità di carico per simularne il comportamento dinamico si sono utilizzati i modelli riportati in Figura 12 e descritti in precedenza. Nelle Figure 16 e 17 si mostrano gli accelerogrammi calcolati in corrispondenza ai punti di misura, sia nel dominio del tempo che in quello delle frequenze rispettivamente per i modelli in assenza di vincoli perimetrali (a) e vincolati secondo l'ipotesi n° 1. Si osservi in Figura 17 come in entrambi i modelli siano molto prossime le prime 2 frequenze proprie. In Tabella 3 le prime quattro frequenze calcolate sono confrontate con quelle ricavate sperimentalmente.



Figura 16: Simulazioni con Midas Gen, accelerazioni in direzione X nel dominio del tempo; (a) ipotesi di vincolo 0. (b) ipotesi di vincolo 1.





Figura 17: Simulazioni con Midas Gen, accelerazioni in direzione X nel dominio delle frequenze; (a) ipotesi di vincolo 0. (b) ipotesi di vincolo 1.

		Da prove in sito	Modello f.e.m. Ip. "0"	Modello f.e.m. Ip. "1"
Tabella 3, Confronto	Modo 1	3.99 Hz	3.76 Hz	3.80 Hz
fra le frequenze	Modo 2	4.16 Hz	3.78 Hz	3.87 Hz
determinate	Modo 3	4.28 Hz	3.84 Hz	4.57 Hz
sperimentalmente e numericamente	Modo 4	4.97 Hz	5.20 Hz	5.48 Hz

Infine la Figura 18 mostra la prima forma modale, vibrazione della copertura in direzione verticale, valutata sperimentalmente (risulta una spezzata perché gli accelerometri in campata sono stati collocati solo in mezzeria), mentre in Figura 19 è riportata la stessa forma modale valutata con il programma Midas Gen nell'ipotesi di vincolo n° 1.







Figura 19: Prima forma modale valutata con il programma Midas Gen, nella ipotesi di vincolo 1. Frequenza 3,80 Hz.

Bibliografia

[1] Toni A., Tesi di laurea specialistica, Università di Ferrara, Marzo 2014. Relatori Proff. Tralli A. e Minghini F., ing. Loffredo G. [2] "Midas Gen" versione 2.1, 2013.

[3] Ewins D.J. (1984). Modal Testing: Theory and Practice, John Wiley & Sons, New York.

[4] Cunha Á, Caetano E. (2006). Experimental modal analysis of civil engineering structures. Sound and Vibration 40(6):12-20.

Corrispondente

Antoniomichele.tralli@unife.it