



PROVE SPERIMENTALI EX-ANTE PER L'IDONEITÀ ALL'USO DI TRAVI IN C.A.P.

L. Jurina, E.O. Radaelli
Politecnico di Milano, Dipartimento ABC, Milano

D. Rampoldi
Ingegnere libero professionista, Milano

A. Infosini, F. Silva
Provincia di Monza e Brianza, Monza

SOMMARIO

Con lo scopo di caratterizzare meccanicamente 144 travi in c.a.p., stoccate all'aperto senza protezioni ed inutilizzate per oltre 13 anni, e di determinarne le capacità resistenti residue, è stata utilizzata una procedura di tipo teorico-sperimentale basata sul confronto tra i dati di progetto forniti dal produttore, i risultati di prove diagnostiche non distruttive ed i valori a rottura ricavati da 6 prove di carico a collasso. Al termine della campagna sperimentale si è giunti alla formulazione di un certificato di idoneità statica e conformità all'uso, che ha consentito l'impiego di tali travi in sicurezza. Sono state altresì condotte prove di tipo dinamico, prima e dopo il collasso delle 6 travi, al fine di individuare un intervallo di frequenze corrispondente alle situazioni di trave "integrata" e di trave "danneggiata". La caratterizzazione dinamica è stata impiegata come metodo speditivo di verifica prima della messa in opera di ciascuna trave.

1. PREMESSA

La presente memoria descrive l'approccio di tipo teorico-sperimentale adottato dagli autori per giungere all'emissione di un certificato di idoneità statica e conformità all'uso relativo alle 144 travi in c.a.p., citate nel sommario.

Questa procedura si è innestata all'interno di un'articolata vicenda concernente i lavori per la realizzazione della variante per il centro ospedaliero di Monza – 2° lotto, lungo la SP6 "Monza – Carate Brianza", avviati dalla Provincia di Milano nel lontano anno 2000 e terminati, incompiuti, nel 2005, causa il verificarsi di sfavorevoli congiunture, durante lo svolgimento dell'appalto.

Per quanto sopra, furono varate sole 23 travi, mentre le rimanenti 144 furono stipate in un

fondo limitrofo all'area di cantiere (di cui circa 1/3 poggiate su terra), affinché potessero essere impiegate nell'ambito dei lavori inerenti il progetto di completamento approvato da Provincia di Milano nel 2009.

Quando, nel corso del 2012, il procedimento realizzativo fu trasferito per competenza territoriale alla Provincia di Monza e della Brianza, quest'ultima provvide alla redazione di un nuovo progetto esecutivo revisionato ed aggiornato, analizzando scrupolosamente la problematica delle travi depositate da anni ed esposte alle intemperie.

Anche per ragioni legate al tempo trascorso, prima di considerare l'eventuale acquisto di nuove travi in cap per la copertura della galleria con conseguente aggravio dei costi di realizzazione dell'opera è stato ritenuto indispensabile richiedere, nel 2014, l'esecuzione delle verifiche ex-ante dei manufatti depositati, così da poter valutare la possibilità di riutilizzo degli stessi.

Presso il produttore è stato quindi reperito tutto il carteggio disponibile riferito alle caratteristiche tecniche-geometriche delle travi in cap, così da agevolare le operazioni di verifica.

Quale attività preliminare, si è dunque proceduto alla verifica ed analisi della documentazione disponibile relativa alle 144 travi; in particolare, sono state analizzate le "Attestazioni di conformità" sulle prove di resistenza a compressione del calcestruzzo impiegato e prove di resistenza a trazione dell'acciaio in tondino, dei trefoli e della rete elettrosaldata, messe a disposizione dal produttore delle travi prefabbricate; sono state altresì valutate la "Relazione di conformità dei manufatti", redatta e fornita dal prefabbricatore, e la "Relazione di calcolo del progetto costruttivo" originale del sottopasso, comprese le tavole di produzione.

La soprelencata documentazione, consultata fin dalle prime fasi di verifica, ha consentito di ottenere un adeguato livello di conoscenza in termini geometrici.

Ciascuna trave ha una larghezza pari a 199 cm all'intradosso e 135 cm all'estradosso, un'altezza di 75 cm ed una lunghezza di 14,60 m. Oltre all'armatura lenta, sono presenti 20 trefoli Φ 0,6" all'intradosso e 4 trefoli, sempre da 0,6", all'estradosso.



Figura 1. Le 144 travi in c.a.p. stoccate all'aperto e oggetto di verifica

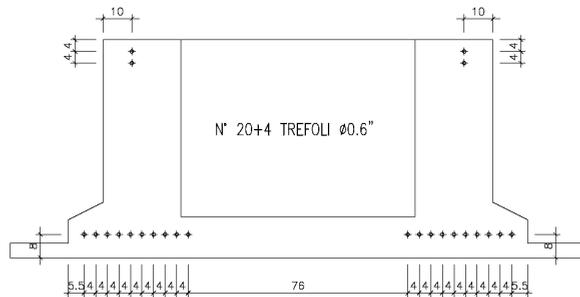


Figura 2. Sezione della trave in c.a.p.

Dopo aver verificato la coerenza geometrica tra quanto indicato in progetto e quanto effettivamente prodotto, si è proceduto con la determinazione delle proprietà meccaniche residue del calcestruzzo e dell'acciaio, mediante approfondite indagini diagnostiche in situ e prove di laboratorio su campioni prelevati dalle travi.

2. LA DIAGNOSTICA PREVENTIVA

Le indagini diagnostiche sono state condotte durante due campagne sperimentali (2013 e 2014) dalla società specializzata 4EMME, per conto della Provincia di Monza.

La resistenza residua del calcestruzzo è stata determinata in base ai risultati di prove di compressione eseguite su carote estratte dalle travi e di battute sclerometriche eseguite in situ.

Quindici campioni cilindrici di calcestruzzo di diametro pari a 45 mm e altezza variabile sono stati prelevati con carotiere, in varie posizioni e per diversi elementi, e sottoposti a prova di compressione,

Prima dell'esecuzione delle prove di compressione si è proceduto a tagliare e rettificare i provini. Il rapporto diametro/altezza al momento dell'esecuzione della prova risultava pari all'unità e pertanto la resistenza in opera ottenuta, seppure su campioni di piccole dimensioni, risulta confrontabile con la resistenza cubica del calcestruzzo ($f_c = R_c$).

Il valor medio della resistenza cubica del calcestruzzo è risultato pari a $55,4 \text{ N/mm}^2$, valore allineato alla classe di calcestruzzo prevista in progetto (C45/55); in accordo con quanto riportato al paragrafo 11.2.6 delle NTC2008 relativo ai controlli di accettazione in opera, la resistenza media in opera è risultata superiore all'85% della resistenza definita in fase di progetto, ossia a $46,75 \text{ N/mm}^2$, indice di un calcestruzzo dalle buone qualità meccaniche.

I provini cilindrici sono stati sottoposti a "test colorimetrico" con fenoltaleina per determinare la profondità della carbonatazione, la quale è risultata modesta e ovunque inferiore ai 5 mm, ossia inferiore allo spessore del copriferro.

Il risultato ottenuto, indice di una porosità molto ridotta e di una buona compattezza del calcestruzzo, ha ragionevolmente consentito di trascurare il fenomeno della carbonatazione e la conseguente ossidazione delle barre, nonostante la prolungata esposizione dei materiali agli agenti atmosferici.

Tale circostanza si è rivelata particolarmente utile in vista del reimpiego delle travi in un ambiente potenzialmente “aggressivo”, soggetto a cicli periodici di gelo e disgelo, in un’ottica di durabilità e di vita utile dei manufatti.

In ogni caso, al fine di meglio valutare la presenza di fenomeni corrosivi che avrebbero potuto compromettere la capacità portante degli elementi, sono state condotte quindici prove sul potenziale di corrosione, in punti prossimi ai carotaggi.

Anche questo tipo di indagine, supportato da ispezioni visive nelle zone scarificate, ha confermato la condizione di passività delle barre e la elevata durabilità dei materiali a suo tempo impiegati nella realizzazione delle travi in c.a.p..

In figura 4 si riportano alcuni risultati ottenuti mediante mappatura colorimetrica del potenziale, in cui compare in ascissa la distanza progressiva (in centimetri) delle letture effettuate a partire dalla mezzeria della trave, mentre in ordinata i colori si riferiscono ai valori del potenziale rilevati.

Nelle zone tra una maglia e l’altra del reticolo i valori sono stati ricavati per interpolazione dei dati.

Per l’interpretazione dei valori ottenuti si riporta in figura 4 la scala dei potenziali in relazione alle condizioni di corrosione, tratta dalla norma UNI 10174.

Sono stati indagati ulteriori quindici punti mediante battute sclerometriche (dodici battute per ciascun punto) che hanno confermato una resistenza media del calcestruzzo in opera pari a 47 N/mm^2 e dunque superiore a quanto richiesto da normativa.

I materiali possedevano pertanto caratteristiche meccaniche tali da garantire il riutilizzo delle travi, almeno in linea teorica, come suffragato dalle verifiche numeriche, a flessione e taglio, condotte sulle sezioni sollecitate dai nuovi carichi previsti in progetto.

Si è proceduto tuttavia all’esecuzione di alcune prove sperimentali a collasso, al fine di determinare il reale carico di rottura, da confrontare con il dato ottenuto numericamente.

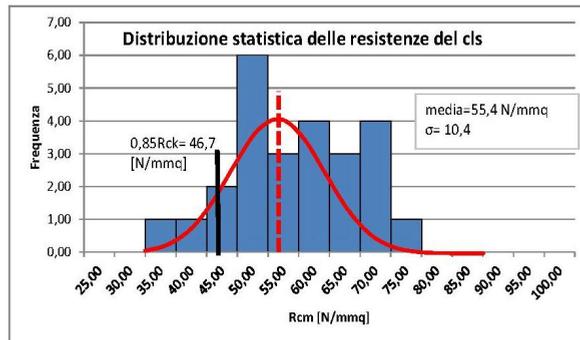


Figura 3. Distribuzione statistica delle resistenze del calcestruzzo ottenute dalle indagini.

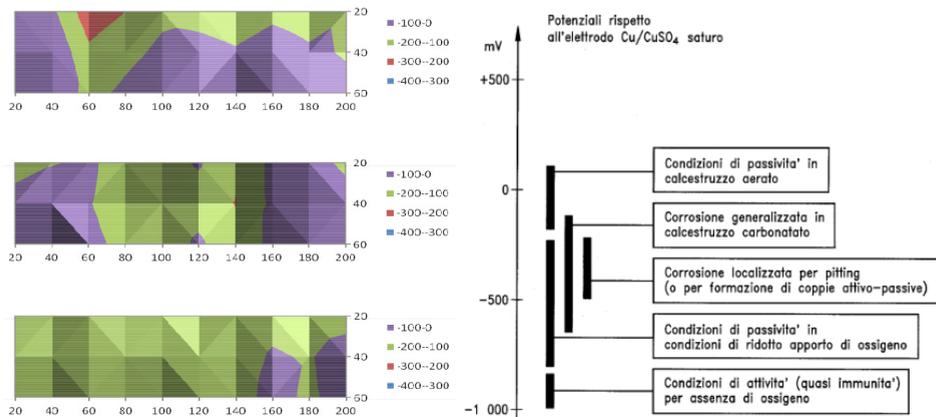


Figura 4. Mappature del potenziale di corrosione (a sinistra) e valori di potenziale assunto da armature in acciaio al carbonio in relazione alle condizioni di corrosione secondo UNI 10174 (a destra)

3. LE PROVE SPERIMENTALI

La campagna sperimentale ha previsto 6 prove distruttive, corrispondenti al 4% dell'intero lotto di 144 travi. Se i risultati non fossero stati soddisfacenti, sarebbero state sottoposte a prova di carico ulteriori 2 travi, per un totale di 8 travi, pari al 5,5% dell'intero lotto, così da disporre di una popolazione statisticamente accettabile. In realtà, come si vedrà nel presente paragrafo, le prime 6 prove sono risultate sufficienti.

3.1. Layout di prova

Preliminarmente alla progettazione del layout di prova, sono stati ricavati i valori di carico a rottura e di deformazione massima, mediante calcolazioni analitiche.

Così facendo è stata dimensionata la strumentazione di prova, ossia pistoni idraulici e contrasti per l'applicazione del carico

Le prove di carico si sono svolte all'interno dell'area di stoccaggio, previo decespugliamento, spianatura con mezzo meccanico dell'area ed esecuzione di una trincea di dimensioni 13x4x1.2m, per consentire il posizionamento dell'attrezzatura di prova e l'osservazione diretta, durante le operazioni di carico.

L'applicazione del carico sulle travi è avvenuta mediante pistoni idraulici, contrastati da bilancini in carpenteria metallica, i quali sono stati collegati a 8 micropali valvolati in acciaio, infissi nel terreno, di lunghezza 5 metri e diametro 114 mm, atti a resistere ad una forza di trazione minima di 35 t ciascuno, corrispondente alla portata di ciascun pistone idraulico.

Lungo due file parallele le teste dei pali sono state collegate a profili metallici contrapposti (1+1 profili UPN 300 per ognuna delle 2 file). I profili sono stati saldati a completa penetrazione per garantire una adeguata collaborazione tra gli 4+4 micropali infissi.

Due delle 144 travi sono state posizionate in direzione ortogonale alle travi da testare, con funzione di appoggio alle estremità, garantendo una luce libera netta pari a 14,2 m.

Il carico è stato applicato mediante pistoni idraulici a trazione, contrastati in sommità da 2 bilancini costituiti da una coppia di UPN 300, di lunghezza pari a 2,8 m, contrapposti e collegati tra loro.

Il carico applicato è stato misurato mediante celle di carico, mentre gli spostamenti verticali delle travi sono stati valutati attraverso letture ottiche, utilizzando un livello di precisione, con precisione $\pm 0,6$ mm/Km, posto a distanza di sicurezza.

Le prove di carico si sono svolte in due fasi successive. In ciascuna fase sono state progressivamente portate a rottura 3 travi, scelte tra quelle che a suo tempo erano state stoccate in posizione bassa, media e alta rispetto al terreno.

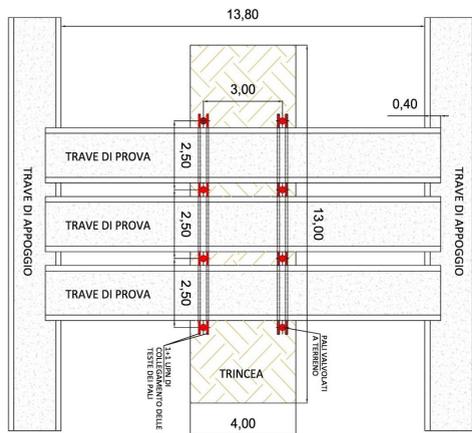


Figura 5. Layout di prova.

3.2. Esiti delle prove a collasso

Il comportamento delle travi, a cui sono stati applicati due carichi concentrati e distanti 1,5 m dalla mezzeria, si è dimostrato pressoché analogo in tutte le sei prove.

In particolare, per un carico mediamente compreso tra 70 t e 80 t sono apparse le prime fessure all'intradosso, lungo la direzione corta, parallele e distanti circa 20 cm una dall'altra.

La rottura effettiva delle travi è avvenuta in modo fragile, dovuta al raggiungimento della resistenza a compressione del calcestruzzo nelle fibre superiori compresse.

Stante il meccanismo fragile, durante le prove si sono verificate consistenti espulsioni di calcestruzzo compresso, in corrispondenza della mezzeria.

Provino	Carico di collasso (t)	Spostamento massimo (mm)
1	> 140	92
2	> 140	85
3	140	80
4	145	78
5	120	95
6	120	92

Tabella 1. Risultati ottenuti dalle prove sperimentali.

In tabella 1 vengono riportati gli esiti delle prove sperimentali, in termini di carico a rottura e di freccia in mezzeria.

Si osserva che tutte le travi hanno superato il carico di collasso atteso da calcolo che, adottando uno schema di trave in semplice appoggio soggetta a due carichi concentrati, era stato stimato pari a 100 t.

Le due travi numero 1 e 2 hanno raggiunto, senza collassare, il limite di carico applicabile da parte dei pistoni idraulici; in tali situazioni si è preferito interrompere la prova per non danneggiare la strumentazione.

In termini di freccia teorica, al carico applicato di 100 t corrisponde una freccia attesa in mezzeria pari a 80 mm. Per un carico di 120 t la freccia attesa era pari a 96 mm

Le frecce sperimentali misurate risultano tutte inferiori ai 96 mm attesi, per tutti i carichi raggiunti, compresi quelli superiori a 120 t.

Dalle prove si è pertanto evinto un comportamento delle travi più che soddisfacente ed oltre le attese, dimostrando un'apprezzabile risorsa strutturale aggiuntiva che non poteva essere valutata mediante la sola verifica numerica.

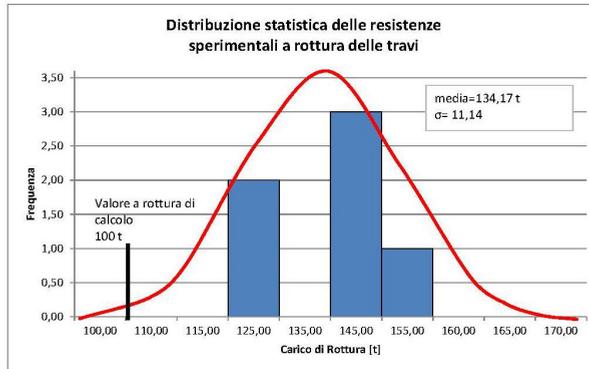


Figura 6. Distribuzione statistica dei carichi a collasso delle 6 travi investigate.

In figura 6 si riporta il valore medio del carico di collasso ottenuto sperimentalmente e la relativa gaussiana. Si osserva che valori di carico a rottura inferiori alle 100 t previste da calcolo rappresentano, statisticamente, circa l'1% della popolazione.

Tale percentuale è più che accettabile se si considera che, nella trattazione degli stati limite, la normativa tecnica richiede il 5%, secondo il principio dell'affidabilità strutturale, inteso in termini probabilistici.

Alla luce di ciò si è pertanto deciso di non procedere alle 2 ulteriori prove aggiuntive.



Figura 7. Collasso di una trave a 120 t e dettagli della rottura per compressione e flessione

4. LE PROVE DI IDENTIFICAZIONE DINAMICA

4.1. Prove condotte durante la campagna sperimentale

Sebbene da un punto di vista probabilistico, coerentemente con la normativa vigente, la validazione delle travi fosse stata assicurata dai calcoli e soprattutto dalle 6 prove sperimentali condotte ex-ante, ciò che ha consentito la stesura di una dichiarazione di idoneità, non si è esclusa a priori la possibilità di risposte inadeguate di alcune delle travi.

Le cause di tali risposte non sarebbero tanto da ricercare in una intrinseca debolezza statica oppure nel degrado legato al tempo trascorso, come dimostrato sperimentalmente, quanto potrebbero risiedere in eventi accidentali verificatisi in passato e causati da movimentazioni e accatastamenti non idonei, che potrebbero aver provocato lesioni, non controllabili con analisi statistiche, né prevedibili con modalità campionarie come quelle adottate durante la validazione.

Pertanto è stato suggerito alla Committenza, che ha accettato, l'esecuzione di prove dinamiche, per cercare una possibile correlazione tra la frequenza propria delle travi e la eventuale presenza di lesioni o carenze strutturali non evidenziabili a vista.

Lo scopo dell'indagine dinamica è quello di individuare sperimentalmente la prima frequenza propria di vibrazione della trave che, essendo legata alle caratteristiche geometriche e meccaniche della struttura, rappresenta un valido strumento di controllo dell'eventuale variazione delle condizioni generali e quindi della presenza di danneggiamenti latenti.

Le frequenze proprie sono state misurate per 5 delle 6 travi testate, in due differenti configurazioni, ossia nella condizione "integra", prima della prova, e nella situazione "danneggiata", post collasso.

L'eccitazione della struttura è stata di tipo naturale, legata alle sollecitazioni ambientali, ed è stata valutata mediante un "tomografo" digitale di grande sensibilità, posto in mezzzeria della trave.

La tabella 2 seguente riporta i risultati ottenuti.

Trave	Frequenza pre-collasso (Hz)	Frequenza post-collasso (Hz)
1	7,5	7,8
2	9,1	8,4
3	8,4	-
4	8,4	-
5	-	-
6	-	5,3

Tabella 2. Frequenze proprie misurate sulle travi indagate.

In linea teorica è noto che tanto maggiore è il carico di collasso (e tanto minore la freccia), tanto più alta dovrebbe essere la frequenza, in quanto la trave più resistente e rigida presenta meno danneggiamenti al suo interno.

Nella pratica, i valori ottenuti da questa campagna di prove non hanno presentano correlazioni definite in modo univoco tra frequenza, freccia e carico di collasso.

Si nota tuttavia che la frequenza diminuisce quando il manufatto viene lesionato e questo si evidenzia con chiarezza nella Trave n°2, parzialmente fessurata, ma non collassata.

Nella Trave n°1, che avrebbe dovuto mostrare lo stesso comportamento, si nota invece un leggero aumento, legato tuttavia al fatto di aver misurato la frequenza senza rimuovere totalmente la apparecchiatura di carico, ciò che ha leggermente incrementato la sua rigidezza, alterando il risultato atteso.

Le travi portate al collasso totale, ossia le n° 3, n° 4 e n° 5, forniscono il solo valore pre-collasso. Per la trave n° 6 si è misurato il solo valore post-collasso.

È interessante notare come le travi testate con strumentazione dinamica prima della prova di carico (oppure testate dopo la prova di carico, ma senza giungere a collasso) abbiano restituito frequenze comprese tra 7,5 e 9,1 Hz.

Il risultato ottenuto provando una trave già collassata (la n° 6) ha invece fornito una frequenza decisamente inferiore, pari a 5,3 Hz.

A seguito di queste considerazioni è stato definito un range di frequenze medio-alte (7,5 – 9,1 Hz) che indica di travi integre. Per valori inferiori alla media è lecito supporre la presenza di difetti o lesioni.

Adottando questo criterio si è proposto alla Committenza di testare sperimentalmente tutte le restanti 138 travi, mediante semplici prove dinamiche, prima dell'operazione di varo definitivo, così da individuare in maniera speditiva, ma sufficientemente accurata, eventuali travi anomale, da scartare.

Prima di illustrare i risultati ottenuti, si vuole commentare il processo di calcolo numerico che è stato adottato a supporto delle prove di identificazione dinamica.

In un'ottica di analisi di sensitività sono stati implementati differenti modelli ad elementi finiti, così da confrontare il risultato numerico con quello sperimentale.

Si riportano in figura 8 a titolo esemplificativo le deformate modali di due travi. Per la trave n°3 la frequenza è stata calcolata nella condizione "integra", mentre per la trave n° 6 si è fatto riferimento alla situazione "danneggiata", ricorrendo alla riduzione del modulo elastico del calcestruzzo nel tratto evidenziato, per simulare una fessura aperta.

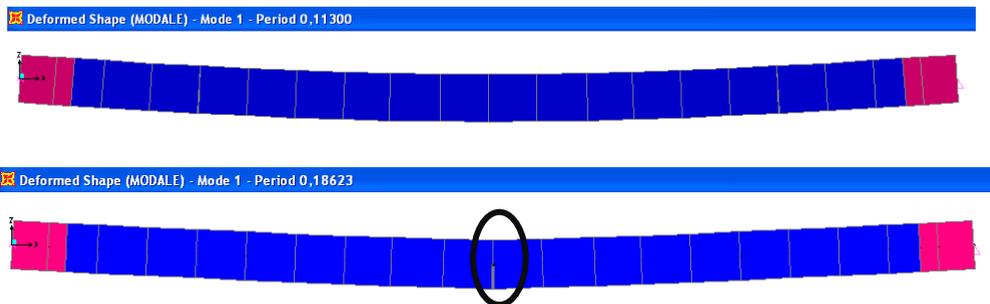


Figura 8. Trave "integra" n° 3 (in alto) e trave n° 6 "fessurata" (in basso).

In Tabella 3 si riportano i risultati delle simulazioni numeriche, a confronto con quelle sperimentali dove, anche se non puntuale, è evidente una correlazione in media tra le due.

Le discrepanze vanno probabilmente ricercate nella difficoltà di determinare l'effettiva distanza netta tra i vincoli, parametro che entra "al quadrato" nella definizione della frequen-

za propria. Le reali condizioni di cantiere non permettono infatti l'esatta identificazione del punto di vincolo meccanico/teorico.

Nonostante ciò, la media delle frequenze misurate in situazione di trave "integra" è pari a 8,35 Hz, la quale è confrontabile con quella calcolata numericamente, che risulta 8,53 Hz.

Lo stesso accade per le travi "lesionate", in cui le due frequenze, quella misurata in situ e quella calcolata numericamente, risultano rispettivamente pari a 5,37 Hz e 5,3 Hz, ossia adeguatamente confrontabili.

Trave	Frequenza pre-collasso misurata (Hz)	Frequenza pre-collasso calcolata (Hz)
1	7,5	8,31
2	9,1	8,68
3	8,4	8,85
4	8,4	8,29
5	-	7,92
6	-	8,56
media	8,35	8,53

Tabella 3. Confronto tra le frequenze proprie misurate e quelle ottenute numericamente, avendo per queste ultime variato il modulo elastico, sulla base dei risultati diagnostici, in funzione della posizione di stoccaggio (alta, media e bassa), corrispondente a differenti livelli di aggressione atmosferica.

4.2. Prove condotte prima del varo delle travi

Alla data di redazione della presente memoria, rispetto alle originarie 138 travi stoccate (al netto delle 6 portate a collasso durante le prove di carico effettuate nel 2014), sono state sottoposte a prove dinamiche un totale di 75 travi, ciascuna misurata prima del varo.

Sulla base della campagna sperimentale condotta nel 2014 e tenuto conto delle frequenze ottenute pre e post-collasso, sono stati individuati i limiti di accettabilità.

In particolare si ha che per frequenze inferiori a 5,5 Hz la trave è da considerarsi non idonea, per valori tra 5,5 Hz e 7,5 Hz l'accettabilità deve essere ulteriormente approfondita, mentre per valori superiori a 7,5 Hz la trave è accettata e può essere posta in opera.

Delle 75 travi analizzate si è ottenuto che:

- 1 trave è stata temporaneamente sospesa, a causa di una frequenza < 7.5 Hz ma > 5.5 Hz;
- 3 travi, seppur idonee, non sono state varate a causa della necessità di riparazioni locali;
- 71 travi sono state varate in quanto hanno restituito una frequenza $> 7,5$ Hz e pertanto ritenute accettabili

Delle 71 travi varate, 9 sono state successivamente sottoposte a prova di carico in sito.

Il positivo risultato ottenuto ha consentito l'emissione, da parte del collaudatore statico, del certificato di idoneità statica, così da permettere l'apertura al traffico veicolare della viabilità stradale sopra alle medesime.



Figura 9. Rilevazioni dinamiche prima del varo e travi varate per la realizzazione del nuovo sottopassaggio.

5. CONCLUSIONI

L'approccio teorico-sperimentale adottato per definire l'idoneità di 144 travi in c.a.p. stoccate per oltre 13 anni ha previsto una fase diagnostica preliminare di caratterizzazione meccanica e geometrica dei materiali, una seconda fase sperimentale in cui 6 travi scelte a campione sono state testate fino a rottura ed infine una terza fase di identificazione dinamica del danno. Le prove a rottura hanno rivelato la presenza di significative risorse strutturali, non identificabili mediante le sole verifiche numeriche. Il valore atteso a rottura di 100 t è stato infatti ampiamente superato, portando a resistenze ben oltre 120 t.

Le prove dinamiche, che durante la sperimentazione hanno individuato un range di frequenze corrispondente alla situazione di trave "integra" e di trave "lesionata", hanno costituito un valido supporto in fase di cantiere, prima del varo delle travi.

Per ciascuna trave movimentata è stata infatti misurata la frequenza propria da confrontarsi con i valori di riferimento, in modo da scartare eventuali travi meno performanti di quelle integre. Le risposte ottenute sono state più che soddisfacenti. Infatti, su 75 travi ad oggi testate, ben 71 sono risultate idonee, mentre solo 4 sono state temporaneamente sospese.

Il procedimento adottato ha portato ad una significativa economia per la Committenza rispetto alla potenziale scelta di scartare tutte le 144 travi, acquistandole ex novo.

BIBLIOGRAFIA

Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P.: Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition, *Proceedings of IMAC 18*, San Antonio (TX), USA, 2000

Fabbrocino G., Di Fusco A. A., Manfredi G.: La misura della resistenza del calcestruzzo nelle strutture esistenti in zona sismica, *AiPnD Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive*, Milano, Italy, 2005

[Http://www.jurina.it](http://www.jurina.it)