

di
FRANCESCO MARZULLO,
 Direttore Tecnico e fondatore
 della società MARZULLO Srl,
 affermato studio di Progettazione
 Architettonica ed Ingegneria
 Strutturale di Roma in attività dal
 1990, ha iniziato la sua carriera
 lavorando per 15 anni, dal 1972
 al 1987, presso lo Studio del
 Prof. R. Morandi, ricoprendo
 inizialmente il ruolo di
 Progettista, poi quello di
 Responsabile di Progetto, infine
 quello di Responsabile delle
 Attività Progettuali.

GIORGIO SFORZA,
 Direttore Tecnico e socio
 fondatore della società ESSEBI Srl
 che dal 1992 opera nel settore
 del monitoraggio e diagnostica
 strutturale. Da oltre un decennio
 si occupa attivamente di
 dinamica strutturale, con
 particolare riferimento alla sua
 implementazione in termini di
 modale operativa. Numerosi
 sono i monitoraggi strumentali, i
 collaudi dinamici e le
 caratterizzazioni dinamiche
 sperimentali eseguite da ESSEBI
 su ponti e viadotti

VERSIONE ARTICOLO ONLINE
 FAST FIND AR1573



INGEGNERIA STRUTTURALE

VIADOTTO SUL POLCEVERA: FINE PREMATURA DI UNA PIETRA MILIARE INGEGNERISTICA DEL DOPOGUERRA

A seguito del crollo della pila 9 del viadotto sul Polcevera, che ha provocato l'immane disastro del 14 agosto 2018, si vuole con la presente memoria fare il punto della situazione e soprattutto chiarezza su un'opera d'arte di grande rilevanza ingegneristica che solo ora, seppure funestamente, ha raggiunto una notorietà enorme.

Dopo una descrizione tecnica, indirizzata soprattutto al faticoso cavalletto-antenna con relativa tirantatura, che costituisce l'essenza del sistema bilanciato della pila 9, si passa a valutare le probabili cause del crollo, gli interventi di risanamento strutturale eseguiti un ventennio or sono sugli stralli del sistema bilanciato della pila 11 ed a ipotizzare quelli che si sarebbero potuti fare, soprattutto sulla base di un continuo controllo e monitoraggio strumentale dell'opera. Monitoraggio finalizzato alla programmazione di una mirata e tempestiva manutenzione, soprattutto considerando che quanto accaduto non è da considerarsi un fatto isolato, ma il proseguimento di una serie di eventi legati principalmente alla vetustà del patrimonio viario nazionale.

Sul raccordo E80, che collega l'autostrada A10 Genova-Savona con l'autostrada A7 Genova-Serravalle, l'attraversamento della valle del torrente Polcevera e di una zona densamente abitata di connessione tra l'area di Cornigliano a quella di Sampierdarena, con edifici civili ed industriali, e interessata anche da impianti ferroviari di grande importanza, venne risolto ricorrendo ad un viadotto di grandi dimensioni e di concezione unitaria. Esso venne realizzato dalla Società Condotte d'Acqua a metà degli anni '60 dello scorso secolo: i cantieri si aprirono nel 1964 ed il tutto si concluse con il collaudo, alla presenza dell'allora Presidente della Repubblica Giuseppe Saragat, il 4 settembre 1967.

Progettista fu il prof. Riccardo Morandi che assieme a Freyssinet, Leonhardt e Maillart, con le sue concezioni decisamente innovative, ha modificato il modo di concepire e realizzare ponti a livello mondiale. Quest'opera d'arte è il classico esempio di inserimento di una grande infrastruttura in un fitto tessuto urbano ed industriale, con l'intendimento di realizzare una corretta composizione dal punto di vista formale e paesaggistico. Essa rappresenta anche una soluzione progettuale riproposta, quasi in carbon copy, in altri due siti: sul lago Maracaibo in Venezuela (ponte General Rafael Urdaneta) e vicino Beida in Libia (Ponte sul Wadi al-Kuf). Morfologicamente il Ponte sul Polcevera è costituito da quattro piste di raccordo e dal viadotto principale. Quest'ultimo, esempio di estremo razionalismo in cui l'essenziale geo-

IL PROGETTISTA DEL VIADOTTO CHE COLLEGA L'AUTOSTRADA A10 GENOVA-SAVONA CON L'AUTOSTRADA A7 GENOVA-SERRAVALLE FU IL PROF. RICCARDO MORANDI CHE ASSIEME A FREYSSINET, LEONHARDT E MAILLART, CON LE SUE CONCEZIONI DECISAMENTE INNOVATIVE, HA MODIFICATO IL MODO DI CONCEPIRE E REALIZZARE PONTI A LIVELLO MONDIALE.

metria ripercorre le linee di forza che sono capaci di garantire l'equilibrio sotto l'azione del peso proprio e del traffico stradale, si compone di una sequenza di undici campate, di lunghezze variabili tra 65 e 208 m, che trovano il loro legame di concezione in una serie di travate tutte uguali di calcestruzzo precompresso di luce pari a 36 m, vincolate a semplice appoggio su sistemi a cavalletto per le luci minori e su sistemi bilanciati per le luci maggiori, quelle cioè costituenti le tre campate principali che permettono il superamento del fascio ferroviario e dell'alveo del torrente da cui il viadotto prende il nome (Figura 1).

Il primo dei due (sistema a cavalletto) è costituito da due stilate oblique in calcestruzzo armato, collegate in testa da una travata a doppio cantilever, di lunghezza variabile, e vincolate al piede da una zattera, a sua volta poggiata su una palificata fondale di pali trivellati¹. Il secondo (sistema bilanciato), quello cioè concernente le ultime tre pile del tratto terminale sulla E80 verso Genova, è quello di maggior interesse, sia per la sua concezione ingegneristica particolare, sia perché il primo di essi, a partire dal lato Savona, è proprio quello crollato il 14 agosto 2018. Ciascun sistema bilanciato (pile 9, 10 e 11) è costituito da una zattera di fondazione nervata in calcestruzzo armato su palificata di pali trivellati di diametro superiore al metro e che raggiungono profon-

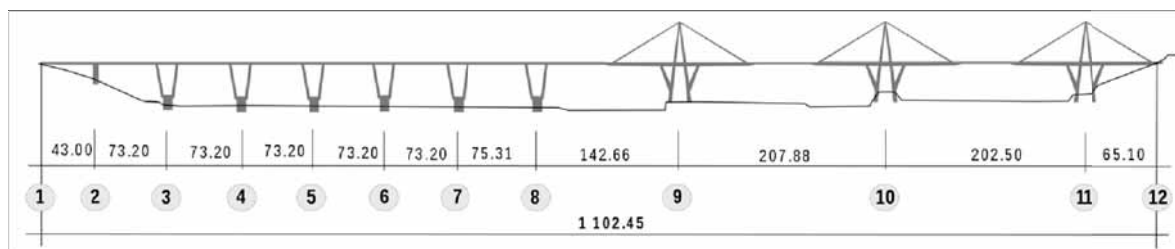


Figura. 1. Schema prospettico delle 11 campate a partire dalla spalla terminale lato Savona.

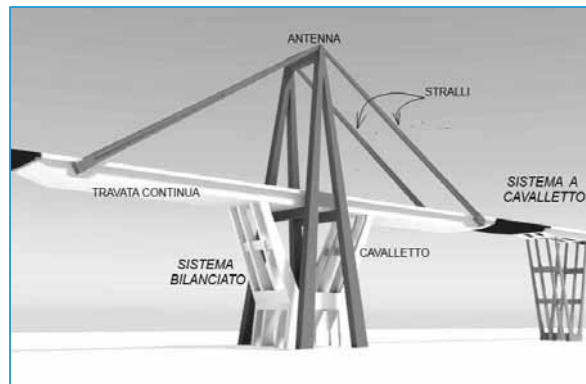


Figure. 2 e 3. Sistema bilanciato pila 9: foto prima del crollo e rendering schematico con indicazioni parti costituenti.

dità fino a 45 m; da uno speciale cavalletto in calcestruzzo armato costituito da quattro elementi ad H affiancati, collegati tra loro da trasversi, i cui estremi superiori costituiscono gli appoggi elastici per la trave di impalcato; da una antenna a quattro elementi obliqui, collegati, in entrambi i sensi, in modo tale da mantenerla indipendente dal sistema cavalletto-travata; da una travata continua in calcestruzzo precompresso, di tipo cellulare (solette all'intradosso e all'estradosso, distanziate da sei nervature) poggiante sul cavalletto. In corrispondenza del nodo d'attacco dei tiranti di sospensione la travata presenta un robusto trasverso in calcestruzzo armato precompresso ai cui estremi, da ambo i lati del ponte, sono assicurati due fasci di cavi che costituiscono i tiranti, che scavalcano l'antenna a 90 m da terra e a 45 m dal piano transitabile del viadotto (Figure 2 e 3). In particolare, la travata continua in calcestruzzo armato precompresso a sezione cellulare cava è collegata al resto in quattro punti: due centrali, posti alla distanza di circa 42 m, su due stilate inclinate, ciascuna composta di quattro pilastri di sezione variabile ed incastrata alla base sul blocco di fondazione e due laterali, alla distanza di circa 152 m, su cui arriva un doppio sistema di tiranti che passano al di sopra di uno speciale cavalletto, denominato antenna, che, collegato unicamente al blocco di

fondazione, risulta indipendente dalla travata (salvo per il legame operato dai tiranti stessi). I tiranti, collegati alla travata a mezzo di apposito trasverso, passano sopra l'antenna gravando su una speciale sella, costituita da lamiere e profilati annegati nel getto di calcestruzzo. Ovviamente, per il caso dei carichi permanenti simmetrici rispetto al piano verticale (trasversale all'asse del viadotto) passante per l'asse del sistema, essendo stata eseguita un'operazione di tesatura dei tiranti per il tramite di martinetti idraulici, tale per cui i punti di attacco di detti tiranti non abbiano subito abbassamenti rispetto alla geometria di progetto, il sistema risulta in equilibrio e la travata si comporta come un sistema continuo su quattro appoggi rigidi entro cui si è prodotto lo sforzo di autocompressione, determinato dalla componente orizzontale del tiro dei tiranti. Per tale fase il tirante singolo è costituito da 352 trefoli².

Ad evidenziare la grandiosità dell'opera, per la costruzione completa del sistema bilanciato corrispondente alla pila 9 sono stati necessari 685 giorni naturali e consecutivi. Ciò significa che nell'ipotesi di costruire due sistemi bilanciati contemporaneamente, sarebbe stato possibile terminare una porzione di viadotto di lunghezza 416 m in non meno di 23 mesi (Figura 4, pagina seguente).

Ad opera praticamente ultimata è stata effettuata la cosiddetta operazione di "omogeneizzazione". Si è costruita cioè intorno ai tiranti una opportuna guaina di calcestruzzo, affidando ai tiranti le casseforme che hanno poi contenuto i getti, in un primo tempo suddivisi in conci lunghi 3 m (perché la variazione della catenaria che si andava producendo nei tiranti per effetto del peso della guaina non inducesse tensioni pericolose) che poi, ad indurimento avvenuto, sono stati resi continui a mezzo di ulteriore riempimento con calcestruzzo tra i giunti. Si è quindi proceduto con la messa in coazione, a mezzo

PER LA COSTRUZIONE COMPLETA DEL SISTEMA BILANCIATO CORRISPONDENTE ALLA PILA 9 SONO STATI NECESSARI 685 GIORNI NATURALI E CONSECUTIVI.

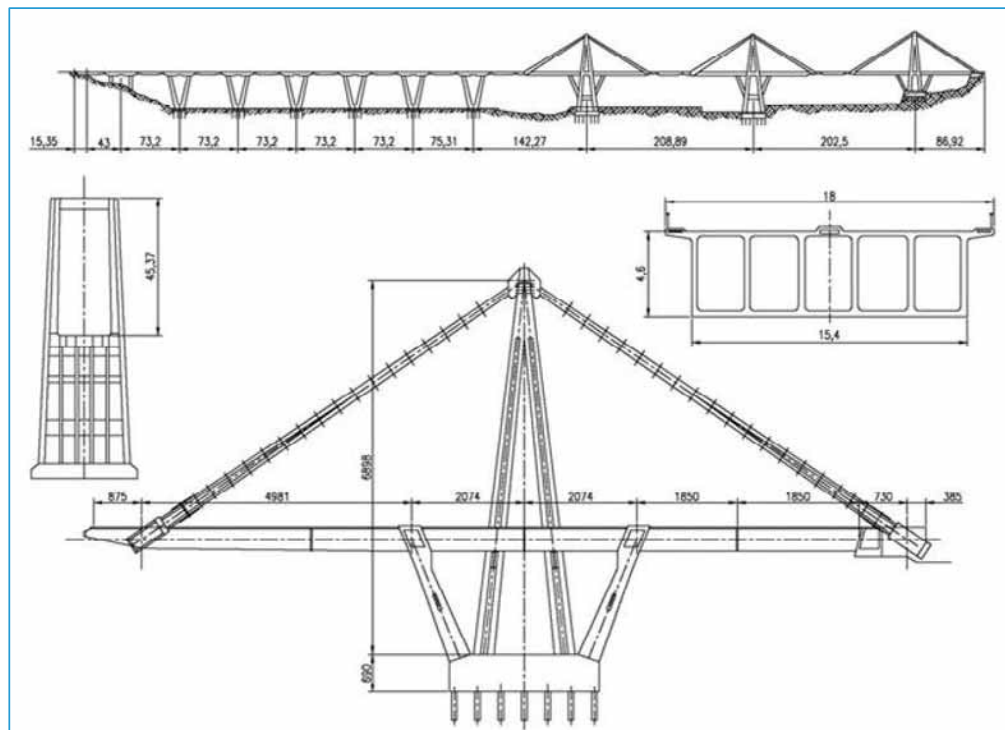


Figura. 4. Sistema bilanciato pila 9.

di altri cavi (per un complessivo di altri 112 trefoli da 12,7 mm di diametro nominale) paralleli a quelli già in esercizio, i cui terminali inferiori provvisoriamente non hanno interessato la travata orizzontale, per evitare che la tensione dei cavi aggiunti comportasse una non prevista distorsione della travata stessa. La guaina di calcestruzzo risultava così compressa ad un tasso di lavoro tale per cui il futuro passaggio dei sovraccarichi orizzontali avrebbe determinato nella guaina stessa una decompressione, senza però raggiungere il valore zero. Sono stati quindi prolungati i cavi sussidiari in maniera tale da interessare la travata e renderli quindi collaboranti per il prosieguo del tempo, ad una stessa tensione, con quelli già in esercizio (previa solita iniezione di malta di cemento nella parte aggiunta). Si è giunti così finalmente al punto in cui tutto il sistema, travate e loro appoggi, antenne e tiranti, costituiva un unicum continuo e omogeneo, tale da resistere, in campo elastico, alle azioni dovute ai carichi accidentali e all'azione del vento (il sistema all'epoca non era previsto).

Principali vantaggi dell'operazione di omogeneizzazione sono la riduzione dell'ampiezza del campo di variazione delle sollecitazioni nell'acciaio con conseguente aumento della sicurezza per fatica dovuta a tensione ondulante; la riduzione delle rotazioni della travata in corrispon-

denza degli appoggi sui ritti obliqui, per il contenimento degli allungamenti dei tiranti al passaggio dei carichi accidentali; la riduzione degli spostamenti longitudinali orizzontali della sommità del sistema antenna, per effetto di stese dissimetriche di sovraccarichi accidentali. Ed, almeno in linea teorica, l'eliminazione della fessurazione delle guaine e la conseguente presunta eliminazione della possibilità di danneggiamento dell'acciaio per opera degli agenti atmosferici. Per il fatto di essere collegato ai sistemi adiacenti a mezzo di travate appoggiate con uno dei vincoli liberamente scorrevole, il sistema bilanciato, almeno lungo la travata³, risulta praticamente insensibile alle variazioni termiche.

Quanto sopra è una veloce descrizione tecnica in grado di spiegare le intuizioni del prof. R. Morandi alla base di una grande opera ingegneristica che, con la sua arditezza, ha consentito di superare grandi luci. Il viadotto era lungo più di 1000 m e la porzione interessata dal crollo, quella intorno alla pila 9, aveva uno sviluppo di circa 200 m (Figure 5 e 6).

A questo punto è doveroso illustrare come è stato riparato nel 1992 lo strallo della pila 11, quella in continuità con il blocco di appoggio terminale in direzione di Genova. A seguito di verifiche ispettive visive e strumentali,



Figure. 5 e 6 - Porzione rossa crollata e parte rimanente lato pila 10

in concomitanza ad importanti interventi manutentivi, è stato, infatti, riscontrato un degrado diffuso riguardante gli stralli dei tre sistemi bilanciati, ed una serie di ulteriori degradi concentrati, alcuni dei quali all'attacco degli stralli con il traversone in sommità dell'antenna, nel sistema bilanciato corrispondente alla pila 11. In particolare le indagini in sito hanno avuto il duplice scopo di determinare le caratteristiche fisico-meccaniche dei calcestruzzi e delle armature tese e di valutare lo stato dei cavi di precompressione, stimandone il livello tensionale. Sui calcestruzzi è stata eseguita una diffusa campagna di diagnostica a mezzo di prove sclerometriche, agli ultrasuoni, pistola Windsor, pull-out, compressione a rottura di carote estratte; sugli acciai sono state eseguite

prove di rottura a trazione su campioni di barre e di trefoli. In particolare, per quanto riguarda gli stralli ed i cavi di precompressione, oltre alle ispezioni visive a mezzo di endoscopia, sono state eseguite misure di rilascio di tensione su carote prelevate dal rivestimento in calcestruzzo, indagini riflettometriche⁴ e rilievi del comportamento dinamico per valutare gli sforzi di trazione agenti⁵. Accertata la gravità della natura del degrado, riguardante prevalentemente le armature di acciaio armonico degli stralli, il progetto di risanamento strutturale è stato fortemente condizionato dal fattore traffico determinato dal fatto che il viadotto si trovava in un importante crocevia viario e collocato in un contesto fortemente antropizzato (Figura 7).



Figura 7. Intervento di risanamento strutturale del 1992: sostituzione strallo pila 11 e rafforzamento locale pila contigua.



Figura 8. Metodo di valutazione della sicurezza degli stralli a seguito di indagine riflettometrica.

Il recupero di base dello strallo ammalorato è stato eseguito installando in opera stralli convenzionali affiancati alle sue facce verticali e adottando al contempo un sistema di cavi corti nella sua parte terminale al fine di modularne lo stato tensionale generale a mezzo del trasferimento del tiro dai cavi vecchi ai nuovi, in modo da utilizzare la rigidità conferita dalla parte in cemento armato anche nella struttura finale riparata.

Tutti i cavi aggiunti alla fine sono stati sostituiti. L'intervento, in definitiva, seppure complesso e richiedente l'impiego di uno spiegamento di forze e di attrezzature fuori dal normale, è stato allo stesso tempo di invasività contenuta, senza alcuna interruzione della viabilità sul tratto interessato, che si è mantenuta nella norma. Soluzioni alternative, con la totale sostituzione degli stralli, avrebbero comportato più consistenti problemi di sicurezza strutturale e soprattutto la paralisi del traffico per un lungo periodo di tempo. Esse avrebbero inoltre alterato le impostazioni di base del progetto, seppure con stralli elastici sovradimensionati si sarebbe ragionevolmente assicurata la preesistente rigidità. La demolizione degli stralli, nella sua traumaticità intrinseca, avrebbe alterato l'architettura dell'opera, comportando grosse difficoltà esecutive, come quelle che si hanno quando si trasferisce il carico sospeso da vecchi a nuovi cavi, e operative, legate alla demolizione stessa, difficilmente controllabile, di tratti del calcestruzzo, e, soprattutto, avrebbe comportato reazioni di opinione per l'allarme sulla stabilità dell'opera e la conseguente perdita d'immagine che ne poteva derivare (Figura 8).

Oltre all'intervento di risanamento strutturale sugli stralli a monte e a valle del sistema bilanciato corrispondente alla pila 11, nello stesso periodo, sono stati eseguiti interventi locali sul sistema bilanciato corrispondente alla pila 10. Sulla base di quanto emerso dal calcolo del fattore

di sicurezza (Figura 8), la situazione critica era concentrata nella sezione d'attacco di sommità dell'antenna e quindi gli interventi sono stati limitati a queste zone, incrementando la sicurezza dell'intero sistema. In ultimo, per la pila corrispondente al sistema bilanciato 9, quella del crollo, poiché i livelli di corrosione erano contenuti, non si è proceduto ad alcun tipo di intervento.

Dalla suddetta disamina risulta fortemente probabile, se non altro per analogia con quanto avvenuto nel passato, che l'evento catastrofico sia dovuto al cedimento di uno strallo del sistema bilanciato della pila 9, per ammaloramenti progressivi da corrosione dei tiranti. Molti possono essere i fattori che si sono aggiunti alla causa principale, in alcuni casi influenti, in altri atti ad esaltarne gli effetti. C'è chi ha tirato in ballo il traffico, intensificatosi negli anni, ma in tal senso, seppure non si debba trascurare il maggior cimento per effetto di fatica, va ricordato che il collaudo è stato eseguito con riferimento ad una colonna di carichi militari a completa occupazione della porzione interessata, così come previsto anche dalle normative attuali, tale da rendere insignificanti le seppur sostanziali variazioni che si sono avute negli anni.

Le particolari condizioni atmosferiche del momento in cui si è verificato il crollo, poi, possono avere esaltato una situazione latente, pronta ad esplodere, anche perché la pila non era affatto stata dimensionata per queste circostanze estreme. Il torrente d'acqua meteorica sull'impalcato, staccandosi in massa, può aver provocato vibrazioni eccessive che, esaltate anche dalla consistente ventosità, possono aver fatto perdere l'appoggio della campata centrale sulla pila 9, e sovrasollecitato uno degli stralli, già in condizioni critiche a livello di degrado dei tiranti. A ciò si aggiunge che molti testimoni visivi hanno

fatto chiaro riferimento ad un fulmine che ha colpito l'antenna nella sua parte sommitale, dove curvano i tiranti, senza alcuna soluzione di continuità, molti dei quali probabilmente con aree resistenti residue ben inferiori a quelle di progetto.

In definitiva, seppure esaltato da fattori contingenti, la causa principale risiede nelle consistenti condizioni di degrado in cui versavano alcuni elementi strutturali, in particolare gli stralli, costituenti il sistema bilanciato. Quello che doveva essere un punto di forza del famoso sistema M5 del prof. Morandi, ossia che il rivestimento in calcestruzzo degli stralli fungesse da vero e proprio inibitore della corrosione, in quanto avrebbe dovuto svolgere una funzione protettiva, si è rivelato un sistema di occultamento che di fatto ha impedito l'ispezione diretta a vista del manifestarsi della stessa. Corrosione che si è vieppiù esaltata nel tempo per il fatto che l'acciaio armonico degli stralli è stato soggetto da sempre a tensioni elevatissime, che ne hanno accentuato la curva di progressione temporale (fenomeno dello Stress Corrosion Cracking-SCC).

Lo stesso prof. Morandi in un articolo del 1979 prendeva in seria considerazione gli sviluppi riguardanti gli stati limite di fessurazione, asserendo che nel caso delle strutture precomprese non si tratta di limitare il cracking a valori accettabili, ma piuttosto di effettuare tutte le indagini necessarie per evitare che questo fenomeno si manifestasse del tutto entro i limiti delle condizioni di lavoro presunte della struttura. Il fatto che le fessure siano o no presenti sta a significare l'assenza o la presenza di difetti nel progetto e nella esecuzione. Perciò, a differenza di quanto avviene in una struttura in calcestruzzo armato normale, nel precompresso il cracking è un fatto molto più raro, ma anche più serio e tale da dover richiedere, nella maggioranza dei casi, un intervento immediato. In una struttura precompressa, agire tempestivamente contro i fenomeni di degrado causati da fattori ambientali è più importante sia per la necessità di proteggere i cavi sia per prevenire la riduzione della

sezione resistente del calcestruzzo, usualmente di dimensioni contenute.

Quindi, ecco la necessità, che diventa sempre più dominante man mano che la tecnologia diventa più sofisticata, di tenere la struttura sotto attenta osservazione all'avanzare del tempo, per decidere riguardo alla possibilità di intervenire tempestivamente ed in modo proprio. In questo contesto, già allora il prof. Morandi, a poco più di 10 anni dalla messa in esercizio del viadotto, ravvisava problemi legati all'ambiente estremamente aggressivo in cui esso si trovava: presenza costante di vapori nocivi dovuti all'alta salinità dell'aria, frammista ai fumi aggressivi delle numerose fabbriche presenti nella zona. Il progetto prevedeva il completo annegamento all'interno del calcestruzzo di tutti gli elementi in acciaio tale da comportare alcune piccole imperfezioni che hanno provocato la comparsa di macchie di ruggine su aree isolate a causa dell'insufficiente copertura terminale del rinforzo, senza eccezione dei rivestimenti di cadmio dei cuscinetti per le travi semplicemente supportate. Tali rivestimenti si corrosero in meno di 5 anni e, a mezzo di complicati processi, furono sostituiti con elementi in acciaio inossidabile. Nonostante ciò, anche i nuovi elementi cominciarono a mostrare i segni dell'aggressione chimica che comportò anche la diminuzione di resistenza superficiale del calcestruzzo con la conseguente riduzione di protezione per i trefoli all'interno. In conclusione, nel 1979, il prof. Morandi prospettava la necessità di effettuare trattamenti per rimuovere tutte le tracce di ruggine e soprattutto di intervenire con resine epossidiche e materiali elastomerici per proteggere e ripristinare la continuità del calcestruzzo, dove il fenomeno fessurativo cominciava a manifestarsi a vista.

Come descritto sopra, nel 1992 fu fatto un primo vero e proprio intervento, risolutivo per la pila 11, e da allora fino ad oggi, verosimilmente a mezzo di indagini riflettometriche, si è arrivati a supporre che l'area resistente dei trefoli si fosse sensibilmente ridotta. Ciò, congiuntamente ad avvisaglie varie e non meglio definite, ha portato a far predisporre la programmazione di un intervento di risanamento conservativo concretizzatosi in un bando di gara per il retrofitting degli stralli delle pile 9 e 10, pubblicato da Autostrade nel mese di maggio 2018, che la macchina burocratica non è riuscita a mettere in atto in anticipo rispetto al crollo di agosto⁶. Tale intervento sarebbe dovuto consistere, nella sua parte principale, nella realizzazione di un sistema di tesatura degli stralli che non si limitasse soltanto al ripristino della configurazione statica di primo impianto, ma che permettesse addirittura la regolazione del tiro da imporre agli stessi, anche in momenti successivi, tale da consentire il loro adattamento ad eventuali mutamenti dello stato tensionale cagionato da situazioni esterne non previste. Tale sistema, inteso come vero e proprio provve-

RISULTA FORTEMENTE PROBABILE, SE NON ALTRO PER ANALOGIA CON QUANTO AVVENUTO NEL PASSATO, CHE IL RECENTE EVENTO CATASTROFICO SIA DOVUTO AL CEDIMENTO DI UNO STRALLO DEL SISTEMA BILANCIATO DELLA PILA 9, PER AMMALORAMENTI PROGRESSIVI DA CORROSIONE DEI TIRANTI.

dimento migliorativo, avrebbe dovuto consentire di gestire l'eventuale comparsa di trazioni nel calcestruzzo, assolutamente nocive per lo stato di conservazione dei cavi originari presenti nel getto, inducendo un favorevole stato di coazione negli stralli, finalizzato ad aumentare sensibilmente la loro vita utile residua.

Il retrofitting, purtroppo mai realizzato, prevedeva anche l'installazione di un impianto di monitoraggio sugli stralli e lascia quantomeno perplessi il fatto che un'opera di tale importanza, con evidenti problemi corrosivi manifestatisi a pochi anni dalla sua messa in esercizio, non fosse già stata posta sotto continuo e costante controllo strumentale. Infatti, prima ancora della manutenzione, per opere di siffatta rilevanza, senza trascurare quelle meno ardite e più usuali, il controllo, inteso come costante monitoraggio dei parametri fisico meccanici ritenuti fondamentali, può risultare vitale e anche economicamente determinante. Vitale in quanto, basandosi su soglie di allerta e poi di allarme, potrebbe consentire di individuare situazioni rapidamente evolutive e porvi preventivo rimedio; economicamente determinante perché, spesso, solo a seguito delle risultanze ed indicazioni derivanti dal monitoraggio, si può essere in grado di porre in essere una mirata ed efficace manutenzione, caratterizzata dalla corretta sequenza di priorità ed intensità di interventi.

In modo complementare e non assolutamente sostitutivo a tutte le indagini cosiddette di diagnostica (quelle, per esempio, eseguite propedeuticamente all'intervento dei primi anni novanta, che hanno dato l'abbrivio all'inter-

vento stesso), i monitoraggi statici continui, per il controllo delle deformazioni, cedimenti, rotazioni, forze, temperature e quant'altro, costituiscono ormai una seria realtà, anche se stentano a prendere piede nel settore che riguarda le arterie di comunicazione, sia su strada che su rotaia. Ad essi, con risvolti addirittura di maggior significatività, vanno aggiunti le caratterizzazioni dinamiche e i monitoraggi dinamici che, secondo gli ultimi e più moderni approcci, tendono addirittura ad integrarsi in un'unica modalità di controllo, come facce della stessa medaglia. Impiegando accelerometri IEPE⁷ di tipo sismico di alta fascia, installati per il periodo strettamente necessario per lo svolgimento dell'analisi e collegati a sistemi di acquisizione ad alta dinamica (maggiore di 150 dB), è possibile definire una mappatura, una sorta di carta d'identità dinamica del manufatto, o di parti di esso, in termini di frequenze proprie, forme modali e smorzamenti. Contrariamente a quanto si faceva qualche anno fa, in cui si doveva ricorrere all'analisi modale classica (EMA), con una forzante esterna nella fattispecie generata da vibrodine da ponte mastodontiche, di difficile trasportabilità e scarsa economicità d'impiego, ora, grazie alla ormai consolidata tecnica dell'analisi modale operativa (OMA) è possibile ottenere i parametri dinamici, addirittura con migliore riproducibilità ed affidabilità, riferendosi alla sola risposta (output only analysis) all'eccitazione randomica ambientale. La ricerca dei parametri modali, per mezzo dei diagrammi di stabilizzazione, si basa su sofisticati algoritmi che possono svilupparsi interamente nel dominio dei tempi (SSI) o nel dominio delle frequenze (LSCF)⁸. La ripetizione perio-

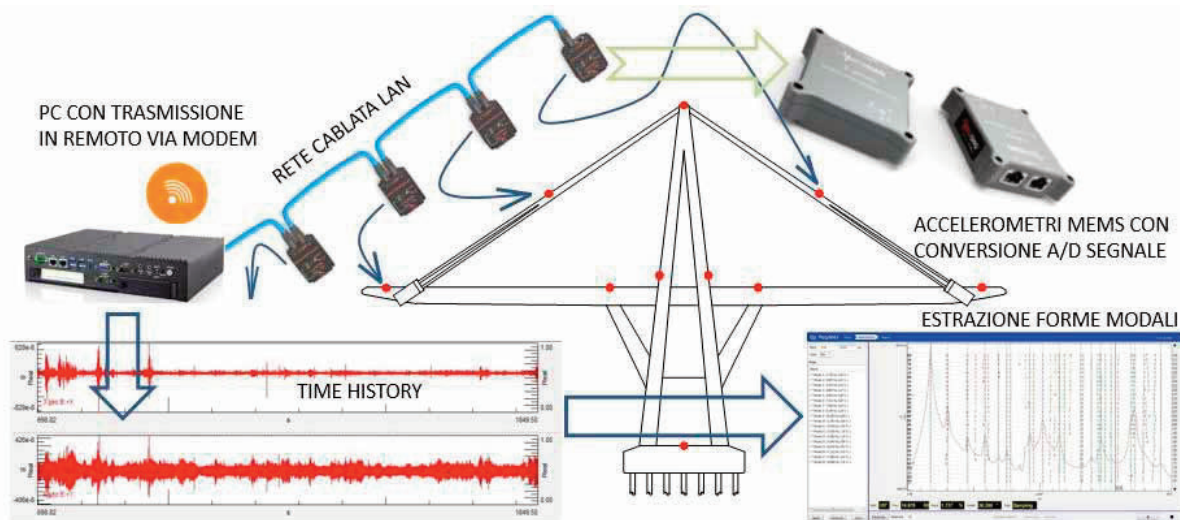


Figura 9. Schema di impianto di monitoraggio dinamico permanente.

RICALCANDO UN PO' QUELLO CHE VIENE EFFETTUATO PER MOLTI PONTI E VIADOTTI IN ALTRE ZONE DEL GLOBO ORMAI DA QUALCHE ANNO, SI SAREBBERO POTUTI INSTALLARE, IN MODO PERMANENTE COME APPENDICE IMPIANTISCA AL MANUFATTO STESSO, MODULI LOCALI, COSTITUITI DA ACCELEROMETRI MEMS AD ALTE PRESTAZIONI.

dica di tali indagini, e delle conseguenti analisi, a cadenze prestabilite o indicate dal verificarsi di particolari eventi, consente di valutare le effettive variazioni dei parametri modali, forieri di modificazioni, più o meno sostanziali, della compagine strutturale del manufatto, o della parte di essa soggetta ad investigazione (Figura 9).

Ricalcando un po' quello che si fa per molti ponti e viadotti in altre zone del globo ormai da qualche anno, si sarebbero potuti installare, in modo permanente come appendice impiantisca al manufatto stesso, moduli locali, costituiti da accelerometri MEMS⁹ ad alte prestazioni, integrati con l'elettronica di condizionamento e trasformazione analogica/digitale, in modo tale che i campionamenti avrebbero potuto immediatamente far capo, per mezzo di collegamenti in serie su supporto ethernet, ad un pc di collazionamento in sito, che, via modem, avesse trasmesso i dati in remoto, a tutte le utenze interessate al controllo.

Con questa soluzione, oltre alla misura in tempo reale delle accelerazioni e della conseguente determinazione analitica della velocità di vibrazione, parametro di alta significatività strutturale in quanto in stretta correlazione con la deformazione, e quindi con la tensione, dell'elemento strutturale su cui il trasduttore è installato, si avrebbe avuta la possibilità di effettuare delle OMA ogniqualvolta se ne fosse presentata la necessità, in tempi immediati e costi contenuti (per la mancata necessità di doversi recare fisicamente sul posto e per il fatto di non dover impiegare strumentazioni di fascia alta).

Un impianto realizzato in accordo a quanto sopra descritto, con trasduttori accelerometrici dislocati sull'impalcato ed in particolare su ognuno dei 12 stralli, con costi decisamente contenuti, avrebbe consentito di valutare, in tempo reale, le seppur minime variazioni, locali e globali, del comportamento dinamico del viadotto sul Polcevera. In particolare quelli sugli stralli, avrebbero consentito di tenere sotto controllo il livello di tensionamento degli stessi, se non quello assoluto, sicuramente quello differenziale rispetto alla data d'installazione, ed in base alle risultanze che ne sarebbero derivate, in ter-

BIBLIOGRAFIA

- R. Morandi "Il Viadotto sul Polcevera per l'Autostrada Genova-Savona" Industria Italiana del Cemento
- F.M. y Cabrera, G. Camomilla, M. Donferri Mitelli, F. Pisani, A. Marioni "Il Risanamento degli Stralli del Viadotto Polcevera" International Symposium & Exhibition On Cable Stayed Bridges - Shanghai (Cina) maggio 1994
- R. Morandi "Concrete Cable-Stayed Structures" L'Industria Italiana del Cemento - Ott 1980
- R. Morandi "The Long Term Behaviour of Viaducts Subjected to Heavy Traffic and Situated in an Aggressive Environment: The Viaduct on the Polcevera in Genoa" IABSE Report Zurich (CH) 1979
- N. Scibilia "La Resistenza delle Travi in Cemento Armato Precompresso del Viadotto Akras di Riccardo Morandi" Italian Concrete Days Roma 27-28 ottobre 2016
- B. Peeters, G. Sforza, F. Germano, L. Sbaraglia "Efficient Operational Modal Testing and Analysis for Design Verification and Restoration Baseline Assessment: Italian Case Studies" - EVACES 2011 Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures - Varenna (IT) 3-5 Ott 2011
- G. Sforza "L'Analisi Dinamica Operativa per la Risposta Sismica delle Strutture" DEI Roma - 12 aprile 2013
- G. Sforza, L. Lepori "Understanding the Dynamics of Vulci's Devil's Bridge" - White Paper Issued by Siemens PLM Software - 2016
- G. Sforza "Collaudo Dinamico di Ponti e Viadotti con l'Impiego dell'Analisi Modale Operativa" Siemens Meeting - Hotel Abitart Conference Center - 5 lug 2016
- G. Sforza "Bridges Monitoring based upon a Network of High Performance MEMS" - Internal Dewesoft Paper - set 2018

mini, per esempio, di progressività temporale, di programmare gli interventi manutentivi nei tempi e nei modi più adatti¹⁰.

Quanto sopra è particolarizzato per il viadotto sul Polcevera, ma vale per tutto il panorama viario nazionale, decisamente datato e finora non sufficientemente mantenuto. E non a caso quanto accaduto non è che l'ultimo di una serie di eventi, ad epilogo talvolta drammatico, occorsi di recente. Andando a ritroso di appena due anni, si possono citare almeno quattro eventi raccapriccianti. Ad ottobre del 2016 il cavalcavia Annone, in provincia di Lecco, è crollato di schianto a seguito del passaggio di un TIR che trasportava bobine d'acciaio, provocando la morte del conducente di una vettura che transitava nella sottostante SS36, che collega Milano alla Brianza. Il 2017 fu un vero e proprio anno orribile. I crolli del ponte Fiumana Allaro in Calabria a gennaio e del viadotto della tangenziale di Fossano, in provincia di Cuneo, ad aprile, fortunatamente non provocarono

vittime. Non fu così per il cavalcavia sulla A14, tra Loreto ed Ancona, il cui crollo fece perdere la vita a due persone e ne ferì altrettante, con ampio coinvolgimento delle vetture sottostanti.

Per porre fine a questa spirale degenerativa, monitoraggio e manutenzione sono le due parole chiave in grado

di consentire la salvaguardia dell'ingente patrimonio riguardante la rete viaria nazionale. Il monitoraggio per programmare in modo mirato e tempestivo gli interventi manutentivi e la manutenzione per evitare nel modo più assoluto che eventi simili possano continuare a manifestarsi.

NOTE

- ¹ La vallata del Polcevera nel tratto interessato dall'opera è contraddistinta da una geomorfologia con corrugazione di impalcato geologico di scisti, anfiboli e filladi, tutti fortemente degradati nei loro strati superficiali, con una forte incisione di fondo valle riempita da un significato strato di alluvione formato da limi, sabbie, ghiaie con inclusione di argille plastiche e formazioni torbose. Pertanto tutti gli elementi di fondazione dell'opera hanno dovuto raggiungere una relativa profondità per reperire appoggio su strati rocciosi stabili, quando questi affiorano in corrispondenza delle sponde della vallata, oppure strati rigidi e consolidati dall'alluvione di fondo valle.
- ² Ciascuno di acciaio speciale con tensione di rottura superiore a 1700 MPa ed avente diametro nominale di 12,7 mm.
- ³ Ad esclusione del breve tratto centrale compreso tra i pilastri obliqui che determinano i due appoggi centrali.
- ⁴ La tecnica riflettometrica consiste nell'emissione di impulsi di breve durata ($2 \div 10$ ns) ad un estremo di un cavo post teso e nella registrazione, nello stesso punto del segnale riflesso alle due estremità. Analizzando quest'ultimo, per ogni anomalia presente, è possibile rilevare il tipo della stessa attraverso la sua variazione di impedenza, la sua grandezza, attraverso l'ampiezza del segnale, e la sua distanza dal punto di misura. Pertanto attraverso la grandezza ed il tipo di segnale riflesso è possibile ricostruire il livello di gravità del degrado nel singolo strallo. Tale livello di gravità definisce il livello di rischio al quale la condizione del cavo è paragonata.
- ⁵ Comportamento dinamico della corda vibrante tesa in cui le frequenze proprie della corda stessa sono strettamente connesse alla tensione alla quale la corda è sottoposta. In particolare è stata impiegata la tecnica del Tir fort con una forza di 7 kN applicata al centro dello strallo e registrando, a mezzo di accelerometri piezoelettrici, le accelerazioni e successivamente sottomettendo i segnali ottenuti all'analisi delle frequenze. Il confronto tra i valori delle frequenze dedotti in modo sperimentale e quelli ottenuti dalla simulazione numerica agli elementi finiti del modello di strallo fornisce informazioni utili sul valore del tiro cercato.
- ⁶ L'ispezione effettuata da Spea sulla totalità dei cavi attraverso carotaggi (nel gennaio 2016) e prove riflettometriche (effettuate in più fasi nel periodo 2015-2017) aveva diagnosticato una riduzione media di sezione nell'ordine del 20%, che non pregiudicava in alcun modo la staticità dell'opera, come confermato nella relazione tecnica del progetto medesimo. L'intervento di ripristino dei cavi analizzati era stato allegato al progetto di retrofitting, approvato dal ministero delle Infrastrutture e Trasporti nel giugno del 2018.
- ⁷ Acronimo per Integrated Electronics Piezo Electric
- ⁸ Acronimi per Stochastic Subspace Identification e Least Square Complex Frequency – una sorta cioè del metodo dei minimi quadrati in campo complesso.
- ⁹ Micro Electro-Mechanical System ossia dispositivi di varia natura integrati in forma miniaturizzata su un substrato di materiale semiconduttore.
- ¹⁰ In una relazione del Politecnico di Milano, che ha dato luogo ad un rapporto finale da parte del prof. C. Gentile, consegnato a SPEA il 25 ottobre 2017, finalizzata alla progettazione dell'intervento di retrofitting sugli stralli, raccomandava di installare alcuni sensori per consentire di studiare il comportamento dei sistemi bilanciati (9 e 10) del viadotto Polcevera, attraverso approfondimenti tecnico-sperimentali. [\[1\]](#)