

# La gestione globale di reti complesse

(Seconda Parte)

**MONITORARE NECESSE EST... MA ANCHE, E PIÙ CHE, MAI GESTIRE RETI COMPLESSE IN MANIERA PREVENTIVA, COORDINATA E CENTRALIZZATA. QUESTO OBIETTIVO, A CUI TUTTI GLI OPERATORI AMBISCONO MA CHE PER ORA NON SEMBRANO RIUSCIRE A RAGGIUNGERE, PUÒ ESSERE AVVICINATO METTENDO IN CAMPO UN METODO OGGETTIVO, DA APPLICARE IN CONTEMPORANEA A MIGLIAIA DI PONTI, CHE PREVEDE SENSORI REAL TIME, INTERVENTI DI SICUREZZA PER IL TRAFFICO E DI RINTEGRO "TEROTECNOLOGICO". IN UNA PAROLA: **BRIGHT**, BRIDGE HEALTH TESTING & SOLVING.**



**Gabriele Camomilla**  
Terotecnologo



L'articolo integrale in anteprima sul web

Tutte le caratteristiche definite come fondamentali dell'analisi proposta nella prima parte di questo articolo (*leStrade* 12/2019), sono soddisfatte dal metodo BRIGHT, un servizio completo composto da più parti, che è nato proprio per la gestione di reti di ponti e viadotti.

## Azioni di BRIGHT in sintesi

1. **Rilievo** Rilevamento automatico dei ponti con droni;
2. **Modellazione 3D automatica** con successiva segmentazione dei modelli 3D con classificazione automatica degli elementi per importanza strutturale, al variare

delle tipologie e dei materiali delle opere;

3. **Valutazione danni visibili in superficie** tramite rilevamento automatico dei difetti, loro classificazione per prestazioni di sicurezza strutturale; graduatoria di affidabilità in automatico di parti di criticità comparabile;

4. **Rilevamento evoluzione danni**<sup>1</sup> tramite installazione di reti di sensori sugli elementi in cui sono stati individuati i danni strutturali, sensori che permettono il monitoraggio continuo dell'evoluzione con allarmi in tempo reale, preventivo alla rottura con la tecnica dell'emissione acustica o altra equivalente;

## La seconda puntata di una grande esclusiva

Si completa con questa seconda parte il nostro approfondimento dedicato a BRIGHT, per la firma dell'ingegner Gabriele Camomilla. Per quanto riguarda la divulgazione di questa specifica materia, i nostri punti di partenza sono stati la trattazione del tema della protezione catodica (*L'Opinione Tecnica* sempre di Camomilla su *leStrade* 10/2010, articolo poi riproposto sul numero

speciale *Strade d'Italia leStrade* 12/2018, a pagina 60: "*La protezione catodica del cemento armato*") e "*White Hawk Down Abbattere o salvare?*", *leStrade* 1-2/2019, a firma dello stesso autore. Tra fine 2018 e inizio 2019 Camomilla iniziò a parlarci di BRIGHT e della sorveglianza dei ponti inseriti in reti complesse. Di BRIGHT siamo quindi riusciti a parlare in modo esaustivo e approfondito alla fine del 2019. Sull'edizione cartacea l'abbiamo fatto in due puntate, sul numero di Dicembre 2019 e su quello di Gennaio-Febbraio 2020. Due puntate la cui ragione è stata semplicemente legata allo spazio.

Dal momento che, tuttavia, il nostro primo dovere di divulgatori è sempre stato quello di agevolare la massima diffusione dei temi di interesse, abbiamo pensato di anticipare la versione integrale dell'articolo sul web e sui nostri social fin dal dicembre del 2019. Per consultare l'approfondimento nella sua interezza basta andare a fare un giro su [lestradeweb.it](http://lestradeweb.it) o scansionare con un'apposita App il QR Code che accompagna questo box in alto a sinistra. La prossima tappa? Sarà la divulgazione dell'intervento tenuto dallo stesso Camomilla al convegno IN ARCH-ANCE del 27 novembre scorso. (FA).

**5. Gestione operativa dati rilevati e monitorati:** controllo remoto centralizzato di tutte le strutture monitorate. Indicazioni sulle modalità di intervento immediato in caso di allarme per le ispezioni successive di dettaglio, gli interventi immediati e quelli successivi con le tecniche e relativi prezzi per operare le riabilitazioni necessarie. BRIGHT<sup>2</sup> è il sistema di gestione più completo di tutti quelli oggi in uso, perché copre tutte le funzioni necessarie alla gestione dei ponti come mostrato in tab. 1, dove si elencano le sue performance.

### Alcuni dettagli delle principali azioni Rilievo delle opere

L'operazione di rilievo va eseguita su tutta la rete, ma può partire dalle opere più problematiche individuate con precedenti sorveglianze anche di tipo tradizionale; sui rilievi si possono effettuare le valutazioni di criticità e apporre subito i sensori di monitoraggio, magari in quantità maggiorate, per coprire zone di dubbia valutazione. Il rilievo con le modalità BRIGHT gradatamente metterà sotto controllo tutto le opere della rete. La prima fase del metodo prevede una campagna di analisi di ogni ponte o viadotto, di qualunque tipologia costruttiva, di cui si vuole controllare lo stato di degrado strutturale, viene eseguita in modo automatico secondo lo schema in fig. 8.

In questa prima fase si effettua il rilievo fotogrammetrico aereo di ciascuna opera mediante l'impiego di uno o più droni o UAV equipaggiati con rilevatori di immagini multispettrali e da tali immagini vengono realizzati disegni in 3D (fig. 9).

Questi disegni in 3D sono successivamente suddivisi in elementi geometrici in 2D, che saranno classificati secondo una graduatoria per importanza per la resistenza strutturale dell'opera, che può essere diversa per ogni tipo di opera; si avranno quindi elementi semplici, più o meno critici. Su tutti gli elementi semplici sono allora mappate le immagini dei droni che contengono le anomalie presenti. Su di esse, sempre automaticamente, vengono rilevati un numero ridotto di difetti, classificati per tipo, intensità ed estensione. Il numero è ridotto e saranno più semplici da rilevare in automatico perché la gravità del difetto sarà connessa alla posizione nell'opera e al materiale che la costituisce (fig. 10).

### Graduatoria in pericolosità delle zone critiche

Saranno allora presenti i difetti esistenti su tutte le zone critiche semplici precedentemente definite come tali in base alle indicazioni di banche dati precostituite<sup>3</sup>. La maggiore o minore presenza delle diverse anomalie su di esse mappate e la loro entità, permetterà allora di effettuare una graduatoria di pericolosità potenziale ai fini della stabilità dell'opera, di dette zone, relazionata al tipo di struttura e ai materiali che la compongono. *In questo modo nella rete di opere sorvegliate si saranno individuati, in numero contenuto rispetto al totale, tutti gli elementi strutturali semplici omogenei per importanza **graduati in gravità** da tenere sotto monitoraggio continuo.* Per le parti delle opere che non

**TAB. 1 CONFRONTO TRA METODO BRIGHT E ALTRI SISTEMI DI RILEVAMENTO MODERNI**

SISTEMI AVANZATI				
Prestazioni	Vibrazioni e analisi modale*	Fibre ottiche*	Interferometria satellitare	BRIGHT
<b>Sorveglianza</b>				
Rilievo dei ponti in modo automatico	NO	NO	NO	✓
Auto Modellazione 3D	NO	NO	NO	✓
Segmentazione automatica dei modelli 3D	NO	NO	NO	✓
Autoclassificazione segmenti per importanza	✓	NO	NO	✓
<b>VALUTAZIONE DANNI IN SUPERFICIE</b>				
Rilievo automatico dei difetti	NO	✓	NO	✓
Riconoscimento automatico dei difetti rilevati	NO	NO	NO	✓
Autoclassificazione per prestazioni strutturali	NO	NO	NO	✓
Autoreporting dei difetti	NO	NO	NO	✓
<b>VALUTAZIONE DANNI STRUTTURALI</b>				
Rete di sensori wireless	NO	NO	✓	
Rilevamento dei danni strutturali	✓	✓	✓	✓
Localizzazione dei danni strutturali	NO	✓	NO	✓
Valutazione della gravità dei danni strutturali	✓	NO	NO	✓
Monitoraggio continuo dei danni	NO	✓	✓	✓
<b>MONITORAGGIO PONTI E GESTIONE DEI DATI RILEVATI</b>				
Controllo remoto delle strutture	NO	✓	✓	
Condivisione dati esercizio e manutenzione delle opere	NO	NO	NO	✓
Sistemi di supporto per decisioni sulle manutenzioni	NO	NO	NO	✓
Auto reporting per piani di ispezione	NO	NO	NO	✓
Monitoraggio di reti di ponti	NO	NO	NO	✓
Gestione dati per i budget delle riparazioni	NO	NO	NO	✓
Controllo remoto delle strutture	NO	✓	✓	
NB. L'ispezione visuale copre i punti 1, 2, 4 in modo soggettivo guidato da Manuali e non automatico *Adatto solo a opere singole				

sono strutturalmente critiche nella suddivisione e per quelle critiche, ma senza lesioni o comunque esenti da difetti potenzialmente pericolosi, vengono individuate comunque le periodicità per effettuare ulteriori esami commensurate alla potenziale evolvibilità delle condizioni in atto.

*La numerazione delle figure va letta in sequenza rispetto a quella della prima parte (leStrade 12/2019).*





**GESTIONE DEL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO E TOPOGRAFICO**

Ispezione video mediante velivoli a pilotaggio remoto (APR)



Sistemi video dotati di telecamere multispettrali ad alta risoluzione modalità di volo automatico ed elettronica di potenza

Ispezione e rilievo fotogrammetrico di ciascun elemento strutturale del ponte secondo una procedura standardizzata su tutte le facciate con opportune sovrapposizioni e maggiore attenzione alle parti considerate critiche, unitamente al rilievo topografico



Insieme alla campagna di ispezione, è possibile rilevare il GCP (Ground Control Points) mediante uno strumento topografico speciale per garantire una georeferenziazione e un ridimensionamento corretti e accurati degli elementi rilevati.



**8. Rilievo della struttura con immagini georeferenziate**



**IMPORTAZIONE NELL'AMBIENTE BIM (MODELLO DI INFORMAZIONI SULLA COSTRUZIONE)**

Estrapolazione di forme a punti o nuvole dal modello 3D, conversione di coordinate utilizzando il software idonei ed importazione in ambiente BIM:



**SEGMENTAZIONE IN ELEMENTI PIANI CON INDIVIDUAZIONE**

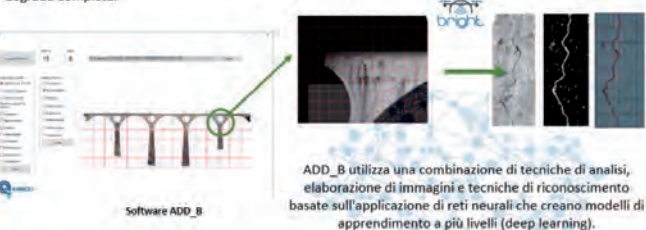


**9. Costruzione del Modello della struttura e sua suddivisione in elementi semplici**



**RILEVAMENTO AUTOMATICO DEI DIFETTI**

Il software di rilevamento automatico dei difetti ADD\_B utilizza immagini digitali ortogonali, estrapolate dal modello 3D, per rilevare oggettivamente danni superficiali e fornire una mappa di degrado completa.



**10. Individuazione automatica del tipo di difetto con estensione e gravità**

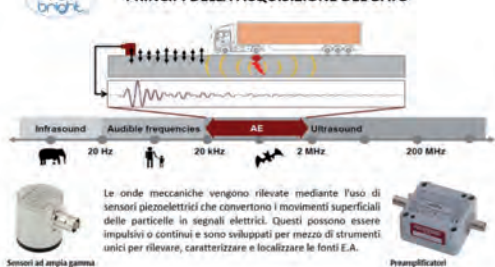
**TECNICA DELLA EMISSIONE ACUSTICA E.A.**

L'emissione acustica (EA) è un fenomeno fisico in cui si generano onde elastiche transitorie all'interno di un materiale o mediante un processo. Un ambiente ostile o l'applicazione di un carico su un materiale produce cambiamenti strutturali interni come la deformazione plastica locale,

la propagazione delle crepe, la corrosione, l'erosione e i cambiamenti di fase. Tutti questi meccanismi sono accompagnati dalla generazione di onde elastiche che si propagano nei materiali. Queste onde contengono informazioni sul comportamento interno e / o sulla struttura del materiale.



**PRINCIPI DELLA ACQUISIZIONE DEL DATO**



**11. Funzionamento della Emissione Acustica**

**Monitoraggio con allerta in tempo reale**

A questo punto il metodo prevede, sulle parti degradate individuate, un'analisi mirata e l'installazione di quantità limitate di *sensori di allarme* legati alla riduzione della resistenza del materiale "bersaglio" indipendenti dal tipo di struttura, senza necessità di elaborazioni. La grandezza da valutare è l'*emissione acustica E.A. del materiale* potenzialmente in rottura che funzione nel modo indicato in fig. 11. L'utilizzo delle tecniche di emissione acustica AE è un metodo di indagine non distruttivo che consente il monitoraggio di un dato elemento strutturale attraverso la cattura di onde acustiche emesse come risultato di fenomeni attivi al suo interno (danni, corrosione, degrado, ecc.). Queste onde sono trasdotte da specifici sensori risonanti o a banda larga (piezoelettrici) e analizzate con software dedicati per determinare parametri specifici quali intensità, frequenza, energia, durata, posizione, tempo di salita del segnale, numero di eventi, ecc. Analizzati in dettaglio, questi segnali danno un quadro completo della condizione dell'elemento strutturale *permettendo di individuare in anticipo eventuali fenomeni di deterioramento e punti deboli*. I sensori AE rilevano fenomeni di rilascio di energia acustica in campi di frequenza e intensità lontani dai limiti di udibilità, in genere le frequenze di studio sono comprese tra 20 kHz e alcuni Mhz (vedi fig. 12, pag seguente).

I sensori EA nelle strutture in cemento armato vengono tarati per misurare le emissioni degli elementi di acciaio principali dell'armatura. I sensori AE possono essere anche integrati da altri tipi di rilevamento, quali ad esempio quelli basati sulla interferometria terrestre o satellitare. Sensori di questa grandezza vengono posti in vicinanza dei punti dove sono rilevate le situazioni potenzialmente critiche e sono in grado di seguire l'evoluzione del difetto fino al raggiungimento delle diverse soglie di allarme predefinite. Tali sensori, che hanno costi sostenibili in relazione al numero di opere che controllano, danno informazioni già decodificate secondo soglie di allarme diverse a seconda del livello di gravità dei difetti<sup>4</sup>. Quindi sugli elementi strutturali "strategici" identificati nella precedente fase sono installati, in punti specifici e selezionati dell'opera, i sensori di emissione acustica AE, che sono definiti anche come "sensori deterministici" (vedi ancora figg. 11 e 12). La differenza fondamentale con altri sistemi di monitoraggio è che l'EA non richiede analisi di comportamento strutturale e da un allarme immediato, senza elaborazioni umane dei

1. Le ispezioni visuali usate fino ad oggi coprono i primi tre punti, ma lo fanno in modo soggettivo anche se guidato da manuali di classificazione dei difetti e della loro gravità. BRIGHT permette di utilizzare separatamente il sensore ad Emissione Acustica come monitoraggio in tempo reale capace di dare tranquillità ai valutatori visivi tutte le volte che hanno dubbi: il sensore avvertirà per tempo se il pericolo esiste evitando chiusure devastanti.

2. Questa tabella e le immagini esplicative che seguono dei principali processi di BRIGHT sono tratti da pubblicazioni interne di AISICO, preparate dagli ingegneri A. Brajon, C. Paganucci, C. Elea Brandani e S. Celli.

3. Le banche dati delle diverse tipologie delle opere, patrimonio del sistema, individuano sulla base delle caratteristiche strutturali dei tipi, dei materiali che li costituiscono componenti e anche i diversi livelli di età e di traffico sopportato le zone critiche per la stabilità, la rottura delle quali metterebbe in pericolo grave la stabilità dell'opera.

4. È anche possibile utilizzare altri tipi di sensori che abbiano comportamento equivalente di risposta immediata, real time, senza elaborazioni, da scegliere di volta in volta, anche a seguito di successive scoperte della tecnica.



segnali ricevuti; i criteri insiti in BRIGHT, inoltre, permettono di ridurli di numero e complessità. Sono in tal modo in grado di fornire livelli di allarme precalibrati in base al grado d'integrità della struttura. I sensori di allarme, possono essere collegati mediante reti wireless o anche reti con fili, e sono calibrati e autoalimentati per permetterne l'uso su diverse tipologie di materiali da costruzione. La taratura personalizzata dei sensori ne consente il funzionamento, indipendentemente dal tipo di struttura su cui vengono impiegati, dall'evoluzione nel tempo della struttura stessa, dal tipo e intensità di traffico che supporta o da altre condizioni di disturbo a cui è stato ed è sottoposta la struttura stessa. Un ulteriore uso, può essere il controllo del comportamento dell'opera, valutato da parte di personale esperto, nelle diverse fasi dei livelli di allarme, dopo il loro innescio, secondo indicazioni fornite dal sistema. Queste indicazioni si riferiscono, ad esempio, alla gestione del traffico dopo l'avvenuto primo allarme, fino agli allarmi di pericolosità più alta che potrebbero intercorrere durante i lavori di riparazione o riabilitazione dei danneggiamenti riscontrati.

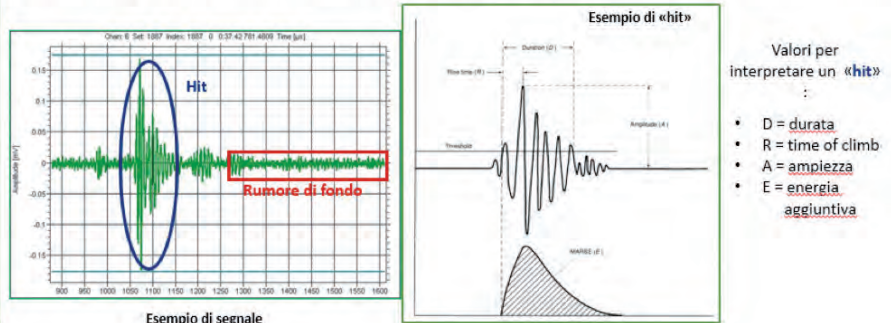
### Centro di controllo della rete monitorata

Tutta la parte diagnostica di evoluzione dei punti o delle zone degradate sopra descritta, è riportata tramite trasmissioni a distanza a un centro di controllo dove i dati vengono monitorati e analizzati in base a una classifica predefinita e selezionata di valori. Il sistema di controllo centrale, a seconda delle condizioni di danneggiamento dell'elemento strutturale elaborato dai sensori di emissione acustica AE, invia un avviso oppure un segnale di allarme che genera tre tipi di reazioni specificatamente catalogate da utilizzare in sequenza secondo protocolli predefiniti, da applicare alle diverse situazioni con un'indicazione anche degli eventuali interventi di controllo del traffico e di regolazione, per esempio velocità e limitazione del carico dei veicoli da effettuare (vedi figg.13 e 14). Seguono le ispezioni di controllo ulteriore per le quali BRIGHT prevede, se necessario, un'analisi per gli elementi individuati automaticamente come più critici dagli allarmi per valutare la corrosione in essi presenti con la riflettometria a impulsi RIMT, da collegare alla valutazione delle capacità portanti residue tramite analisi modellistiche connesse ai difetti ubicati per posizione e tipologia (vedi fig. 15). Questa valutazione di corrosione può anche essere effettuata a integrazione dei rilievi automatici descritti al paragrafo "Graduatoria in pericolosità delle zone critiche". per la fase iniziale di scelta dei punti di monitoraggio come analisi ulteriore per gli elementi già individuati automaticamente come più critici, per valutare i degradi (principalmente il livello di corrosione). Anche queste sole valutazioni possono portare alla messa in opera su parti più critiche controllate solo in questo modo, dei sensori di "attenzione". Un altro modo di utilizzare le prove RIMT è quello di operare un confronto tra i rilievi di un elemento, per esempio una trave di bordo di impalcato, che sia strumentata con EA e misurata con RIMT, rispetto le condizioni di travi simili, apparentemente in buone condizioni, che abbiano anch'esse rilievi di stato di corrosione RIMT.



### TIPO DI SEGNALE E RUMORE DI FONDO

L'onda elastica può essere influenzata dal mezzo di propagazione in cui si trova, prima che raggiunga il sensore. Al fine di valutare correttamente i segnali studiati, vengono eseguiti in anticipo un test di «interruzione del piombo della matita» e un periodo di ascolto per impostare le soglie (Soglia) e limitare il rumore di fondo generato da effetti esterni (pioggia, traffico, vento, ecc.)



- Valori per interpretare un «hit»:
- D = durata
  - R = time of climb
  - A = ampiezza
  - E = energia aggiuntiva

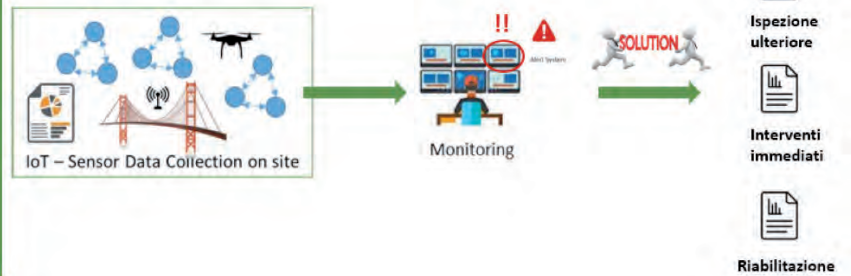
12. Segnali di emissione acustica



### CONTROLLO DELLA RETE DI PONTI DAL CENTRO DI ASCOLTO

13

As a result of a survey and a targeted defect analysis it is possible to continuously monitor the critical parts of several bridges simultaneously, this is done from a listening room. Set alert thresholds on the monitoring of each critical element, the user is alerted instantly if one of them is exceeded. If this is the case, a visual inspection shall be carried out at the point indicated and a decision shall be taken on how to take action.



### AZIONI DI SICUREZZA E RIPARAZIONE

14

ISPEZIONI ADDIZIONALI ANCHE STRUMENTALI



DEFINIZIONE DELLE AZIONI PER LA SICUREZZA DEL TRAFFICO



CRITERI DI RIABILITAZIONE CONSEGUENTI



13, 14. Controllo centralizzato della rete



**RIFLETTOMETRIA RIMT E SUO SVILUPPO RE.CO.DE.**  
MISURE DI TIPO STRUTTURALE

Si può rilevare la **CORROSIONE** semplificata  
E misurare l'**AFFIDABILITÀ RESIDUA** dell'elemento rilevato  
**RIMT valuta quella dell'elemento**  
**RIMT valuta quella della struttura di cui fa parte**

Con i dati della corrosione ed i loro diversi livelli si possono:

1 - Creare **modelli strutturali**-semplificati o perfettamente corrispondenti alla **trave** misurata

$C_m$  = CARICO DI ROTTURA del modello

**TRAVE IN OPERA VALUTATA CON RIMT**  $\geq$  **TRAVE SENZA DEGRADAZIONI**

2 - Creare modelli strutturali- dell'intera **struttura** di cui fa parte per tenere conto delle azioni strutturali complessive

**15. Uso di diagnostica di corrosione con RIMT**

**GESTIONE DELLE ALTRE PARTI DELLE OPERE DEL PONTE: GIUNTI, APPOGGI, RITEGNI SISMICI**

QUESTE PARTI HANNO CRITERI DI SORVEGLIANZA BEN DEFINITI GIÀ OGGI PERCHÉ SONO STRUTTURE «MACCHINA» GIÀ CONSOLIDATE PRESSO CHI SVOLGE ATTIVITÀ DI SORVEGLIANZA ABITUALI

ANCHE I CRITERI CON CUI VENGONO RIPARATE O SOSTITuite IN MODO MIGLIORATIVO SONO CONSOLIDATE NEL TEMPO E NELL'USO. IN PARTICOLARE I RITEGNI SISMICI

**CI SONO POI LE FONDAZIONI**

**fondazioni in alveo** **fondazioni in terreni instabili**

Che vanno trattate con i criteri e sistemi della geotecnica e non ne parliamo in questo articolo

**16. Le altre parti da sorvegliare e gestire\***

**RIABILITAZIONE DI APPOGGI**

**Sostituzione appoggi** **Sostituzione di giunti**

**17. Riparazioni appoggi e giunti**

## Attività di completamento della gestione delle opere

Le azioni sintetizzate coprono pile e impalcati. Rimangono altre parti (fig. 16) fondamentali del ponte, quali i giunti, gli appoggi, spesso integrati nelle ultime applicazioni con ritegni sismici a dissipazione di energia. Giunti e appoggi hanno criteri di sorveglianza già oggi ben definiti perché sono strutture "macchina" e le loro verifiche hanno usi già definiti, comunque sempre inseribili nelle metodologie BRIGHT. Anche i criteri con cui vengono riparate o sostituite in modo migliorativo sono consolidati nel tempo e nell'uso (vedi fig. 17). I ritegni sismici sono le parti con maggior contenuto innovativo e spesso vanno inseriti in azioni di adeguamento dei ponti anche con lo scopo di rendere i percorsi con sicurezze al sisma di tipo omogeneo per tutte le opere. Anche questo è un argomento che costituisce uno degli aspetti della parte BRIGHT riguardante i *criteri di riabilitazione* che non tratteremo dettagliatamente. Riportiamo solo a scopo dimostrativo delle possibilità di miglioramento funzionale delle opere, ricordate anche nella pubblicazione riportata in nota 5, la *trasformazione semi integrale* dei ponti esemplificata in fig. 18 (pag seguente) in cui si trasformano campate semplicemente appoggiate e separate in strutture semi integrali collegando in soletta le campate e sostituendo tutti gli appoggi con dotazioni di dissipazione dell'energia dei terremoti, reversibili senza danno dopo i sismi e mettendo giunti adeguati alle sole due estremità<sup>5</sup>.

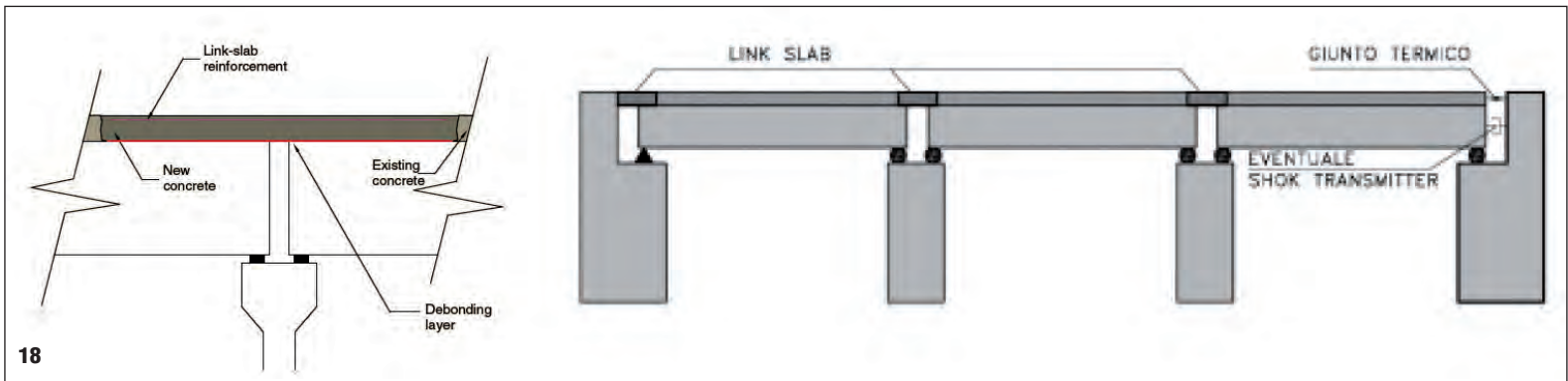
Questa trasformazione è la più efficace per la durata nel tempo dell'opera anche perché interrompe i processi di degrado più aggressivi che sono quelli che interessano i giunti eliminati con i rispettivi bordi trasversali dell'impalcato ed i pulvini e le pile sottostanti; Tutto ciò è ampiamente definito negli studi condotti nel 2014 in Anas in collaborazione con l'università di Venezia IUAV che raggruppano tutte le esperienze effettuate nei decenni precedenti per centinaia di ponti autostradali. Ci sono poi le fondazioni sia in alveo di fiumi con problemi di erosione che su terreni naturali che possono avere problemi di instabilità; queste parti dei ponti vanno trattate con i criteri e sistemi della geotecnica e non ne parliamo in questo articolo.

Un altro intervento fondamentale di riabilitazione interessa il *refacimento dei copriferro carbonatati* che causano la corrosione dei ferri esterni delle armature con loro successivo distacco. In effetti, la pericolosità di questo attacco ai copriferro, presente nella maggior parte delle strutture in cemento armato, si è ridimensionata nel tempo: nella maggior parte dei casi l'effetto è solo di tipo estetico e comporta, se non reintegrato, una progressione verso l'interno della struttura con indebolimenti strutturali per i quali occorre comunque molto tempo, almeno nei nostri climi. Ciò non toglie che la si possa tollerare, anzi la terotecnologia ha individuato molte azioni correttive mirate oggi divenute comuni, che sono principalmente la verniciatura delle superfici o la loro impregnazione che riducono l'ingresso della anidride carbonica che la causa.

La *carbonatazione dei copriferro*, che porta alla corrosione degli acciai più esterni dei ponti, è però *risolvibile in modo definitivo* con la *protezione catodica* nelle sue diverse for-

\* Il recente crollo il 24 novembre scorso di parte del viadotto Madonna del Monte sull'A6 dimostra la validità di questo assunto





18

me. Oggi abbiamo constatato che quella da usare è la *protezione catodica passiva* con anodo di sacrificio<sup>6</sup> messa a punto anch'essa come tecnica terotecnologica con durate previste superiori ai 30-40 anni (fig. 19). Oggi è possibile anche con elettrodi sostituibili più volte, a consumo avvenuto, eliminando il problema per sempre (fig. 20). La più diffusa delle riabilitazioni è infine il *rinforzo delle travi in C.A.P.* che hanno subito perdite di precompressione (fig. 21). È una tecnica ormai applicata da molti anni e quindi verificata nell'uso, con tipologie di cavi, sistemi di aggancio e criteri di calcolo, molto variati. L'applicazione più impegnativa è stata quella del viadotto Polcevera nella Pila 11 recentemente demolita con esplosivo, in cui erano stati sostituiti gli acciai degli stralli con cavi esterni in guaine viplate, 12 per strallo, sostituibili in caso di degrado (vedi figura 22 conclusiva, in cui la pila 11 è mostrata nel suo aspetto reale pochi giorni dopo il tragico crollo della pila 9).

### Osservazioni conclusive

Il risultato operativo di BRIGHT, oltre alla riduzione dei livelli di rischio di crollo o di messa fuori servizio delle opere,

19



### RIFACIMENTO COPRIFERRO MIGLIORATIVI PROTEZIONE CATODICA PASSIVA



**ACCOPPIAMENTO GALVANICO**



**Genera l'aumento del PH che può essere portato da 9 (condizione di carbonatazione) a 12-13 (protezione del ferro),**

**APPLICABILE INSIEME CON IL RIFACIMENTO DEI COPRIFERRO**

**Anodi sacrificali di ZINCO**

18. Schema di trasformazione dei ponti con eliminazione dei giunti: ponte semi-integrale

19. Protezione catodica passiva delle pile

20. Anodi di sacrificio rinnovabili per protezione catodica passiva

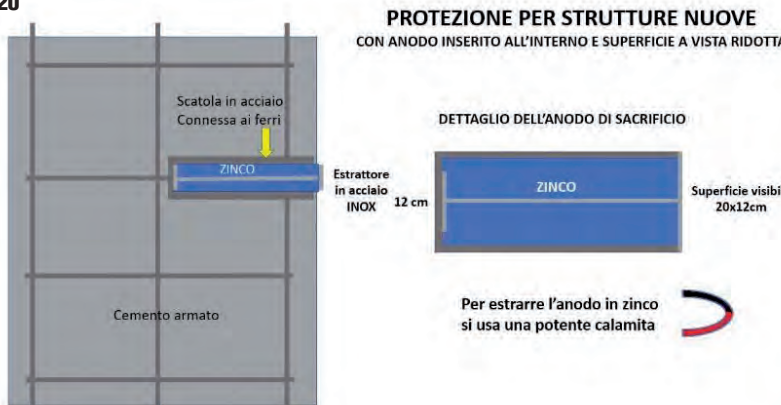
5. Vedi "Le nuove tecniche di gestione delle opere d'arte" di E. Cesolini, G. Camomilla, S. Oddone - Rapporto Interim maggio 2013 ANAS - Direzione Ricerche e Nuovi Materiali e "Approfondimenti scientifici e soluzioni progettuali tipologiche per la trasformazione di opere d'arte a travi appoggiate in strutture integrali o semi-integrali attraverso l'eliminazione di giunti e appoggi o di giunti ai fini del miglioramento funzionale e/o sismico", Studio ANAS DCRNT-IUAV 2015.

quantificabili economicamente in primo luogo in riduzione dei costi di assicurazione, è poi anche nella minimizzazione dei costi di sorveglianza e anche di manutenzione, date le conoscenze terotecnologiche consolidate raggiunte sui metodi di riparazione o *retrofitting* delle diverse problematiche di invecchiamento, che aumenterà la vita delle opere, oltre ad arrestarne il degrado come nel caso della protezione catodica, che elimina le conseguenze della carbonata-

6. Messa a punto dalla Mapei, è recente la scomparsa del suo sviluppatore storico, Giorgio Squinzi, che ha portato al top mondiale i materiali di questo settore la stessa casa che oggi produce le migliori malte di ripristino e anti carbonatazione. vedi articolo Opinione tecnica "La Protezione catodica passiva delle opere in cemento armato - La chiave di volta della durabilità delle costruzioni moderne" di G. Camomilla, *leStrade* 10/2010.

**20**

**PROTEZIONE PER STRUTTURE NUOVE**  
CON ANODO INSERITO ALL'INTERNO E SUPERFICIE A VISTA RIDOTTA



Scatola in acciaio Connessa ai ferri

ZINCO

Estrattore in acciaio INOX 12 cm

Cemento armato

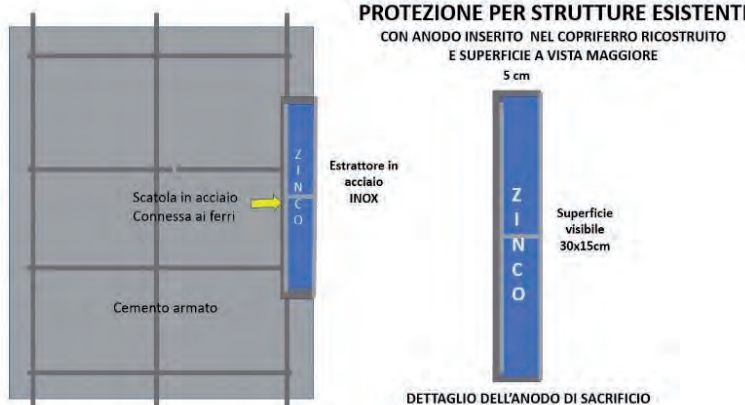
DETAGLIO DELL'ANODO DI SACRIFICIO

ZINCO

Superficie visibile 20x12cm

Per estrarre l'anodo in zinco si usa una potente calamita

**PROTEZIONE PER STRUTTURE ESISTENTI**  
CON ANODO INSERITO NEL COPRIFERRO RICOSTRUITO E SUPERFICIE A VISTA MAGGIORE



Scatola in acciaio Connessa ai ferri

ZINCO

Estrattore in acciaio INOX

Cemento armato

DETAGLIO DELL'ANODO DI SACRIFICIO

ZINCO

Superficie visibile 30x15cm





**21. Cavi aggiunti per ripristino della precompressione-cavi viplati**

zione e i cavi viplati che impediscono anch'essi la corrosione. BRIGHT è diverso, da tutti i metodi strumentali perché, oltre a basarsi su processi ispettivi e diagnostici *oggettivi* automatici, usa sensori di *emissione acustica*, che a differenza dei sensori di movimento o di forza, forniscono informazioni in tempo reale sul degrado pericoloso per la stabilità in punti precisi, che possono essere classificate a seconda della gravità rilevata su una scala di sicurezza ovviamente anche essa obiettiva.

Con il rilevamento dell'emissione acustica (ma anche la valutazione con i sistemi interferometrici satellitari) nei modi descritti, svolge in modo completo la funzione di tracciamento del degrado con un "parametro tecnico" secondo i principi della terotecnologia. Sarà come il rilievo dell'aderenza delle pavimentazioni, il CAT, usato ormai da decenni per tracciare l'ubicazione e la dimensione di pavimentazioni più o meno sicure, in modo tale da permettere la programmazione delle riabilitazioni tempestive necessarie. Sapremmo quindi anche quanti parti di ponti sono in condizioni "buo-

ne", "discrete", "scarse" per pianificarne la riparazione per tempo. In più BRIGHT con i suoi sensori "magici" ci richiamerà l'attenzione su tutte le parti che stanno diventando "scarse", cosa che neppure i rilievi ad alto rendimento delle pavimentazioni sono in grado di fare in modo automatico e che per i ponti è assolutamente necessario e vitale. BRIGHT non è solo il sistema che utilizza il sensore "magico" che ti informa in tempo reale sulla parte più sofferente e a rischio dell'opera tra le migliaia di parti simili non preoccupanti, ma anche il metodo per tenere sotto controllo tutte le altre parti. Nasce dall'uso ultradecennale delle esperienze di sorveglianza "artigianali" usate sin dai primi anni '80 nella società Autostrade SpA, e in altre organizzazioni stradali; ne utilizza le esperienze e arriva alla *gestione integrale oggettiva automatica* di reti di opere d'arte, che individua le parti delle opere sane e quella che sono che sono critiche per la loro funzionalità. Il risultato è stato raggiunto perché si è sempre pensato a ciò che era necessario per la gestione della rete, ricercando tra le infinite possibilità disponibili, quelle più adatte al conseguimento del risultato.

Ho una discreta sicurezza di essere sulla buona strada con i principi che hanno ispirato BRIGHT, ma non mi illudo sulla velocità della sua applicazione: partiti male come abbiamo fatto dopo il Polcevera, ci vorranno anni e forse altri disastri prima di imboccare una strada "diritta" come chiamavano una volta le autostrade, quando erano considerate giustamente il bene del Paese. Occorre però ragionare senza incertezze su ciò che effettivamente serve ai ponti e al Paese e svilupparlo al meglio nella direzione che promette risultati sostenibili, perché questo lavoro è comunque necessario e vitale. Forse lo adotteranno prima all'estero e noi ne godremo di ritorno, come spesso avviene; sarebbe sicuramente un ottimo risultato. Comunque, visto che oggi vogliamo che tutte le attività siano "sostenibili", perché non ricercare questa caratteristica intelligente anche per la gestione del nostro patrimonio infrastrutturale, vitale per il nostro futuro? ■

**22. La celebre pila 11 dell'ormai demolito viadotto sul Polcevera, a Genova, rinforzata 29 anni fa nell'ambito di un intervento di manutenzione innovativa coordinato dall'ingegner Camomilla, autore di questo articolo, al tempo direttore di un settore unico nel suo genere, che abbinava le Manutenzioni e tutte le loro attività, agli Studi: la DCSM della società Autostrade SpA**

