

Il ponte della Corona: restauro funzionale con impiego di tessuti in fibra aramidica

di LAURA CERIOLO

Per materiali compositi si intende una nuova generazione di materiali di ampio impiego nell'ambito delle costruzioni civili e non. Il loro utilizzo avviene in primo luogo nel campo dell'aeronautica e si estende successivamente agli altri settori strutturali.

I materiali compositi al servizio del restauro

I materiali compositi cui rivolgiamo l'attenzione (noti come FRP materials, acronimo di Fibers Reinforced Polymers) sono costituiti da matrici di polimero in cui sono immerse fibre tessute o unidirezionali. Tali materiali si possono presentare sotto forma di:

- profili pultrusi (sono ormai note le prime realizzazioni interamente in composito pultruso nel campo navale e aeronautico, velivoli, mezzi di trasporto pubblici e nel campo civile, edifici con ossatura in composito), rigidi e leggeri, con tipologie di mercato simili ai profili in acciaio;
- gusci o altre forme complesse e curvate, tramite processo di formatura, nel caso delle imbarcazioni, ad esempio;
- barre e reti, utilizzati quali armature di materiali tradizionali come il calcestruzzo, la muratura e il legno;
- tessuti impregnati di resina (che costituisce la matrice del composito).

Quest'ultima è la categoria che ci riguarda e anche la più diffusa, in quanto designata al rinforzo di strutture esistenti danneggiate. La conservazione del patrimonio architettonico in Italia rappresenta infatti un imperativo della massima gravità; di conseguenza il rinforzo, la riabilitazione o il restauro dell'esistente con compositi presentano grandi interesse e attualità.

Le fibre dei tessuti compositi sono di varia natura: aramide, carbonio, vetro, altre fibre minerali o ibride. Per laminati in composito si intendono inoltre la composizione e la sovrapposizione di vari strati (o lamine) di tessuti impregnati con resina. I compositi si possono formare *in situ* (tecnica del

wet lay-up) a seconda delle esigenze progettuali di intervento, mettendo insieme tessuto e matrice. Le tecniche di intervento consistono essenzialmente nella fasciatura (*wrapping*) o cerchiatura (confinamento) e nel placcaggio degli elementi deteriorati. L'intervento di rinforzo sul costruito coinvolge spesso manufatti antichi e di pregio, unici e peculiari, i quali richiedono un progetto "su misura". I compositi si prestano puntualmente a tali esigenze, offrendo la possibilità di essere progettati in base al dosaggio della quantità di matrice e fibra o alla formatura del laminato.

Con tali premesse l'applicazione del composito ha tempi ridotti, grazie alla sua estrema lavorabilità e all'intervento *in situ*. Altrettanto agevole è la rimozione dell'applicazione, requisito questo, auspicato dalle Soprintendenze, che garantisce la reversibilità dell'intervento e gli conferisce un carattere non invasivo. L'operazione permette di ottenere notevoli incrementi di resistenza e di duttilità della struttura, soprattutto in associazione con aderenti dal comportamento di tipo fragile, come la ghisa prodotta nell'Ottocento. In effetti, se le prime applicazioni di rinforzo con compositi hanno come aderente il calcestruzzo e la muratura, gli sviluppi più recenti sono indirizzati al rinforzo di strutture da ponte in ghisa o metallo in genere. Esistevano prima dell'intervento al ponte de la Corona a Venezia due applicazioni in tutto il mondo, in Gran Bretagna, che coinvolgono due ponti stradali in ghisa rispettivamente del 1810 e del 1874. È evidente che tali operazioni possono rivestire carattere di tipo preventivo e non soltanto "curativo", se adoperate ad esempio per rendere il manufatto meno vulnerabile all'impatto di un natante, soprattutto in prossimità di imposte e timpani dell'arco. Incidenti di questa natura si sono verificati a più riprese causando non solo la frattura, ma anche il distacco di parti degli elementi portanti (archi), compromettendo la funzione primaria del ponte e paralizzando il traffico fino all'avvenuta sostituzione degli archi danneggiati.

Le tecniche di manutenzione e riabilitazione

tradizionali prevedono infatti per i ponti in ghisa storici – e classifichiamo come tali quei ponti la cui ghisa si comporta bene a compressione, ma possiede una resistenza a trazione spesso inferiore a 10 kg/mm², con un allungamento a rottura quasi nullo e una resistenza all’impatto, misurata con la prova di resilienza, altrettanto ridotta – la sostituzione degli elementi gravemente deteriorati con elementi uguali per forma, ma che differiscono nel materiale, trattandosi a seconda dei casi di ghisa duttile o di acciaio. Raramente si può intervenire con la tecnica della saldatura, essendo la ghisa molto sensibile agli *stress* termici.

Il progetto di intervento con il composito avviene invece in questi termini: si agisce localmente sulla parte danneggiata, placcandola con il tessuto composito impregnato di resina. L’intervento ha lo scopo di arrestare la propagazione delle lesioni individuate, che mettono a rischio la fruibilità dell’opera. L’applicazione avviene, per quanto concerne il ponte de La Corona, nella parte interna dell’arco e, per quanto riguarda operazioni di prevenzione e di aumento della capacità portante della struttura, coinvolge tutto il manufatto seguendone il profilo delle piattabande superiore, inferiore e delle eventuali aperture e occhielli. L’applicazione viene successivamente trattata con vernice a protezione dell’umidità e delle radiazioni ultraviolette con pigmento tale da eliminare ogni impatto visivo della riparazione.

La scelta del composito di fibra aramidica (Kevlar 49) per l’intervento al ponte de la Corona si fonda sulla compatibilità elettrochimica di tale materiale che, a differenza della fibra di carbonio, non è conduttivo. La fibra di Kevlar, inoltre, esibisce un’alta resistenza all’impatto ed, essendo chimicamente inerte, non è soggetta a corrosione. La combinazione di elevati valori di resistenza e modulo fornisce alla struttura rinforzata un rivestimento superficiale esterno in grado di assorbire energia e di resistere al danneggiamento da impatto ripetuto.

Le prove sperimentali eseguite allo Iuav presso il laboratorio di scienza delle costruzioni su provette e campioni a scala reale sono servite alla caratterizzazione meccanica della ghisa storica prelevata da ponti veneziani, dopo averne definito le caratteristiche chimiche. Il programma ha previsto prove sull’efficacia dei compositi applicati, test di impatto, di flessione con e senza intaglio dei campioni riparati con Kevlar, test post-applicazione successivi al progetto di rinforzo del ponte de la Corona.

Problematiche relative agli interventi su ponti storici in ghisa

Senza entrare nel merito delle questioni relative all’autorevole disciplina del restauro e ai differenti approcci che essa contempla, il connubio (accoppiamento) tra il binomio conservazione-innovazione deve essere interpretato nel senso di incrementare la capacità di resistenza e la funzionalità dei monumenti storici, operando al tempo stesso nel rispetto e per la salvaguardia del patrimonio culturale. Con queste premesse parliamo di restauro funzionale.

La metodologia più comune di intervento su ponti in ghisa storici consiste nel sostituire gli elementi mancanti o ammalorati con altri identici, ma di nuova fusione in ghisa duttile o acciaio (come per i ponti di Sully e di St. Denis a Parigi). La maggior parte dei ponti in ghisa che vanta Venezia sono stati restaurati con questa tecnica.

Le strutture in ghisa documentano i primi esempi di prefabbricazione e assemblaggio, tecnologie proprie all’era industriale che non esistevano per le strutture in muratura. Esse vanno dunque conservate quali testimoni dell’epoca. Poiché la ghisa dell’Ottocento esibisce un comportamento di tipo fragile, privo di deformazioni residue che precedano la crisi, la funzionalità delle strutture in ghisa va analizzata in maniera particolare. Tuttavia, essendo i ponti ad arco veneziani pedonali, non soggetti quindi a fenomeni di fatica, ai fini della sicurezza essi lavorano a compressione e l’arco si mantiene all’interno della curva delle pressioni: configurazione statica ideale ai fini della loro conservazione.

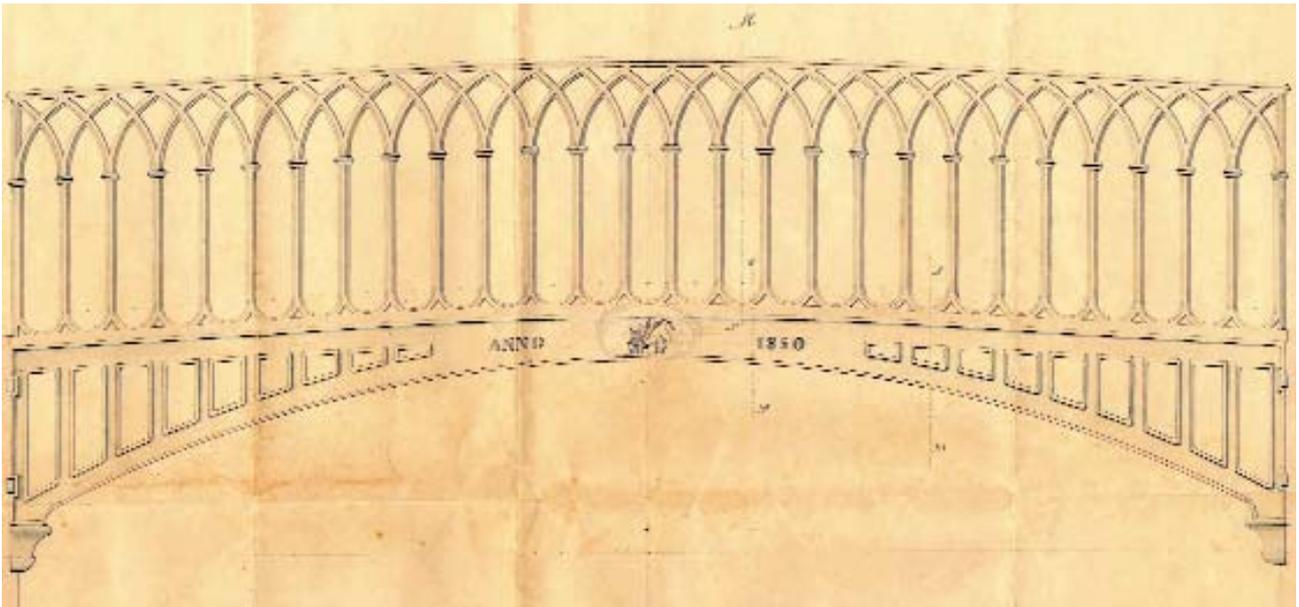
Il ponte de la Corona dalle origini all’intervento di restauro con FRP

“Anticamente il ponte appellavasi Ponte Lion della patrizia famiglia Lion, l’arma della quale scorgesi tuttora scolpita sopra un antico fabbricato respiciente il ponte medesimo”.

Realizzato nel 1851 dalla premiata fonderia dell’ingegnere Collalto di Mestre, è questo il primo ponte metallico eretto a Venezia, sul rio del Remedio nel sestiere di Castello.

Il ponte è così ora chiamato da una locanda all’insegna della corona esistente nel Settecento, forse nel medesimo luogo dove si trova oggi l’albergo Corona.

Lo Zucchetta riporta le seguenti notizie: il De’ Barbari ci mostra una semplice passerella di legno che attraversa lo stretto corso d’acqua. Il



Il ponte de la Corona in un disegno della metà dell'Ottocento

Coronelli, invece, descrivendo la situazione quale era nell'anno 1697, parla già di una struttura in pietra, ma priva di bande laterali.

Nel 1776 il ponte in pietra viene sottoposto a restauri.

Nel 1850 il Municipio, trattandosi di ricostruirlo *ex novo*, opta, dato il basso costo, per una costruzione in metallo la cui fusione viene affidata alle fonderie Odoardo Collalto di Mestre.

A tal proposito si citano i documenti conservati presso l'archivio storico della Celestia a Venezia, Congregazione municipale del 4 ottobre 1850:

“Si approva che venga costruito in ferro fuso il piccolo ponte denominato della Corona a San Zaccaria... a guisa di quel di legno... omettendo però il piccolo leone, e facendogli invece da una parte l'iscrizione a spese civiche, e dall'altra l'anno 1850. Ordina Codesto ufficio stesso di far eseguire a mezzo dell'impresa di manutenzione navale tutte le opere murali che occorsero però, comprese le gradinate in pietra arenaria facendogli giurare la spesa relativa nei giornali di manutenzione e raccomandandogli poi in ogni caso che quell'ottima opera non superi le 1400”.

Si tratta di una struttura costituita da tre centine fuse in ghisa, sagomate inferiormente a formare un arco ribassato, avente una luce di soli 4 m circa. Su di un lato si legge la data di costruzione: “anno 1851”, sull'altro l'iscrizione “a spese civiche”. Le rampe d'accesso hanno sei gradini per parte, mentre il piano di calpestio, recentemente sostituito, è ora fatto di lamiera d'acciaio inossidabile rivestita come

di consueto in asfalto.

Altre notizie riguardo il ponte sono fornite dal Romanelli che così riporta: “L'officina e fonderia dell'ingegnere Collalto di Mestre inizia nel 1850 col ponte della Corona nei pressi di San Giovanni nuovo a fornire alla città i pregevoli ponti in ferro che ancora possono vedersi in buon numero: i progetti Collalto miravano a un effetto di trasparenza e di leggerezza attraverso un uso sapiente e discreto d'elementi di struttura come d'ornato propri dell'ingegneria di ferro coniugati alle esigenze ambientali veneziane. L'esilità e la solidità dei manufatti, il basso costo iniziale, la lunga durata e le ridotte spese di manutenzione, la neutralità ed eleganza del disegno furono tutti elementi che contribuirono a fare di questi ponti la soluzione pressoché ideale a molti dei problemi di viabilità”.

La struttura originaria e le sue modificazioni

È un ponte di tipologia ad arco a via superiore, la cui struttura portante è costituita da tre arcate in ghisa. Si tratta dell'unica struttura da ponte in ghisa presente a Venezia composta da tre archi affiancati. Le spalle del ponte sono costituite dalla massa muraria degli edifici che si affacciano sul rio. Gli archi sono a sesto ribassato e hanno campate non parallele di lunghezza 4,19 m, 4,20 m e 4,23 m. L'impalcato ha una larghezza variabile da 1,64 m a 3,6 m per permettere l'accesso a un'abitazione, il cui ingresso è possibile solo direttamente dal ponte. La sezione trasversale degli archi ha una forma irregolare: varia in altezza lungo il proprio asse.

Inoltre, in elevato, i tre archi risultano non pieni, ma forati, laddove gli elementi pieni sono i montanti verticali, di altezza variabile decrescente dalle imposte alla chiave dell'arco, i quali collegano membratura superiore e inferiore dell'arcata. L'accesso al ponte avviene mediante dei gradini in pietra che sono posti sulla calle di ingresso alla struttura e consentono il raggiungimento della quota necessaria per l'attraversamento del rio senza intralciare il transito delle barche; il piano di calpestio risulta quasi piano. L'impalcato del ponte è costituito di bitume raccolto in vasche di acciaio della profondità di alcuni centimetri ed è sostenuto, a causa dell'ultimo intervento di ristrutturazione, da una serie di travi trasversali in acciaio con sezione a C poggianti su altre travi in acciaio a C piazzate sopra gli archi di ghisa e di cui seguono il profilo. L'arco centrale, in particolare, è affiancato da due di queste travi. I diversi elementi strutturali sono connessi con bulloni, alcuni dei quali risultano visibili anche esternamente, lungo il prospetto esterno degli archi. I traversi originali sono stati rimossi e sostituiti dalla predetta nuova struttura. Quest'ultima ha sollevato gli archi in ghisa da ogni funzione strutturale; infatti, lavorando la stessa ad arco fortemente ribassato non caricava detti archi, i quali d'altra parte si presentavano non più idonei a sopportare il carico dell'impalcato e i sovraccarichi della folla.

Per quanto riguarda l'ancoraggio delle arcate alla muratura, questo è piuttosto atipico e costituisce un'altra particolarità del ponte de la Corona rispetto agli altri ponti in ghisa di Venezia. La zona interessata dall'appoggio è rivestita di pietra d'Istria e complanare alla muratura degli edifici laterali; non siamo in presenza di una mensola di appoggio, ma di un incastro realizzato con una piastra di ghisa collegata alle spalle mediante quattro tirafondi e di una piccola mensola in ghisa anch'essa ancorata mediante due tirafondi.

Diagnosi preliminare al presente intervento

L'analisi storica, i rilievi geometrico e delle lesioni, le indagini sulla struttura avevano evidenziato uno stato di degrado generalizzato, con presenza di lesioni e cricche nelle sue sezioni più deboli, dovute alla natura stessa della ghisa dell'epoca, che si presenta come un materiale dal comportamento fragile, e ai numerosi impatti di natanti subiti dal ponte in condizioni di marea alta. La situazione era aggravata da uno stato di corrosione avanzata con perdita di sezioni resistenti, dovuta all'ambiente lagunare

aggressivo in cui si situa il manufatto e al deposito degli escrementi dei piccioni. Una descrizione dettagliata dello stato di conservazione in cui versava il ponte è fornita nel paragrafo seguente.

Il degrado e le lesioni

Dall'analisi del ponte eseguita negli anni 2000 e 2001, risultava che esso avesse subito nel corso degli anni diversi interventi di manutenzione e ristrutturazione, l'ultimo dei quali particolarmente invasivo, poiché aveva determinato la sostituzione dell'impalcato con una struttura d'acciaio autoportante.

I primi interventi si leggono con la localizzazione di sagome a L di ferro imbullonate in chiave internamente e in affiancamento ai due archi esterni e di una sagoma a forma d'U per l'arco centrale, al fine di sanare le fessure che avevano avuto origine nella ghisa. Il ponte, infatti, incastrato agli estremi, si era lesionato nella sezione di chiave. Questi interventi sono databili a inizio secolo (la ghisa non è saldata).

L'operazione di manutenzione precedente il nostro intervento risaliva a circa 15 anni fa (testimonianza del proprietario dell'officina Scarpa, che curò l'intervento). Il ponte versava già in condizioni compromesse, aggravate dall'impatto particolarmente violento procurato da un natante. Di questa ultima azione di recupero l'ispezione al



Lo stato di degrado del ponte prima dell'intervento di restauro

ponte rivelava la saldatura d'alcune fessure. Inoltre il parapetto risultava caratterizzato da colonnine non a piombo. Questa anomalia sembra essere causata dalla modificazione dell'impalcato del ponte, che in origine doveva essere di pietra, secondo la scrittura del 18 maggio 1851, che riporta peraltro un episodio di danno:

“Due pezzi di arenaria per ora danneggiati... in causa che si spezzarono per l'incuria dei lavoratori. Le parti in ferro fuso costruite, però, sono perfettamente e in ogni singola parte definitivamente confezionate”.

Dai disegni originali di progetto (1850) risulta un'alzata di elevato spessore. Prima dell'intervento che costituisce l'oggetto di questo scritto, il ponte sosteneva un impalcato di acciaio ricoperto di asfalto portato da travi a C che avevano innalzato di alcuni centimetri il piano di calpestio. I traversi che sostenevano le lastre di pietra non sono stati conservati, ma si leggono ancora sugli archi le sporgenze che li dovevano reggere. L'arco centrale non era stato recuperato nella sua funzione strutturale ed era stato affiancato da due travi a C a sostegno dell'impalcato di acciaio. Il parapetto risultava collaborante con gli archi poiché incastrato alla muratura con funzione di spalla del ponte. Questa soluzione, non presente in origine, si era resa necessaria al momento dell'intervento di restauro per sostenere il parapetto stesso, essendo stato il profilo del ponte modificato con l'introduzione dell'impalcato di acciaio. Al momento di intervenire con il rinforzo in tessuto composito, durante lo smantellamento dell'impalcato e delle travi in acciaio adiacenti l'arco centrale e del rinforzo dello stesso, è emerso che l'arco fosse spezzato in due parti quasi in chiave con una importante lacuna, circa 10 cm, di materiale. L'aspetto del ponte risultava diverso dal prospetto disegnato all'epoca poiché in facciata si notava, tra la base della ringhiera e l'estradosso dell'arco, uno spazio colmato dalla sporgenza della trave a C sagomata. L'altezza della trave servirebbe a sostenere il carico che grava sulla struttura. Questo potrebbe spiegare l'anomala ringhiera che non segue il profilo dell'arco, come nel prospetto originale, ma appare collegata a esso mediante dei monconi di ferro in modo da permetterle di coprire l'intera lunghezza dell'arco aumentata dall'innalzamento del piano di calpestio.

Nel 1999 venivano effettuati lavori di



Una saldatura effettuata nell'ultimo intervento di restauro, fine anni ottanta

consolidamento e risanamento dei muri di sponda, pertanto le spalle del ponte risultavano solide e idonee a sostenere la struttura al momento dell'intervento in oggetto.

Prove sperimentali

Prove non distruttive

Ai fini di verificare l'efficacia dell'accoppiamento ghisa-AFRP¹ per il rinforzo del ponte sono state eseguite prove a vario livello. Prelievi di materiale provenienti da ponti coevi sono stati analizzati con spettrofotometro per determinare la composizione della ghisa e ne hanno confermato la sua natura fragile. Alcune prove di pulitura del materiale sono state eseguite presso il laboratorio di scienza delle costruzioni dello Iuav per verificare il tipo di pulitura della ruggine più adatto e meno aggressivo per il ponte e per l'ambiente circostante. Altri test di incollaggio del composito sono stati approntati per dare prova della sua rimovibilità (requisito richiesto dalla Soprintendenza). Successivamente è stata

¹ Acronimo di Aramid Fiber Reinforced Polymers (Kevlar®)

tabella 1

proprietà dei materiali utilizzati	resistenza a trazione (MPa)	E (GPa)	ILSS tessuto secco (MPa)	ILSS tessuto umido (MPa)	contenuto fibre - peso (%)
tessuto multiassiale	195,0	11,8			
tridirezionale 0/+45/-45 (KTX360)	336,0	21,0			50
tridirezionale 90/+45/-45	54,0	7,0			50
bidirezionale 281	389,0	22,0	18,9	16,5	
unidirezionale nastro NKU360	683,0	40,0			68

testata l'adesione fra i due materiali utilizzando la tecnica del *wet lay up* e il *peel test*. Tali prove sono servite per simulare la realtà nell'intervento al ponte de la Corona e per scegliere il metodo di pulitura più adatto per un'adesione ottimale fra ghisa e tessuto composito. Sono stati poi eseguiti test a trazione del nastro di AFRP unidirezionale (del tipo NKU360 nella tabella 1) e dei tessuti bidirezionale e triassiale (rispettivamente Style 281 e KTX360). Sul tessuto impregnato sono state eseguite prove per la determinazione dell'*Inter Laminar Shear Strength* (ILSS), selezionando diversi tipi di tessuto corrispondenti a differenti requisiti richiesti nell'applicazione al caso reale. Tutti i risultati sono illustrati nella tabella 1. Sono stati eseguiti test di invecchiamento accelerato e prove per la determinazione della reologia della resina. Una prova sperimentale molto utile è rappresentata dalla tecnica di indagine con ultrasuoni, una sorta di ecografia della struttura su cui viene applicata la fasciatura in composito, in grado di evidenziare eventuali difetti di adesione, scollamenti, bolle. I dati vengono letti su di una mappa della struttura che presenta colori di intensità diversa in presenza di difetti. Durante le prove preliminari all'intervento della Corona una trave in ghisa è stata fasciata con tessuto di AFRP, sotto il quale erano stati simulati difetti artificiali di diverse dimensioni, dell'ordine di grandezza di 0,1 mm. La trave è stata quindi sottoposta al tipo di test ora descritto. La ricerca ha dimostrato che le proprietà meccaniche degli FRP sono fortemente influenzate dalla qualità dell'applicazione, in particolar modo nel caso del ponte de la Corona, sottoposto a condizioni ambientali aggressive piuttosto severe. Questo tipo di controllo verrà eseguito sul ponte in maniera periodica a scadenze regolari.

Prove meccaniche

Test di flessione su quattro punti

Su travi in ghisa coeve a scala reale, di cui alcune

integre, altre intagliate in mezzeria per simularne le cricche e altre ancora intagliate e rinforzate con AFRP, sono state eseguite prove di flessione su 4 punti ai fini di quantificare il beneficio svolto dal rinforzo. Le travi intagliate e rinforzate con uno o due strati di AFRP portate a rottura hanno esibito un incremento della rigidità rispetto a quelle non rinforzate. Il diagramma carico/spostamento estrapolato dal test di flessione su quattro punti ha evidenziato inoltre che le curve paiono simili per forma, ma il modo di rottura si differenzia alquanto. La trave rinforzata con un solo strato di AFRP collassa per rottura nel composito, mentre nella trave rinforzata con due strati si verifica lo scollamento dello stesso dal metallo. Il distacco ha inizio in mezzeria della trave, laddove si trova l'intaglio, per estendersi lungo tutta la parte rinforzata, come d'altronde prevedibile. In effetti l'energia impiegata per la rottura nel composito risulta maggiore di quella necessaria allo scollamento. Evitare il *peeling off* della trave è possibile prevedendo un incremento della superficie rinforzata ai fini di accrescere la resistenza di adesione. La superficie di rottura della ghisa si mostra netta, quasi perpendicolare alla direzione longitudinale delle travi non rinforzate a ghisa nuda, senza snervamento che preceda la crisi, come del resto ci si aspettava.

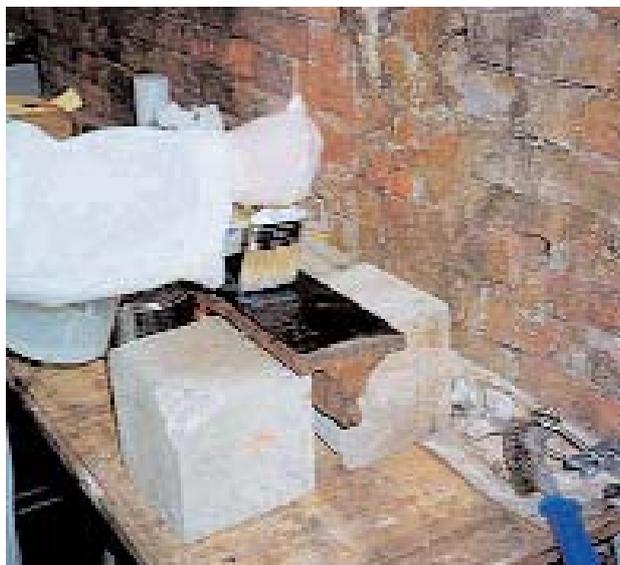
Charpy test

Test Charpy su ghisa nuda e ricoperta di composito. Per quanto riguarda il test di resilienza eseguito con il pendolo di Charpy, attuato secondo la norma Standard EN10045, utilizzando il tessuto aramidico Kevlar 49 prodotto da Seal spa, le provette con intaglio rinforzate con AFRP KTX360 hanno esibito un incremento del 25% in valore assoluto dell'energia di frattura necessaria a rompere il rinforzo rispetto alle provette intagliate non rinforzate, ciò grazie alla elevata capacità, da parte del composito aramidico, di assorbimento di energia di impatto.

Modellazione numerica dell'impatto di un'imbarcazione sul ponte

L'impatto di un natante in una zona della struttura metallica del ponte produce:

- un effetto localizzato di forti gradienti tensionali a carattere impulsivo;
- una propagazione di onde vibrazionali che viaggiano nella struttura;



Test di adesione del composito su provino in ghisa e test di flessione su travi coeve al ponte

- una eccitazione dinamica della struttura nel suo complesso.

I tre effetti menzionati sono tutti dissipativi; le eventuali cricche dissipano energia (di frattura). La struttura del natante a sua volta dissipa energia per la deformazione del natante stesso, per la sua frattura e per l'acquisizione del moto di rimbalzo. Risulta quindi una fenomenologia dipendente, oltre che dalla velocità del natante, dalle masse e dalle rigidità dei corpi in collisione.

Per queste ragioni, se la struttura metallica si presenta con la superficie interna dell'arco (quella non visibile) ricoperta di composito FRP (Fiber Reinforced Polymers), si ottiene un effetto "damping" dovuto all'elevata velocità di deformazione del composito, soprattutto se aramidico. Le fibre aramidiche (AFRP, Aramid Fiber Reinforced Polymers) infatti hanno in se stesse proprietà di "damping", che sono amplificate per la dissipazione nel composito (*debonding* di interfaccia resina/fibre).

Un altro importante beneficio è rappresentato dall'effetto di arresto delle lesioni che viene esercitato dal composito su potenziali *crack*. Sono state pertanto eseguite simulazioni numeriche degli effetti dell'impatto di un natante alle imposte dell'arco nelle due situazioni di rinforzo e non, prevedendo un'area di impatto di 600 cm², con un'imbarcazione di 350 kg massa alla velocità di 5 km/h.

Obiettivi dell'intervento

Il ponte conserva *in situ* i tre archi in ghisa dov'erano. Il parapetto si conserva com'era. La rimanente parte del ponte – sovrastruttura, traversi, ripartitori e pavimentazione – viene rimossa e sostituita in quanto non originaria e ostativa alla funzione strutturale degli archi in ghisa.

Gli archi in ghisa vengono restaurati e rinforzati con la tecnologia innovativa utilizzando materiali compositi (AFRP) ai fini di restituirne la funzione statica, mentre di essi viene incrementata la capacità di assorbire eventuali urti di natanti demandando al composito aramidico la capacità dissipativa.

La funzione portante degli archi viene integrata da nuovi elementi trasversali in acciaio che sopperiscano alle esigenze di trasferire agli archi il carico di folla compatta consentendo anche di allocare le canalizzazioni dei servizi. Tale rete di servizi viene raccolta in un'unica scatola metallica sagomata ad arco autoportante. Inoltre l'accesso

alle canalizzazioni per la manutenzione viene reso agevole. Comunque la sagoma originaria del ponte non viene variata se non in un leggero innalzamento della quota di estradosso, necessario per contenere le canalizzazioni nella sagoma in chiave degli archi. In sintesi si è puntato al restauro funzionale degli archi e alla riduzione della vulnerabilità del sistema per fenomeni di impatto dei natanti.

Descrizione del progetto di rinforzo

Gli archi in ghisa sono stati rinforzati con materiale composito di fibra aramidica multiassiale (KTX360-EC181) e con tessuto interallacciato (Style 281-EC 181), mentre le aperture sono state fasciate con nastro intrecciato unidirezionale (NKU360) prodotti da Seal spa. Gli archi laterali sono stati foderati solo nella parte interna, l'arco centrale invece da entrambi i lati. Il tessuto è stato applicato con la tecnica del *wet lay up*, provata preventivamente in officina su dima realizzata in legno.

La struttura interna agli archi viene integrata con una struttura di nuova costruzione, così composta: profilo longitudinale a C, opportunamente calandrato seguendo il raggio di curvatura dell'estradosso degli archi, all'interno di ciascun arco (di conseguenza doppio per l'arco centrale) chiuso alle spalle da un profilo a C a esso trasversale che lo accoglie.

La struttura d'acciaio è controventata con cavi

d'acciaio disposti a croce nel piano intradossale dell'impalcato.

La sovrastruttura d'impalcato è realizzata con vasche d'acciaio inox riempite di resina, che fungono da piano di calpestio (questa soluzione è stata voluta dalla committenza, sostituendola a quella lignea proposta dai progettisti).

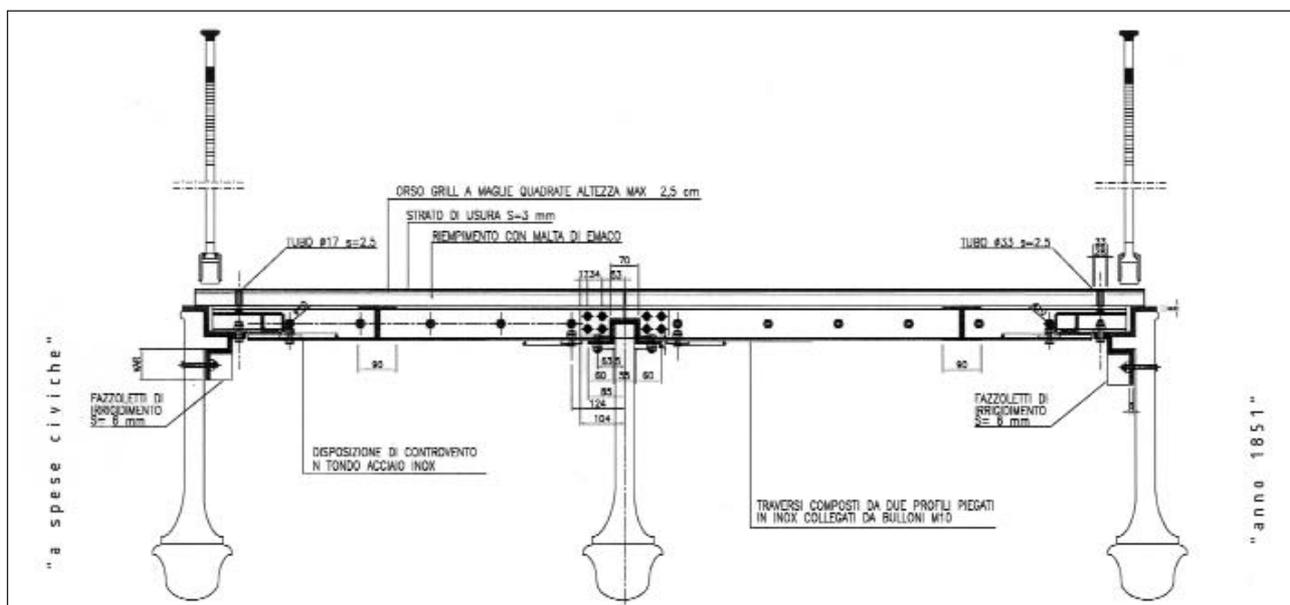
L'intero ponte viene ridipinto, ivi compresi gli strati di composito.

Il rinforzo è stato realizzato in sole due settimane nel febbraio 2002, mentre i tempi per la preparazione del ponte al rinforzo (smantellamento della sovrastruttura d'impalcato e messa a nudo degli archi), creazione di una piattaforma di lavoro soprastante il canale, ripristino dell'impalcato e dipintura finale hanno richiesto tempi maggiori, consentendo l'apertura al pubblico nel maggio dello stesso anno.

A conoscenza dell'autore si tratta del primo esempio di rinforzo di struttura metallica con compositi realizzato in Italia.

Fasi costruttive

Essendo i lavori stati intrapresi nel mese di febbraio (2002), si rendeva necessario mantenere il sito del ponte a una temperatura costante non inferiore a 5° C (temperatura sotto la quale la resina, matrice del composito, non avrebbe polimerizzato). La temperatura è stata raggiunta con l'impiego di stufe



Sezione trasversale della sovrastruttura di impalcato (progetto esecutivo, ing. Frezza)

scheda tecnica

progetto	Laura Ceriolo
consulente scientifico e supervisore	Angelo Di Tommaso
collaboratori	Filena Di Tommaso, Alvaro Casanovas
contractor	Seal spa, Legnano (MI); Savarese costruzioni spa, Venezia
fornitura materiali composito	Seal spa, Legnano (MI)
proprietà	Comune di Venezia
concessionario	Insula spa
direttore lavori	Fausto Frezza
data di messa in servizio	febbraio 2002, 2 settimane lavorative per applicazione
sponsor	Seal spa, Legnano (MI), Du Pont de Nemours sa, Genève (CH)
costo del materiale (esclusa forza lavoro)	1.500 euro

posizionate *in situ*. Dopo una prima pulizia meccanica del ponte ai fini di rimuovere i diversi strati di vernice, eseguita con decappatore ad aghi e manualmente con spazzola metallica, si è resa necessaria anche una più approfondita pulizia chimica manuale (tempistica: un giorno per 3 persone). La tappa successiva è consistita nella stesura del primer anticorrosivo, operazione che ha richiesto un'altra giornata. Le operazioni appena descritte e quelle successive sono state eseguite da personale specializzato del gruppo Seal. Nelle giornate successive, effettuato il taglio dei tessuti ai piedi del ponte, su piattaforma fondata nel canale, si è proceduto a impregnare gli stessi e a farli aderire alle parti interne degli archi laterali e ad ambo le pareti dell'arco centrale e intorno alle aperture delle imposte. Polimerizzata la resina,

alcuni pezzi sono stati rifilati e sagomati con fresa circolare. Infine, dopo un'ulteriore limatura, si è passati alla stesura della resina pigmentata in grigio antracite. Successivamente l'impresa di costruzioni delegata alla posa dell'impalcato ha provveduto al carteggio della resina e al montaggio della scatola autoportante contenente le reti dei servizi, che non è stata calandrata per ragioni di costi. Infine è stato montato l'impalcato (anche le travi d'acciaio di sostegno non sono state calandrate), solidarizzato agli archi rinforzati con AFRP tramite bullonature, che hanno recuperato i fori precedenti il rinforzo, nei quali erano stati preventivamente inseriti degli spinotti. Attualmente il ponte è in servizio e sottoposto a monitoraggio e a controlli non distruttivi per ottenere conferma delle stime di durabilità che comunque risultano ottimali.



Le fasi di rinforzo degli archi in ghisa con materiale composito di fibra aramidica

Monitoraggio e test non distruttivi post-applicazione

Monitoraggi e ispezioni sono tutt'ora in corso sul ponte de la Corona ai fini di valutare l'efficacia e la qualità del rinforzo con gli FRP. In particolare si tratta di prove di valutazione sulla durabilità del composito e sull'assorbimento di umidità del composito stesso.

Nel mese di marzo 2003 il ponte è stato indagato in tutta la sua superficie rinforzata con Kevlar con un martelletto (*tap coin testing*) costruito a norma ASNT vol 9 (Special Non destructive Test Method sez. 5 Tap Testing). Sono state riscontrate circa in mezz'ora dei due archi laterali e alle imposte due bolle del diametro di 2 cm circa, che si ritiene già formate all'epoca dei lavori di applicazione del composito aramidico. Non essendo di nuova formazione le due bolle non destano alcuna preoccupazione. Non si sono reperiti scollamenti di alcuna entità. Inoltre nel mese di maggio dello stesso 2003 la tecnica a ultrasuoni già descritta nelle pagine precedenti e applicata a campioni di ghisa è stata messa in atto per il ponte stesso. Quest'ultima si è rivelata uno strumento di indagine molto più sensibile, anche se più oneroso, del *tap coin method*, che ci ha confortato sui risultati ottenuti con il martelletto, rivelandoci e confermando la posizione e l'entità dei difetti (bolle con distacco del composito) già individuati.

A distanza di più di un anno dall'ultimazione dei lavori il ponte si conserva in ottimo stato.

Bibliografia

- F. Bastianini, L. Ceriolo, A. Di Tommaso, G. Zaffaroni, *Issues related with the use of Reinforced Polymers in the Reparation/Restoration of an Historical Cast Iron Bridge*, in *23rd International Conference, Sampe Europe*, Society for the Advancement of Material & Process Engineering, Paris, 9-11 aprile 2002, pp.23-32.
- F. Bastianini, L. Ceriolo, A. Di Tommaso, G. Zaffaroni, *Mechanical and non destructive testing to verify the effectiveness of composite strengthening on an historical cast iron bridge in Venice (Italy)*, in *MCM2002, XII International Conference on Mechanics of Composite Materials*, Riga, Latvia, 9-13 giugno 2002.
- L. Ceriolo, A. Di Tommaso, *Problems of restoration of old cast iron bridges using Aramid Fiber Reinforced Polymers*, in *5th International Congress on Restoration of Architectural Heritage*, CICOP, International Center for the Architectural Heritage Conservation, Firenze, 18-23 settembre 2000, pp. 1409-1418.
- L. Ceriolo, A. Di Tommaso, *Cast Iron Bridge Failure due to Impact: reduced Vulnerability through FRP Composite Materials Strengthening*, in *National Conference on Structure failures and reliability of civil constructions*, Iuav, Venezia, 6-7 dicembre 2001, pp. 535-544.
- L. Ceriolo, A. Di Tommaso, *Il ponte in ghisa "de la Corona" a*

Nel frattempo alcuni campioni di Kevlar + resina (senza pigmento) ritagliati dal ponte in oggetto all'epoca dell'applicazione (febbraio 2002) erano stati esposti in ambiente aggressivo lagunare e sono stati pesati prima e dopo l'esposizione. L'aumento di peso corrisponde a circa il 2%, valore accettabile in letteratura (Zaffaroni). Si ritiene inoltre che il materiale abbia raggiunto un livello di saturazione quasi completo e non presenterà ulteriori incrementi in peso, salvo verifiche successive sull'attendibilità del dato.

Conclusioni e sviluppi

Tutte le prove sperimentali condotte su campioni in ghisa accoppiata a AFRP a scala reale e ridotta sono state molto soddisfacenti e incoraggiano all'utilizzo della tecnica di rinforzo descritta ai fini di incrementare resistenza e duttilità ed estendere la vita delle strutture in ghisa storiche o in metallo in genere. Il monitoraggio e le prove post applicazione al ponte medesimo confermano il successo di tale tecnica, che sarebbe quindi auspicabile adoperare per altri ponti metallici veneziani, per restituirne la funzione strutturale e ridurne la vulnerabilità ai potenziali impatti dei natanti, evitando lacune dovute al distacco e alla rottura fragile di elementi o parte di essi, inevitabilmente perduti nelle acque sottostanti. Il raffronto con interventi precedenti su analoghe strutture metalliche coeve ha evitato la costosa e lunga operazione di smontaggio e ripristino in officina della struttura.

Venezia. *Riduzione di vulnerabilità e restauro funzionale*, in *Manuale sul consolidamento*, Mancosu editore, Roma, in corso di stampa.

G. Romanelli, *Venezia Ottocento*, Stamperie Veneziane, Venezia 1977.

G. Zucchetto, *Venezia ponte per ponte*, t. I e II, Stamperie Veneziane, Venezia 1999.

L'Autore desidera ringraziare i tecnici del laboratorio di scienza delle costruzioni dello Iuav di Venezia per la loro preziosa collaborazione nell'esecuzione delle prove sperimentali.

Seal spa e Du Pont de Nemours Int. SA hanno finanziato ricerca e progetto; Seal inoltre ha finanziato le fasi operative e fornito i materiali per l'intervento: a essi va la più viva gratitudine. Si ringraziano inoltre Insula spa che ha approvato l'intervento innovativo sul ponte de la Corona, l'ing. Fausto Frezza, direttore dei lavori dell'insula di Maria Formosa, per la disponibilità, la Soprintendenza di Venezia e gli operatori dell'impresa Savarese Costruzioni spa.

I più vivi ringraziamenti sono infine indirizzati al prof. Angelo Di Tommaso, supervisore e consulente scientifico al progetto e ai collaboratori al progetto arch. Filena Di Tommaso e arch. Alvaro Casanovas e alle ricerche storiche arch. Valeria Zerbo.