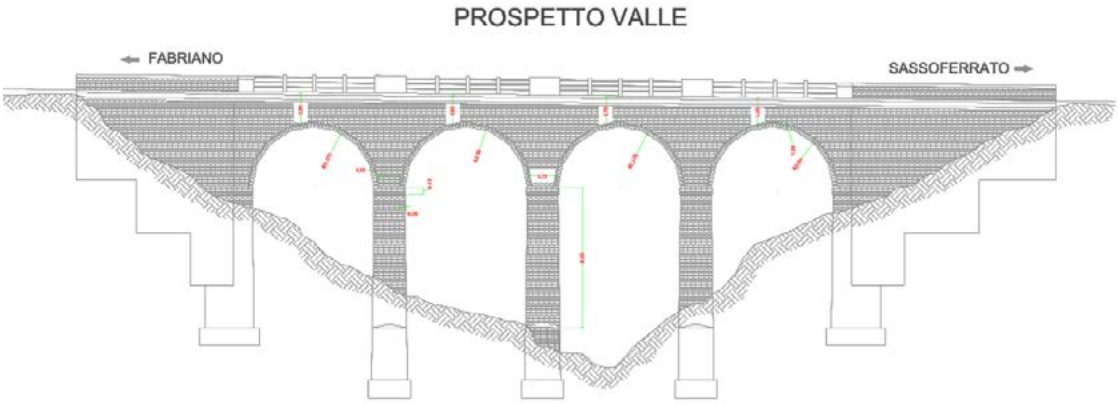
INFRASTRUTTURE IN MURATURA:
IL PROGETTO DI MIGLIORAMENTO SISMICO DI UN PONTE
Tecniche differenti per problematiche complesse

Autore: Ing. Alessio Pierdicca (CapStudio Srl) con la collaborazione di Fibre Net

L'articolo illustra un intervento di rinforzo strutturale con materiali compositi fibrorinforzati effettuato su un ponte in muratura soggetto a vicolo, ammalorato e strutturalmente non adeguato alla normativa vigente. La scelta del progettista è stata orientata ad adottare soluzioni di intervento innovative proposte da Fibre Net e basate su materiali compositi – CRM e FRP – che spaziano dalla tecnica dell'intonaco armato con rete in fibra di vetro, all'impiego di barre pultruse fino alla ristilatura armata dei giunti con trefoli in acciaio.



Le patologie strutturali e materiche rilevate sul ponte in provincia di Ancona hanno richiesto la definizione di un adeguato consolidamento in grado di arrestare il degrado in corso e garantire lo stato di efficienza della struttura in sicurezza con adeguamento alla normativa vigente.
La diagnostica eseguita e la modellazione ad elementi finiti hanno consentito di calibrare le soluzioni più opportune per le pile e per le volte del ponte integrando tecniche di rinforzo differenziate e puntuali.

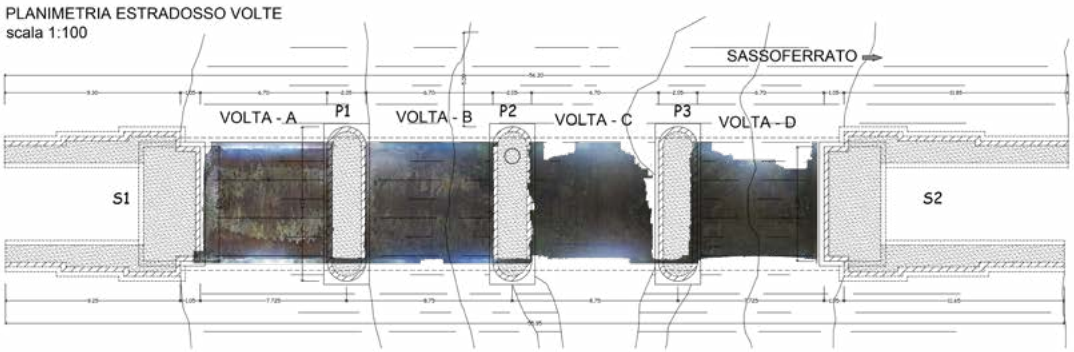
La procedura con cui è stato affrontato il progetto consiste quindi in 3 fasi distinte e complementari: la **conoscenza del manufatto**, la **modellazione numerica a elementi finiti** e la **valutazione e mitigazione del rischio sismico** attraverso interventi di riabilitazione strutturale.
Accanto alle più comuni indagini diagnostiche per la caratterizzazione dei materiali di costruzione, il monitoraggio dinamico dei ponti riveste ormai un ruolo determinante nell'ambito della conoscenza strutturale in quanto permette di determinare i parametri strutturali (frequenze proprie di vibrazione, smorzamento e forme modali) per via sperimentale e di correlarli con le analisi a elementi finiti (Finite Element Method F.E.M.). Sulla scorta di un modello F.E.M. calibrato sono state condotte le analisi strutturali e progettati gli interventi di consolidamento, con l'obiettivo di preservare le caratteristiche costruttive dell'opera. Essendo il manufatto di interesse storico sono stati progettati interventi di consolidamento che mirassero alla conservazione delle murature faccia vista e delle volte in muratura senza alterarne l'architettura.

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE DEL PONTE

Il ponte ha una luce complessiva di 34 m (distanza tra le due spalle), le volte sono a tutto sesto per un raggio pari a 3,50 m, le pile hanno un'altezza massima dall'imposta della volta pari a 10 m dal livello del terreno di fondazione.

PILE: costituite da **muratura in mattoni** pieni per la porzione perimetrale esterna (a 3 teste) ed un nucleo centrale in pietrame disordinato.

VOLTE: costituite da un **arco in muratura a 3 teste** con soprastante riempimento in materiale sciolto e non coerente che svolge la funzione di rinfianco.



VISTE ASSONOMETRICHE
nuvole di punti ottenute dal rilievo fotogrammetrico

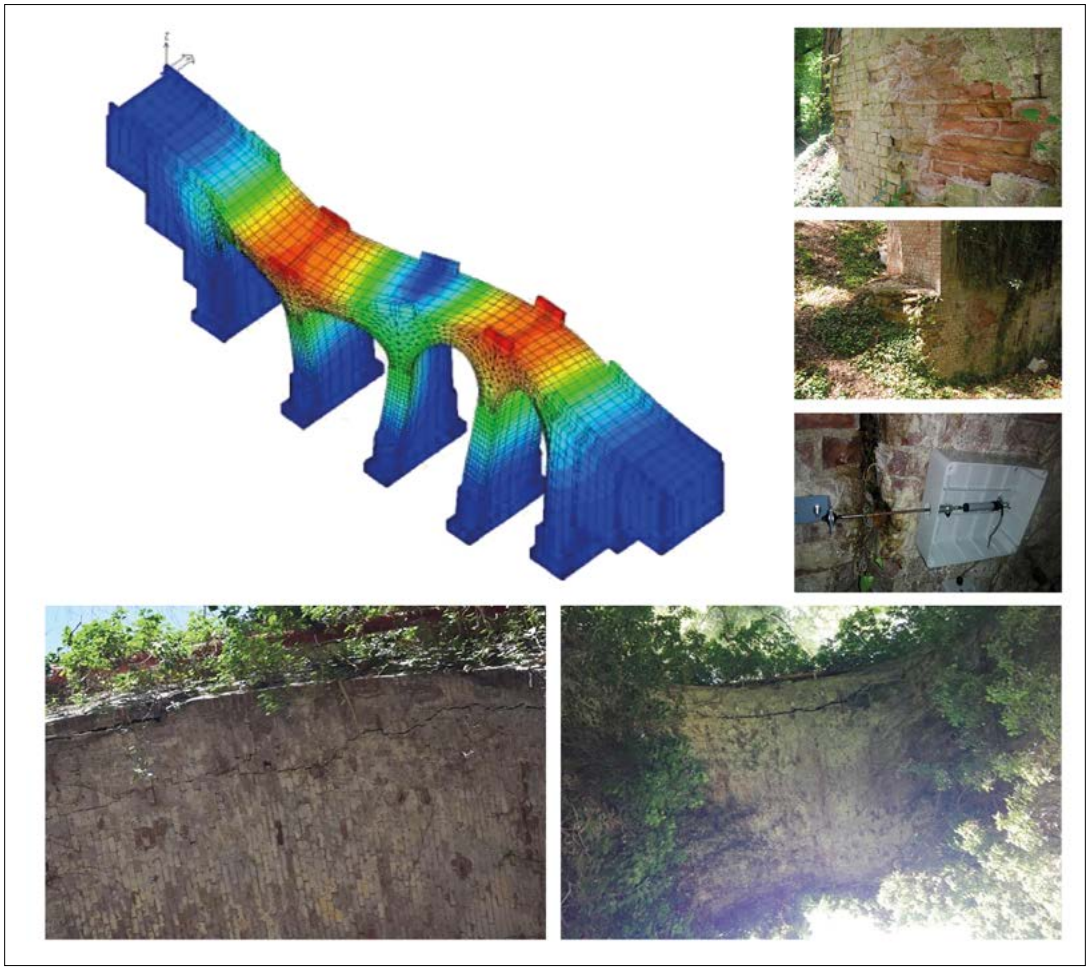
Nella fase di conoscenza il rilievo fotogrammetrico eseguito con laser scanner ha consentito l'identificazione di dettaglio della geometria del ponte e l'individuazione dei danni della struttura in muratura. Nelle viste assonometriche e nell'integrazione delle nuvole di punti nella planimetria dell'estradosso sono leggibili impostanti informazioni materiche e strutturali.

INDAGINI DINAMICHE

Una campagna di indagini dinamiche è stata svolta con l'**obiettivo di identificare le principali frequenze proprie di vibrazione, smorzamenti e forme modali.** Grazie a questi dati è stato possibile calibrare i modelli FEM per le analisi strutturali al fine di avere un modello affidabile per l'interpretazione dei risultati.

Processo di identificazione dinamica: dall'acquisizione delle accelerazioni all'estrazione dei parametri dinamici.

Le acquisizioni sono state eseguite mediante la registrazione in continuo di accelerazioni di tipo ambientale derivati dall'eccitazione naturale della struttura causata da fenomeni esterni, quali vento, microsismi e rumori derivanti dall'attività antropica (es. traffico veicolare).
Gli **accelerometri** sono stati fissati meccanicamente mediante tasselli metallici direttamente alle solette in c.a. posti ai lati della carreggiata, rimuovendo la porzione superiore di manto bituminoso.
I contenuti in frequenza delle time histories sono stati acquisiti applicando **l'algoritmo FFT (Fast Fourier Transform).** I parametri dinamici strutturali sono stati ottenuti elaborando i dati mediante l'algoritmo **SSI (Stocastic Subspace Identification).**
La campagna di monitoraggio dinamico ha permesso di valutare le risposte strutturali relative al ponte in muratura indagato: è stato rilevato un comportamento strutturale di tipo globale, infatti le forme modali corrispondenti mobilitano l'intera struttura e non sono presenti modi locali.



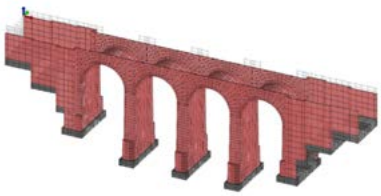
Immagini del degrado materico e delle fessurazioni del ponte e modellazione strutturale.

MODELLAZIONE NUMERICA

Il modello FEM preliminare è stato realizzato inserendo gli elementi strutturali principali e, grazie alle indagini dinamiche svolte, **è stata effettuata una calibrazione dei modelli al fine di ottenere uno strumento di calcolo affidabile per le analisi strutturali.**

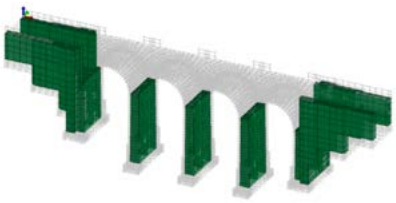
Il modello di calcolo è basato sulla schematizzazione del ponte come insieme costituito da: volta, spalle, contrafforti, timpani, rinfianco e riempimento. La mesh è stata raffinata fino ad un elevato livello di dettaglio (39938 nodi e 39148 elementi brick) dove muratura e riempimento sono stati considerati come un continuo equivalente dove i singoli elementi costituenti (ossia mattoni, pietre e giunti di malta) non sono rappresentati singolarmente. Il comportamento dei materiali è ipotizzato di tipo elastico-lineare.

Le caratteristiche dei materiali sono state determinate, laddove eseguite, dalle prove in situ semidistruttive che hanno consentito di determinare i moduli elastici e le tensioni agenti sulle murature (martinetti piatti in configurazione singola e doppia).



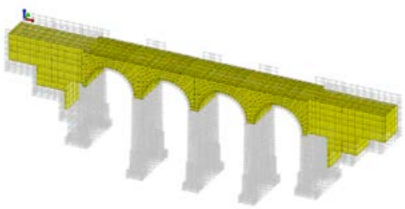
Pile esterne, volte, timpani e spalle esterne: muratura in mattoni pieni e malta di calce

Tipologia di muratura	f_m N/cm²	τ_0 N/cm²	E N/mm²	G N/mm²	W kN/m³
Muratura in mattoni pieni e malta di calce 82	240 - 400	6 - 9,2	1200 - 1800	400 - 600	18
LC2	320	7,6	1800	600	18
Caratteristiche della muratura:	Malta buona - giunti sottili				
Coeff. corr. parametri resistenza:	2,25				
Coeff. Corr. parametri elasticità:	2,25				
	720	17,1	4050	1350	18
Media dei valori misurati	720	17,1	6557	2185,667	18
Fattore di confidenza (LC2)	1,2				
LC2- FC	600,00	14,25	6557,00	2185,67	18



Pile interne e spalle interne: muratura a conci di pietra tenera

Tipologia di muratura	f_m N/cm²	τ_0 N/cm²	E N/mm²	G N/mm²	W kN/m³
Riempimento - Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100 - 180	2 - 3,2	690 - 1050	230 - 350	12
	100	2	690	230	12



Riempimento: muratura in pietrame disordinata

Tipologia di muratura	f_m N/cm²	τ_0 N/cm²	E N/mm²	G N/mm²	W kN/m³
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite)	140 - 240	2,8 - 4,2	900 - 1260	300 - 420	16
LC1	140	2,8	1260	420	16
Caratteristiche della muratura:	-				
Coeff. corr. parametri resistenza:	1,00				
Coeff. Corr. parametri elasticità:	1,00				
LC1	140	2,8	1260	420	16
Fattore di confidenza (LC1)	1,35				
LC1- FC	103,70	2,07	1260,00	420,00	16

ANALISI ANTE-OPERAM DELLE TENSIONI E DELLE DEFORMAZIONI

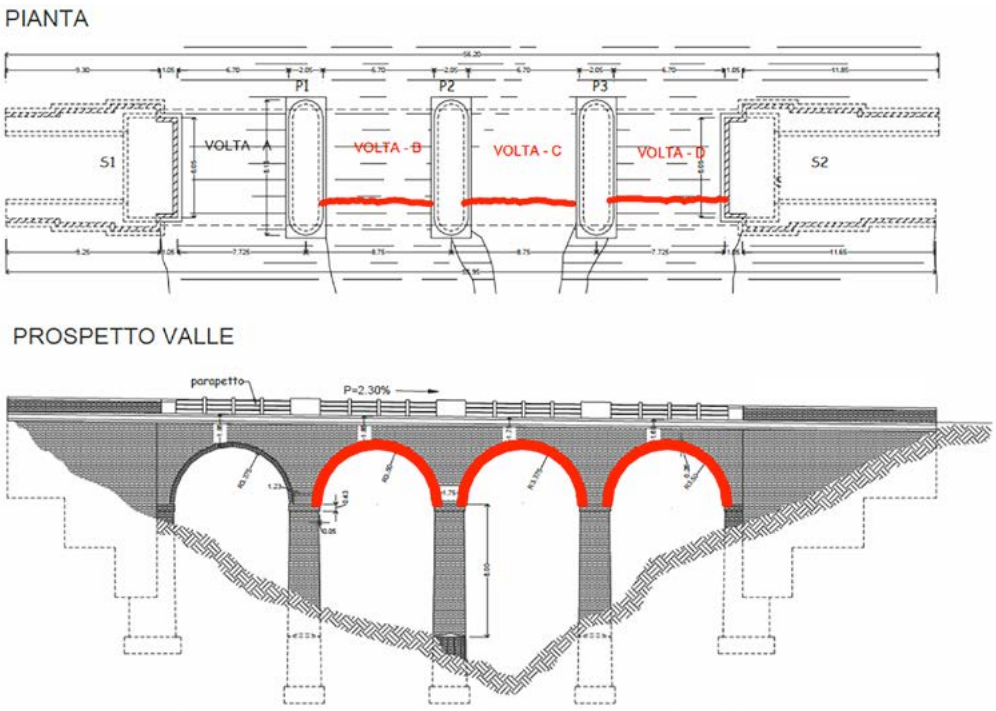
In fase analitica, **il ponte è stato valutato in due differenti condizioni di carico: l'una statica** (definita secondo normativa come presenza di due corsie di carico parallele poste longitudinalmente al ponte con un carico tandem viaggiante in corrispondenza della chiave della volta centrale) **e l'altra dinamica**, con presenza di azione sismica. Le analisi preliminari condotte hanno dimostrato che con le attuali azioni sismiche il ponte non è in grado di sostenere azioni statiche e sismiche previste dalle attuali normative. Si rende dunque necessaria la definizione di un intervento di rinforzo che risponda alle problematiche individuate e consolidi le pile e le volte del ponte in linea con i parametri dettati dalle normative vigenti.

CONSOLIDAMENTO MULTI-SISTEMA DEL PONTE

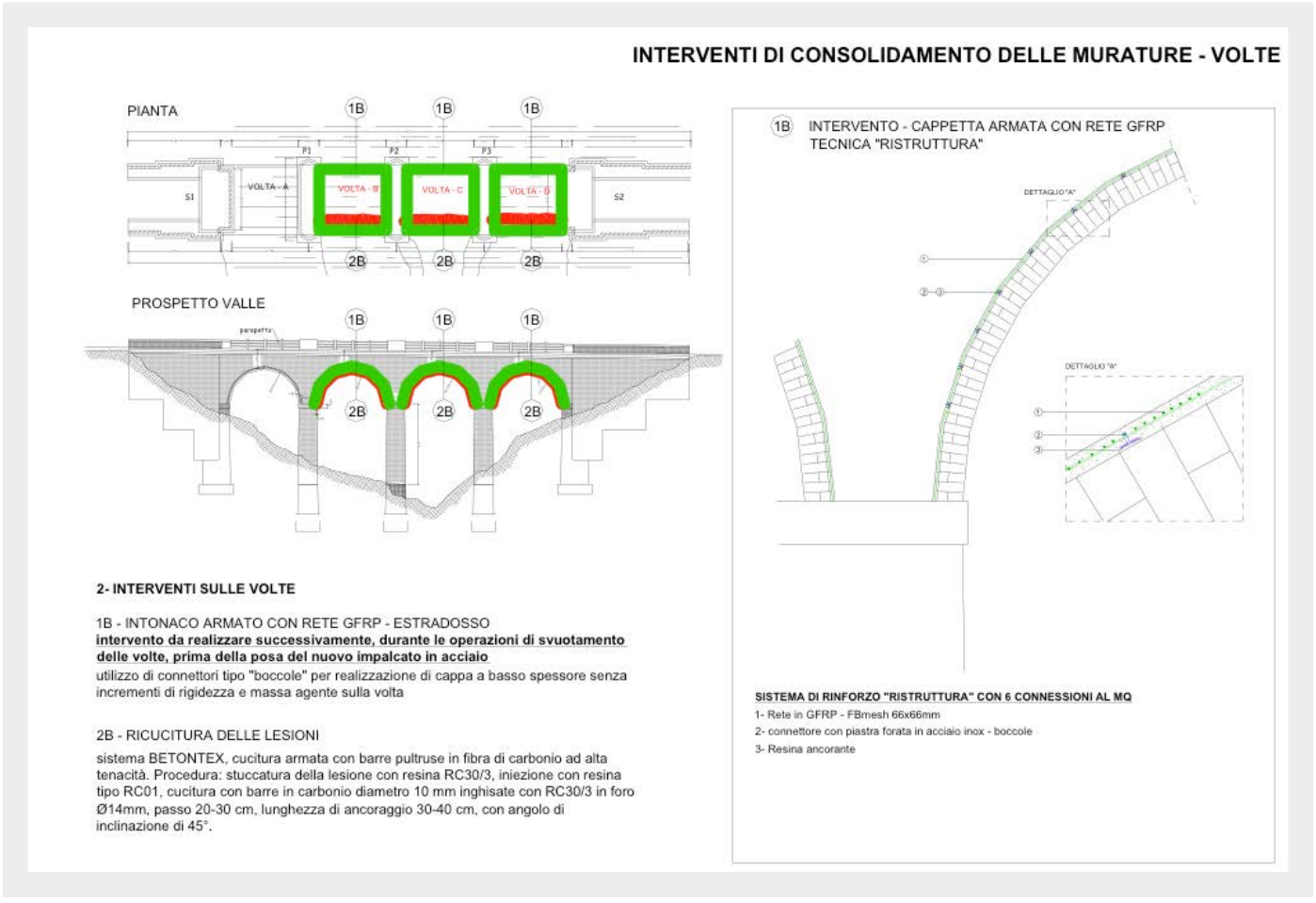
Gli interventi di rinforzo strutturale riguardano sia le volte sia le pile e rispondono puntualmente alle problematiche di degrado materiale e strutturale rilevato nel corso delle indagini diagnostiche condotte sul ponte. **Il progetto ha identificato nei sistemi di Fibre Net le modalità più opportune per rispondere alle specifiche esigenze di rinforzo.**

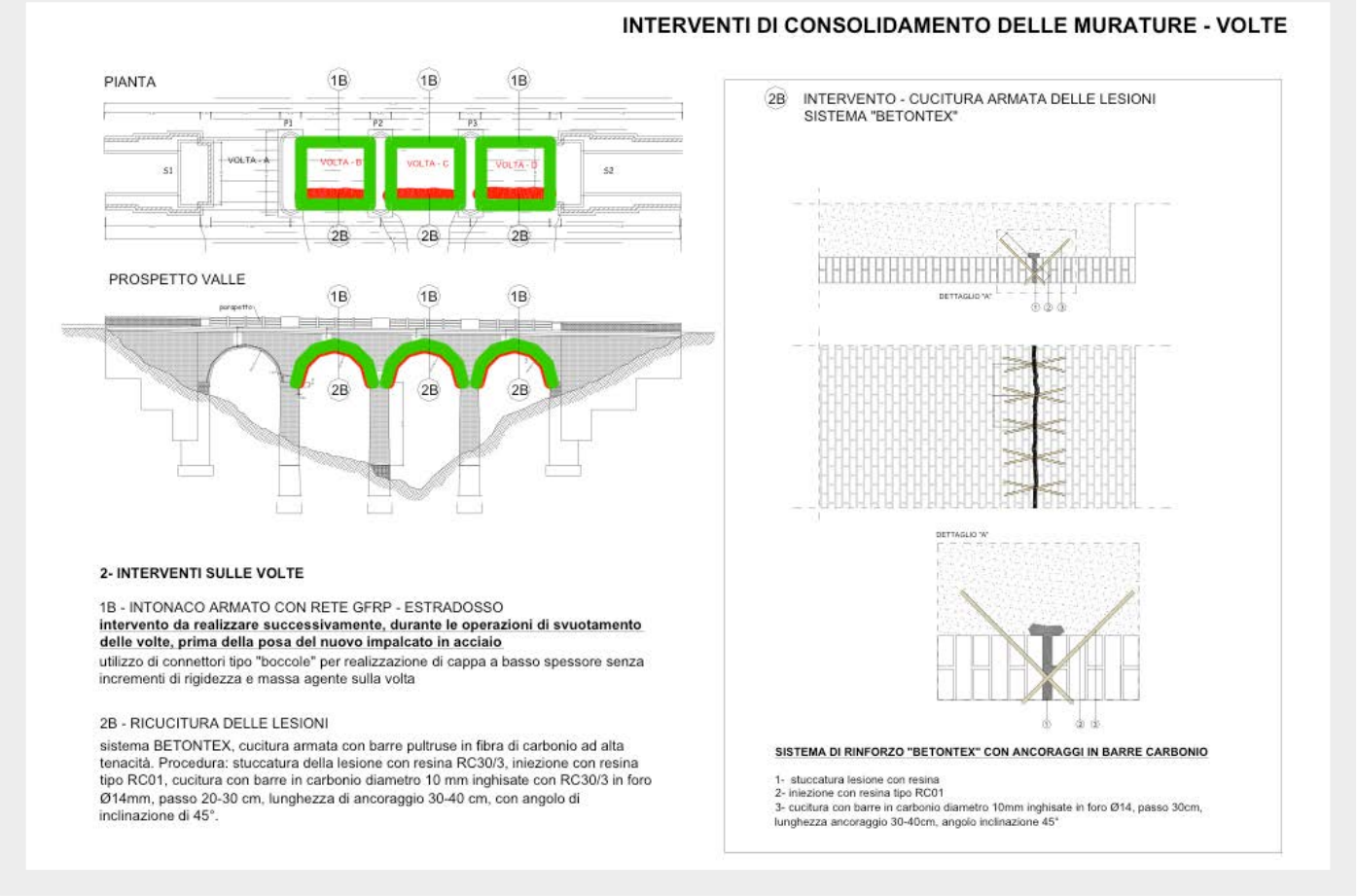
PROBLEMATICHE	SOLUZIONI FIBRE NET
DEGRADI DELLE PILE DEL PONTE Le forme di degrado che caratterizzano le pile del ponte in mattoni sono riassumibili in quella serie di fenomeni connessi alla presenza di acqua (di risalita o dilavamento). Si tratta infatti di **EFFLORESCENZE SALINE**, diffuse sulla gran parte delle superfici, **ESFOLIAZIONE** degli elementi in laterizio, **DISGREGAZIONE e POLVERIZZAZIONE** dei giunti di malta e dei mattoni delle pile, fenomeni concentrati soprattutto alla base delle pile.	**INTERVENTO SULLE PILE** • Ricostruzione delle porzioni ammalorate alla base delle pile con metodo cuci-scuci • Incremento della rigidezza e resistenza della base delle pile mediante intonaco fibrorinforzato fino ad un'altezza di circa 1,50 m (intervento 1A): **sistema CRM** RI-STRUTTURA • Aumento delle prestazioni meccaniche delle pile mediante tecnica "reticola" per mantenere la faccia a vista dei paramenti murari (intervento 2A): **sistema** RETICOLA
DISSESTI E DEGRADI DELLE VOLTE Le volte B, C e D presentano **lesioni in corrispondenza degli intradossi,** posizionate a circa 1,5 metri dl bordo e sviluppate lungo l'intera lunghezza di ciascuna volta. Ulteriori lesioni all'intradosso sono presenti in prossimità delle armille, causate da possibili rotazioni e distacco delle armille e aggravatesi per l'insinuarsi della vegetazione all'interno delle fessure.	**INTERVENTO SULLE VOLTE** • Ricucitura e contenimento delle lesioni tra le armille e le volte, mediante tecnica di ristilatura armata dei giunti (intervento 1B): **sistema** RETICOLA • Ricucitura e consolidamento delle lesioni presenti nelle volte B,C e D, mediante interventi di iniezioni e inserimento di barre in materiale composito (intervento 2B): BARRE PULTRUSE del **sistema** BETONTEX

Nota: vedi allegati in fondo per interventi 1A, 2A, 1B, 2B



L'intervento di consolidamento è previsto sulle tre volte che presentano gravi lesioni con un'ampiezza che varia da 1 a 5 cm. Essendo il ponte vincolato a livello architettonico è possibile intervenire sull'intradosso delle volte in maniera conservativa, mantenendo la muratura faccia vista.



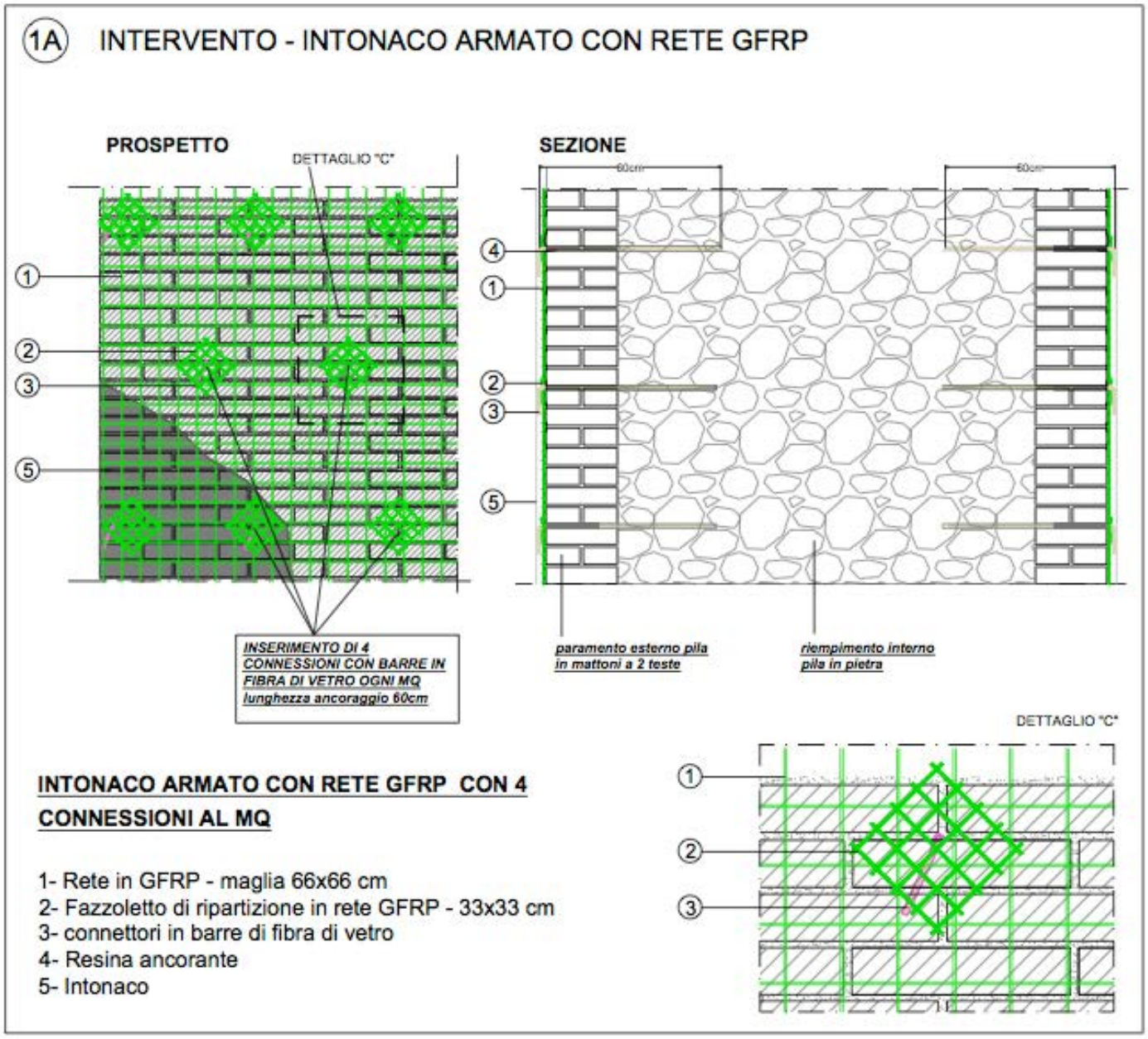


Gli interventi previsti ed attualmente in fase di realizzazione permetteranno di garantire le prestazioni strutturali richieste nel rispetto dei vincoli a cui il ponte, essendo storico è sottoposto. Consolidamento, rinforzo e conservazione in perfetta armonia per raggiungere un unico obiettivo sicurezza ed rispetto dei vincoli imposti per un bene storico tutelato.

L'ATTIVITÀ DI R&S DI FIBRE NET

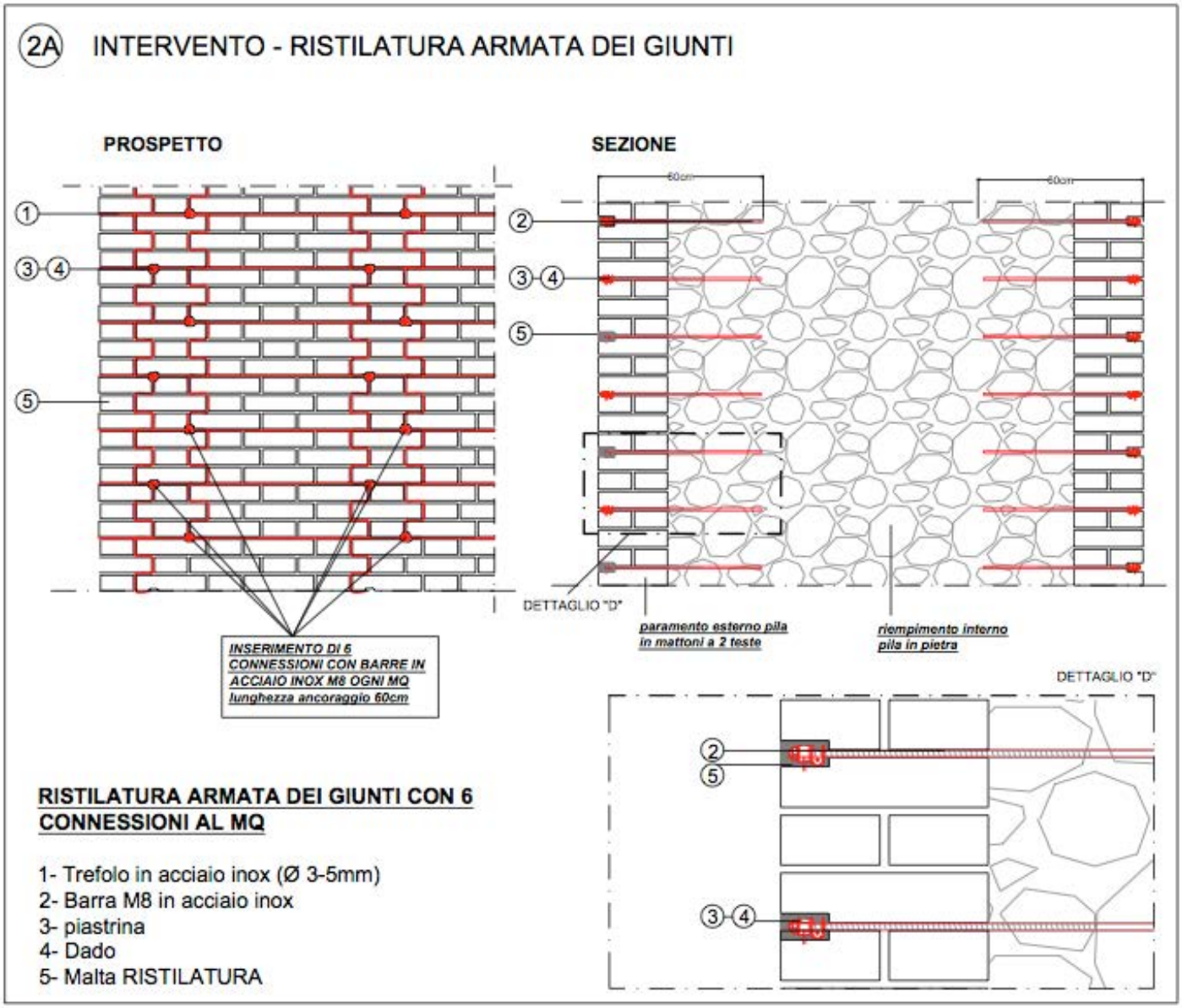
LINK DI APPROFONDIMENTO:
SPERIMENTAZIONE SU VOLTE IN MURATURA CON LA TECNICA DELL'INTONACO ARMATO E RETE IN GFRP
https://www.ingenio-web.it/6957-rinforzo-di-volte-in-muratura-mediante-intonaco-armato-e-rete-in-gfr

ALLEGATO 1A - dettaglio di intervento



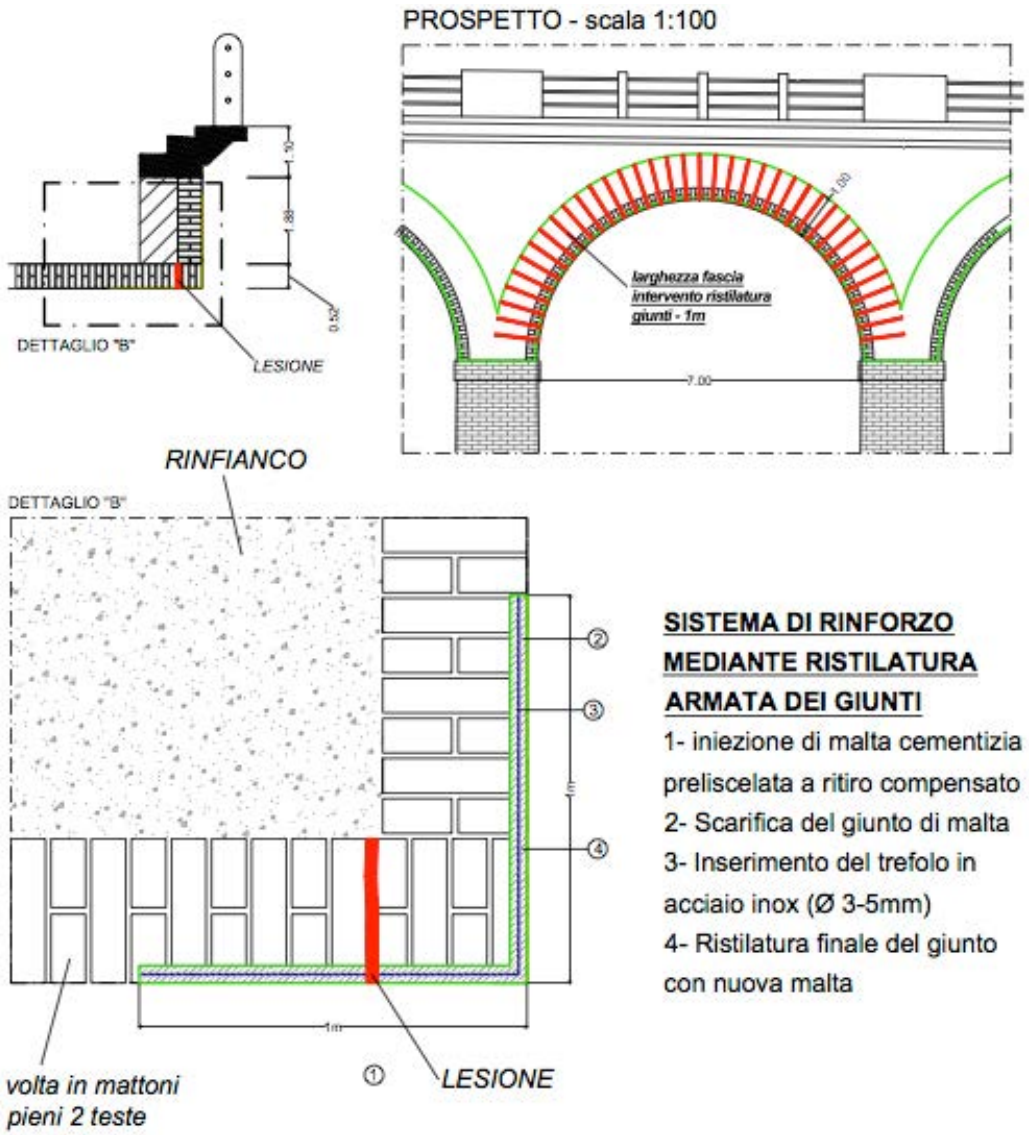
La tecnica prevede la realizzazione di intonaco armato CRM Composite Reinforced Mortar, mediante applicazione di rete preformata e monolitica in GFRP del sistema CRM RI-STRUTTURA di Fibre Net.
Il rete in GFRP a maglia66x66 mm viene posata ipotizzando n°4 connessioni a mq, lunghezza di ancoraggio 60 cm, betoncino con malta a pura calce idraulica a 15 MPa per uno spessore finale di 4 cm. In questo caso quindi non viene garantita la facciavista per un'altezza di circa 1,5 m dalla base delle pile.
Il sistema prevede l'inserimento di barre costituite da fibre di vetro lunghe alcalino resistenti impregnate con resina termoindurente di tipo epossidicovinilestere, avente n°15 barre/metro/lato, peso 420 g/m^2.
(Disegno Ing. A. Pierdicca).

ALLEGATO 2A - dettaglio di intervento



Il sistema RETICOLA di Fibre Net prevede l'applicazione in corrispondenza dei giunti di malta di trefoli in acciaio inox Ø 3 che disegna una maglia di 30x30 cm con n°6 connessioni a mq e ristilatura dei giunti con malta a pura calce idraulica a 15 Mpa.
(Disegno Ing. A. Pierdicca).

1B INTERVENTO - RICUCITURA LESIONI MEDIANTE RISTILATURA ARMATA DEI GIUNTI

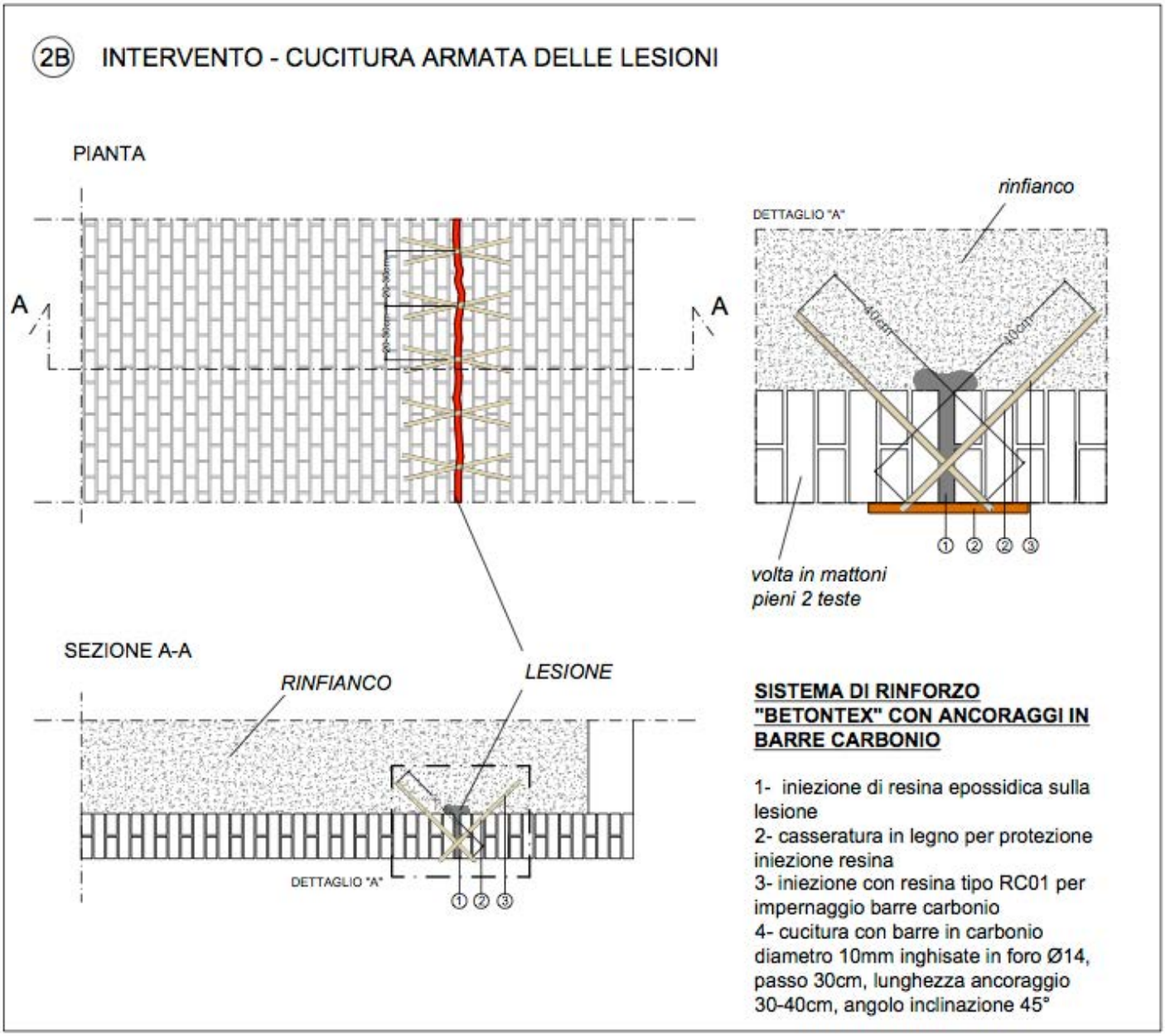


SISTEMA DI RINFORZO MEDIANTE RISTILATURA ARMATA DEI GIUNTI

1- iniezione di malta cementizia preliscelata a ritiro compensato
2- Scarifica del giunto di malta
3- Inserimento del trefolo in acciaio inox (Ø 3-5mm)
4- Ristilatura finale del giunto con nuova malta

Il sistema RETICOLA di Fibre Net prevede l'applicazione in corrispondenza dei giunti di malta di trefoli in acciaio inox Ø 3 e ristilatura dei giunti con malta a pura calce idraulica a 15 MPa. L'intervento prevede di NON utilizzare connessioni al fine di non andare a ridurre le sezioni resistenti della volta di limitato spessore.
(Disegno Ing. A. Pierdicca)

ALLEGATO 2B - dettaglio di intervento



L'intervento prevede la cucitura armata con barre pultruse in fibra di carbonio ad alta tenacità del sistema BETONTEX di Fibre Net.
L'iter realizzativo consiste nella stuccatura della lesione con resina, iniezione con resina, cucitura con barre in carbonio diametro 10 mm inghisate in foro Ø14 mm, passo 20-30 cm, lunghezza di ancoraggio 30-40 cm, con angolo di inclinazione di 45°.
(Disegno Ing. A. Pierdicca)