



REGIONE LOMBARDIA
PROVINCIA DI PAVIA
COMUNE DI CONFENZA



PROGETTO PRELIMINARE

**INTERVENTI DI RISTRUTTURAZIONE PONTE
SULLA S.P.197 ROBBIO - CONFENZA
POSTO ALL'ALTEZZA DEL KM 2+000**

studio di ingegneria
lavezzi e grandi

Via Monte Nero 10/C - TROMELLO (PV) - IT
Tel. +39.0382.809100 - Fax +39.0382.809874
P.IVA 01544450180
amministrazione@studiolavezzigrandi.it
www.studiolavezzigrandi.it



Allegato n.

A

RELAZIONE ILLUSTRATIVA

Rev.	Data	Note			Redatto	Controllato	Approvato
0	01.09.2017	Emissione			R.D.	E.R.	A.G.
1							
Commessa		18CONF17	Fase	PROGETTO PRELIMINARE			
Località		Strada Provinciale S.P.197 - Ponte sulla roggia Biraga			Scala	----	

Stazione appaltante

Amministrazione Comunale di Confenza

Sede	Corso V.Emanuele 24 - 27030 Confenza (PV)	tel	+39 0384.64032	PEC	confenza@postemailcertificata.it
------	---	-----	----------------	-----	----------------------------------

studio di ingegneria **lavezzi e grandi**

**Studio di Ingegneria
Lavezzi e Grandi**
Via Monte Nero 10/C
27020 Tromello (PV)
C.F./P.IVA 01544450180



PROGETTISTA RESPONSABILE: ing. Antonio Grandi

AMMINISTRAZIONE COMUNALE

Sindaco Pro Tempore: Michele Zanotti Fragonara

SOMMARIO

PREMESSA.....	- 3 -
1. DOCUMENTAZIONE STORICA (Fonte Archivio Storico AIES).....	- 4 -
2. RILIEVO TOPOGRAFICO, GEOMETRICO, INDAGINI PRELIMINARI E SOTTOSERVIZI	- 7 -
2.1. RILIEVO TOPOGRAFICO DEL CONTESTO (rif. elaborato grafico 03)	- 7 -
2.2. RILIEVO GEOMETRICO DEL MANUFATTO (rif. elaborato grafico 03).....	- 7 -
2.3. INDAGINI PRELIMINARI	- 7 -
2.4. INFRASTRUTTURE, IMPIANTI E RETI INTERFERENTI CON IL MANUFATTO	- 9 -
3. PROVE E INDAGINI GEOLOGICO, GEOTECNICHE E SISMICHE (rif. allegato B)	- 12 -
4. PROVE SUI MATERIALI E ISPEZIONE VISIVA DELL'INTRADOSSO DELL'ARCO	- 13 -
5. VERIFICHE STRUTTURALI SUGLI ELEMENTI PORTANTI COSTITUENTI IL PONTE STORICO	- 15 -
6. ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI E SCELTE PROGETTUALI	- 21 -
6.1. RISULTATI OTTENUTI DA SONDAGGI E PROVE SUI MATERIALI	- 21 -
6.2. RISULTATI OTTENUTI DA VERIFICHE TENSIONALI	- 22 -
6.3. CIRCA IL TOTALE RIPRISTINO DEL PONTE STORICO	- 23 -
6.4. VALUTAZIONI IN MERITO ALL'INTERVENTO DI TOTALE RIPRISTINO DEL PONTE STORICO.....	- 23 -
6.5. IPOTESI PROGETTUALE.....	- 25 -
7. DESCRIZIONE IPOTESI PROGETTUALE (rif. elaborato grafico 04)	- 25 -
8. PROGETTO DELLA SEDE STRADALE (rif. Elaborato grafico 04).....	- 28 -

9. INTERVENTI DI RIPRISTINO PARZIALE DEL PONTE STORICO.....	28 -
BIBLIOGRAFIA	32 -

PREMESSA

Il ponte da assoggettarsi a **interventi di ristrutturazione** è costituito da un arco ribassato che sovrappassa il cavo irriguo denominato Roggia Biraga, la cui gestione è in carico all'Associazione Irrigua Est Sesia (AIES) con sede in Novara. L'infrastruttura, di proprietà dell'ente governativo Provincia di Pavia, è collocata interamente nel territorio comunale di Confienza (PV) e insiste sulla SP 197 Robbio - Confienza, km 2+000.

Dall'analisi della documentazione storica, invero assai limitata, parrebbe l'edificazione della struttura, realizzata in muratura di mattoni pieni con giunti di malta cementizia e con luce libera di poco superiore ai 10 m, possa essere fatta risalire alla metà del diciannovesimo secolo, all'incirca decennio 1850 - 1860.

A seguito della sua chiusura al traffico veicolare, giustificata da un significativo cedimento riscontrato sul manto stradale in corrispondenza della spalla sinistra idrografica (lato Comune di Robbio) il quale ha indotto al sospetto di un sifonamento fondale esercitato dalla roggia, la cui corrente è in battuta sulla spalla del ponte, l'Amministrazione Comunale di Confienza si è fatta carico, in esecuzione della Convenzione, stipulata in data 06 luglio 2017 n.1336 di raccolta con la Provincia di Pavia, del ripristino dello stato di sicurezza dell'infrastruttura viaria.

Nel seguito della presente sono quindi descritte le attività di indagine eseguite sul manufatto, le verifiche strutturali ovvero le molteplici valutazioni effettuate, propedeutiche alla soluzione progettuale proposta e ritenuta dallo scrivente, in termini tecnici, temporali ed economici, la più indicata per rapida messa in sicurezza del manufatto ed completo ripristino della viabilità stradale.

1. DOCUMENTAZIONE STORICA (fonte Archivio Storico AIES)

La documentazione storica relativa alla Roggia Biraga e, in particolare, ai manufatti che insistono sul tratto d'alveo d'interesse è custodita presso l'Archivio Storico dell'Associazione Irrigua Est Sesia (AIES), sede generale di Novara.

In data 7 agosto 2017, a seguito di elaborate ricerche eseguite presso il suindicato archivio, sono state recepite utili informazioni circa l'infrastruttura in oggetto, censita e descritta nel Testimoniale di Stato dell'Amministrazione Generale dei Canali Demaniali d'Irrigazione (Canali Cavour), al Volume XIII, dedicato alla Roggia Rizzo Biraga.

Il ponte in esame è catalogato all'opera n.302 alla progressiva (sull'asse della roggia) 35273; dopo la descrizione dello stesso e le interferenze con i sottoservizi dell'epoca sono riportate le dimensioni degli elementi che compongono il manufatto e le opere accessorie. Utile segnalare che le grandezze geometriche indicate nello scritto, allegato al contratto 6 settembre 1883, corrispondono con quelle rilevate in sito, a testimonianza dell'assenza di interventi significativi sul manufatto, nel corso degli anni.

La successiva *Fig.1* riporta la scansione delle pagine 308 e 309 del Testimoniale di Stato con le informazioni descritte mentre la *Fig.2* evidenzia un estratto della cartografia del documento storico.

<p>- 308 -</p> <p>301 Progressiva 35125 sinistra</p> <p>SB0000 di colature di terreni di proprietà Speciale Pio, Bezzi Antonio ed Altri.</p> <p>Non è coperto da concessione.</p> <p>E' provvisto di doccia in legno, sporgente verso la roggia.</p> <p>E' in stato d'uso, la manutenzione è a carico dei detti Sigg. Speciale e Bezzi.</p> <p>DIMENSIONI</p> <p>Lunghezza della doccia m. 4,00</p> <p>Larghezza della doccia m. 0,20</p> <p>302 Progressiva 35273 attraverso</p> <p>PONTE per il sovrappasso della strada provinciale Robbio-Confienza.</p> <p>Corrisponde al N. 251 del tipo planimetrico allegato al contratto 6 settembre 1883.</p> <p>E' in muratura di cotto, ad un solo arco a sesto ribassato; muri d'ala a monte e a valle con risvolti, di cui quello a monte destra e valle sinistra sono curvi: quello a valle destra è pressochè demolito.</p> <p>Parapetti in cotto, diritti a monte e a valle, con copertina e pilastri terminali in vivo.</p> <p>E' in stato d'uso, salvo il muro d'ala a valle</p>	<p>- 309 -</p> <p>AMMINISTRAZIONE GENERALE DEI CANALI DEMANIALI D'IRRIGAZIONE (Canali Cavour)</p> <p>TESTIMONIALI DI STATO</p> <p>destro che è in cattivo stato.</p> <p>La manutenzione è a carico della Provincia di Pavia.</p> <p>Verso monte vi è attraversamento con linea di energia elettrica a tre fili su pali in legno della S.A.V.E.; verso valle altro attraversamento con linea telefonica della Stipel e delle Finanze.</p> <p>DIMENSIONI</p> <p>Larghezza del ponte compresi i parapetti m. 7,20</p> <p>" " " esclusi " " m. 6,40</p> <p>Lunghezza di cadun parapetto m. 11,40</p> <p>Altezza di cadun parapetto m. 0,75</p> <p>Corda arco m. 10,00</p> <p>Sagitta arco m. 1,85</p> <p>Altezza piedritti m. 1,50</p> <p>Lunghezza muro d'ala a monte sinistra . . m. 12,45</p> <p>Sviluppo muro d'ala a monte destra . . . m. 5,50</p> <p>" " " a valle sinistra . . m. 5,80</p> <p>Lunghezza muro d'ala a valle destra</p> <p>(tratta non demolita) m. 3,00</p> <p>Risvolto a monte sponda destra m. 2,50</p> <p>" " " sinistra m. 2,15</p> <p>Risvolto a valle sponda sinistra m. 2,25</p> <p>303 Progressiva 35339 sinistra</p>
---	--

Fig.1: Testimoniale di Stato - consistenza dell'opera

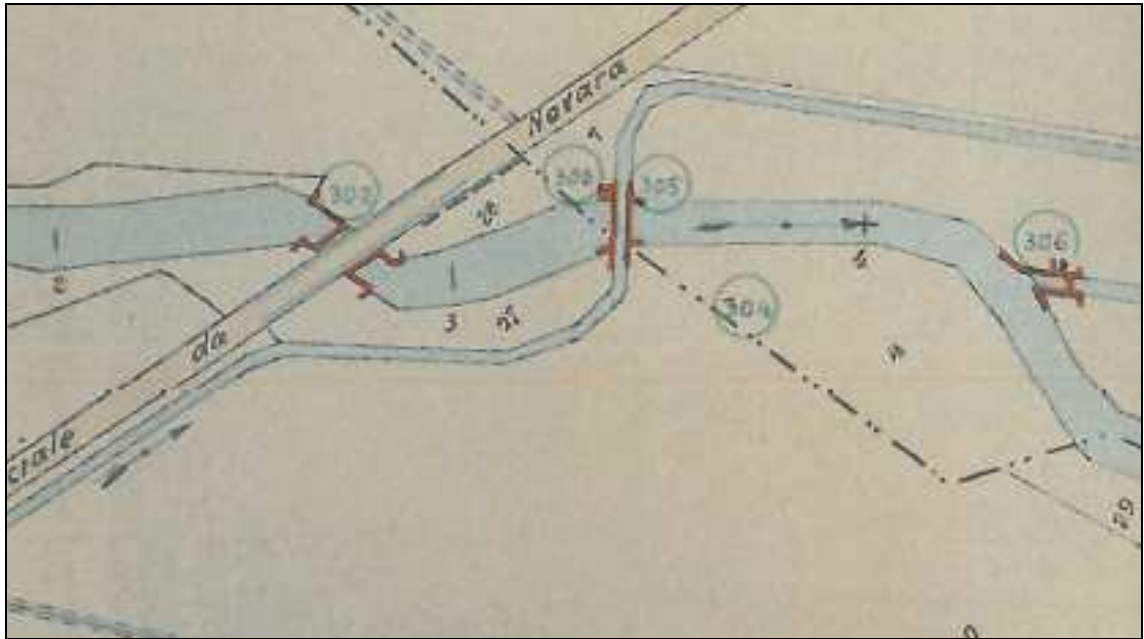


Fig.2: Testimoniale di Stato - estratto planimetrico

2. RILIEVO TOPOGRAFICO, GEOMETRICO, INDAGINI PRELIMINARI E SOTTOSERVIZI

2.1. RILIEVO TOPOGRAFICO DEL CONTESTO (rif. elaborato grafico 03)

Lo studio topografico è stato eseguito, mediante l'ausilio di unità GPS, rilevando i punti caratteristici del ponte, di un tratto dell'infrastruttura viaria in direzione Robbio per circa 170 m ovvero in direzione Confienza per oltre 100 m. Assieme al terrapieno stradale sono state altresì rilevate tutte le strade (vicinali, campestri e/o di accesso ai vari fondi agricoli) interferenti sia con i tratti dell'infrastruttura viaria principale suindicati che con le sponde della Roggia Biraga, a monte e a valle, per una lunghezza pari a circa 30 m. Il tutto ha generato un modello geometrico tridimensionale dal quale ricavare le informazioni dimensionali per le successive fasi progettuali. Quanto succintamente descritto è presentato in termini geometrici esaustivi nell'elaborato grafico allegato al progetto preliminare.

2.2. RILIEVO GEOMETRICO DEL MANUFATTO (rif. elaborato grafico 03)

Utile sottolineare, fin da ora, che il ponte è realizzato tramite un arco circolare con raggio pari a 8,30 m, angolo al centro pari a 76° e uno sviluppo curvo dello stesso di circa 11,70 m all'estradosso; l'arco non è perpendicolare al flusso della corrente ma inclinato di circa 9° rispetto alla stessa. Tale considerazione geometrica evidenzia due aspetti: la struttura ha un comportamento tridimensionale e la spalla maggiormente sollecitata dall'azione idrodinamica della corrente è quella verso il Comune di Robbio.

2.3. INDAGINI PRELIMINARI

Tramite l'utilizzo di un escavatore, in data 30 giugno 2017, è stata indagata la posizione esatta dello spigolo superiore esterno di ciascuna spalla; in tal modo si è potuto altresì controllare visivamente lo stato di conservazione delle murature.

L'operazione è consistita nella scarifica e nel successivo scavo della massicciata stradale fino al rinvenimento del tratto orizzontale, in mattoni, di entrambe le spalle del manufatto; il primo sondaggio (lato Comune di Confienza) è stato realizzato al limite esterno della corsia in direzione Confienza, in sponda idrografica destra, mentre il secondo (lato Comune di Robbio) è stato effettuato al limite esterno della corsia Confienza - Robbio, in sponda idrografica sinistra.

Il primo sondaggio ha mostrato la presenza di un cavidotto metallico a sezione rettangolare di cui si dirà al successivo paragrafo a proposito dei sottoservizi.

Il secondo sondaggio è stato eseguito in corrispondenza del noto cedimento nel manto stradale, causa della chiusura al traffico dell'infrastruttura, di profondità pari a circa 0,70 m e forma in pianta all'incirca ellittica, con lunghezza asse maggiore pari a circa 0,60 m, come ben visibile nella successiva immagine.



Fig.3: cedimento stradale in corrispondenza della spalla lato Robbio

A seguito di prime valutazioni si ritiene che la causa del cedimento localizzato nel manto stradale possa ascriversi all'azione dinamica esercitata dal traffico pesante in uscita dal ponte, in presenza sia di una sottostruttura che di una pavimentazione stradale, entrambi irregolari. Il fenomeno è sicuramente stato

favorito, nel tempo, dall'azione di infiltrazione della pioggia e non secondario può essere altresì l'effetto della corrente del corso idrico che su tale spalla è in battuta: tale fatto può aver favorito la creazione di *vuoti* che hanno generato il cedimento, a maggior ragione a seguito della variazione stagionale del carico piezometrico o dei periodi di asciutta.

L'estradosso delle spalle del ponte è posizionato ad una profondità pari a circa 1,20 m al di sotto del piano stradale e si estende per circa 1,50 m in direzione asse infrastruttura viaria. La successiva *Fig.4* mostra lo spigolo superiore della spalla in muratura (lato Robbio).



Fig.4: spigolo superiore della spalla lato Robbio

2.4. INFRASTRUTTURE, IMPIANTI E RETI INTERFERENTI CON IL MANUFATTO

Nel contesto in analisi sono presenti alcune reti infrastrutturali, facenti capo a differenti enti gestori. In particolare:

- **Telecom** ha confermato la presenza di un cavidotto posto al di sotto della sede stradale. Trattasi di una canalina metallica a sezione rettangolare, di dimensione decimetrica, posta al limite esterno della corsia Robbio -

Confienza, a circa 0,60 m dal guard-rail e alla profondità di circa 0,50 m dall'attuale piano viario. Le informazioni geometriche descritte sono state misurate nel corso del sondaggio preliminare di cui al paragrafo 2.3, nel mentre del quale è stata riportata alla luce siffatta canalina documentata nella successiva Fig.5. Naturalmente tale manufatto dovrà essere rimosso durante le fasi di cantiere e successivamente riallocato secondo le indicazioni dell'ente gestore.

Nota: la lettera AIES, relativa alla presenza di infrastrutture e ricevuta in data 23.08.2017, riporta testualmente: - *attraversamento con linea telefonica, mediante tubo in ferro ancorato a valle del ponte alla prog. 35.273, in carico a Telecom*. Si ritiene la canalina suindicata possa aver sostituito tale manufatto; la fattispecie dovrà essere verificata in sede di Conferenza dei Servizi.



Fig.5: canalina Telecom in prossimità della spalla lato Confienza

- **ASMare** presenta una tubazione ancorata a valle del ponte, al limite della corsia Confienza - Robbio. Trattasi di un tubo di mandata della rete fognaria proveniente da Confienza in ghisa DN300 inserito in un tubo camicia in acciaio catramato DN500 (quello visibile). Al di sopra di tale tubo camicia

compare un'altra tubazione, rivestita in materiale plastico, la quale probabilmente dovrebbe contenere gli allacci elettrici e di controllo della centralina di sollevamento della rete fognaria, collocata a piano campagna in sponda destra della roggia immediatamente, a valle del sovrappasso.

Nota: la lettera AIES, relativa alla presenza di infrastrutture e ricevuta in data 23.08.2017, riporta testualmente: - *attraversamento con linea gas, mediante tubo in ferro ancorato a valle del ponte alla prog. 35.273, in carico al Comune di Confienza*. Tale fattispecie dovrà essere verificata in sede di Conferenza dei Servizi.

In ogni caso tali tubazioni non interferiranno con i lavori di ristrutturazione del manufatto. La successiva *Fig.6* documenta la posizione delle infrastrutture descritte sul lato di valle del ponte; in tale immagine è altresì visibile lo spigolo della recinzione che delimita l'impianto di sollevamento della rete fognaria, dotato di troppo pieno e di scarico vasca i quali recapitano direttamente nella roggia, come documentato dallo schema idraulico di *Fig.7*.



Fig.6: infrastrutture ASMare

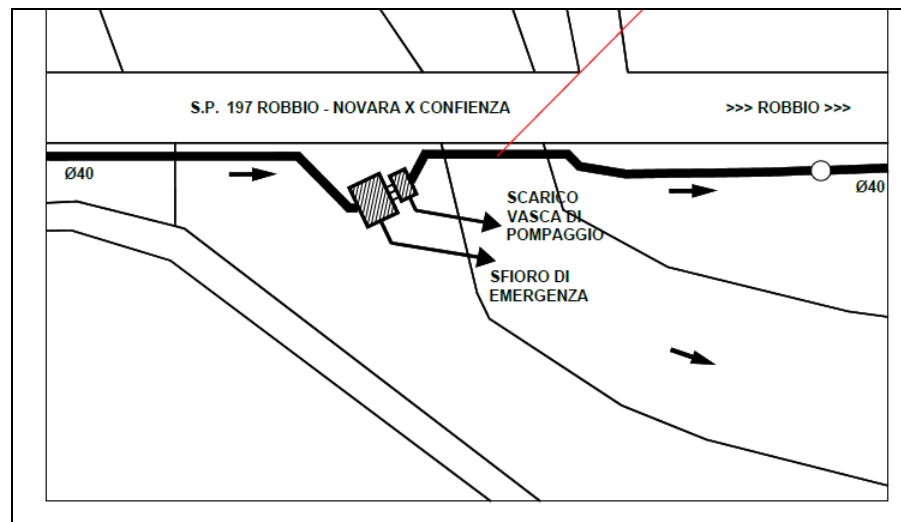


Fig.7: schema idraulico ASMare

3. PROVE E INDAGINI GEOLOGICO, GEOTECNICHE E SISMICHE (rif. allegato B)

Il carotaggio e le prove STP in foro, svolte in data 24 luglio 2017, sono state eseguite in asse strada perforando la spalla del ponte lato Comune di Robbio. La scelta di perforare la spalla è stata dettata dalla necessità di valutarne la profondità ma soprattutto lo stato di conservazione della muratura costituente la stessa, oltre che di esaminare direttamente il terreno sul quale insiste la fondazione. La posizione ottimale per la perforazione è stata individuata a seguito dei sondaggi preliminari descritti nel paragrafo dedicato.

Il carotaggio ha permesso di confermare la posizione dell'estradosso della spalla del ponte a quota -1,20 m dal piano stradale ovvero determinare il piano di appoggio della fondazione della spalla stessa a quota -5,60 m dal piano viabile. La trivellazione con il recupero delle carote si è conclusa a -12,00 m dal piano strada e, nel corso del carotaggio, sono state effettuate n.3 prove STP a differenti profondità (-6,50 m, -9,00 m e -12,00 m).

I risultati hanno evidenziato uno strato costituito da mattoni alterati misto a materiale di natura limosa, molle e senza struttura, posizionato alla base della

spalla e avente spessore pari a circa 0,50 m, con caratteristiche meccaniche di gran lunga inferiori a quelle della muratura sovrastante. **Tale fattispecie costituirà un significativo vincolo per le successive scelte progettuali.**

La successiva *Fig.8* riporta la sequenza stratigrafica tra -5 m e -10 m ove, anche da un sommario esame visivo, è possibile notare i circa 0,50 m di materiale alterato.



Fig.8: cassetta carotaggio tra -5 m e -10 m

4. PROVE SUI MATERIALI E ISPEZIONE VISIVA DELL'INTRADOSSO DELL'ARCO

In merito ai materiali posti in opera, mattoni e malta, si è ritenuto indispensabile l'esecuzione di prove puntuali non distruttive sulla muratura dell'arco assieme al prelievo di alcuni mattoni al fine di valutarne, in laboratorio, la resistenza a compressione.

In data 3 agosto 2017 sono state effettuate prove penetrometriche sulla malta costituente i giunti con sonda WP-2000, assieme all'estrazione di alcuni mattoni (*Fig.9*), al fine di valutare quanto sopraccitato. Ad oggi si è in attesa dei risultati

della prova a compressione sugli elementi prelevati.

Tali accertamenti sono stati eseguiti con estrema difficoltà a causa delle complicate condizioni di accesso al contesto di intervento: la quota del pelo libero del corso d'acqua dista unicamente circa 2,50 m dall'intradosso della sezione sommitale dell'arco e tale misura si riduce a circa 0,80 m in corrispondenza delle spalle. Per tale ragione non è stata in alcun modo possibile l'attuazione delle altre previste prove, sclerometrica su malta con sclerometro a pendolo PM ovvero con martinetti piatti semicircolari.

Nel mentre delle suindicate analisi è stata eseguita un'approfondita ispezione visiva, con report fotografico, sia dell'intradosso dell'arco che della parte emersa verticale delle spalle, lato acqua tramite la quale è stato possibile prendere conoscenza del pessimo stato di conservazione della muratura in molti frangenti, in speciale modo quella che origina dalla spalla lato Robbio, come ben evidenziato nella successiva *Fig.10*.



Fig.9: prelievo campioni di mattoni da sottoporre a prova. Da notare la significativa fessurazione spalla lato Robbio



Fig.10: muratura intradosso arco lato Robbio. Da notare il significativo degrado della muratura costituente l'intradosso dell'arco

5. VERIFICHE STRUTTURALI SUGLI ELEMENTI PORTANTI COSTITUENTI IL PONTE STORICO

Lo stato tensionale agente sull'arco e sulle spalle del ponte indotto dal peso proprio, dai carichi portati e dalle sollecitazioni dinamiche del traffico veicolare sono state determinate per via numerica utilizzando software strutturali dedicati a tale tipologia di infrastruttura (arco in muratura). Per i carichi stradali ci si è riferiti agli schemi e ai valori indicati dalla normativa vigente in merito a ponti di prima categoria.

Come deducibile dallo schema in *Fig.11*, nella fattispecie in esame la larghezza della sede stradale è occupata dalla carreggiata senza marciapiedi con due corsie (una per ciascun senso di marcia).

Nella *Fig.12* si riporta lo schema per ponti di prima categoria del carico viaggiante prescritto dalla normativa vigente. Dallo schema risulta che di carico sulla striscia d'arco di ponte di larghezza pari a 1 m corrisponde all'impronta di due ruote gemellate (una per ciascun tandem) con 150 kN ciascuna (generate da

due tandem da 300 kN per asse) e un carico distribuito paria a 9 kNm^{-2} sulla restante parte.

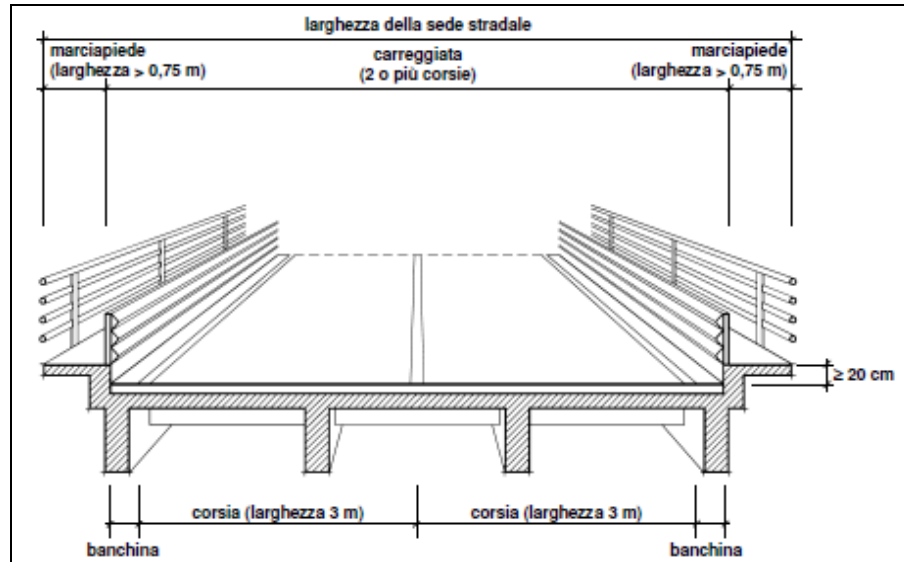


Fig.11: schema della sede stradale presente nella normativa vigente

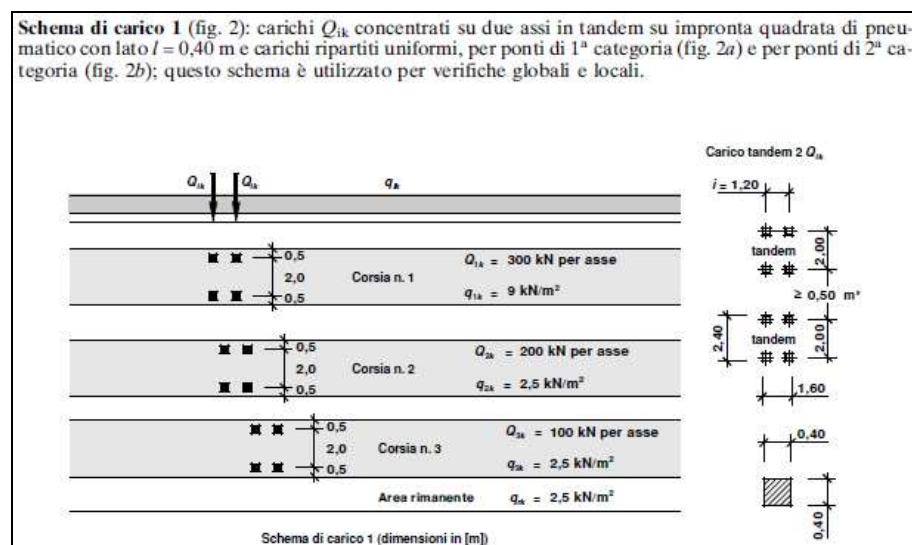


Fig.12: schema di carico per ponti di prima categoria come da normativa vigente

Tra le valutazioni preliminari preme ricordare che l'asse dell'arco è deviato rispetto all'asse stradale evidenziando il fatto che la struttura possiede un comportamento tridimensionale, il quale ne aumenta ulteriormente la resistenza e

il grado di sicurezza nei confronti di potenziali lesioni e/o cedimenti (formazione di cerniere plastiche e cedimento alle spalle).

La situazione geometrica della struttura è evidenziata nella successiva *Fig.13* nella quale sono visibili anche le travi in calcestruzzo a bordo della sede stradale che ancorano le barriere protettive.

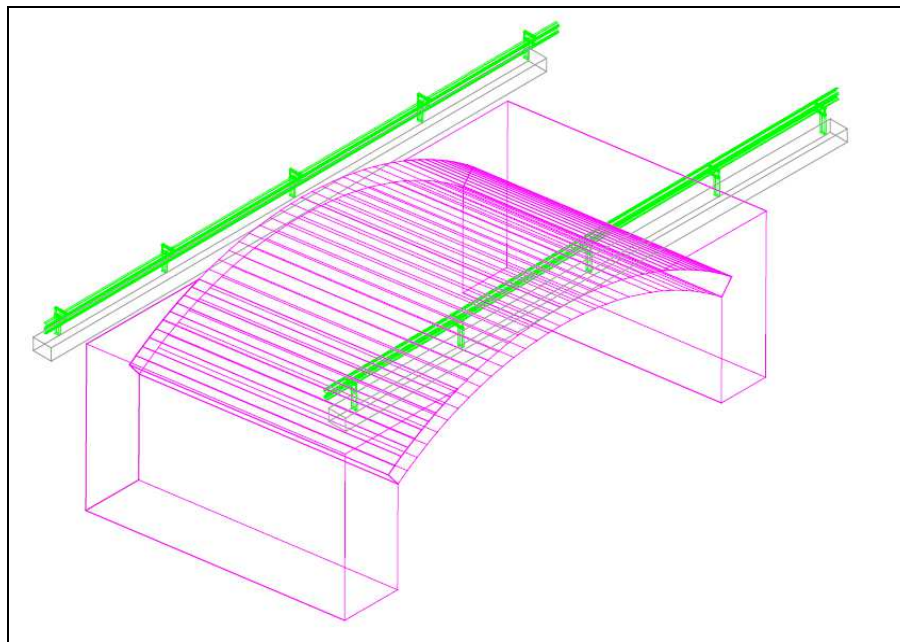


Fig.13: schema tridimensionale della struttura

La verifica dello stato tensionale è stata effettuata utilizzando il software di calcolo *Arco* del Prof. Piero Gelfi, docente presso l'Università degli Studi di Brescia. *Arco* è un programma per l'analisi di archi e volte in muratura basato sul teorema statico dell'analisi limite. L'applicazione delle idee alla base del calcolo limite applicato alle strutture in muratura risale agli studi di Heyman. Il teorema statico può essere enunciato nel modo seguente: *un arco in muratura è sicuro se esiste una linea delle pressioni, in equilibrio con i carichi esterni e giacente interamente nello spessore dell'arco, e se le tensioni corrispondenti sono sufficientemente basse*. Partendo dal teorema statico si applica il metodo di Mèry che enuncia: *Una struttura è in grado di sopportare determinati carichi se si può dimostrare che può equilibrarli con un regime di sforzi ammissibile per il*

materiale. In ipotesi di duttilità e assenza di fenomeni di instabilità, con il metodo di Mèry si cerca l'esistenza di questo regime di sforzi, sintetizzato dalla curva delle pressioni.

La struttura ad arco, tre volte iperstatica, viene resa isostatica introducendo tre cerniere, in corrispondenza delle quali si assumono momenti iperstatici nulli. La posizione delle cerniere viene variata alla ricerca di un regime di sforzi ammissibile.

Scopo di tale analisi è la verifica della congruità tra i valori tensionali calcolati dal programma con le risultanze delle prove sui materiali in situ determinando così i coefficienti di sicurezza per ciascun elemento strutturale.

La procedura è stata applicata seguendo l'approccio classico del calcolo degli archi ove il rinfiango è considerato un mero sovraccarico verticale, ignorando l'effetto delle pressioni passive orizzontali che possono essere mobilitate quando l'arco spinge contro il rinfiango. Con riferimento alla *Fig.14*, tale considerazione comporta avere *wall reactions* nulle.

Il programma fornisce anche le reazioni verticali e orizzontali alle spalle (*reactions at springings*) e il tiro della catena (*tie thrust*) che annullerebbe la componente orizzontale alle spalle.

In merito al carico viaggiante, considerando la diffusione al di sotto della pavimentazione per lo spessore del ricoprimento dell'arco, si ottiene una superficie pari a $3,64 \text{ m}^2$ con un carico pari a $89,62 \text{ kNm}^{-2}$ su di una lunghezza di $2,60 \text{ m}$ per la striscia di arco la larghezza pari a 1 m . Nel programma si è considerata un'estensione dell'arco pari a 7 m necessaria al fine di ottenere le reazioni totali sulle spalle.

L'arco è stato diviso in 15 conci (equivalenti ciascuno a 12 corsi di mattoni) e si dapprima considerata la striscia di carico in centro all'arco, come indicato dallo schema di *Fig.14*, ricavando i risultati con le sollecitazioni superiori e inferiori dell'arco in corrispondenza di ogni concio, le sollecitazioni massime, le

eccentricità della linea delle pressioni rispetto alla mezzeria dell'arco e le reazioni totali sulle spalle.

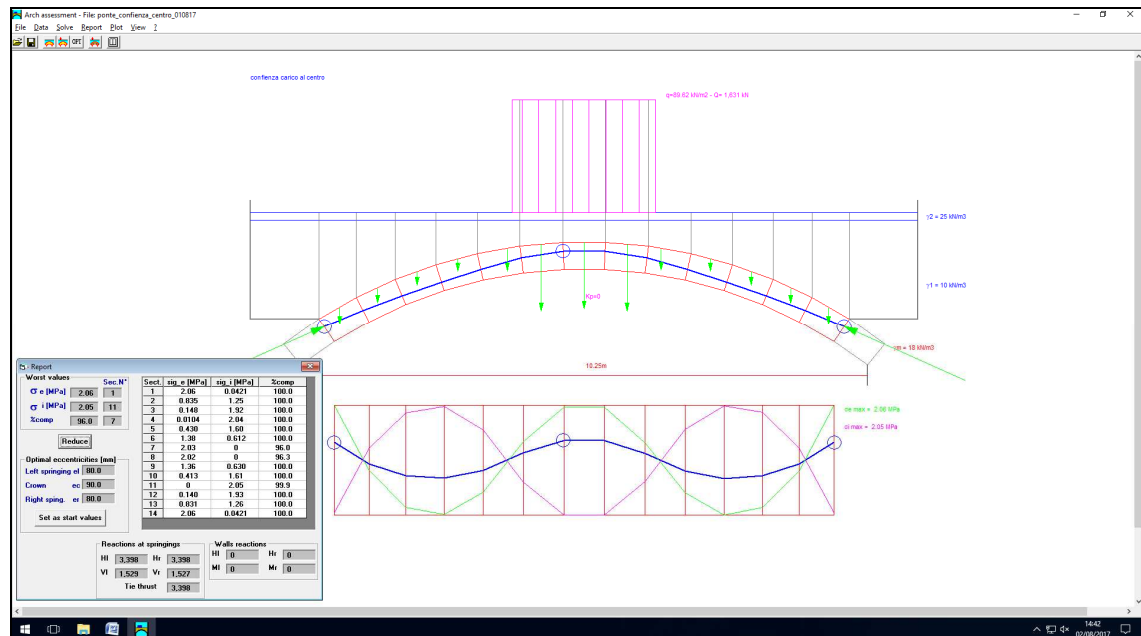


Fig. 14: schema di carico viaggiante in centro arco

Le sollecitazioni massime calcolate sono, all'estradosso, $\sigma_e = 2,06$ MPa e all'intradosso $\sigma_i = 2,05$ MPa, con una sezione compressa del 96% rispetto alla sezione complessiva.

Ripetendo la medesima procedura con il carico viaggiante in prossimità di una spalla si sono ottenuti i risultati di cui alla Fig.15 ove risulta evidente l'incremento delle eccentricità nella curva delle pressioni. Le sollecitazioni massime calcolate sono, all'estradosso, $\sigma_e = 3,50$ MPa e all'intradosso $\sigma_i = 3,56$ MPa con una sezione compressa del 38% rispetto alla sezione complessiva.

Limitatamente alla muratura costituente l'arco, le forze calcolate rimangono ampiamente nel campo delle sollecitazioni ammissibili di una muratura in buono stato la quale potrebbe essere caratterizzata, a titolo meramente indicativo, da un carico di rottura compreso in un intervallo tra 6 e 7 MPa (equivalenti a 60 - 70

daNcm⁻²). Naturalmente la muratura presente in sito, in merito alla quale si stanno attendendo i risultati delle prove, non possiede sicuramente tali requisiti.

Utilizzando la reazione verticale massima alla spalla sommata al peso statico della spalla stessa si ricava che la sollecitazione massima al piede sul terreno (corrispondente all'incirca al fondo alveo) è pari a circa 3,10 daNcm⁻². Tale valore parrebbe essere compatibile con le caratteristiche meccaniche del terreno evidenziate dal carotaggio.

Importante riflessione deve essere condotta in merito alla presenza dello strato deteriorato, di spessore pari a circa 0,50 m (descritto nel capitolo 3), rinvenuto alla base della fondazione: tale strato, anche se meccanicamente non giunge a rottura potrebbe, in particolari condizioni critiche, generare cedimenti assai significativi per il corretto funzionamento dell'arco. Si ritiene che tali cedimenti, sicuramente già avvenuti, abbiano generato (favorito o contribuito) la formazione delle lesioni visibili sui rin fianchi del ponte di cui alla Fig.9. Essendo inoltre la struttura sghemba a comportamento tridimensionale, un eventuale cedimento su una porzione di spalla può aver generato (favorito o contribuito) la formazione di lesioni come quella visibile circa a metà della spalla sinistra, lato Robbio, vedasi spigolo sinistro in basso a Fig.10.

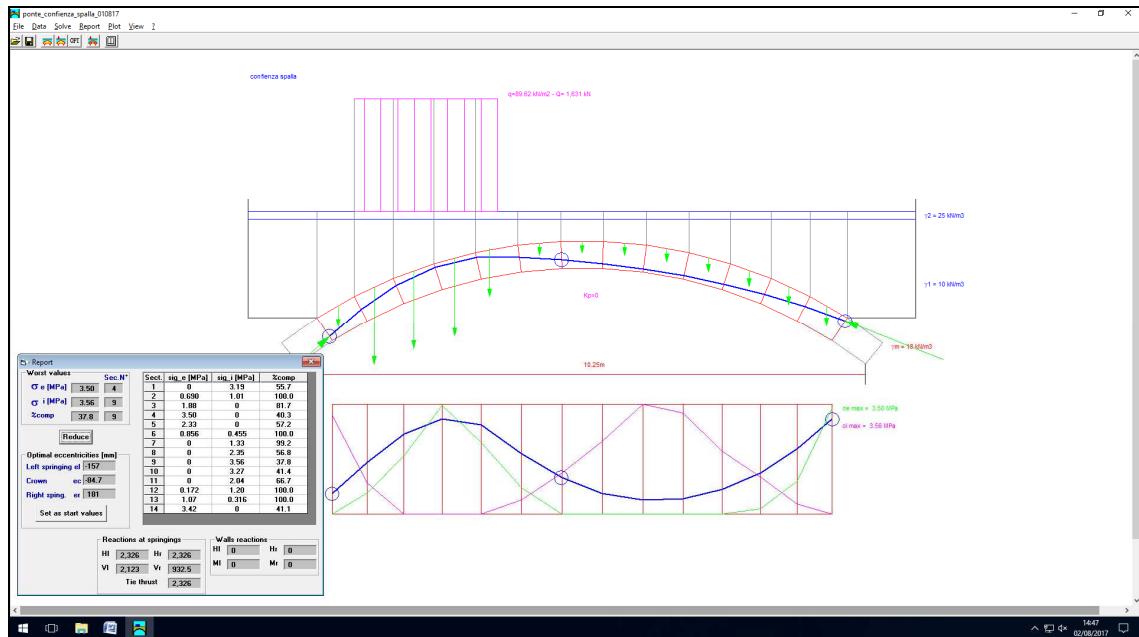


Fig.15: schema di carico viaggiante in corrispondenza della spalla

6. ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI E SCELTE PROGETTUALI

6.1. RISULTATI OTTENUTI DA SONDAGGI E PROVE SUI MATERIALI

A conclusione della fase di indagine e delle verifiche sopradescritte sulle strutture in essere, possono essere effettuate le seguenti considerazioni:

- il sondaggio penetrometrico ha misurato con precisione la profondità delle spalle del ponte confermando che le stesse, come già adombrato nella descrizione presente nel Testimoniale di Stato, insistono in corrispondenza del fondo alveo del corso d'acqua. Tale fattispecie le espone direttamente all'azione della corrente oltre che, a seguito dei significativi e ripetuti carichi trasmessi dal traffico, a sollecitazioni non previste dalle buone pratiche edificatorie dell'epoca di costruzione - *metà '800* - con particolare riferimento alle azioni dinamiche;
- il terreno di fondazione alla base delle spalle rivela uno strato estremamente deteriorato - *molle* - avente spessore pari a circa 0,50 m, meccanicamente

meno resistente con rischio di elevati cedimenti, il quale necessita assolutamente di adeguato risanamento;

- l'allineamento del piano di fondazione con il fondo alveo, in speciale modo in spalla destra ove la corrente è in battuta, potrebbe aver favorito la creazione di vuoti, in concomitanza con la variazione stagionale del carico piezometrico o dei periodi di asciutta, concausa del cedimento sul manto stradale;
- il suindicato e ormai noto cedimento della sede viaria è presumibilmente anche da ascrivere all'azione dinamica esercitata dal traffico pesante in uscita dal ponte, in presenza altresì di una superficie asfaltata assai irregolare. Tale azione, ripetuta nel tempo e coadiuvata dall'infiltrazione delle acque di pioggia nel foro, ha sicuramente esercitato sul rilevato stradale una continua azione di pompaggio, incrementante sempre più il vuoto formatosi;
- la muratura delle spalle si presenta, in diversi frangenti, in buono stato conservativo; purtroppo altrettanto non può essere affermato in merito alle condizioni dei mattoni costituenti l'intradosso dell'arco. Le lesioni superficiali, macroscopicamente evidenti, possono essere imputabili sia agli agenti atmosferici che, più probabilmente, alle azioni dinamiche esercitate dalla sovrastruttura viaria. La conformazione geometrica della struttura ad arco ribassato, unita a un modesto ricoprimento dell'estradosso, limita la diffusione dell'impronta dei carichi pesanti rendendo assai più incisive le sollecitazioni dinamiche.

6.2. RISULTATI OTTENUTI DA VERIFICHE TENSIONALI

Gli stati tensionali generati dal peso proprio della struttura e dal carico previsto dalla normativa vigente per un ponte di prima categoria, valutati sull'arco, sulle spalle e sul terreno di fondazione, sono compatibili con le risultanze delle prove

effettuate sul terreno. Al momento della stesura della presente si è in attesa di ulteriori risultati in merito alla muratura.

6.3. CIRCA IL TOTALE RIPRISTINO DEL PONTE STORICO

A seguito delle indagini descritte e delle verifiche strutturali eseguite sul manufatto storico, è stata valutata la possibilità di un ripristino totale dell'infrastruttura attraverso le seguenti lavorazioni:

- consolidamento del terreno di sottofondo e, più in generale, dello strato di terreno deteriorato - *molle* - riscontrato alla base della fondazione durante la prova penetrometrica, tramite iniezioni di malta in pressione o jet grouting, necessario al fine di migliorare le caratteristiche geomeccaniche degli strati limosi e sabbiosi evidenziati dal carotaggio. Tale intervento sarà indispensabile altresì per inibire l'azione erosiva da parte della corrente la quale potrebbe, come detto, addirittura creare vuoti localizzati alla base delle spalle;
- formazione di una calotta di consolidamento dell'estradosso dell'arco tramite la messa in opera di materiale fibrorinforzato, le cui estremità potrebbero essere estese al di sopra delle spalle, allo scopo di consolidare la struttura muraria in essere, ridistribuire su una superficie più ampia dell'arco murario il carico verticale viaggiante in superficie e realizzare una sorta di collegamento tra le due spalle del ponte;
- regolarizzazione della superficie viaria tramite il consolidamento della massicciata stradale (circa 15 m per lato) al fine di minimizzare le sollecitazioni secondarie, indotte dal traffico pesante, sulla struttura del ponte.

6.4. VALUTAZIONI IN MERITO ALL'INTERVENTO DI TOTALE RIPRISTINO DEL PONTE STORICO

A seguito di quanto al precedente paragrafo, permangono tuttavia significative incertezze circa l'intervento di ripristino dell'infrastruttura, in particolare dettate da:

- difficoltà alla messa in opera delle lavorazioni inerenti il consolidamento dello strato di terreno deteriorato - *molle* - riscontrato alla base della fondazione, a causa della presenza, pressoché costante, di vena liquida nel corpo idrico. Tali problematiche sono da evidenziarsi principalmente sotto l'aspetto tecnico, economico e temporale. Non ultima, anche qualora la roggia Biraga fosse in asciutta (essendo il corso d'acqua un canale di bonifica, una simile eventualità non potrà mai essere completamente garantita, in speciale modo durante gli eventi metereologici della stagione autunnale, con la necessità di significativi costi per aggettamenti, deviazioni varie e altre opere provvisorie), la difficoltà di accesso alla zona di intervento, praticamente in alveo, da parte dei mezzi d'opera;
- il progredire dell'ammaloramento della muratura dell'arco, dovuto all'azione dinamica dei carichi superficiali, potrebbe richiedere ulteriori significativi interventi in tempi successivi abbastanza brevi (10 o 20 anni), praticamente azzerando l'aspetto costo - benefici degli attuali lavori;
- a vantaggio della soluzione è possibile affermare che l'intervento di totale ripristino dell'infrastruttura comporterebbe una limitata azione sulla livelletta stradale, mantenendosi pressoché inalterate le quote iniziali (stato di fatto) e finali (progetto).

A fronte delle motivazioni suesposte e dei risultati attesi, tenendo altresì in debito conto dei livelli di traffico insistenti sull'infrastruttura all'epoca di realizzazione della stessa, si ritiene che un intervento di totale ripristino del ponte storico non possa essere considerato quale scelta progettuale ottimale, in termini tecnici, temporali ed economici, per la rapida messa in sicurezza del manufatto ed completo ripristino della viabilità stradale.

6.5. IPOTESI PROGETTUALE

L'ipotesi progettuale, sulla scorta delle considerazioni di cui al paragrafo precedente, propone quindi di intervenire sul ponte sia con tutte le indispensabili opere conservative che affidando il carico stradale ad una nuova sovrastruttura. Il costruendo impalcato, insistente su nuove spalle costituite da travi di testata impostate su micropali trivellati valvolati, in modo tale da svincolare le nuove fondazioni dall'attuale interferenza con il corpo idrico, si integrerà con il ponte storico modificandone l'aspetto esteriore in minima parte.

La nuova sovrastruttura comporterà un sopralzo dell'attuale sede viaria, asse ponte, di circa 0,50 m, rendendo necessaria la sistemazione della livelletta stradale, in ingresso e in uscita, per un tratto sufficientemente lungo al fine di rispettare i vincoli imposti dalla normativa vigente in termini di viabilità.

In merito al manufatto storico sono previsti interventi di miglioramento dello stato fondale, di consolidamento conservativo dell'estradosso dell'arco, di ripristino dei vari ammaloramenti e delle lesioni presenti nelle murature oltre che di sistemazione statica del muro d'ala a valle del ponte in sinistra.

7. DESCRIZIONE IPOTESI PROGETTUALE (rif. elaborato grafico 04)

L'intervento progettato prevede quindi (vedasi *Fig.16*) quanto di seguito elencato:

- realizzazione di un nuovo impalcato costituito da n.6 travi in calcestruzzo, prefabbricate e precomprese di altezza 50 cm, accostate e rese collaboranti tramite un getto integrativo, anch'esso in calcestruzzo, avente spessore pari a 20 cm. La luce libera tra l'estradosso dell'arco e l'intradosso del nuovo impalcato, pari a circa 20 cm (i quali, a seguito della realizzazione della calotta in materiale fibrorinforzato, potrebbero diminuire di circa 5 cm),

saranno più che sufficienti a garantire l'assenza di interazioni tra i due manufatti;

- l'impalcato sarà vincolato alle nuove spalle, costituite ciascuna da una trave in cemento armato gettata in opera. Tale trave, oltre a unire la testa dei micropali di fondazione, si collegherà, tramite adeguata armatura, con l'impalcato, in modo tale questi possa comportarsi alla stregua di diaframma rigido nel proprio piano, nel rispetto, naturalmente, della situazione di vincolo ipotizzata;
- ciascuna trave sarà intestata su n.14 micropali valvolati, disposti su doppia fila sfalsata (quinconce), trivellati direttamente nelle spalle del ponte attuale. Nell'attuale fase progettuale ogni micropalo avrà un diametro di trivellazione pari a 22 cm con armatura diametro 177,8 mm spessore 8 mm; la lunghezza sarà pari a 10/12 m e verrà meglio definita nelle successive fasi progettuali. **La scelta di trivellare i micropali direttamente nelle spalle del ponte attuale possiede l'importante duplice scopo di ridurre di circa 1,50 m la luce di calcolo delle travi dell'impalcato (limitando così il sopralzo stradale a 0,50 m e quindi minimizzando il più possibile la modifica della pendenza longitudinale della livelletta stradale, purtroppo necessaria) ovvero, attraverso l'iniezione di miscela cementizia, di consolidare lo strato deteriorato - *molle* - presente al di sotto delle fondazioni del ponte storico. Così facendo verrà rinforzata anche la struttura muraria la quale, dopo la realizzazione dell'infrastruttura viaria, sarà scarica da azioni esterne e soggetta solo al peso proprio;**
- il rilevato stradale, a tergo delle spalle, non richiede ulteriori verifiche di stabilità in quanto, di fatto, verrà contrastato dall'attuale struttura muraria del ponte, ulteriormente consolidata dai pali trivellati.

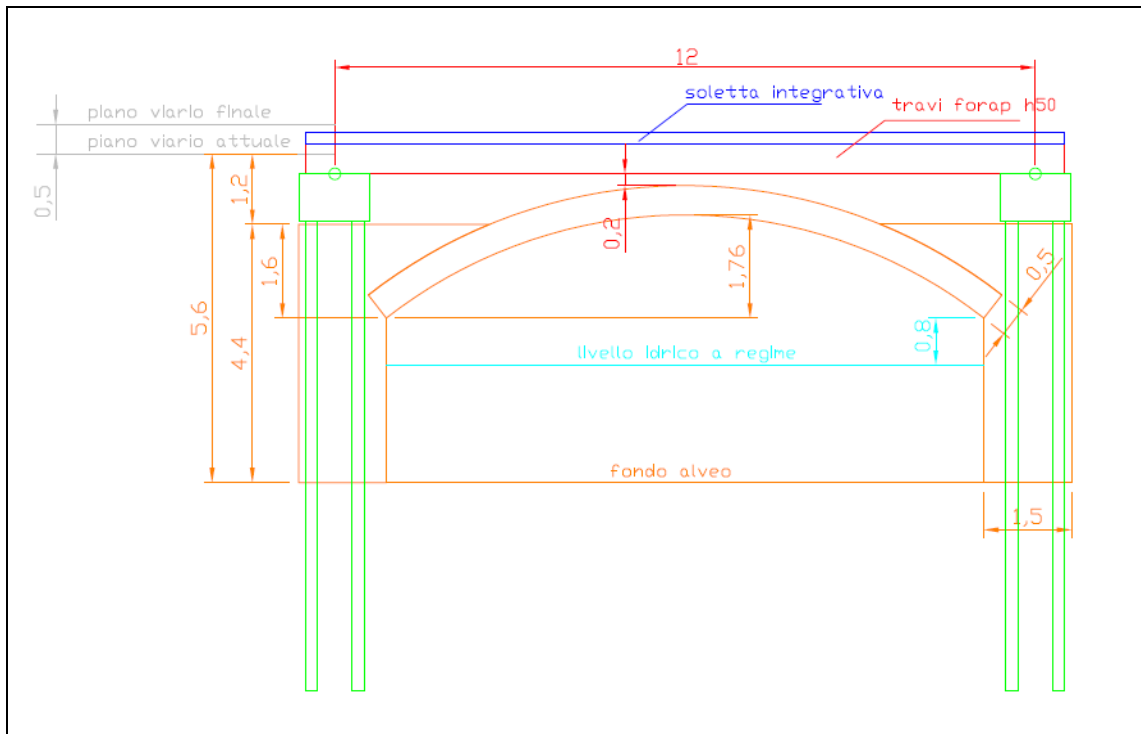


Fig.16: schema di progetto sovrapposto al ponte esistente

La successiva *Fig.17* riporta lo schema strutturale di verifica delle nuove spalle costituite dalle travi di testata e dai micropali trivellati. Lo schema traccia anche l'impalcato in travi precomprese prefabbricate ad intradosso piano tipo FORAP (GRUPPOCENTRONORD S.p.A.) o similare, dimensionate utilizzando l'impronta su una trave dei due tandem gemellati del carico viaggiante previsti dalla vigente normativa.

In merito alle verifiche delle spalle è stato utilizzato il software di calcolo Sismicad 12.10 di Concrete s.r.l., Padova.

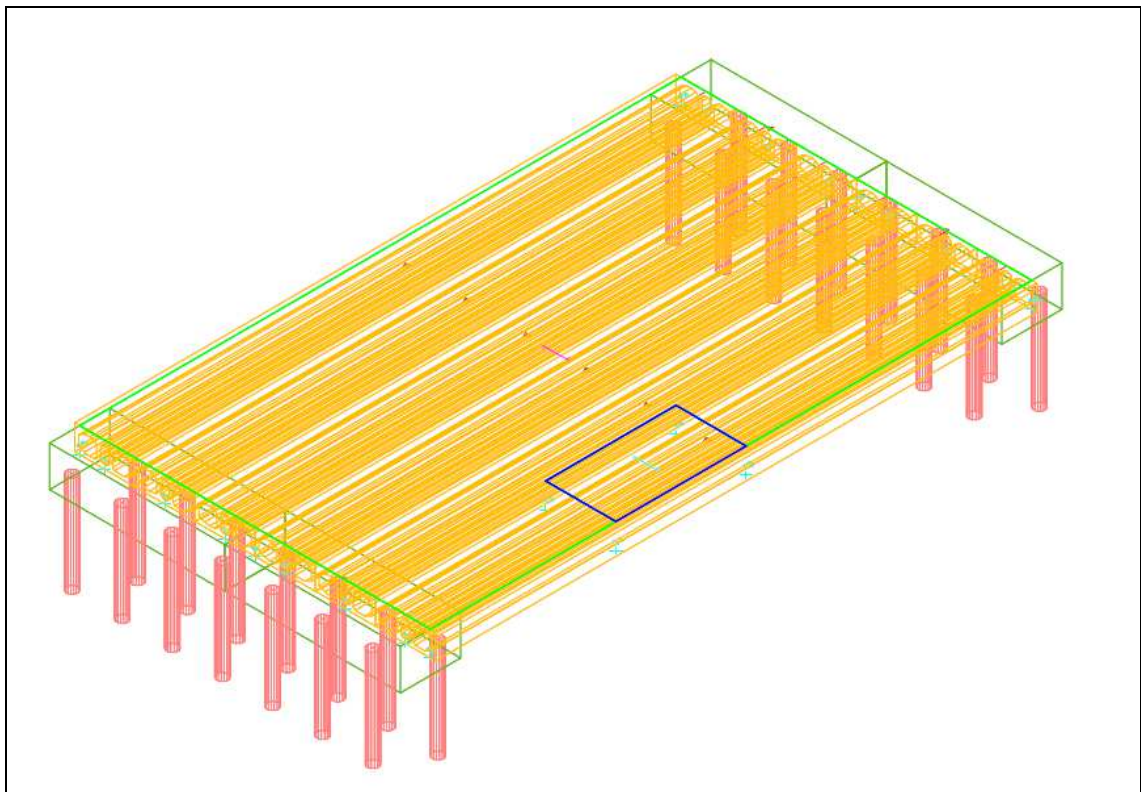


Fig.17: schema strutturale di progetto

8. PROGETTO DELLA SEDE STRADALE (rif. elaborato grafico 04)

Come dettagliato nel precedente capitolo, il progetto della nuova sovrastruttura viaria comporta un sopralzo dell'attuale quota stradale pari a 0,50 m. Tale incremento di quota, inevitabile, richiederà la risagomatura altimetrica di un tratto di sede stradale, in entrambi i lati del ponte, ovvero il raccordo di quest'ultima con la viabilità secondaria di accesso alle proprietà fondiarie prospicienti e/o di servizio ispettivo per le opere irrigue.

9. INTERVENTI DI RIPRISTINO PARZIALE DEL PONTE STORICO

Le attività previste e i relativi scopi perseguiti possono essere così riassunti:

- con la realizzazione dei micropali di fondazione, valvolati, necessari al fine di impostare le travi di testata della nuova sovrastruttura, si otterrà il

conseguente consolidamento del terreno di fondazione sul quale insiste la struttura storica. In tal modo si ritiene potrà essere risolta la problematica, più volte citata, dello strato di terreno deteriorato - *molle* - evidenziata durante il carotaggio;

- le spalle in muratura esistenti non necessitano di alcun intervento significativo;
- calotta di consolidamento dell'arco. Tale elemento, di per sé, non necessiterebbe di alcun rinforzo strutturale: si ritiene però importante la posa in opera di materiale fibrorinforzato, le cui estremità saranno estese sino alla nuove travi di testata in modo tale da consolidare e proteggere ulteriormente la struttura muraria esistente la quale, dopo l'intervento, sarà scarica e non più raggiungibile al di sotto del nuovo impalcato;
- formazione di un tratto di rilevato stradale, in prossimità dell'ingresso e dell'uscita al ponte, avente caratteristiche meccaniche di sottofondo superiori allo standard: tale intervento viene proposto al fine di evitare che il formarsi di irregolarità nella massicciata associate al traffico pesante possa indurre sollecitazioni secondarie sulla struttura del ponte. Tale risultato può essere ottenuto, a titolo di esempio, tramite la posa in opera di uno strato in misto cementato che si estenda indicativamente per 10 - 15 m oltre le spalle del ponte;
- ripristino delle varie lesioni delle murature costituenti il ponte storico, in speciale modo quella presente a monte in spalla idrografica destra;
- prosecuzione della muratura in mattoni pieni al fine di raccordare l'estradosso del ponte storico con la nuova sede stradale, come detto sopralzata di 0,50 m rispetto alla quota attuale;
- formazione di punti di scarico per eventuali acque meteoriche le quali, infiltrandosi al di sotto del rilevato stradale, potrebbero ristagnare all'estradosso dell'arco e sopra le spalle del ponte storico;

- messa in sicurezza, al fine di eliminare il rischio di ribaltamento di porzioni murarie all'interno dell'alveo, del muro d'ala curvo posizionato a valle del ponte, in sinistra idrografica (lato Robbio), evidenziato in Fig.20. A tergo di tale infrastruttura saranno realizzati alcuni micropali ai quali verranno vincolate le funi metalliche di collegamento al muro. Anche le significative lesioni visibili nella muratura saranno ripristinate.



Fig.18: ammaloramenti e lesioni varie nella muratura verticale a monte



Fig.19: ammaloramenti e lesioni nella muratura verticale a valle



Fig.20: lesioni e danni strutturali al muro d'ala a valle in sinistra

BIBLIOGRAFIA

Boothby, T.E. (2001). Analysis of masonry arches and vaults. Prog. Struct. Engng Mater. 3, 246-256

Concrete Srl (2017). Sismicad 12.10, manuale d'uso

Gelfi, P., (2002). "Role of Horizontal Backfill Passive Pressure on the Stability of Masonry Vaults", International Journal for Restoration of Buildings, Aedificatio Verlag, Freiburg, Vol. 8, No 6, pag. 573-589, ISSN 0947-4498

Harvey, W.J., (1988). Application of the mechanism analysis to masonry arches, The Structural Engineer 66(5), 77-84

Heyman J. (1966). The stone skeleton, International Journal of Solids and Structures 2, 249-279.

Confienza (PV), lì 01.09.2017

Il progettista
ing. Antonio Grandi

