



INTERVENTO FINANZIATO NELL'AMBITO DEL PATTO PER BOLOGNA

VARIANTE ALLA S.P. 65 "DELLA FUTA"

NODO DI RASTIGNANO - 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO
TRATTO COMPRESO TRA SVINCOLO DI RASTIGNANO E PONTE DELLE OCHE
NEI COMUNI DI SAN LAZZARO DI SAVENA, BOLOGNA E PIANORO

PROGETTO DEFINITIVO

CORPO STRADALE

OPERE D'ARTE MAGGIORI

RISTRUTTURAZIONE PONTE STORICO DEL PALEOTTO

RELAZIONE TECNICA DEI LAVORI DI CONSOLIDAMENTO

<p>VISTO DEL PROPRIETARIO DELLE OPERE</p> <p></p> <p>CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA</p> <p>IL RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO Ing. Pietro Luminasi</p>		<p>VISTO DEL CONCEDENTE</p> <p></p> <p>Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti DIPARTIMENTO PER LE INFRASTRUTTURE, GLI AFFARI GENERALI ED IL PERSONALE ISTRUTTORIALE DI INIZIATIVA SIA E FINANZIARIA SIA I</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

SPEA Engineering

VARIANTE ALLA SP65 “DELLA FUTA”

PROGETTO DEFINITIVO

NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO

TRATTO COMPRESO TRA SVINCOLO DI RASTIGNANO E PONTE DELLE
OCHE NEI COMUNI DI SAN LAZZARO DI SAVENA, BOLOGNA E PIANORO

PONTE STORICO DEL PALEOTTO

RELAZIONE TECNICA DEI LAVORI DI CONSOLIDAMENTO



INDICE


1.	PREMESSA.....	2
2.	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	3
3.	DESCRIZIONE DELLA GEOMETRIA DELL'OPERA	4
4.	DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA E DEI MATERIALI.....	7
4.1	SPALLE E PILE	7
4.2	ARCADE	10
4.3	RINFIANCHI	11
4.4	MURI DI TESTA O MURI FRONTALI	13
5.	ESAME DEL DEGRADO ATTUALE	14
5.1	POLVERIZZAZIONE DELLA MURATURA	14
5.2	PORZIONI DI MURATURA MANCANTE	15
5.3	COLLASSO DEL PARAPETTO E DEL MURETTO LATERALE	17
6.	INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI DELLE INDAGINI DIAGNOSTICHE	18
6.1	PROVA DI COMPRESSIONE DELLA MALTA	18
6.2	PROVA DI COMPRESSIONE DI ELEMENTI IN LATERIZIO	20
6.3	PROVA DI COMPRESSIONE SU CAMPIONI DI CAROTE IN MURATURA.....	21
6.4	ANALISI DIFFRATOMETRICA A RAGGI X E ANALISI MINERALOGIA-PETROGRAFICA DELLA MALTA	22
7.	ANALISI STRUTTURALI ALLO STATO ATTUALE.....	31
8.	INTERVENTI IN PROGETTO	39
8.1	INTERVENTI IN FONDAZIONE.....	41
8.2	INTERVENTI SULLA SOVRASTRUTTURA.....	42

ALLEGATI

Allegato 1: Rapporti di prova emessi da Istituto Giordano S.p.A..

1. PREMESSA

La presente relazione ha lo scopo di presentare le indagini diagnostiche, lo stato di conservazione attuale, gli schemi di calcolo, le verifiche strutturali eseguite e i principali risultati ottenuti

 gruppo Atlantia	<p style="text-align: right;"> VARIANTE ALLA SP65 “DELLA FUTA NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro Progetto Definitivo PONTE STORICO DEL PALEOTTO RELAZIONE TECNICA DEI LAVORI DI CONSOLIDAMENTO </p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

dall'analisi strutturale eseguita per il ponte storico Paleotto nell'ambito del progetto definitivo del completamento della variante alla S.P. 65 in località Rastignano (BO).

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- **Legge 5 Novembre 1971, n. 1086** - *Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica*

- **Legge 2 Febbraio 1974, n. 64** - *Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche*

- **Decreto Min. Infrastrutture e Trasporti 14 Gennaio 2008** - *Norme tecniche per le costruzioni*

- **Circolare 2 febbraio 2009, n. 617** - *Istruzioni per l'applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 14 gennaio 2008*

3. DESCRIZIONE DELLA GEOMETRIA DELL'OPERA

La struttura in esame è un ponte in muratura portante di epoca settecentesca costituito da tre arcate di forma circolare di cui una risulta ad oggi quasi totalmente occlusa da terreno e vegetazione spontanea.



Fotografia 1: Ponte storico Paleotto

La lunghezza totale del ponte è di circa 38 m e le tre arcate presentano le seguenti luci misurate dal bordo pile e spalle:

- Arcata sinistra¹: impossibile la misurazione causa ingombro del terreno;
- Arcata centrale: 9.70 m circa;
- Arcata destra: 10.70 m circa.

¹ La denominazione è concorde con la vista da monte a valle.



Fotografia 2: Arcata sinistra del ponte storico da monte a valle



Fotografia 3: Arcata destra e centrale del ponte storico da valle a monte

La sede stradale presenta un piano viabile di larghezza pari a circa 2.60 m al netto dei muretti laterali (ognuno di spessore e altezza pari a circa 0.30 m) e quindi adatto al transito di un solo veicolo per senso di marcia. Il piano stradale ha una quota variabile da circa 97.80 m s.l.m. (sponda sinistra se lo si guarda da monte a valle) a circa 98.90 m s.l.m. (sponda destra se lo si guarda da monte a valle) per via della livelletta longitudinale. Lo spessore delle arcate risulta pari a circa 0.50 m, come è ben osservabile anche dall'esterno guardando la disposizione e la geometria dei laterizi, mentre lo spessore dell'impalcato in chiave all'arcata centrale misura circa 1.30 m.



Fotografia 4: Sede stradale dell'opera d'arte

Le pile presentano una sezione rettangolare dotata di rostri come era solito per le pile in muratura in alveo: i lati hanno sostanzialmente dimensioni pari a 3.30 m X 2.30 m.

4. DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA E DEI MATERIALI

Il ponte presenta la classica struttura dei ponti storici in muratura portante, costituita dai seguenti elementi:

- Pile e spalle su cui gravano le arcate;
- Arcate;
- Rinfianco dell'estradosso delle arcate;
- Muri di testa o muri frontali;
- Riempimento della struttura fino a quota della sovrastruttura stradale;
- Muretti laterali.

4.1 Spalle e pile

La spalla sinistra del ponte non è in pratica visibile a causa del terreno e della vegetazione spontanea che ne occlude la forma. Per indagarne la struttura si è ordinata l'esecuzione di due sondaggi verticali a carotaggio continuo dal piano viabile, posizionati però ad una certa distanza dallo stacco delle arcate. Sulla spalla sinistra il sondaggio è nominato "ENS3" e sulla destra "ENS4": in Figura 4.1 e Figura 4.2 si riportano le stratigrafie risultanti.

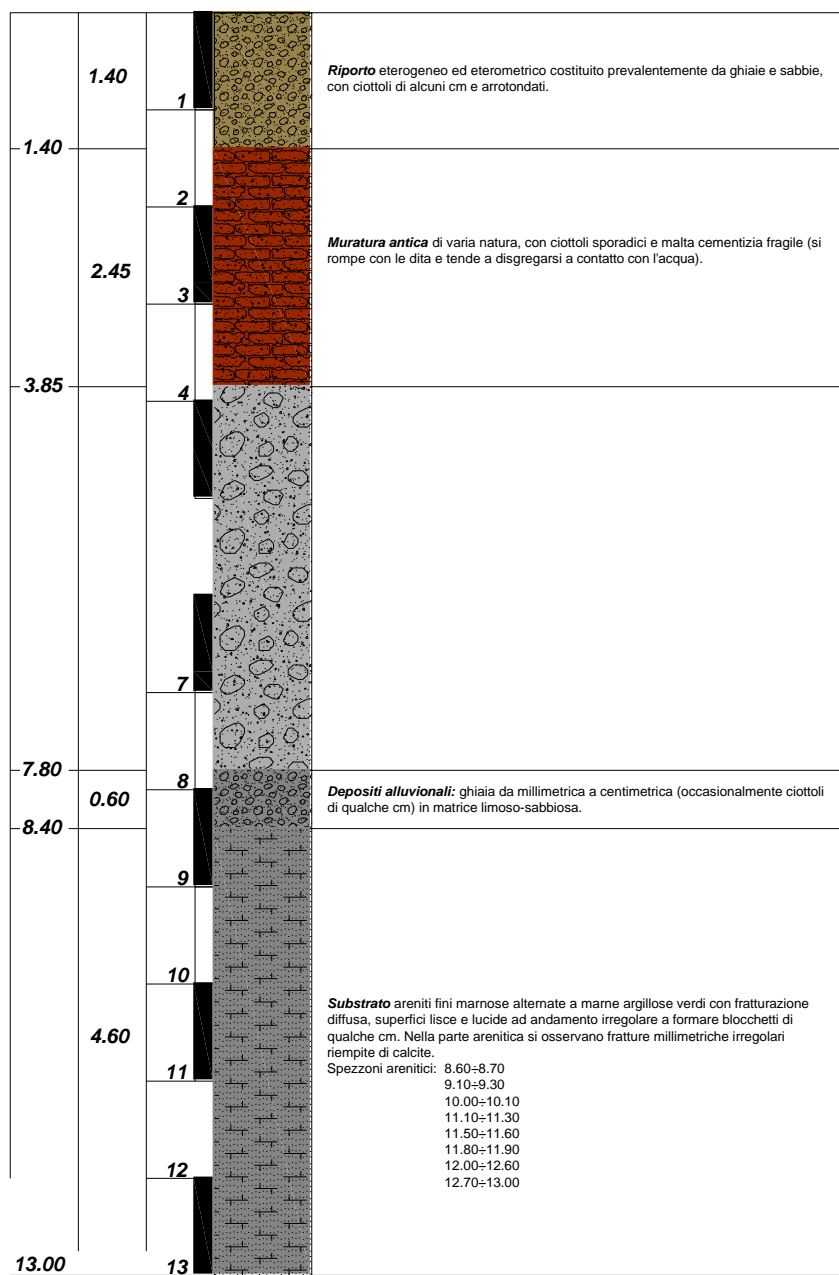


Figura 4.1: Descrizione della stratigrafia del sondaggio ENS3

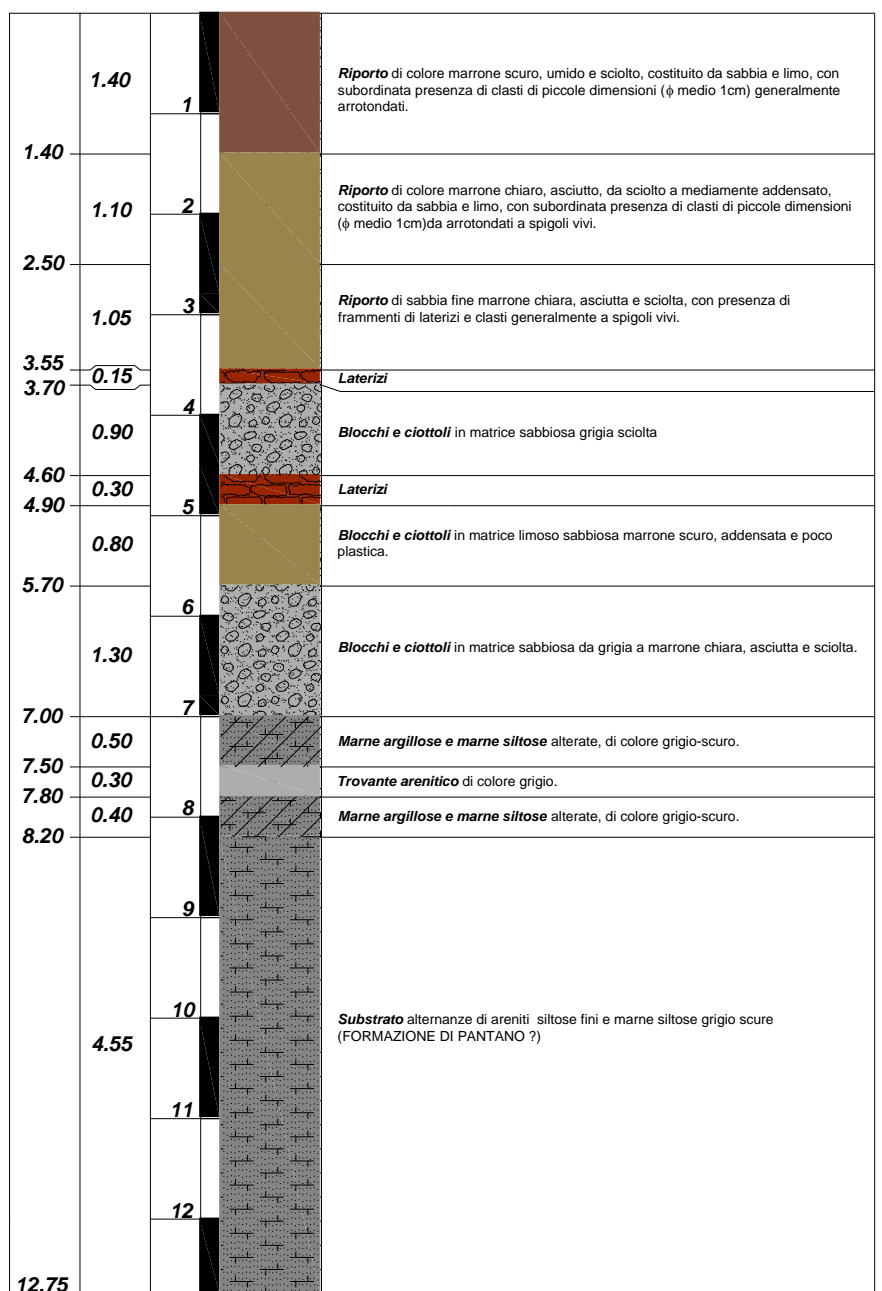


Figura 4.2: Descrizione della stratigrafia del sondaggio ENS4

Le pile presentano sostanzialmente sezione trasversale rettangolare: sono però munite di rostri per migliorarne il comportamento in alveo (anche se, attualmente, solo la pila di destra risulta a contatto con l'acqua).

Dai rilievi geometrici a disposizione e da diversi sopralluoghi si sono potute dedurre le dimensioni dei lati della pila destra, mentre la pila sinistra risulta ad oggi in pratica occlusa dal terreno. Per indagare le fondazioni della pila destra si sono eseguiti saggi con escavatore meccanico: da questi si è potuto dedurre la presenza di uno zoccolo di fondazione in calcestruzzo

(dovuto ad un progetto di consolidamento dell'opera risalente al passato) rastremato rispetto alla sezione trasversale del fusto pila, anche se è stata impossibile la determinazione precisa delle dimensioni. Invece lo spessore è ragionevolmente ipotizzabile in 0.50 m, in virtù di un'indagine penetrometrica eseguita con carotatrice elettrica. Tale sondaggio è stato eseguito con inclinazione di circa 10° rispetto alla verticale; a profondità di circa 1.50 m si è rilevata la presenza di un ciottolo di alveo, interpretabile come la quota del piano di posa delle fondazioni.

Per determinare la struttura interna delle pile, che si ipotizzava ragionevolmente in muratura a sacco, si è ordinata l'esecuzione di un sondaggio orizzontale a carotaggio continuo di grande diametro con il prelievo di due campioni di notevoli dimensioni. Dalle carote prelevate si è avuta la conferma che l'interno delle pile è realizzato in muratura a sacco con elementi di elevate dimensioni (ciottoli di fiume di grossa o grossissima pezzatura) legati con malta cementizia o cemento. Lo spessore della cortina esterna in laterizio risulta di circa 50 cm.

Ai fini della caratterizzazione meccanica della muratura costituente le pile (che dagli esami visivi si può supporre ragionevolmente uguale a quella costituente le arcate) si sono ordinati diverse indagini di laboratorio a Istituto Giordano S.p.A. sulle due carote di grande diametro prelevate tramite un sondaggio sub-orizzontale con carotiere elettrico eseguito sul fusto della pila centrale. Per i dettagli si rimanda al Capitolo 6.

4.2 Arcate

Le arcate, o più correttamente le volte, hanno tutte forma sostanzialmente circolare, anche se di dimensioni diverse. Lo spessore strutturale, dato fondamentale per le future elaborazioni analitiche, è desumibile direttamente da un esame visivo grazie alla disposizione dei laterizi e risulta pari a circa 0.50 m. Per avere conferma di questo dato essenziale e per indagare il riempimento delle volte si è ordinata l'esecuzione di un saggio in chiave all'arcata centrale.

Dal saggio si è avuta la conferma dello spessore dell'arco e si sono ottenute le informazioni per il disegno della sezione trasversale riportata in Figura 4.3.

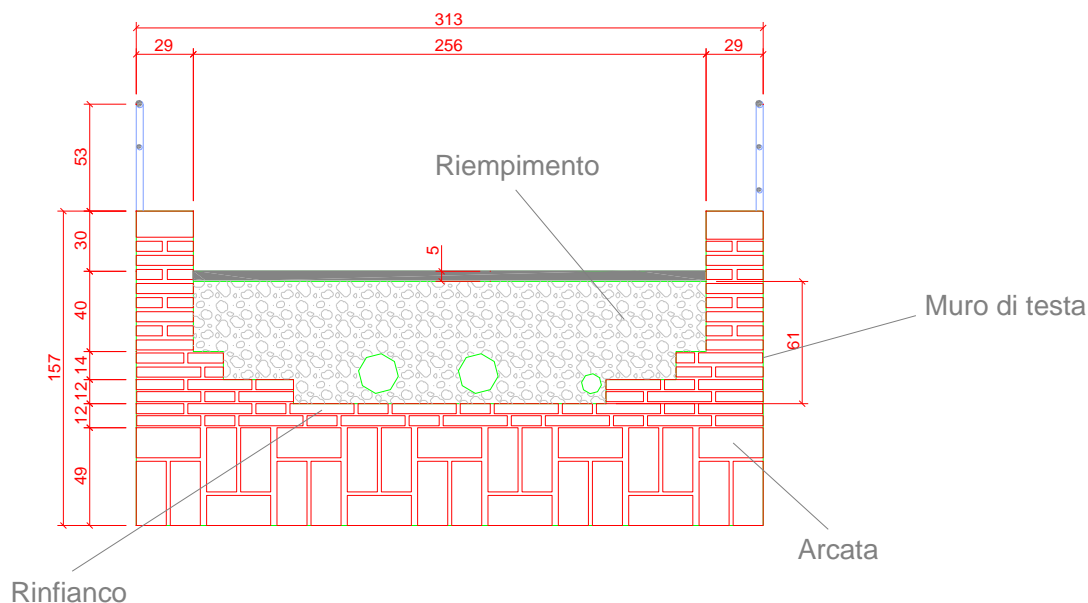


Figura 4.3: Sezione trasversale in chiave campata centrale

Le arcate sono realizzate in muratura di laterizi e malta (con ogni probabilità costituita da calce) e presentano un forte stato di degrado superficiale: si veda in proposito il Capitolo 5.

4.3 Rinfianchi

La presenza di un rinfianco, solitamente realizzati in muratura con caratteristiche meccaniche più scadenti rispetto a quella utilizzata per le arcate, è stata appurata dal saggio eseguito in chiave all'arcata centrale. Esso sembra essere costituito da pietre sbozzate in maniera regolare e di buone caratteristiche meccaniche, caratterizzate da una discreta compattezza e durezza. Indagini più approfondite, finalizzate alla determinazione dell'andamento longitudinale del rinfianco e alle sue caratteristiche meccaniche, non sono state eseguite a causa della presenza dei sottoservizi che hanno impedito la realizzazione di un sondaggio meccanico in asse pila. Ai fini delle elaborazioni analitiche, come si vedrà al Capitolo 5, si è agito in maniera cautelativa trascurandone la presenza e considerandolo un semplice riempimento.



Fotografia 5: Saggio in chiave alla campata centrale



Fotografia 6: Probabile estradosso del rinfianco

4.4 Muri di testa o muri frontali

I muri frontali, che insieme al rinfiango costituiscono il timpano delle arcate, sono costituiti da una muratura per lo più in pietre naturali approssimativamente sbazzate caratterizzata da una tessitura piuttosto disordinata e irregolare. In conseguenza di ciò e di uno stato di degrado piuttosto evidente e preoccupante rimane dubbia la loro efficienza strutturale di contenimento del riempimento: in effetti si è intervenuto in passato con numerosi incatenamenti metallici trasversali ai fini di preservarne la resistenza alle spinte orizzontali.

5. ESAME DEL DEGRADO ATTUALE

Da un veloce esame visivo dei paramenti esterni del manufatto si evince chiaramente il pre-occupante stato di degrado superficiale che caratterizza oggi la muratura. Per maggior chiarezza si possono individuare le seguenti patologie generali dell'opera.

5.1 Polverizzazione della muratura

Questa tipologia di degrado consiste nella parziale disgregazione e polverizzazione dei giunti di malta e degli elementi in laterizio (o pietra naturale) ed è diffuso sostanzialmente su tutta la struttura muraria con particolare evidenza nelle zone delle arcate. Solitamente il fenomeno è imputabile alla formazione di solfati sulle superfici murarie. L'intensità del degrado è elevata ed è ragionevole supporre che la muratura sia incisivamente indebolita e non possa fornire sufficienti garanzie di monoliticità e coesione.



Fotografia 7: Polverizzazione arcata destra



Fotografia 8: Polverizzazione alle reni dell'arcata destra



Fotografia 9: Polverizzazione in chiave arcata centrale

5.2 Porzioni di muratura mancante

Legato al precedente fenomeno, questa tipologia di degrado consiste nel distacco evidente di interi elementi di laterizio (o lapidei) dai paramenti murari ed è diffuso sostanzialmente su tutta la struttura muraria con particolare evidenza nelle zone alla base delle pile. Il fenomeno è imputabile all'azione degli agenti atmosferici e, per le pile, all'azione di dilavamento delle acque di alveo. L'intensità del degrado è elevata ed è ragionevole supporre che la muratura sia incisivamente indebolita e non possa fornire sufficienti garanzie di monoliticità e coesione.



Fotografia 10: Disgregazione alla base della pila destra



Fotografia 11: Porzioni di muratura mancante alla base della pila sinistra



Fotografia 12: Porzioni di muratura mancante alla base della pila destra

5.3 Collasso del parapetto e del muretto laterale

In corrispondenza dell'arcata sinistra uno dei due muretti laterali si trova in evidente stato di collasso avendo subito una manifesta rotazione verso l'esterno dell'impalcato. La barriera di sicurezza ha subito il medesimo danno ed è ad oggi in stato di collasso. Questo fenomeno può essere imputato alla spinta trasversale del riempimento o all'eventuale urto di veicoli contro il parapetto stesso.



Fotografia 13: Collasso del muretto laterale e del parapetto

6. INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI DELLE INDAGINI DIAGNOSTICHE

Al fine di ottenere una minima conoscenza dei parametri meccanici e chimici caratterizzanti la muratura che costituisce il ponte, l'Istituto Giordano S.p.A. ha eseguito su richiesta degli scriventi alcune indagini in laboratorio su campioni di materiale prelevati in situ. Le indagini eseguite sono le seguenti:

1. Prova di compressione su provini di malta;
2. Prova di compressione su provini di elementi in laterizio;
3. Prova di compressione su porzioni di carote in muratura;
4. Analisi diffrattometrica ai raggi X e analisi mineralogica-petrografica su provini di malta.

Per i dettagli sulle prove si rimanda ai rapporti ufficiali emessi da Istituto Giordano S.p.A. n. 224929, n. 224930, n. 224931 del 26/04/2007 e n. 225503 del 11/05/2007. In seguito si riporta una breve descrizione delle indagini di laboratorio eseguite e la loro interpretazione critica ai fini della valutazione dello stato di degrado attuale del ponte.

6.1 Prova di compressione della malta

Dai due campioni di materiale prelevati in situ tramite un sondaggio sub-orizzontale con carotiere elettrico eseguito sul fusto della pila centrale del ponte (divisi poi da Istituto Giordano S.p.A. in carota 1A, 1B, 1C, 2A, 2B, 2C, 2D, 2E), si sono ottenuti, per la parte esterna della struttura, dei provini composti dal mattone nella parte inferiore e dalla malta sulla faccia superiore sulla quale si è eseguita, previo intaglio della malta in elementi di forma pressoché cubica di piccole dimensioni, la prova di compressione tramite un punzone di diametro pari a 20 mm. Analogamente si è proceduto per la malta presente all'interno della struttura della pila, per la quale si sono ricavati una serie di provini cubici. Il carico di rottura è inteso come il carico che porta ai primi fenomeni di fessurazione del provino testato.

I risultati delle prove, forniti da Istituto Giordano S.p.A sono riassunti nelle Tabelle seguenti.

Tabella 6.1: Risultati prova di compressione malta – carota 1A

Provino	Spessore malta (mm)	Superficie di carico (mm ²)	Carico di 1 ^a fessurazione (N)	Resistenza a compressione (MPa)
1	22	314	7017	22.35
2	23	314	9725	30.97
3	22	314	8135	25.91

4	21	314	6720	21.40
5	22	314	4019	12.80
6	23	314	7794	24.82

Il valore medio risulta pertanto: $f_{c,medio} = 23.04$ MPa.

Tabella 6.2: Risultati prova di compressione malta – carota 2E

Provino	Spessore malta (mm)	Superficie di carico (mm ²)	Carico di 1 ^a fessurazione (N)	Resistenza a compressione (MPa)
1	20	314	13924	44.34
2	22	314	14677	46.74
3	23	314	12125	38.61
4	21	314	12363	39.37
5	21	314	10757	34.26
6	22	314	13096	41.71

Il valore medio risulta pertanto: $f_{c,medio} = 40.84$ MPa.

Tabella 6.3: Risultati prova di compressione malta – carota 1B

Provino	Superficie di carico (mm ²)	Carico di 1 ^a fessurazione (N)	Resistenza a compressione (MPa)
1	473	9607	20.31
2	449	9977	22.20
3	462	9311	20.14
4	454	9391	20.70
5	458	10272	22.43

Il valore medio risulta pertanto: $f_{c,medio} = 21.16$ MPa.

Tabella 6.4: Risultati prova di compressione malta – carota 1C

Provino	Superficie di carico (mm ²)	Carico di 1 ^a fessurazione (N)	Resistenza a compressione (MPa)
1	547	6964	12.73
2	522	9509	18.22
3	547	7666	14.01
4	543	7188	13.24
5	510	4903	9.61

Il valore medio risulta pertanto: $f_{c,medio} = 13.56$ MPa.

Dai valori numerici appena riportati si può affermare che la malta che lega gli elementi resistenti del fusto della pila indagata presenta una resistenza a compressione piuttosto elevata. In effetti, se si prendono come riferimento le tipologie di malte assunte per le costruzioni nuove in muratura nel D.M. 14/01/2008, si nota come le resistenze medie sopra riportate risultano maggiori, a volte di molto, del valore previsto per la tipologia M10), malta di discrete caratteristiche meccaniche (i primi 2 valori medi risultano superiori anche al valore previsto per la tipologia M20 che rappresenta il tipo più resistente).


6.2 Prova di compressione di elementi in laterizio

Dai due campioni di materiale prelevati in situ tramite un sondaggio sub-orizzontale con carotiere elettrico eseguito sul fusto della pila centrale del ponte (divisi poi da Istituto Giordano S.p.A. in carota 1A, 1B, 1C, 2A, 2B, 2C, 2D, 2E), si sono ottenuti alcuni provini dei mattoni in laterizio di forma pressoché cubica di piccole dimensioni (lato $\cong 20$ mm), sui quali si è eseguita la prova di compressione previo essiccamento in stufa.

I risultati delle prove, forniti da Istituto Giordano S.p.A sono riassunti nelle Tabelle seguenti.

Tabella 6.5: Risultati prova di compressione laterizi – carota 1A

Provino	Superficie di carico (mm ²)	Carico di 1 ^a fessurazione (N)	Resistenza a compressione (MPa)
1	524	10400	19.85
2	513	10140	19.77
3	522	10821	20.73

	<p style="text-align: right;">VARIANTE ALLA SP65 "DELLA FUTA NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro Progetto Definitivo PONTE STORICO DEL PALEOTTO RELAZIONE TECNICA DEI LAVORI DI CONSOLIDAMENTO</p>
-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

4	517	9118	17.64
5	534	8532	15.98

Il valore medio risulta pertanto: $f_{c,medio} = 18.79$ MPa.

Tabella 6.6: Risultati prova di compressione laterizi – carota 2D

Provino	Superficie di carico (mm ²)	Carico di 1 ^a fessurazione (N)	Resistenza a compressione (MPa)
1	578	12134	20.99
2	586	12524	21.37
3	583	8960	15.37
4	499	7654	15.34

Il valore medio risulta pertanto: $f_{c,medio} = 18.27$ MPa.

Dai valori numerici appena riportati si può affermare che i laterizi che costituiscono gli elementi resistenti del fusto della pila indagata presentano una resistenza a compressione discreta. In effetti, se si prendono come riferimento le resistenze degli elementi in laterizio pieni e semipieni assunte per le costruzioni nuove in muratura nel D.M. 14/01/2008, si nota come la resistenza a compressione vari da un minimo di 2.0 MPa ad un massimo di 40.0 MPa.

6.3 Prova di compressione su campioni di carote in muratura

I due campioni di materiale prelevati in situ tramite un sondaggio sub-orizzontale con carotiere elettrico eseguito sul fusto della pila centrale del ponte sono stati divisi da Istituto Giordano S.p.A. in più parti (carota 1A, 1B, 1C, 2A, 2B, 2C, 2D, 2E). Da esse si sono ottenuti 4 provini di forma cilindrica con diametro nominale pari a 140 mm sui quali si è eseguita la prova di compressione tramite una pressa meccanica.

I risultati delle prove, forniti da Istituto Giordano S.p.A sono riassunti nelle Tabelle seguenti.

Tabella 6.7: Denominazione e descrizione dei provini

Provino	Descrizione
1A	Muratura in laterizio
2D	Muratura in laterizio
1B	Muratura in pietra naturale (ciottoli)

1C	Muratura in laterizio
----	-----------------------

Tabella 6.8: Risultati prova a compressione carote in muratura

Provino	Altezza (mm)	Peso (g)	Carico di rottura (KN)	Resistenza a compressione (MPa)
1	145	4099	313.00	20.34
2	146	4190	243.20	15.81
3	146	5282	381.80	24.81
4	130	5314	418.20	27.18

Dai valori numerici sopra riportati si può affermare che la muratura costituente il fusto della pila indagata presenta una resistenza a compressione molto elevata. In effetti, se si prendono come riferimento le resistenze a compressione delle murature assunte per le nuove costruzioni nel D.M. 14/01/2008, si nota come la resistenza a compressione vari da un minimo di 1.2 MPa ad un massimo di 14.3 MPa. Tutte le resistenze sopra riportate risultano maggiori del valore massimo proposto per le costruzioni in muratura di nuova realizzazione.

6.4 Analisi diffrattometrica a raggi X e analisi mineralogia-petrografica della malta

Dai due campioni di materiale prelevati in situ tramite un sondaggio sub-orizzontale con carotiere elettrico eseguito sul fusto della pila centrale del ponte (divisi poi da Istituto Giordano S.p.A. in carota 1A, 1B, 1C, 2A, 2B, 2C, 2D, 2E), si sono ottenuti alcuni provini di malta sui quali si è eseguita un'analisi diffrattometrica a raggi X per il riconoscimento delle fasi cristalline in essa presenti e un'analisi mineralogico-petrografica per la determinazione dei principali componenti chimici.

I risultati delle prove, forniti da Istituto Giordano S.p.A sono riassunti nelle Tabelle seguenti.

Tabella 6.9: Risultati analisi diffrattometrica ai raggi X

Carota 1A		
Specie mineralogica	Stima di abbondanza relativa*	Metodo di prova
Quarzo SiO_2	+++	XRD
Calcite CaCO_3	++	XRD
Plagioclasio $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	+	XRD
Microclino KAlSi_3O_8	tr	XRD
Ettringite $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	tr	XRD

- +++ Componente principale
- ++ Componente presente in quantità media
- + Componente presente in piccola quantità
- tr Componente presente in tracce
- * Dati indicativi e soggetti ad elevati margini di errore nel caso di argille, fillosilicati e zeoliti.

Tabella 6.10: Risultati analisi mineralogico-petrografica.

Carota 1A		
Parametri tessitu- rali	Componenti	Analisi modale*
Matrice	Formato da calcite a tessitura micritica con silicoalluminati	31 %
Porosità da aggregati	Assente	-
Porosità da legante	Definita da vacui irregolari e microfratture, anche lunghe	26 %
Porosità da sutura aggregato/legante	Non rilevata	-
Aggregati	Calcari micritici, calcite spatica, calcareniti	38
	Arenarie	24
	Quarzo	24
	Feldspati	12
	Rocce metamorfiche gneissiche	1
	Miche	< 0,5
	Serpentiniti	< 0,5
	Rocce vulcaniche effusive	< 0,5
		43 %

(*) Determinazioni percentuali sulla base di diagrammi per la stima visuale. SHVETSOV M.S. (1954).


	<p style="text-align: right;">VARIANTE ALLA SP65 "DELLA FUTA NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro Progetto Definitivo PONTE STORICO DEL PALEOTTO RELAZIONE TECNICA DEI LAVORI DI CONSOLIDAMENTO</p>
-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabella 6.11: Risultati analisi morfometrica degli aggregati.


Carota 1A		
Granulometria	Siltoso grossolana (1/16-1/32 mm)	5 %
	Arenacea molto fine (1/8 - 1/16 mm)	11 %
	Arenacea fine (1/4 - 1/8 mm)	22 %
	Arenacea media (1/2 - 1/4 mm)	27 %
	Arenacea grossolana (1 - 1/2 mm)	16 %
	Arenacea molto grossolana (2 - 1 mm)	9 %
	Conglomeratica micro (4-2 mm)	5 %
	Conglomeratica fine (8-4 mm)	5 %
Forma	Da angolosa ad arrotondata	
Sfericità	Da alta a molto bassa	
Classazione	Scarsa. Non si evidenziano orientazioni preferenziali tra i clasti	

Tabella 6.12: Caratterizzazione del materiale

Carota 1A	
Classificazione dell'impasto	<p>Malta realizzata con calce idraulica, caricata con sabbia di natura sia silicatica (arenarie, quarzo, feldspati, gneiss, miche, serpentiniti, vulcaniti) che carbonatica (calcarei micritici, calcite spatica, calcareniti).</p> <p>La granulometria dell'aggregato varia dalla classe siltoso grossolana (1/16-1/32 mm) a quella conglomeratica fine (8 - 4 mm) con prevalenza della frazione arenacea media (1/2-1/4 mm). Il rapporto aggregato/legante in polvere è circa 7/1 in volume.</p> <p>La porosità totale è media, definita da vacui di forma prevalentemente irregolare e microfratture.</p>
Osservazioni particolari	<p>È molto frequente la presenza di cristallizzazioni saline nei pori. Si rileva un basso grado di carbonatazione del legante.</p> <p><u>Lo stato di conservazione della malta è scadente per l'estesa cristallizzazione di sali nei pori: l'elevata presenza di sali diminuisce la resistenza dell'impasto e ne inficia l'adesione ai laterizi.</u></p>

Tabella 6.13: Risultati analisi diffrattometrica ai raggi X

Carota 1B		
Specie mineralogica	Stima di abbondanza relativa*	Metodo di prova
Quarzo SiO ₂	+++	XRD
Calcite CaCO ₃	++	XRD
Plagioclasio CaAl ₂ Si ₂ O ₈ -NaAlSi ₃ O ₈	+	XRD

 gruppo Atlantia	VARIANTE ALLA SP65 "DELLA FUTA NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro Progetto Definitivo PONTE STORICO DEL PALEOTTO RELAZIONE TECNICA DEI LAVORI DI CONSOLIDAMENTO
------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Microclino KAlSi_3O_8	+	XRD
Ettringite $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	tr	XRD


- + + + Componente principale
- + + Componente presente in quantità media
- + Componente presente in piccola quantità
- tr Componente presente in tracce
- * Dati indicativi e soggetti ad elevati margini di errore nel caso di argille, fillosilicati e zeoliti.

Tabella 6.14: Risultati analisi mineralogico-petrografica.

Carota 1B		
Parametri tessiturali	Componenti	Analisi modale*
Matrice	Formato da calcite a tessitura micritica, idrossido di calcio e silicoalluminati	22 %
Porosità da aggregati	Assente	-
Porosità da legante	Definita da vacui di forma irregolare	28 %
Porosità da sutura aggregato/legante	-	-
Aggregati	Calcari micritici, calcareniti	44
	Quarzo mono e policristallino	28
	Arenarie	11
	Feldspati	9
	Rocce metamorfiche gneissiche	8
	Frammenti di conchiglie	< 0,5
		50 %

Tabella 6.15: Risultati analisi morfometrica degli aggregati.

Carota 1B		
Granulometria	Arenacea molto fine (1/8 - 1/16 mm)	5 %
	Arenacea fine (1/4 - 1/8 mm)	15 %
	Arenacea media (1/2 - 1/4 mm)	19 %
	Arenacea grossolana (1 - 1/2 mm)	38 %
	Arenacea molto grossolana (2 - 1 mm)	8 %
	Conglomeratica micro (4-2 mm)	15 %

	<p style="text-align: right;">VARIANTE ALLA SP65 "DELLA FUTA NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro Progetto Definitivo PONTE STORICO DEL PALEOTTO RELAZIONE TECNICA DEI LAVORI DI CONSOLIDAMENTO</p>
-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Forma	Da angolosa ad arrotondata
Sfericità	Da alta a molto bassa
Classazione	Scarsa. Non si evidenziano orientazioni preferenziali tra i clasti

(*) Determinazioni percentuali sulla base di diagrammi per la stima visuale. SHVETSOV M.S. (1954).

Tabella 6.16: Caratterizzazione del materiale

Carota 1B	
Classificazione dell'impasto	<p>Malta realizzata con calce idraulica, caricata con sabbia di natura sia silicatica (quarzo, arenarie, feldspati, gneiss,) che carbonatica (calcari micritici, calcareniti, frammenti di conchiglie).</p> <p>La granulometria dell'aggregato varia dalla classe arenacea molto fine (1/8 - 1/16 mm) a quella conglomeratica micro (4-2 mm) con prevalenza della frazione arenacea grossolana (1 - 1/2 mm). Il rapporto aggregato/legante in polvere è circa 8/1 in volume.</p> <p>La porosità totale è medio-alta, definita da vacui di forma prevalentemente irregolare.</p>
Osservazioni particolari	<p>È molto frequente la presenza di cristallizzazioni saline nei pori.</p> <p>Si rileva un basso grado di carbonatazione del legante.</p> <p><u>Dal punto di vista microscopico lo stato di conservazione del campione è scadente per i valori medio - alti di porosità e la cristallizzazione di sali nei pori.</u></p>

Tabella 6.17: Risultati analisi diffrattometrica ai raggi X

Carota 1C		
Specie mineralogica	Stima di abbondanza relativa*	Metodo di prova
Quarzo SiO ₂	+++	XRD
Calcite CaCO ₃	++	XRD
Plagioclasio CaAl ₂ Si ₂ O ₈ -NaAlSi ₃ O ₈	+	XRD
Microclino KAlSi ₃ O ₈	+	XRD

+++ Componente principale

++ Componente presente in quantità media

+ Componente presente in piccola quantità

tr Componente presente in tracce


* Dati indicativi e soggetti ad elevati margini di errore nel caso di argille, fillosilicati e zeoliti.

Tabella 6.18: Risultati analisi mineralogico-petrografica

Carota 1C		
Parametri tessitu- rali	Componenti	Analisi modale*
Matrice	Formato da calcite a tessitura micritica, idrossido di calcio e silicoalluminati	18 %
Porosità da ag- gregati	Assente	-
Porosità da legan- te	Definita da vacui di forma irregolare e microfessu- razioni	28 %
Porosità da sutu- ra aggregato/legante	Definita da microfessurazioni	4 %
Aggregati	Calcari micritici, calcite spatica	51 %
	Quarzo	30 %
	Feldspato	10 %
	Arenarie	5 %
	Rocce metamorfiche gneissiche	3 %
	Frammenti di conchiglie	< 0,5 %
	Serpentiniti	< 0,5 %

Tabella 6.19: Risultati analisi morfometrica degli aggregati

Carota 1C		
Granulome- tria	Siltoso grossolana (1/16-1/32 mm)	1 %
	Arenacea molto fine (1/8 - 1/16 mm)	5 %
	Arenacea fine (1/4 - 1/8 mm)	7 %
	Arenacea media (1/2 - 1/4 mm)	12 %
	Arenacea grossolana (1 - 1/2 mm)	20 %
	Arenacea molto grossolana (2 - 1 mm)	15 %
	Conglomeratica micro (4-2 mm)	-
	Conglomeratica fine (8-4 mm)	25 %

	<p style="text-align: right;">VARIANTE ALLA SP65 "DELLA FUTA NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro Progetto Definitivo PONTE STORICO DEL PALEOTTO RELAZIONE TECNICA DEI LAVORI DI CONSOLIDAMENTO</p>
-----------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	Conglomeratica media (16-8 mm)	15 %
Forma	Da angolosa a sub-arrotondata	
Sfericità	Alta	
Classazione	Scarsa. Non si evidenziano orientazioni preferenziali tra i clasti	

(*) Determinazioni percentuali sulla base di diagrammi per la stima visuale. SHVETSOV M.S. (1954).

Tabella 6.20: Caratterizzazione del materiale

Carota 1C	
Classificazione dell'impasto	<p>Malta realizzata con calce idraulica caricata con sabbia di natura sia carbonatica (calcarei micritici, calcite spatica, frammenti di conchiglie) che silicatica (quarzo, feldspato, arenarie, gneiss, serpentiniti).</p> <p>La granulometria dell'aggregato varia dalla classe siltoso grossolana (1/16-1/32 mm) a quella conglomeratica media (16-8 mm) con prevalenza della frazione conglomeratica fine (8-4 mm). Il rapporto aggregato/legante in polvere è circa 8/1 in volume.</p> <p>La porosità totale è alta, definita da microfessure e vacui di forma irregolare.</p>
Osservazioni particolari	<p>Si rilevano cristallizzazioni saline nei pori.</p> <p>Si rileva un basso grado di carbonatazione del legante.</p> <p><u>Dal punto di vista microscopico lo stato di conservazione del campione è scadente per i valori alti di porosità e la presenza di cristallizzazioni saline nei pori. La presenza di cristallizzazioni saline può inoltre diminuire l'adesione dell'impasto ai lapidei.</u></p>

Tabella 6.21: Risultati analisi diffrattometrica ai raggi X

Carota 2D		
Specie mineralogica	Stima di abbondanza relativa*	Metodo di prova
Quarzo SiO ₂	+++	XRD
Calcite CaCO ₃	++	XRD
Plagioclasio CaAl ₂ Si ₂ O ₈ -NaAlSi ₃ O ₈	+	XRD
Microclino KAlSi ₃ O ₈	+	XRD

- +++ Componente principale
- ++ Componente presente in quantità media
- + Componente presente in piccola quantità
- tr Componente presente in tracce

- Dati indicativi e soggetti ad elevati margini di errore nel caso di argille, fillosilicati e zeoliti.
-


	<p style="text-align: right;">VARIANTE ALLA SP65 "DELLA FUTA NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro Progetto Definitivo PONTE STORICO DEL PALEOTTO RELAZIONE TECNICA DEI LAVORI DI CONSOLIDAMENTO</p>
-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabella 6.22: Risultati analisi mineralogico-petrografica

Carota 2D		
Parametri tessi- turali	Componenti	Analisi moda- le*
Matrice	Formato da calcite a tessitura micritica, con silicoal- luminati	30 %
Porosità da ag- gregati	Assente	-
Porosità da le- gante	Definita da microfessurazioni e secondariamente a vacui di forma regolare ed irregolare	25 %
Porosità da sutu- ra aggrega- to/legante	Definita da microfessurazioni	5 %
Aggregati	Quarzo	53 %
	Calcari micritici, calcite spatica, calca- reniti	27 %
	Feldspati	13 %
	Arenarie	6 %
	Serpentiniti	< 0,5 %
	Miche	< 0,5 %

Tabella 6.23: Risultati analisi mineralogico-petrografica.

Carota 2D		
Granulometria	Siltoso grossolana (1/16-1/32 mm)	< 0,5 %
	Arenacea molto fine (1/8 – 1/16 mm)	9 %
	Arenacea fine (1/4 – 1/8 mm)	30 %
	Arenacea media (1/2 – 1/4 mm)	35 %
	Arenacea grossolana (1 - 1/2 mm)	23 %
	Arenacea molto grossolana (2 - 1 mm)	3 %
Forma	Da angolosa a sub-arrotondata	
Sfericità	Alta	
Classazione	Scarsa. Non si evidenziano orientazioni preferenziali tra i clasti	

(*) Determinazioni percentuali sulla base di diagrammi per la stima visuale. SHVETSOV M.S. (1954)

Tabella 6.24: Caratterizzazione del materiale

Carota 2D	
Classifica- zione	Malta realizzata con calce idraulica caricata con sabbia di natura preva- lentemente silicatica (quarzo, feldspati, arenarie, serpentiniti, miche) e se-

dell'impasto	<p>condariamente carbonatica (calcarei micritici, calcite spatica, calcareniti).</p> <p>La granulometria dell'aggregato varia dalla classe siltoso grossolana (1/16-1/32 mm) a quella arenacea molto grossolana (2-1 mm) con prevalenza della frazione arenacea media (1/2 - 1/4 mm). Il rapporto aggregato/legante in polvere è circa 6/1 in volume.</p> <p>La porosità totale è alta, definita da microfessurazioni e vacui di forma regolare ed irregolare.</p>
Osservazioni particolari	<p>Non si rilevano cristallizzazioni saline e il grado di carbonatazione del legante è elevato.</p> <p><u>Dal punto di vista microscopico il campione appare in scadente stato di conservazione per l'elevato numero di microfratture.</u></p>

7. ANALISI STRUTTURALI ALLO STATO ATTUALE

Com'è ormai noto dalla letteratura tecnica, nel campo delle strutture ad arco in muratura l'approccio analitico che meglio ne coglie il comportamento strutturale è quello costituito dall'analisi limite dell'equilibrio di corpi rigidi.

Infatti la scarsa resistenza a trazione del materiale e la sua elevata rigidità alla compressione fanno sì che, nella quasi totalità dei casi, il collasso avvenga per la formazione di un numero di cerniere unilateri sufficiente a trasformare l'arco in un cinematismo costituito da atti di moto sostanzialmente rigidi (struttura labile). Da numerose evidenze sperimentali, infatti, si osserva come la crisi sia (nella grande maggioranza dei casi) legata alla formazione di un cinematismo caratterizzato generalmente dall'insorgere di una serie di perni alternati in posizione intra ed estradosale: ciò è dovuto proprio alla scarsa resistenza a trazione del materiale. Infatti la formazione della cerniera in una sezione tra due conci rigidi che presentano infinita resistenza a compressione e nulla a trazione si ha quando la curva delle pressioni (luogo dei punti di applicazione della risultante delle azioni interne) tange un lembo esterno della sezione: questa circostanza si ha quando l'arco risulta pressoinflesso con valori del momento flettente non trascurabili, come avviene ad esempio nel caso di carichi concentrati su aree più o meno ristrette. Le cerniere che si formano non sono cerniere plastiche, ma veri perni geometrici costituiti dal semplice contatto materico tra due conci: hanno un comportamento unilatero poiché possono solo aprirsi data la sostanziale incomprimibilità del materiale.

Alla luce di quanto detto è spesso trascurabile (e a volte fuorviante) l'analisi dello stato tensio-deformativo dell'arco (peraltro da eseguire in campo non lineare per cogliere la non resistenza a trazione e la limitata resistenza a compressione) perché la sua resistenza al collasso dipende più dalla geometria che dalla meccanica delle strutture (le deformazioni elasto-plastiche hanno scarsa influenza sul comportamento di strutture in muratura ad arco di dimensioni ordinarie), mentre diviene importante il calcolo del carico che provoca l'innescio di un determinato meccanismo di collasso tra conci ipotizzati rigidi.

Importante: affinché l'approccio adottato (che rappresenta sostanzialmente il metodo di analisi riconosciuto ad oggi più adatto per archi in muratura) possa essere ritenuto applicabile è essenziale che il materiale muratura si comporti in maniera monolitica, evitando di avere crisi premature per disgregazione dei paramenti murari (causata per lo più dal degrado della malta, come la polverizzazione).

Lo stato attuale di conservazione delle murature non sembra però garantire, almeno nel lungo termine, questa capacità di monoliticità e coesione richiesta, senza un intervento mirato.

Le analisi strutturali del ponte in oggetto sono state eseguite tramite la realizzazione di un modello agli elementi finiti secondo il programma di calcolo "**RING v. 1.5**", scritto, prodotto e messo a disposizione dall'Università di Sheffield, Inghilterra (Prof. Matthew Gilbert, Prof. H.M. Ahmed, Prof. A.J. Sollis).

Il programma schematizza il ponte tramite elementi finiti rigidi bidimensionali (lo spessore è considerato come dimensione, ma la modellazione non risulta tridimensionale nel senso classico del termine) caratterizzati da una resistenza a trazione nulla e una resistenza a compressione editabile dall'utente. Il programma applica la teoria cinematica dell'equilibrio limite dei corpi rigidi per determinare il valore del moltiplicatore dei carichi che innesci un determinato meccanismo di collasso. Grazie ad un algoritmo matematico di tipo ottimizzato il programma permette di determinare il valore minimo (quindi critico) del moltiplicatore dei carichi, cioè quel valore minimo

di amplificazione dei carichi assegnati tra tutti quelli che caratterizzano i possibili meccanismi attivabili (cioè staticamente ammissibili) dai carichi stessi.

Il modello realizzato presenta le seguenti caratteristiche:

- Gli archi sono di forma circolare passanti per tre punti definiti in input. Ognuno è schematizzato da 100 conci rigidi di spessore pari a 0.40 m;
- Larghezza degli archi pari a 2.50 m;
- Pila 1 di altezza pari a 2.50 m e di larghezza costante pari a 3.05 m schematizzata in 25 conci rigidi;
- Pila 2 di altezza pari a 2.10 m e di larghezza costante pari a 2.37 m schematizzata in 21 conci rigidi;
- Il piano viabile è stato schematizzato tenendo fede alla livelletta longitudinale;
- Coefficiente d'attrito per la muratura degli archi: 0.2;
- La diffusione dei carichi mobili all'interno del riempimento è ipotizzata secondo la teoria di Bousinessque con angolo di ripartizione pari a 30°;
- Angolo di attrito arco – riempimento pari a 20°;
- Coefficiente di spinta passiva orizzontale del riempimento $K_p = 1.0$. E' importante sottolineare che il valore di K_p da adottare nelle analisi deve essere sufficientemente piccolo rispetto al valore che si adotterebbe in un normale calcolo di spinta del riempimento su un paramento verticale per tenere in considerazione la geometria curva dell'arco, gli spostamenti orizzontali (dovute alle rotazioni rigide) che risultano piccoli per mobilitare l'intera spinta passiva del terreno e infine il fatto di trascurare la spinta attiva dello stesso riempimento. Risultati sperimentali e lo stesso manuale del programma consigliano un fattore di spinta ridotto non superiore ad 1/3 del fattore di spinta reale: anche attribuendo al riempimento un angolo di attrito pari a 20° (già a sicurezza) si avrebbe un valore di K_p pari a 4.6 (da cui si deduce che nelle analisi si è proceduto in maniera cautelativa).

Geometry (all distances in mm, angles in radians)

Global: **No. of spans** 3 **Bridge width** 2500 **Fill depth** User defined **LHS abut** None **RHS abut** None

x	y
-1531	3871
-1339	3891
108	3911
4257	4021
8264	4111
11229	4261
34659	4941
36414	5101

Span 1: **Shape** User defined **No of Rings** 1

x	y
0	0
4230	2650
8470	-400

Ring	No of Blocks	Thickness
1	100	400

Pier 1: **Pier Height** 2500 **Width(top)** 3050 **Width(base)** 3050.00305 **No of blocks** 25

Span 2: **Shape** User defined **No of Rings** 1

x	y
0	0
4670	3143
9510	-485

Ring	No of Blocks	Thickness
1	100	400

Pier 2: **Pier Height** 2100 **Width(top)** 2370 **Width(base)** 2370.00237 **No of blocks** 21

Span 3: **Shape** User defined **No of Rings** 1

x	y
0	0
5251	4145
10618	-665

Ring	No of Blocks	Thickness
1	100	400

Figura 7.1: Descrizione delle caratteristiche geometriche del modello di calcolo

Data la scarsa certezza numerica su alcuni parametri che influenzano i risultati delle analisi strutturali (alcuni dei quali in maniera incisiva) si è deciso di eseguire diverse analisi strutturali che variano a seconda dei parametri stessi:

- Tipologia dei carichi viaggianti e della loro distribuzione;
- Valore della resistenza a compressione di calcolo della muratura dell'arco;
- Peso specifico del riempimento;

- Peso specifico della muratura degli archi.

A favore di sicurezza tutte le analisi sono state svolte trascurando la presenza della muratura del rinfiango, considerando lo spessore compreso tra estradosso archi e piano viabile occupato totalmente da riempimento.

Come carichi viaggianti si sono considerati i seguenti casi:

- Carico viaggiante ad un unico asse di impronta di carico 1 KN di larghezza pari a 1.0 m distribuito in 20 posizioni diverse equidistribuite lungo l'intera lunghezza del ponte. Con tale tipologia di caricamento si è voluto indagare in maniera semplice la risposta della struttura ai carichi concentrati per avere l'ordine di grandezza della sua capacità portante;
- Carico viaggiante a 2 assi di impronte di carico 1 KN – 1 KN di larghezza pari a 0.4 m con passo pari a 2.0 m corrente su 20 posizioni diverse equidistribuite lungo l'intera lunghezza del ponte. Con tale tipologia di caricamento si è voluto simulare il passaggio di una normale automobile;
- Due carichi viaggianti a 2 assi di impronte di carico 1 KN – 1 KN di larghezza pari a 0.4 m con passo pari a 2.0 m e distanti tra loro 2.0 m correnti su 20 posizioni diverse equidistribuite lungo l'intera lunghezza del ponte. Con tale tipologia di caricamento si è voluto simulare il passaggio di due normali automobili spaziate da 2.0 m;
- Due carichi viaggianti a 2 assi di impronte di carico 1 KN – 1 KN di larghezza pari a 0.4 m con passo pari a 2.0 m e distanti tra loro 6.0 m correnti su 20 posizioni diverse equidistribuite lungo l'intera lunghezza del ponte. Con tale tipologia di caricamento si è voluto simulare il passaggio di due normali automobili spaziate da 6.0 m;
- Due carichi viaggianti a 2 assi di impronte di carico 1 KN – 1 KN di larghezza pari a 0.4 m con passo pari a 2.0 m e distanti tra loro 10.0 m correnti su 20 posizioni diverse equidistribuite lungo l'intera lunghezza del ponte. Con tale tipologia di caricamento si è voluto simulare il passaggio di due normali automobili spaziate da 10.0 m;
- Due carichi viaggianti a 2 assi di impronte di carico 1 KN – 1 KN di larghezza pari a 0.4 m con passo pari a 2.0 m e distanti tra loro 20.0 m correnti su 20 posizioni diverse equidistribuite lungo l'intera lunghezza del ponte. Con tale tipologia di caricamento si è voluto simulare il passaggio di due normali automobili spaziate da 20.0 m;
- Carico viaggiante a 4 assi di impronte di carico 3 - 3 - 1 - 1 KN di larghezza pari a 0.4 m con passo 1.25 – 2.85 – 1.65 m corrente su 20 posizioni diverse equidistribuite lungo l'intera lunghezza del ponte. Con tale tipologia di caricamento si è voluto simulare il passaggio di un normale autocarro.

In maniera ragionevole si è escluso il transito sul manufatto di mezzi quali autotreni, autoarticolati e autosnodati per ovvie ragioni di dimensioni.

Come è evidente da quanto appena esposto, non si sono adottati i carichi proposti dalla normativa vigente (D.M. 14/01/2008) per la simulazione dei carichi mobili in quanto essi sono definiti per costruzioni di nuova realizzazione e consistono in carichi molto gravosi che convenzionalmente comportano un certo margine di sicurezza rispetto a carichi reali che non sembrano essere applicabili alla struttura in esame. È sembrato quindi molto più ragionevole utilizzare carichi che schematizzassero, seppur in maniera approssimata, veicoli sufficientemente realisti-

ci che hanno l'effettiva possibilità di transito sul ponte, in ogni caso tenendo come riferimento il Codice della Strada.

Come resistenza di calcolo a compressione si sono considerati i seguenti casi:

- Resistenza infinita;
- $f_d = 1.30 \text{ MPa}$.

Il valore di 1.3 MPa si è adottato in riferimento alla Tabella C8A.2.1 dell'appendice C8A delle "Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008". In questo documento, infatti, la resistenza a compressione media da attribuire ad una muratura di laterizi e malta di calce presenta il valor minimo dell'intervallo proposto pari a 2.40 MPa. Adottando un fattore di confidenza massimo (a causa di un basso livello di conoscenza della struttura), pari a 1.35, si ha:

$$f_d = f_m / FC = 2.4 / 1.35 = 1.78 \text{ MPa}$$

ma, cautelativamente e tenendo in considerazione dello stato di conservazione del materiale si è adottato il valore:

$$f_d = 1.30 \text{ MPa}.$$

Per quanto riguarda il peso specifico del riempimento e della muratura si è osservato che, a parità di tutti i dati rimanenti, non influenzano in maniera apprezzabile i risultati delle analisi. Si sono perciò adottati i seguenti valori:


- Peso specifico muratura: $18 \cdot 1.4 = 25.2 \text{ KN/m}^3$;
- Peso specifico riempimento: $18 \cdot 1.4 = 25.2 \text{ KN/m}^3$.

Il coefficiente 1.4 è stato introdotto per considerare che le verifiche allo stato limite ultimo prevedono la fattorizzazione dei carichi caratteristici.

In Tabella 7.1 si riportano i valori del moltiplicatore critico dei carichi per alcuni dei casi di analisi brevemente descritti.

Tabella 7.1: Riassunto delle analisi strutturali eseguite

$f_d [\text{MPa}]$	Numero veicoli	A ssi	L impronte [m]	Distanza veicoli [m]	λ_{cr}
1.3	1	1	1	-	290
1.3	1	2	0.4	-	190
1.3	2	2	0.4	2	274
1.3	2	2	0.4	6	144

	<p style="text-align: right;">VARIANTE ALLA SP65 "DELLA FUTA NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro Progetto Definitivo PONTE STORICO DEL PALEOTTO RELAZIONE TECNICA DEI LAVORI DI CONSOLIDAMENTO</p>
-----------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

1.3	2	2	0.4	10	183
1.3	2	2	0.4	20	176
1.3	1	4	0.4	-	62

Sembra essenziale sottolineare che il valore dei moltiplicatori critici che conducono il manufatto al collasso secondo i vari cinematismi determinati (per i quali ogni moltiplicatore risulta il minimo possibile) rappresenta, una volta moltiplicato per il carico assegnato ad ogni impronta, il valore dei carichi a collasso. Tale valore va però diviso (per tener conto delle verifiche allo stato limite ultimo) per il fattore 1.5 di combinazione dei carichi allo Stato Limite Ultimo e per 1.4, fattore di amplificazione dinamica dei carichi mobili assunto.

Da un veloce esame dei risultati ottenuti e riportati sopra si deduce quanto segue:

- La tipologia di carico mobile maggiormente gravosa è costituita da un unico autocarro a 4 assi per il quale il massimo valore di carico sopportabile delle impronte vale 88.6 – 88.6 – 29.5 – 29.5 KN. Ne consegue che il transito di un veicolo di massa complessiva pari a 32 tonnellate come riportato sul Codice della Strada porterebbe a collasso il manufatto;
- Il transito di due veicoli schematizzanti due autovetture è leggermente più gravoso rispetto al veicolo singolo quando la distanza tra essi è pari a 6.0 m: in tal caso il carico dei veicoli che porta al collasso il manufatto passa infatti da 90.5 KN del veicolo singolo a 68.6 KN (per entrambi i veicoli). Tale riduzione tende a scomparire quando la distanza sale a 20.0 m perché ciò che accade su una campata non è influenzato nella sostanza da carichi agenti a 2 campate di distanza.

In Figura 7.2 e Figura 7.3 si riporta la geometria del meccanismo cinematico di collasso associato al moltiplicatore minore tra tutti quelli determinati e al caso con le due autovetture distanti 6.0 m.

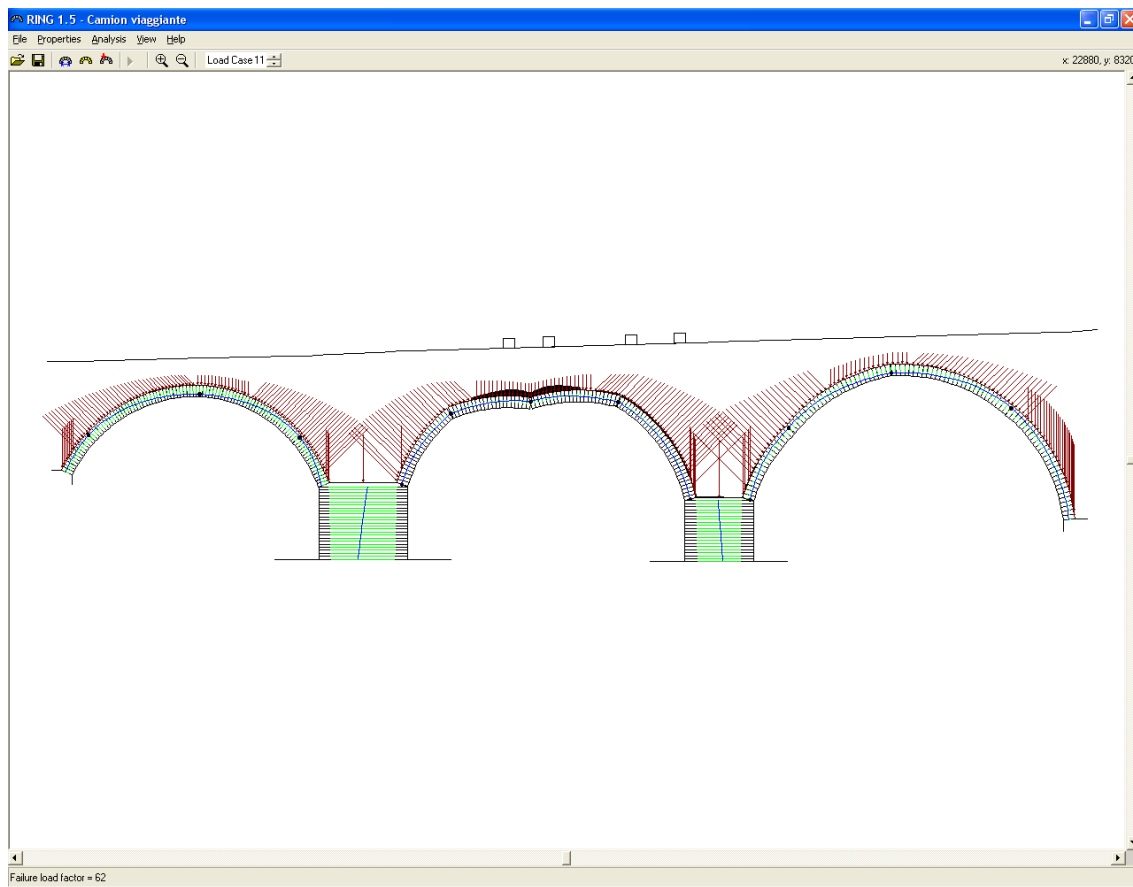


Figura 7.2: Meccanismo di collasso del manufatto per singolo autocarro viaggiante associato al moltiplicatore critico

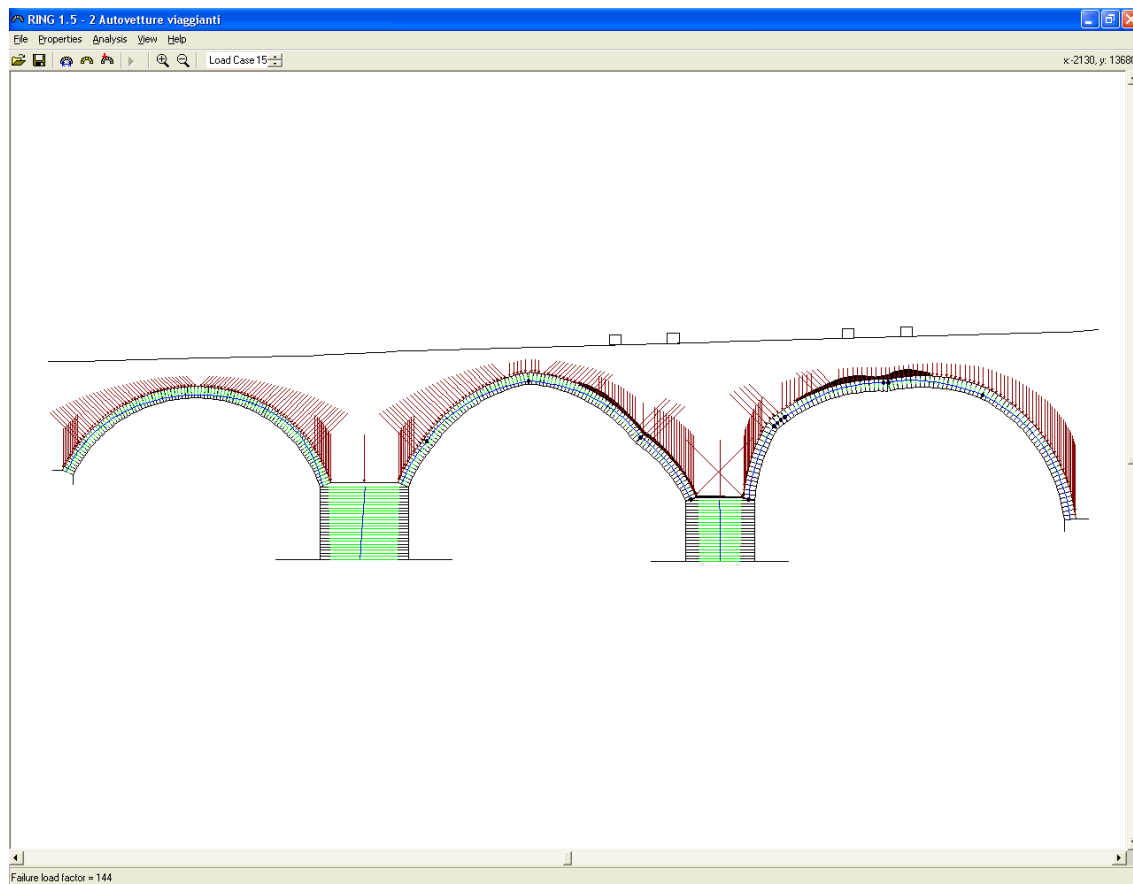


Figura 7.3: Meccanismo di collasso del manufatto per due autovetture viaggianti distanti 6 m associato al moltiplicatore critico

Considerando che:

- se transitasse un singolo autocarro a 4 assi dovrebbe avere massa a pieno carico inferiore a circa 20 t;
- se transitasse un'autovettura singola dovrebbe avere massa inferiore a circa 18 t;
- se transitassero due autovetture dovrebbero avere massa inferiore a circa 13 t;
- sembra ragionevole ipotizzare più probabile, date le geometrie della sede stradale, il transito di due autovetture piuttosto che quello di un grosso autocarro;
- il codice della strada all'art. 62 comma 1 prevede una massa complessiva massima per veicoli a 2 assi non superiore a 8 t, ma al comma 6 prevede la possibilità che arrivi fino a 20 t per interasse pari a 2 m;
- gli interventi in progetto non hanno come prima funzionalità quella di incrementare la capacità portante delle arcate, ma di far sì che quella dedotta dalle analisi possa in effetti venire esplicata dal manufatto (evitare cedimenti delle fondazioni, disgregazioni della tessitura muraria, dissesti dei muri frontali per le spinte del riempimento);

si prevede l'apertura del ponte al traffico veicolare **con il divieto di transito a veicoli di massa a pieno carico superiore alle 8 t**, qualsiasi sia la loro geometria (e quindi il numero di assi).

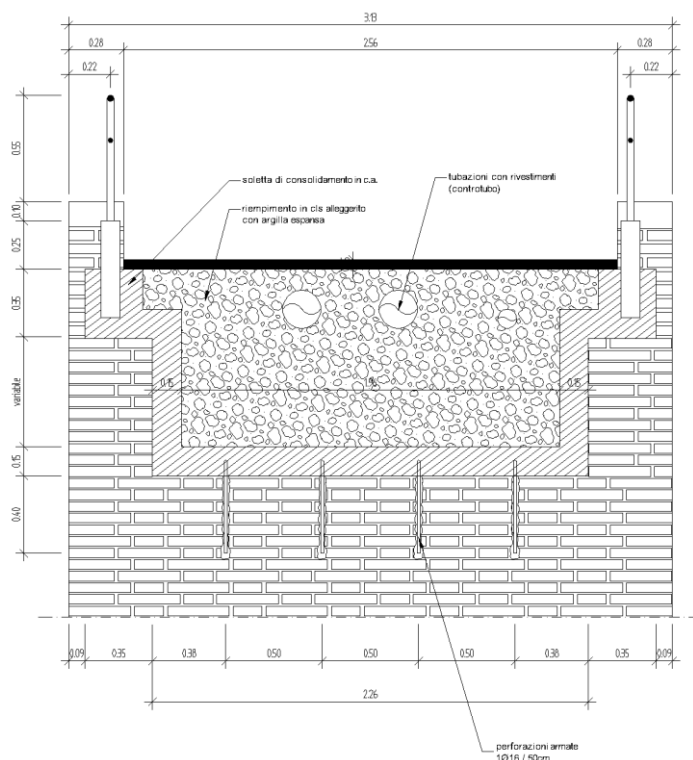


Figura 8.3: Sezione C-C

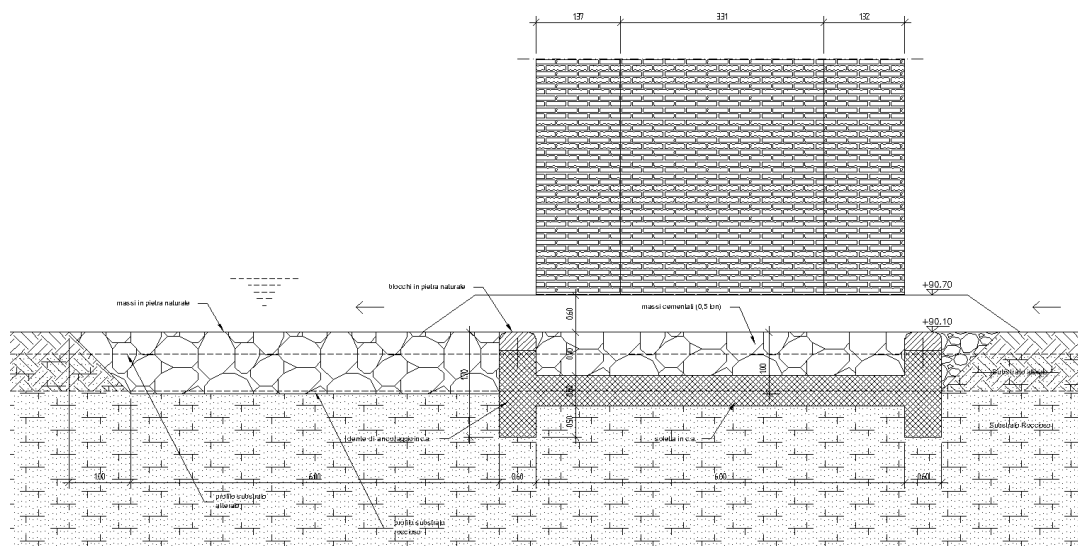


Figura 8.4: Sezione D-D

8.1 Interventi in fondazione

Come riportato al punto 4.1 non si è in possesso di informazioni precise sulla tipologia delle strutture di fondazione delle pile e delle spalle: è ragionevole però supporre sufficientemente attendibile quanto già affermato. Considerato che:

- La quota dell'alveo del fiume di progetto, pari a circa 90.60 m s.l.m. per la campata sinistra (da monte a valle), 90.10 m s.l.m. per la campata centrale e 90.60 m s.l.m. per quella destra, risulta circa 0.5 ÷ 0.6 m più bassa rispetto a quella attuale;
- Risulta necessaria ai fini idraulici la realizzazione di una soglia in calcestruzzo armato (previa demolizione di quella esistente);
- L'esperienza mostra come la vulnerabilità strutturale dei ponti ad arco in muratura sia dovuta nella grande maggioranza dei casi a dissesti in fondazione piuttosto che a debolezze delle arcate (le analisi strutturali svolte non hanno in effetti evidenziato risorse di resistenza insufficienti);

si prevedono i seguenti interventi in fondazione delle pile e delle spalle:

- Demolizione dei zoccoli di fondazione esistenti e della soglia esistente;
- Realizzazione di nuove zattere di fondazione in c.a. adeguatamente connesse alle pile e alle spalle tramite perforazioni armate inghisate con resina chimica;
- Realizzazione di una nuova soglia in c.a. come da esigenze di natura idraulica e facente parte di unico corpo monolitico con le zattere di fondazione delle pile e delle spalle;
- Realizzazione di micropali sub-verticali da quota di estradosso rinfianco e posizionati in asse delle due pile e delle spalle.

Il nuovo zoccolo di fondazione ha, da una parte, la funzione di incrementare la capacità portante della base pile e spalle intesa come fondazione superficiale e, dall'altra, di proteggere, anche se in maniera non sostanziale, lo scalzamento delle pile.

La soglia ha funzionalità principali di natura idraulica, ma rendendola collegata agli zoccoli di fondazione delle pile e delle spalle svolge anche una funzione di cordolo di collegamento tra di essi.

I micropali hanno la funzione principale di limitare al minimo i possibili cedimenti fondali dell'opera dovuti a carichi mobili (carichi accidentali) gravanti sull'impalcato: tale tipologia di intervento risulta di estrema importanza in quanto preserva in maniera efficiente da patologie fondali che risultano le principali cause dei dissesti dei ponti ad arco in muratura. Essi saranno vincolati in testa da un cordolo in c.a. di dimensioni di circa 50 cm x 30 cm che risulterà poi un corpo unico con la soletta in c.a.. Si prevede infatti l'inserimento di apposite staffe a U rovescia in modo da garantire una buona connessione cordoli-soletta.

Si prevedono micropali di diametro di perforazione pari a **200 mm** armati con tubo di diametro esterno pari a **127 mm** e spessore di **10 mm** e spinti ad una profondità di almeno **6 m** dalla quota di inizio del substrato roccioso.

8.2 Interventi sulla sovrastruttura

Dall'esame visivo dell'opera si deduce come la struttura muraria esterna sia in gravi condizioni di degrado superficiale che ne compromette non solo l'aspetto estetico ma anche la resistenza meccanica. Affinché le analisi strutturali abbiano una certa attendibilità (e quindi che i carichi di collasso determinati siano ragionevoli) è essenziale che il materiale muratura si comporti in maniera monolitica, evitando crisi premature per disgregazione dei paramenti murari (causata per lo più dal degrado della malta, come la polverizzazione). Lo stato attuale di conservazione delle murature non sembra però garantire questa capacità di monoliticità e coesione richiesta per cui l'intervento primario consisterà in un'opera generalizzata di restauro e bonifica dei paramenti esterni del ponte. Questo intervento può essere realizzato attraverso le seguenti tecniche:


- Rimozione degli elementi di laterizio degradati;
- Sistemazione di nuovi elementi in laterizio;
- Ristilatura dei giunti di malta previa profonda scarnitura dei paramenti, pulizia delle superfici e analisi dell'idoneità della nuova malta apportata.

Ad una prima analisi speditiva del quadro attuale del degrado, è possibile affermare che tali operazioni dovranno interessare in sostanza circa il 70%-80% dei paramenti murari dell'opera.

Il secondo intervento in progetto consiste nella realizzazione di una soletta in c.a. di ridotto spessore (15 cm) posta all'estradosso della struttura del ponte. Questa soletta, opportunamente armata con rete elettrosaldata, avrà una sezione ad U presentando due risvolti laterali che dovranno salire circa fino a quota del piano viabile e svolge le seguenti funzioni:

- Fornire una certa resistenza a trazione in zona estradosale delle arcate con conseguente limitazione delle aperture delle cerniere di collasso in tale zona e quindi forte contrasto alla nascita dei classici cinematismi a 4 cerniere alternate (intradosso – estradosso);
- Favorire una ripartizione omogenea dei carichi mobili sulle arcate sottostanti;
- Fornire un collegamento strutturale tra le arcate e i muri frontali, favorendo di conseguenza un comportamento d'insieme dei vari elementi murari;
- Fornire un evidente incremento di resistenza ai muri frontali alle spinte del riempimento che allo stato attuale testimoniano un certo grado di sofferenza (confermato dalla presenza di numerose catene trasversale inserite proprio per lo scopo di cui sopra): in sostanza si avranno delle pareti verticali in c.a.;
- Fornire un adeguato ancoraggio alle barriere di sicurezza in previsione (quelle attuali sono in evidente stato di collasso insieme ai muretti laterali).

Il collegamento soletta-muratura è previsto tramite l'inserimento di perforazioni armate con barre di diametro di 16 mm inghisate con resine chimiche: si prevedono 4 perforazioni armate sulla sezione trasversale corrente (aventi interasse di circa 50 cm). Lungo lo sviluppo del ponte si prevedono 3 file di perforazioni armate nelle zone delle reni degli archi e 2 file nelle zone di asse pila. Le perforazioni presenteranno una profondità all'interno dei rinfianchi di circa 40 cm e le barre saranno piegate in sommità per garantire un buon ancoraggio al getto della soletta superiore. Si escludono perforazioni per il tratto centrale delle arcate (dalla chiave fino ad un quar-

 gruppo Atlantia	<p style="text-align: right;"> VARIANTE ALLA SP65 "DELLA FUTA NODO DI RASTIGNANO – 2° LOTTO DI COMPLETAMENTO Tratto compreso tra svincolo di Rastignano e Ponte Delle Oche nei comuni di San Lazzaro di Savena, Bologna e Pianoro Progetto Definitivo PONTE STORICO DEL PALEOTTO RELAZIONE TECNICA DEI LAVORI DI CONSOLIDAMENTO </p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

to della luce circa) al fine di evitare pericolose conseguenze causate dalle perforazioni in zone in cui lo spessore della struttura muraria si riduce molto.

I riempimenti, rimossi per la realizzazione del getto di calcestruzzo, saranno ricostituiti in conglomerato cementizio alleggerito con argilla espansa per non apportare incrementi di massa apprezzabili e per incrementare l'effetto legante favorendo il comportamento d'insieme. I cavi-dotti esistenti saranno protetti tramite controtubo per garantirne in ogni caso l'accessibilità futura.

Per la realizzazione della soletta armata si rende necessaria la parziale demolizione dei muri frontali: ciò è peraltro propedeutico all'intervento previsto che consiste nella realizzazione di nuovi muretti laterali sporgenti dal piano viabile, dettato anche dal loro collasso lungo un ampio tratto dell'impalcato. Il paramento frontale sarà comunque ricostituito in laterizi opportunamente resi solidali ai risvolti verticali della soletta in c.a..

Come ultimo intervento si prevede la sostituzione delle attuali barriere di sicurezza (le quali sono in stato di collasso lungo un ampio tratto di impalcato) con altre di nuova realizzazione. Queste troveranno un efficace grado di incastro all'interno dei risvolti verticali della soletta in c.a. prevista, riducendo di conseguenza la vulnerabilità al rischio di fuoriuscita dalla sede stradale dei veicoli transitanti.