



AIPO

Agenzia Interregionale per il fiume Po



COMUNE DI STAGNO LOMBARDO
Provincia di Cremona

SETTORE POLITICHE ENERGETICHE PATRIMONIO AMBIENTE SERVIZI LAVORI PUBBLICI

Titolo del Progetto

**CR-E-815 Rifacimento chiavica del Fossadone sull'Argine Maestro sinistro del fiume Po
in Comune di Stagno Lombardo (CR) - Cod OPERA 936 - CUP B53H19000290002 - CIG 82186558A7**

Livello di progettazione

PROGETTO DEFINITIVO



©I.S.I. Ingegneria e Ambiente
Ing. Gian Lorenzo Bernini - Ing. Rosaria Ragazzini
Via Martiri della Liberazione, 36 - 43126 Vicofertile (PR)
cod.fisc. e P.I. 02577010347
Tel. 0521 941229 - info@isiingegneriaeambiente.it

Progettazione
Ing. Gian Lorenzo Bernini
Ing. Rosaria Ragazzini

Titolo

Relazione di caratterizzazione dei materiali

Numero

2020-815-CR-STR2

REVISIONE	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
02	28.08.2020	Aut. Paesaggistica	RR	RR	FA
03	23.12.2020	Progetto Definitivo	RR	RR	FA

Tutti i diritti sono riservati a norma di legge, di questo elaborato è vietata la riproduzione e la cessione a terzi senza esplicita autorizzazione

Sommario

1	PREMESSA	2
2	VALORI CARATTERISTICI E DI CALCOLO DELLE PARTI IN C.A.	4
2.1	Caratterizzazione meccanica del cls di progetto.....	4
2.1.1.	Calcestruzzo C30/37 (di calcolo e di getto per i diaframmi di fondazione in c.a.)	4
2.1.2.	Calcestruzzo C35/45 (di getto)	4
2.1.3.	Parametri per verifiche di fessurazione	4
2.1.4.	Parametri verifiche a taglio (par. 4.1.2.3.5.1, par. 4.1.2.3.5.3 DM 17/01/2018)	5
2.1.5.	Parametri verifiche a punzonamento (par.6.4.4, EN 1992-1-1:2005)	5
2.1.6.	Durabilità	5
2.2	Valori caratteristici e di calcolo dell'acciaio per c.a.	5
2.3	Strutture di elevazione – Carpenteria metallica esterna	6
2.3.1.	Acciaio strutturale laminato a caldo (UNI EN 10025-2) di tipo S235	6
2.3.2.	Acciaio strutturale laminato a caldo (UNI EN 10025-2) di tipo S275	6
2.3.3.	Bulloneria ad alta resistenza di tipo SB	6
3	CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI DELLA CHIAVICA ESISTENTE	7
3.1	Caratterizzazione meccanica del cls esistente: C25/30	7
3.1.1.	Parametri per verifiche di fessurazione	7
3.1.2.	Parametri verifiche a taglio (par. 4.1.2.3.5.1, par. 4.1.2.3.5.3 DM 17/01/2018)	7
3.1.3.	Parametri verifiche a punzonamento (par.6.4.4, EN 1992-1-1:2005)	7
3.2	Caratterizzazione meccanica dell'acciaio per c.a. esistente.....	8
3.3	Controlli sui materiali	8
3.4	Stima della resistenza basata sui carotaggi	8
3.5	Scelte sulla caratterizzazione meccanica dei materiali a calcolo.....	9
4	CARATTERIZZAZIONE DELLA MURATURA DEL PONTE AD ARCO	10

1 Premessa

La presente Relazione di Caratterizzazione meccanica dei materiali supporta sia la progettazione dei fabbricati del nuovo presidio idraulico che la verifica della sicurezza statica e sismica (secondo NTC2018) della struttura idraulica di regolazione esistente. In particolare, la valutazione della sicurezza si riferisce all'infrastruttura idraulica di compartimentazione del recapito del cavo Fossadone su Po, a garanzia della continuità idraulica dell'Argine Maestro.

Il progetto del nuovo impianto chiavicale e del sistema di sollevamento s'inserrerà infatti in affiancamento alla struttura esistente di compartimentazione dell'attraversamento del cavo entro l'argine maestro di Po.

Il fabbricato attuale si compone di una struttura chiavicale a struttura portante in calcestruzzo armato, inclusa nell'ingombro del corpo arginale, a cui è affiancato un ponte ad arco in muratura, ad unica campata di luce pari a 7.50 m, funzionale all'attraversamento del cavo Fossadone.

Entrambe le strutture esistenti furono realizzate in asse con il tracciato arginale, con quota di piano stradale e di manovra riferiti alla "originaria" sommità arginale maestra di 38.00 m s.l.m. non più adeguata all'attuale livello idrometrico TR200 (PAI) di Po, valutato a quota 38.17 m s.l.m. sulla sezione del manufatto (riferibile alla sezione 27B del Catasto Arginature maestre di Po - AIPO).

La non possibilità di adeguamento sommitale del tratto arginale intercettato dal ponte in muratura e dall'adiacente manufatto chiavicale, ha indotto la formazione di una concavità nell'andamento altimetrico della sommità arginale attuale. Il nuovo manufatto idraulico, pertanto, oltre a garantire la compartimentazione arginale e il deflusso delle portate del Fossadone, dovrà compensare la criticità altimetrica, mediante un impalcato ed un rilevato arginale di apporto adeguati per quota altimetrica per tenuta idraulica. L'impalcato inoltre, dovrà consentire la continuità della pista arginale, e per tale ragione sarà dimensionato (come riscontrabile dalla relazione di predimensionamento strutturale allegata al presente Progetto Preliminare) per garantire un transito stradale di 1° cat.

La Committente, tuttavia, ha espresso la volontà di non dismettere quanto già in loco, ossia di:

- ⇒ Mantenere l'impianto chiavicale esistente con funzione di doppio scudo di sicurezza
- ⇒ Conservare l'attraversamento su ponte ad arco, limitando tuttavia l'accesso ai soli addetti AIPO.

Tali esigenze hanno vincolato in sede di progettazione preliminare le scelte progettuali di definizione della proposta architettonica della nuova struttura ed hanno ampliato la campagna di rilievo e d'indagini geognostiche dello stato di fatto includendo, oltre alla conformazione topografica e geologica dei luoghi, anche alle attività di:

- ✓ Rilievo architettonico dei manufatti esistenti
- ✓ Caratterizzazione meccanica dei materiali (c.l.s. e barre d'armatura) del manufatto chiavicale
- ✓ Caratterizzazione meccanica delle murature portanti del ponte ad arco
- ✓ Valutazione prestazionale del ponte

L'elaborato 2020-815-CR-GEO3, a cui si rimanda, riepiloga quindi la campagna di indagini diagnostiche di caratterizzazione delle prestazioni meccaniche dei materiali costitutivi gli elementi strutturali del fabbricato di regolazione idraulica esistente e del ponte ad arco in muratura di attraversamento arginale, organizzate nell'ambito dei livelli di progettazione "Preliminare" (ossia di Fattibilità tecnico-economica) e Definitiva-Esecutiva.

I dati acquisiti sono quindi serviti da supporto, in sede di progettazione definitiva, per la valutazione della sicurezza e vulnerabilità sismica del fabbricato di regolazione esistente, in sede di progettazione esecutiva alla verifica di sicurezza e vulnerabilità sismica del ponte ad arco in muratura di attraversamento del Fossadone in corrispondenza della chiavica esistente.

L'assetto progettuale della infrastruttura idraulica di regolazione e sollevamento, infatti, considera:

- Il sistema di paratoie presenti nel manufatto di regolazione attuale come un presidio di sicurezza in caso di avaria o manutenzione del sistema principale a progetto;
- L'attraversamento su ponte ad arco come un elemento funzionale al percorso ciclo-pedonale di sommità arginale.

In ragione di ciò, le analisi strutturali di valutazione della sicurezza statica e vulnerabilità sismica della chiavica esistente e del ponte ad arco, considereranno:

- Il declassamento della infrastruttura esistente da una classe d'uso IV (*"Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti..."*) ad una classe d'uso II (*"Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali"*)
- Il declassamento del ponte ad arco da ponte stradale di 2° cat a ponte ciclo pedonale (con azione accidentale distribuita pari a 500 daN/mq)

La scelta di conservazione dei manufatti esistenti consente, durante le fasi di realizzazione della nuova infrastruttura idraulica, la funzionalità del presidio di sicurezza idraulica e la transitabilità della sommità arginale.

Ad opera eseguita, le strutture esistenti potranno essere sia mantenute nell'ambito delle funzionalità "ridotte" sopra descritte, come pure demolite, senza vincoli di funzionalità e operatività della infrastruttura idraulica di progetto tale da:

- Garantire l'efficacia del sistema di compartimentazione idraulica
- Implementare il sistema con la possibilità di regolazione idraulica per sollevamento delle portate in arrivo;
- Ripristinare, con il nuovo impalcato, la continuità della quota di sommità arginale.

Nell'ambito del livello di progettazione definitiva si è quindi inclusa la Valutazione della Sicurezza e Vulnerabilità Sismica del sistema chiavicale esistente con le elaborazioni prodotte in Doc. 2020-815-CR-STR5, a cui si rimanda.

Il ponte in muratura, la cui efficacia a sostenere in ambito statico carichi di tipo stradale, è stata accertata, in sede di valutazione preliminare, mediante apposita prova di carico, verrà invece trattato nella successiva fase di progettazione esecutiva.

Nei paragrafi seguenti verranno pertanto riepilogate le caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzate nella progettazione delle nuove strutture e nella verifica delle esistenti.

Le modalità di posa in opera dei materiali e le prove di accettazione in cantiere dovranno essere conformi a quanto previsto dalle seguenti normative cogenti e dalle norme in esse richiamate:

- D.M. Infrastrutture 17 Gennaio 2018, "Nuove norme tecniche per le costruzioni", Gazzetta Ufficiale n. 42 del 20 febbraio 2018 (di seguito denominato NTC 2018);
- Circolare applicativa delle NTC 2018 n.7 del 21 gennaio 2019 del Consiglio superiore dei Lavori Pubblici, pubblicata nella GU n.35 dell'11 febbraio 2019

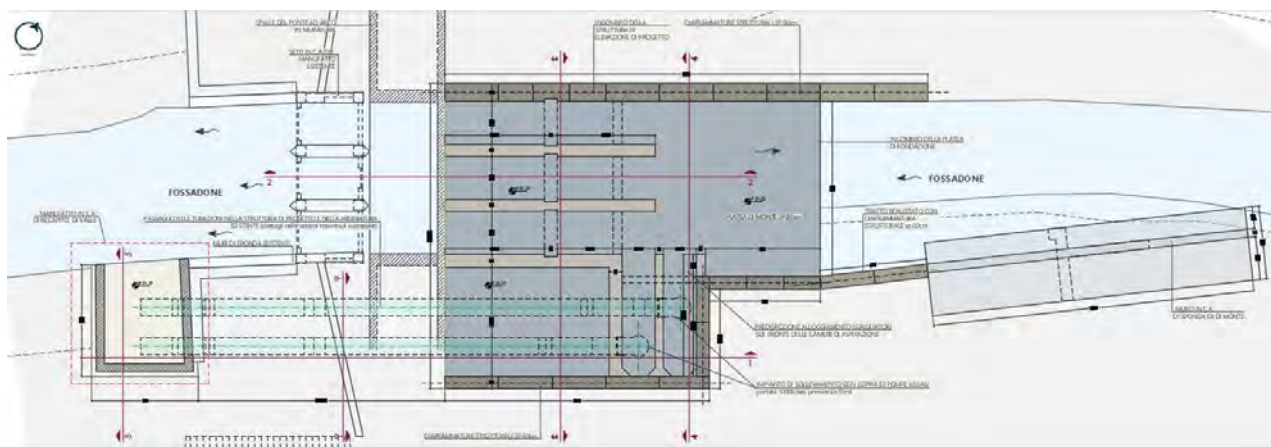


Figura 1: Organizzazione delle strutture di elevazione – Struttura principale di compartimentazione e regolazione

2 Valori caratteristici e di calcolo delle parti in c.a.

Le strutture in progetto, relative sia al Manufatto principale di regolazione e sollevamento (diaframmi in c.a. inclusi), come pure per i manufatti secondari sono calcolate considerando i valori caratteristici e di design di un calcestruzzo **C30/37**. Gli elaborati grafici progettuali (e con essi gli elaborati economici del progetto definitivo) prescrivono invece l'applicazione di un calcestruzzo **C35/45. Per le strutture di elevazione, conservando il C30/37 per le strutture profonde (diaframature strutturali in c.a.)**. Tale scelta tiene conto sia delle particolari condizioni di getto (con getti massivi o di elevazione consistente) sia delle condizioni ambientali ed esposizione delle nuove strutture di elevazione.

Le verifiche SLU ed SLV dei fabbricati oggetto di realizzazione, verranno condotte utilizzando i valori caratteristici dei materiali, divisi per il coefficiente γ_m corrispondente.

2.1 Caratterizzazione meccanica del cls di progetto

2.1.1 Calcestruzzo C30/37 (di calcolo e di getto per i diaframmi di fondazione in c.a.)

Resistenza cubica caratteristica a compressione	$R_{ck} = 37.00 \text{ N/mm}^2$
Resistenza cilindrica caratteristica a compressione	$f_{ck} = 0,83 \cdot R_{ck} = 30.71 \text{ N/mm}^2$
Valor medio della resistenza cilindrica a compressione	$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 38.71 \text{ N/mm}^2$
Resistenza media a trazione semplice	$f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3} = 2.94 \text{ N/mm}^2$
Resistenza media a trazione per flessione	$f_{ctm} = 1.2 f_{ctm} = 3.53 \text{ N/mm}^2$
Resistenza di calcolo a compressione	$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c = 14.74 \text{ N/mm}^2$
Resistenza caratteristica a trazione	$f_{ctk} = 0,7 \cdot 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} = 2.03 \text{ N/mm}^2$
Resistenza tangenziale di aderenza di calcolo	$f_{bd} = 2.25 \cdot \eta \cdot f_{ctk} / \gamma_c = 3.09 \text{ N/mm}^2$
Modulo elastico	$E = 22.000 (f_{cm}/10)^{0.3} = 33.020 \text{ N/mm}^2$
Coefficiente di Poisson	$\nu = 0.2$

2.1.2 Calcestruzzo C35/45 (di getto)

Resistenza cubica caratteristica a compressione	$R_{ck} = 45.00 \text{ N/mm}^2$
Resistenza cilindrica caratteristica a compressione	$f_{ck} = 0,83 \cdot R_{ck} = 37.35 \text{ N/mm}^2$
Valor medio della resistenza cilindrica a compressione	$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 45.35 \text{ N/mm}^2$
Resistenza media a trazione semplice	$f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3} = 3.35 \text{ N/mm}^2$
Resistenza media a trazione per flessione	$f_{ctm} = 1.2 f_{ctm} = 4.02 \text{ N/mm}^2$
Resistenza di calcolo a compressione	$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c = 17.93 \text{ N/mm}^2$
Resistenza caratteristica a trazione	$f_{ctk} = 0,7 \cdot 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} = 2.35 \text{ N/mm}^2$
Resistenza tangenziale di aderenza di calcolo	$f_{bd} = 2.25 \cdot \eta \cdot f_{ctk} / \gamma_c = 3.52 \text{ N/mm}^2$
Modulo elastico	$E = 22.000 (f_{cm}/10)^{0.3} = 34.625 \text{ N/mm}^2$
Coefficiente di Poisson	$\nu = 0.2$

2.1.3 Parametri per verifiche di fessurazione

Per le verifiche di formazione delle fessure il moltiplicatore di f_{ctm} è: 1/0;

Per le verifiche di apertura delle fessure i valori ammissibili delle aperture delle fessure sono:

per le armature sensibili:

Combinazione Rara	Combinazione Quasi Permanente	Combinazione Frequente
0 mm	0.2 mm	0.3 mm

per le armature poco sensibili:

Combinazione Rara	Combinazione Quasi Permanente	Combinazione Frequente
0 mm	0.3 mm	0.4 mm

2.1.4. Parametri verifiche a taglio (par. 4.1.2.3.5.1, par. 4.1.2.3.5.3 DM 17/01/2018)

$C_{Rd,c} = 0.18/\gamma_c$, $v_{min} = 0.191703 * k^{3/2}$, $k_1 = 0.15$, $f_{cd}/f_{cd} = 0.5$
 Per il significato dei parametri si veda anche par.6.2.2 EC2

2.1.5. Parametri verifiche a punzonamento (par.6.4.4, EN 1992-1-1:2005)

Sono i medesimi valori per il taglio di cui sopra

2.1.6. Durabilità

La **classe di esposizione** sarà del tipo **XC4-XD3-XF3** (considerando l'utilizzo di C35/45) con **copriferro di 30mm** per le strutture verticali in opera, **di 40mm** per le strutture orizzontali in opera e di fondazione. Verranno inoltre applicate le seguenti prescrizioni esecutive

- Sovrapporre i ferri nelle riprese per almeno 60 diametri ;
- Impiegare distanziatori in plastica o pasta di cemento per garantire un copriferro (misurato dall'esterno ferro e non dal baricentro ferro)
- Sovrapporre le reti eventuali per almeno cm 20 ;
- Nella giunzione per sovrapposizione dei ferri, non legare i due ferri fra loro, ma tenerli distanziati di almeno cm 2 (interferro).

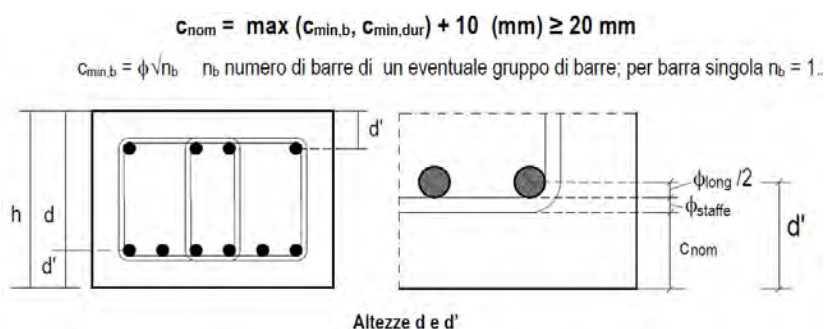


FIGURA 2: Particolare di definizione della distanza di copriferro

La necessità di una classe di esposizione XC4-XD3-XF3, adeguata all'ambiente di lavoro, comporterà quindi l'utilizzo di calcestruzzo C35/45 . Il copriferro minimo sarà di 30mm per le strutture verticali in opera, di 40mm per le strutture orizzontali in opera e di fondazione

2.2 Valori caratteristici e di calcolo dell'acciaio per c.a.

Acciaio da armatura		U.M.	Tipo di acciaio
			B450C
Tensione caratteristica di rottura	f_{tk}	MPa	540
Tensione caratteristica di snervamento	f_{sk}	MPa	450
Resistenza di calcolo dell'acciaio	$f_{sd} = f_{sk} / \gamma_s$	MPa	391,3
Modulo elastico	E_s	GPa	206
Deformazione al limite elastico	$\epsilon_{yd} = f_{sd} / E_s$	‰	1,90

2.3 Strutture di elevazione – Carpenteria metallica esterna

Per le analisi strutturali riguardanti l'intervento in esame verranno considerati i seguenti materiali strutturali:

- acciaio strutturale laminato a caldo (UNI EN 10025-2) di tipo **S275** ed **S235**
- bulloneria ad alta resistenza per strutture metalliche **con insiemi di tipo SB** (Structural Bolting, non a serraggio controllato, secondo le norme UNI EN 15048-1:2007 e UNI EN 15048-2:2007) presentanti idonea marcatura, con caratteristiche di **classe 8 (dado) e 8.8 (vite)**.
- Barre filettate D20-16-24mm
- Spessore dei cordoni di saldatura 10mm

2.3.1 Acciaio strutturale laminato a caldo (UNI EN 10025-2) di tipo S235

S235J – (ex Fe360) spessore t , $40 < t < 80$ mm:

f_{tk} : tensione caratteristica di rottura	3.60	N/mm ²
f_{yk} : tensione caratteristica di snervamento	2.35	N/mm ²
$\gamma_a = 1.05$		
f_d : tensione di calcolo = f_{yk} / γ_a	2.10	N/mm ²
Dilatazione termica	1.2 10-51/C°	
Modulo E di elasticità normale	210.000 N/mm ²	
Modulo G di elasticità tangenziale	80.769 N/mm ²	

2.3.2 Acciaio strutturale laminato a caldo (UNI EN 10025-2) di tipo S275

S275J – (ex Fe430) spessore t , $40 < t < 80$ mm:

f_{tk} : tensione caratteristica di rottura	4.30	N/mm ²
f_{yk} : tensione caratteristica di snervamento	2.75	N/mm ²
$\gamma_a = 1.05$		
f_d : tensione di calcolo = f_{yk} / γ_a	2.50	N/mm ²
Dilatazione termica	1.2 10-51/C°	
Modulo E di elasticità normale	210.000 N/mm ²	
Modulo G di elasticità tangenziale	80.769 N/mm ²	

2.3.3 Bulloneria ad alta resistenza di tipo SB

Classe del dado	8	10		
Classe della vite	8.8	10.9		
f_{yb} : Tensione di snervamento	649	N/mm ²	900	N/mm ²
f_{tb} : Tensione di rottura	800	N/mm ²	1000	N/mm ²
c: Coefficiente di resistenza a taglio	0.6		0.5	

3 Caratterizzazione dei materiali della chiavica esistente

Noti i risultati delle prove a compressione sui campionamenti di cls ed acciaio di armatura effettuati nell'ambito delle campagne di indagini diagnostiche 2015-2020, in considerazione delle indicazioni del capitolo 8 delle NTC18 e della Circolare 7-2019 per un Livello di Conoscenza LC1 (Fattore di Confidenza FC=1.35), **alla struttura esistente è stato assegnato un calcestruzzo C25/30 ($R_{ck} = 300 \text{ daN/cm}^2$).**

Alle strutture sostanzialmente interrate, alle pareti e alla soletta di impalcato è stato assegnato un copriferro di 30 mm; per le strutture in elevazione quali pilastri e travi sono stati considerati copriferri di 20 mm.

Per quanto concerne l'acciaio per cemento armato è stata considerata una tipologia FeB32 cui corrisponde un valore medio di snervamento pari a: $f_{ym} = 3200 \text{ kg/cm}^2$

3.1 Caratterizzazione meccanica del cls esistente: C25/30

Resistenza cubica caratteristica a compressione	$R_{ck} =$	30.00 N/mm ²
Resistenza cilindrica caratteristica a compressione	$f_{ck} = 0,83 \cdot R_{ck} =$	24.90 N/mm ²
Valor medio della resistenza cilindrica a compressione	$f_{cm} = f_{ck} + 8 =$	32.90 N/mm ²
Resistenza media a trazione semplice	$f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3} =$	2.56 N/mm ²
Resistenza media a trazione per flessione	$f_{ctm} = 1.2 f_{ctm} =$	3.07 N/mm ²
Resistenza di calcolo a compressione	$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c =$	11.95 N/mm ²
Resistenza caratteristica a trazione	$f_{ctk} = 0,7 \cdot 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} =$	1.79 N/mm ²
Resistenza tangenziale di aderenza di calcolo	$f_{bd} = 2.25 \cdot \eta \cdot f_{ctk} / \gamma_c =$	2.69 N/mm ²
Modulo elastico (*)	$E = 22.000 (f_{cm}/10)^{0.3} =$	31.45/mm²
Coefficiente di Poisson	$\nu = 0.2$	

(*) Per quanto riguarda il calcestruzzo delle strutture a telaio (sovrastutture appartenenti al fabbricato paratoie) è stato ritenuto opportuno considerare rigidità fessurate al 50%. Per le strutture sottostanti invece è stato utilizzato un calcestruzzo con rigidità integre, per cui:

$E = 22.000 (f_{cm}/10)^{0.3} =$	31.45/mm²	STRUTTURE INTEGRE (fondazione)
$E = 11.000 (f_{cm}/10)^{0.3} =$	15.72/mm²	STRUTTURE FESSURATE (elevazione)

3.1.1. Parametri per verifiche di fessurazione

Per le verifiche di formazione delle fessure il moltiplicatore di f_{ctm} è: 1/0;

Per le verifiche di apertura delle fessure i valori ammissibili delle aperture delle fessure sono:

per le armature sensibili:

Combinazione Rara	Combinazione Quasi Permanente	Combinazione Frequente
0 mm	0.2 mm	0.3 mm

per le armature poco sensibili:

Combinazione Rara	Combinazione Quasi Permanente	Combinazione Frequente
0 mm	0.3 mm	0.4 mm

3.1.2. Parametri verifiche a taglio (par. 4.1.2.3.5.1, par. 4.1.2.3.5.3 DM 17/01/2018)

$C_{Rd,c} = 0.18/\gamma_c$, $v_{min} = 0.175 \cdot k^{3/2}$, $k_1 = 0.15$, $f_{cd}/f_{cd} = 0.5$

Per il significato dei parametri si veda anche par.6.2.2 EC2

3.1.3. Parametri verifiche a punzonamento (par.6.4.4, EN 1992-1-1:2005)

Sono i medesimi valori per il taglio di cui sopra

3.2 Caratterizzazione meccanica dell'acciaio per c.a. esistente

Acciaio da armatura		Tipo di acciaio	
		U.M.	B450C
Tensione caratteristica di rottura	f_{tk}	MPa	540
Tensione caratteristica di snervamento	f_{sk}	MPa	450
Resistenza di calcolo dell'acciaio	$f_{sd} = f_{sk} / \gamma_s$	MPa	391,3
Modulo elastico	E_s	GPa	206
Deformazione al limite elastico	$e_{yd} = f_{sd} / E_s$	‰	1,90

3.3 Controlli sui materiali

In merito si rimanda all'Elaborato 2020-815-CR-GEO3 "Caratterizzazione dei materiali delle strutture esistenti"

In questa sede si vogliono giustificare le assunzioni progettuali di verifica esposte nei paragrafi precedenti comparandole con gli esiti delle prove di trazione e allungamento delle barre d'armatura come di compressione del prelievo di cls.

N° Identifica- tivo L.T.M	Contrassegno	Ø nominale effettivo (mm)	Sezione effettiva S_0 (mm ²)	Tensione di snervamento f_y (MPa)*	Tensione di rottura f_t (MPa)*	$A_s(\%)$	Data di prova
1	Tondo liscio diam.6 mm	6	28,3	362,7	466,0	29,0	11/04/16

FIGURA 3: Estratto del certificato di prova della barra d'armatura – Cert. 302B/16 Lab. LTM s.r.l.

RISULTATI DELLE PROVE							
N	Contrassegno provini	Dimensioni diametro x altezza (mm)		Rapp. H/Ø	Massa Volumica (Kg/m ³)	Resistenza Max. Unit. (Mpa)* f_c	Data di prelievo
1	C01 pilastro chiavica Aipo Cavo Fossadore	68	x 135	1,99	2263	27,1	25/02/2016
							31/03/2016

FIGURA 4: Estratto dei certificati sul campione C1 2016 di calcestruzzo – Cert. 276B/16 Lab. LTM s.r.l.

3.4 Stima della resistenza basata sui carotaggi

Per convertire le resistenze ottenute dalle carote in un valore di resistenza media IN SITU è stata applicata la formula di **MASI** (2005) in cui :

$$F_{cis} = F_{car} (C_{h/D} \times C_{dia} \times C_a \times C_d)$$

In cui

- $C_{h/D}$ Coefficiente correttivo dei rapporti h/D diversi da 2 = $2 / (1.5 + D/h)$
- C_{dia} Coefficiente correttivo del diametro = 1.06, 1.00, 0.98 per D pari a 50-100-150mm
- C_a Coefficiente correttivo relativo alla presenza di armature incluse = $1.03 \div 1.13$
- C_d Coefficiente correttivo di disturbo assunto pari a 1.10

Da cui:

$F_{cis} = F_{car} (C_{h/D} \times C_{dia} \times C_a \times C_d)$									
	F_{car} (MPa)	D (mm)	H (mm)	$C_{h/D}$	C_{dia}	C_a	C_d	F_{cis} (MPa)	R_{cis} (MPa)
C1	27.1	68,00	135	0,998	1,06	1,03	1,1	32,48	39,13
	$R_{cis} = F_{car} (C_{h/D} \times C_{dia} \times C_a \times C_d) / 0,83$								

Con valori di resistenza cubica a compressione superiori a 30MPa, seppure relativi ad una unica prova di rottura e con una classe di resistenza C25/30 per i calcestruzzi in opera ipotizzata nei calcoli di verifica.

3.5 Scelte sulla caratterizzazione meccanica dei materiali a calcolo

Poiché le prove in sito effettuate hanno risposto ai minimi previsti da Circolare per un livello di conoscenza LIMITATO, considerata la NON disponibilità del progetto esecutivo dell'opera, si è ritenuto ragionevole assumere nelle elaborazioni di analisi un **livello di conoscenza LC1 ed un conseguente fattore di confidenza FC=1.35**

Per le strutture di fondazione ed elevazione di progetto, tutte realizzate in opera, è previsto a calcolo l'utilizzo di calcestruzzo C25/30. L'acciaio di armatura è del tipo B450C (ex Feb44K). Le caratteristiche meccaniche e prestazionali dei due materiali sono illustrate nelle tabelle seguenti. In particolare, i valori di calcolo sono ottenuti con l'applicazione di coefficienti parziali di sicurezza ($\gamma_c = 1.5$ e $\gamma_s = 1.15$)

Livello di Conoscenza	Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione oppure rilievo ex-novo completo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>limitate</i> verifiche in-situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>limitate</i> prove in-situ	Analisi lineare statica o dinamica	1.35
LC2		Disegni costruttivi incompleti con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure <i>estese</i> verifiche in-situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali ¹ con <i>limitate</i> prove in-situ oppure <i>estese</i> prove in-situ	Tutti	1.20
LC3		Disegni costruttivi completi con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure <i>esaustive</i> verifiche in-situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto con <i>estese</i> prove in situ oppure <i>esaustive</i> prove in-situ	Tutti	1.00

Livello di Indagini e Prove	Rilievo(dei dettagli costruttivi) ^(a)	Prove (sui materiali) ^{(b)(c)(d)}
	Per ogni elemento "primario" (trave, pilastro)	
<i>limitato</i>	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 15% degli elementi	1 provino di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 1 campione di armatura per piano dell'edificio
<i>esteso</i>	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 35% degli elementi	2 provini di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 2 campioni di armatura per piano dell'edificio
<i>esaustivo</i>	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 50% degli elementi	3 provini di cls. per 300 m ² di piano dell'edificio, 3 campioni di armatura per piano dell'edificio

FIGURA 5. da Tabella C8.5.IV (Circ. Min 7/19) – definizione orientativa dei livelli di rilievo e prove per edifici in c.a.

SINTESI DEI CRITERI DI ANALISI E DI VERIFICA DELLA SICUREZZA							
		Modello lineare (ML)		Modello non lineare		Metodo con il fattore di struttura q^4	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo (e/m)	Duttile/fragile	Accettazione del modello lineare (ML) (per il controllo dei valori di $\rho_i=Di/Ci$)					
		Dall'analisi. Usare i valori medi dei moduli nei modelli	In termini di resistenza. Usare i valori medi				
	Duttile	Verifiche (se il ML è accettato)			In termini di deformazione. Usare i valori medi divisi per FC	Dall'analisi con spettro di progetto ridotto con q	In termini di resistenza. Usare i valori medi divisi per FC e per il coefficiente parziale.
		Dall'analisi	In termini di deformazione. Usare i valori medi divisi per FC				
	Fragile	Verifiche (se il ML è accettato)		Dall'analisi. Usare i valori medi nel modello	In termini di resistenza. Usare i valori medi divisi per FC e per il coefficiente parziale.	Dall'analisi con spettro di progetto ridotto con $q=1.5$	In termini di resistenza. Usare i valori medi divisi per FC e per il coefficiente parziale.
		Se $\rho_i \leq 1$ dall'analisi	In termini di resistenza. Usare i valori medi divisi per FC e per il coefficiente parziale.				
		Se $\rho_i > 1$ dall'equilibrio con la resistenza degli e/m duttili. Usare i valori medi moltiplicati per FC					

FIGURA 6. Utilizzo delle Resistenze di Calcolo

4 Caratterizzazione della muratura del ponte ad arco

Delle prove con martinetto piatto (singolo e doppio) effettuate nell'ambito delle campagne di indagini 2015 e 2020 è stato possibile comparare la muratura di spalla, sul cui concio di indagine è stato stimato un valore del modulo elastico longitudinale E di 37.000 daN/cm², ad una muratura di mattoni pieni con malta M2, caratterizzata dai seguenti valori "di letteratura":

Resistenza caratteristica a compressione verticale	f_k	34	daN/cm ²
Resistenza caratteristica a compressione orizzontale	f_{hk}	17	daN/cm ²
Resistenza caratteristica a taglio in assenza di azione assiale	f_{vko}	2	daN/cm ²
Modulo di elasticità normale	E	34.000	daN/cm ²
Modulo di elasticità tangenziale	G	13.600	daN/cm ²

La campagna di indagini 2020 sulle strutture in muratura del ponte ad arco, ha tenuto conto delle prescrizioni normative (Circ. n.7 21/01/19 tabb. C8.5.I-II-III) riferite ad una analisi della sicurezza e vulnerabilità sismica degli elementi strutturali condotta nell'ambito di un livello di conoscenza LC1, in cui si prevede:

- L'utilizzo di valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura come da indicazioni tabellari di tab. C8.5.I;
- L'applicazione dei valori minimi tabellari delle resistenze;

- L'applicazione dei valori medi degli intervalli tabellari per quanto concerne i Moduli elastici
- L'eventuale applicazione di fattori correttivi dei valori minimi e medi mediante indagini in sito di quantità adeguata.

Scelto di approcciare le analisi di sicurezza statica e vulnerabilità sismica in ambito LC1, la campagna di indagini 2020 è stata finalizzata a confermare la caratterizzazione tipologica della muratura/e costitutiva/e gli elementi strutturali del ponte in muratura così da potere correlare senza incertezze i valori tabellari previsti da circolare con il tipologico riscontrato in opera. In ragione di ciò, la campagna di indagini 2020 è stata completata da una sola ulteriore prova con martinetto doppio, di cui in allegato si produce certificato di prova.

Tabella C8.5.I -Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura, da usarsi nei criteri di resistenza di seguito specificati (comportamento a tempi brevi), e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura. I valori si riferiscono a: f = resistenza media a compressione, τ_0 = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), f_{v0} = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), E = valore medio del modulo di elasticità normale, G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale, w = peso specifico medio.

Tipologia di muratura	f (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	-	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	-	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	-	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,4-2,2	0,028-0,042	-	900-1260	300-420	13 ÷ 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

Figura 7: Circolare CSLLPP n.7 del 21/01/19 – Tab. C8.5.I

Tabella C8.5.II -Coefficienti correttivi massimi da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone; ricorsi o listature; sistematiche connessioni trasversali; consolidamento con iniezioni di malta; consolidamento con intonaco armato; ristilatura armata con connessione dei paramenti.

Tipologia di muratura	Stato di fatto			Interventi di consolidamento			
	Malta buona	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Iniezione di miscele leganti (*)	Intonaco armato (**)	Ristilatura armata con connessione dei paramenti (**)	Massimo coefficiente complessivo
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	1,3	1,5	2	2,5	1,6	3,5
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo	1,4	1,2	1,5	1,7	2,0	1,5	3,0
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	1,1	1,3	1,5	1,5	1,4	2,4
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,5	1,2	1,3	1,4	1,7	1,1	2,0
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,6	-	1,2	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura a blocchi lapidei squadati	1,2	-	1,2	1,2	1,2	-	1,4
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	(***)	-	1,3 (****)	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	1,2	-	-	-	1,3	-	1,3

Figura 8: Circolare CSLLPP n.7 del 21/01/19 – Tab. C8.5.II