SOCIETÀ PER AZIONI AUTOSTRADA DEL BRENNERO – TRENTO

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROV. DI TRENTO
dott.ing. STEFANO VIVALDELLI
ISCRIZIONE ALBO N° 1032

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO
dott. ing. Stefano Vivaldelli

autostrada del brennero

RIPRISTINO E RINFORZO STRUTTURALE DELLE SELLE GERBER DEGLI IMPALCATI DI 13 SOVRAPPASSI UBICATI NELLE PROVINCE DI REGGIO EMILIA E MODENA, TRA LE PROGRESSIVE AUTOSTRADALI KM 287+306 E KM 311+245.

1	RELAZIONE TECNICA E DI CALCOLO

REVISIONE:	DATA:	DESCRIZIONE:	REDAZIONE:	VERIFICA:	APPROVAZIONE:
1	GIUGNO 2018	REVISIONE PER VERIFICA	E. CAZZADOR	D. QUATTROCIOCCHI	C. COSTA
0	OTTOBRE 2017	EMISSIONE	E. CAZZADOR	D. QUATTROCIOCCHI	C. COSTA

DATA:

OTTOBRE 2017

NUMERO PROGETTO:

43/17

SERVIZIO PROGETTAZIONE

IL DIRETTORE TECNICO GENERALE E PROGETTISTA:

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROV. DI BOLZANO
Dott. Ing. CARLO COSTA
Nr. 891
INGENIEURKAMMER DER PROVINZ BOZEN

RIPRISTINO E RINFORZO STRUTTURALE DELLE SELLE GERBER DEGLI IMPALCATI DI 13 SOVRAPPASSI UBICATI NELLE PROVINCE DI REGGIO EMILIA E MODENA, TRA LE PROGRESSIVE AUTOSTRADALI KM 287+306 E KM 311+245.

RELAZIONE TECNICA E DI CALCOLO

I N D I C E

1 Premessa e motivazione delle necessità di intervento 2

2 Descrizione delle strutture esistenti 3

3 Lavori ed opere previsti in progetto 5

4 Calcoli statici della sezione oggetto di intervento 20

4.1 Caratteristiche dei materiali 20

4.2 Riferimenti normativi 21

4.3 Sollecitazioni agenti in corrispondenza della sella Gerber 21

4.3.1 Carichi permanenti 22

4.3.2 Carichi mobili su sovrappasso tipo 3 travi 22

4.3.3 Carichi mobili su sovrappasso tipo 4 travi 24

4.3.4 Carichi mobili su sovrappasso tipo 6 travi 26

4.3.5 Riepilogo sollecitazioni sulla sezione di intervento 29

4.4 Resistenza a taglio della sezione senza rinforzo 29

4.5 Parametri di calcolo del rinforzo in fibra di carbonio 30

4.5.1 Modi di rottura per distacco del supporto 30

4.5.2 Resistenza al distacco 31

4.5.3 Tensione di progetto del sistema di rinforzo 33

4.5.4 Resistenza efficace 33

4.6 Resistenza a taglio della sezione con rinforzo e verifica 34

5 Programma dei lavori e tempi di esecuzione 38

6 Prezzi unitari 38

1 Premessa e motivazione delle necessità di intervento

Tra i numerosi impegni sottoscritti dalla Società in sede di proroga della propria concessione autostradale, figura la ricostruzione dei sovrappassi presenti lungo il nastro A22.

Sono circa 150 le opere sovrastanti il tracciato di competenza. Trattasi in parte di strutture ormai inadeguate alle accresciute e modificate esigenze del traffico veicolare, realizzate nel rispetto di norme tecniche vigenti all'epoca della loro costruzione e nel tempo ormai mutate.

La Società mira oggi a progettare sovrappassi che tengono conto dei più moderni criteri in materia di tecnica costruttiva e tecnologia dei materiali, con capacità portanti in linea con le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008) per quanto attiene ai ponti di I^{a} categoria.

Nell'attesa sia via via ricostruito ogni sovrappasso risalente all'epoca della costruzione dell'A22, le opere sono costantemente sottoposte ad accurate analisi e controlli, così da valutare altresì eventuali interventi manutentivi necessari.

La Società, infatti, è costantemente impegnata nel mantenimento in efficienza delle proprie opere d'arte per mezzo di opportuni interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria: in particolare, per quanto riguarda i sovrappassi, trattasi del rifacimento dei cordoli, della sostituzione delle barriere di sicurezza e delle protezioni laterali, del rifacimento dei giunti di dilatazione, del rinforzo delle pile, del ripristino del copriferro e così via.

Dalle ispezioni periodiche condotte sulle opere d'arte in proposta emergono diverse problematiche, causate soprattutto dal deterioramento dei giunti di dilatazione, che evidenziano caratteristiche di permeabilità e di inefficienza, e dal degrado dell'impermeabilizzazione degli impalcati. L'acqua stagnante in sottopavimentazione bagna, infatti, le testate delle travi a parete sottile, che mostrano evidenti segni di distacco del calcestruzzo di ricoprimento delle armature, le quali affiorano in stato di ossidazione, soprattutto in prossimità delle selle Gerber.

Tra i sovrappassi risalenti all'epoca della costruzione dell'autostrada, fatta eccezione per quelli i cui interventi di ricostruzione sono attualmente in corso di esecuzione o di imminente avvio, sono state individuate 13 opere d'arte, contraddistinte dalla particolare tipologia costruttiva comprendente selle Gerber, sulle quali intervenire limitatamente a tale elemento strutturale. Trattasi, in particolare, dei seguenti sovrappassi:

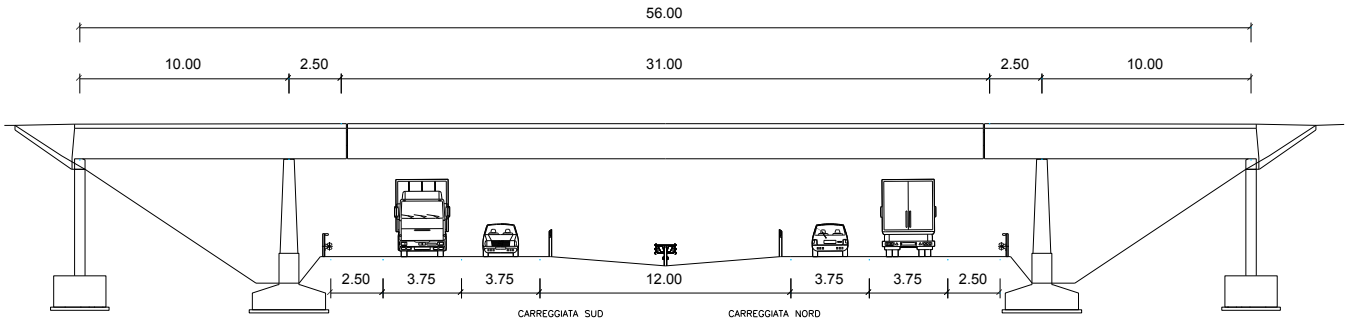
n°	progressiva	denominazione opera	prov.	comune interessato
126	287+306	S.P. 44 "Reggiolo-Rolo" – via Porto	RE	Rolo
127	289+709	S.P. 4 via Campo Grande	RE	Rolo
128	292+032	via Valle	MO	Carpi
129	294+070	via dai Grilli	MO	Carpi

130	296+655	Cavalcavia Budrione	MO	Carpi
132	298+892	via S. Giacomo	MO	Carpi
133	299+709	via Nuova Ponente	MO	Carpi
134	300+916	via cavalcavia Zappiano	MO	Carpi
138	304+460	via Beghetto	MO	Carpi
140	307+328	S.P. 13 “Campogalliano”– via Canale Carpi	MO	Campogalliano
141	308+549	via Nacmani	MO	Campogalliano
142	310+493	S.P. 13 “Campogalliano”– via Ponte Alto per Modena	MO	Campogalliano
143	311+245	via Barchetta	MO	Campogalliano

Sebbene i citati sovrappassi siano destinati ad essere interamente demoliti e ricostruiti nei prossimi anni, con priorità diverse, le peculiarità strutturali di tali opere e il loro stato di degrado rendono opportuno procedere con interventi di ripristino e di rinforzo strutturale delle selle Gerber, spesa oggetto dell’appalto.

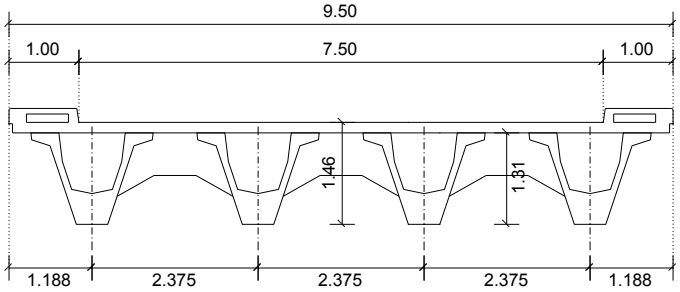
2 Descrizione delle strutture esistenti

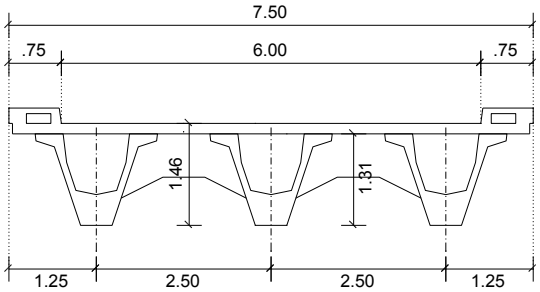
La struttura dei sovrappassi in esame è attualmente realizzata con travi a “V” post-tese e si articola in tre campate con luci rispettivamente di 10.00 m, 36.00 m e 10.00 m. L’impalcato esistente è del tipo a travata in calcestruzzo armato precompresso.
Le due travate esterne si protendono a sbalzo per 2.50 m oltre gli appoggi su due pile a sostegno, con selle Gerber, di una travata centrale della luce teorica di 31.00 m.

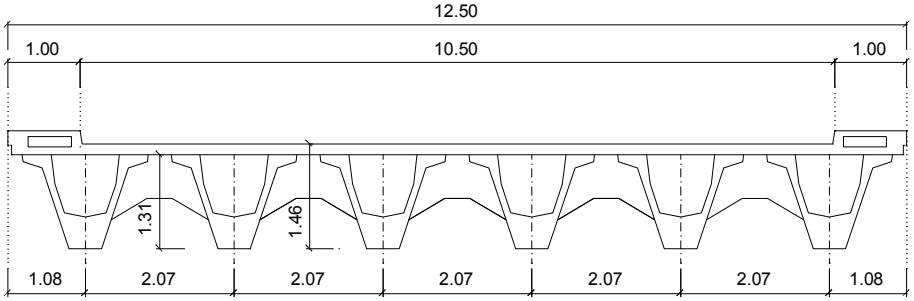


Sezione longitudinale

Le travate sono costituite da 3/4/6 travi longitudinali prefabbricate in c.a.p., con sezione trasversale cava, a “V”, alte 1.31 m, collegate in opera da una soletta prefabbricata e da traversi in c.a.







Sezioni trasversali impalcati

Le travi sono precompresse da cavi in acciaio armonico post-tesi e alloggiati entro guaine. La costruzione delle travi da 31.00 m di luce è stata eseguita in due conci simmetrici, collegati e parzialmente precompressi prima del varo. Quattro cavi di ciascuna delle travi della travata sospesa sono ancorati in soletta.
La cavità delle travi longitudinali è divisa in celle da setti interni; ciascuno di questi è dotato di un varco nella parte inferiore: ciò per consentire che eventuale acqua entrata nella cavità delle travi, possa defluire fino agli scarichi di cui ciascuna trave è provvista. Le travi sospese presentano due scarichi ciascuna, ubicati alle estremità; le travi esterne sono dotate di uno scarico ciascuna, ubicato in vicinanza delle testate in appoggio sulle spalle.

Gli apparecchi d'appoggio delle travate sulle pile e sulle selle Gerber sono realizzati con piastre in neoprene armato delle seguenti dimensioni:
- 400x400x25 mm per gli appoggi sulle pile;
- 400x300x53 mm per gli appoggi sulle Gerber.

In asse agli appoggi sulle pile sono presenti spinotti in acciaio del diametro di 50 mm, annegati nei pilastri e inseriti in boccole realizzate all'intradosso delle travi. Queste ultime sono dunque incernierate ai pilastri. Sulle spalle aperte sono invece realizzati dei piani di appoggio con piastre in piombo all'antimonio.

Le strutture d'appoggio delle tre travate sono costituite da due spalle a parete cava e da due pile; l'elevazione di queste ultime è formata da pilastri in c.a., in numero uguale a quello delle travi, con sezione di dimensioni variabili in altezza, reciprocamente connessi alla base da una parete in c.a.
La sezione superiore dei pilastri è di forma rettangolare ed ha le seguenti dimensioni: 50 cm in senso parallelo alle travi e 45 cm in senso ortogonale alle travi.
Per i sovrappassi n° 128, n° 129, n° 140, n° 141 e n° 142 sono già stati eseguiti i lavori di rinforzo strutturale delle pile mediante setti in calcestruzzo con incamiciatura in acciaio.
Pile e spalle sono unite "a cerniera" alle travate esterne e formano dunque con esse telai con architrave incernierata ai piedritti (tra i pulvini delle spalle ed i traversi di testata delle travate esterne passano tondini in acciaio, verticali).

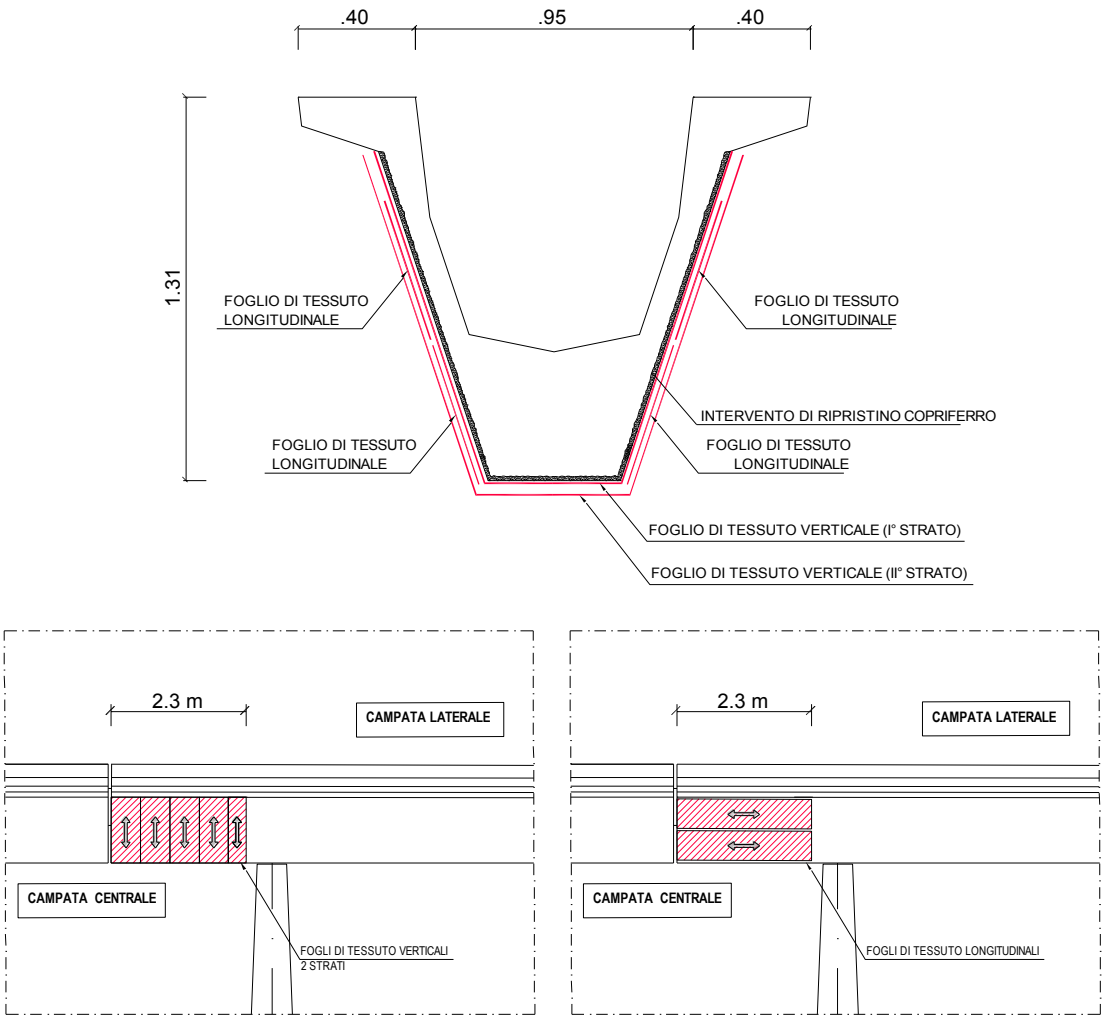
A differenza di quelle sopra descritte, le due spalle del sovrappasso n° 142 e la spalla ovest del sovrappasso n° 143 sono di tipo "chiuso" a parete piena. Per queste ultime l'elevazione è costituita dal muro frontale, con sezione di altezza variabile da 100 cm alla base a 70 cm in sommità, e da due muri andatori lunghi 9,20 m, anch'essi con sezione di altezza variabile da 87 cm alla base a 50 cm in sommità.

3 Lavori ed opere previsti in progetto

Gli interventi in progetto sono volti al ripristino e al rinforzo strutturale delle selle Gerber degli impalcati dei sovrappassi individuati e consistono sostanzialmente nel ripristino del ricoprimento delle armature affioranti mediante l'utilizzo di intonaco e nella successiva applicazione di più strati sovrapposti di tessuti in fibra di carbonio.
Con l'intervento si intende ripristinare, laddove necessario, le condizioni di durabilità in prossimità delle selle Gerber, oltre che incrementare la resistenza allo stato limite ultimo nei confronti della rottura a taglio, di tipo fragile, delle mensole di appoggio delle Gerber stesse.

Sono previste le seguenti lavorazioni:

- demolizione localizzata del calcestruzzo corticale nelle zone maggiormente ammalorate in corrispondenza delle selle Gerber fino alla rimozione completa del conglomerato degradato;
- sabbiatura a metallo bianco dei ferri d'armatura affioranti;
- trattamento anticorrosivo dei tondini in acciaio;
- ravvivatura delle superfici demolite mediante idrosabbiature e/o sabbiatrice;
- ricostruzione delle zone demolite mediante l'applicazione di malta premiscelata tixotropica contenente fibre sintetiche in poliacrilonitrile;
- applicazione, in tre strati sovrapposti, di fibre di carbonio monodirezionali ad alto modulo elastico previa ravvivatura della superficie, applicazione di primer epossipoliamminico e stesa di adesivo a base epossidica bicomponente;
- sabbiatura e successiva verniciatura, con uno strato di protettivo elastico bicomponente a base di resina poliuretanica elastomerica, di tutte le superfici oggetto dell'intervento.



Sezioni schematiche dell'intervento

Si riportano di seguito le immagini dei sovrappassi interessati dall'intervento, dalle quali si evince l'effettivo stato di ammaloramento in corrispondenza delle selle Gerber.

- Sovrappasso **n° 126** "S.P. 44 "Reggiolo-Rolo" – via Porto" - comune di Rolo (RE) (4 travi)

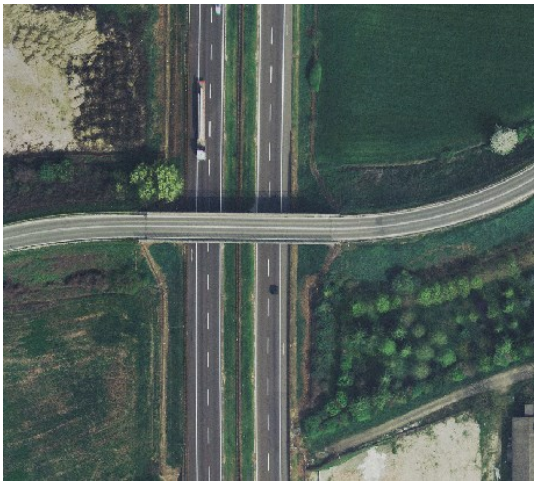
Vista dall'alto

Vista del giunto corsia nord

Vista del giunto lato ovest

Vista del giunto lato est

- Sovrappasso **n° 127** "S.P. 4 via Campo Grande" - comune di Rolo (RE) (4 travi)



Vista dall'alto

Vista del giunto corsia nord

Vista del giunto lato ovest

Vista del giunto lato est

- Sovrappasso **n° 128** “via Valle” - comune di Carpi (MO) (3 travi)

Vista dall’alto

Vista del giunto corsia nord

Vista del giunto lato ovest

Vista del giunto lato est

- Sovrappasso **n° 129** "via dei Grilli" - comune di Carpi (MO) (3 travi)

Vista dall'alto

Vista del giunto corsia nord

Vista del giunto lato ovest

Vista del giunto lato est

- Sovrappasso **n° 130** "Cavalcavia Budrione" - comune di Carpi (MO) (3 travi)

Vista dall'alto

Vista del giunto corsia nord

Vista del giunto lato ovest

Vista del giunto lato est

- Sovrappasso **n° 132** "via S. Giacomo" - comune di Carpi (MO) (4 travi)

Vista dall'alto

Vista del giunto corsia nord

Vista del giunto lato ovest

Vista del giunto lato est

- Sovrappasso **n° 133** "via Nuova Ponente" - comune di Carpi (MO) (4 travi)

Vista dall'alto

Vista del giunto corsia nord

Vista del giunto lato ovest

Vista del giunto lato est

- Sovrappasso **n° 134** "via cavalcavia Zappiano" - comune di Carpi (MO) (3 travi)

Vista dall'alto

Vista del giunto corsia nord

Vista del giunto lato ovest

Vista del giunto lato est

- Sovrappasso **n° 138** "via Beghetto" - comune di Carpi (MO) (3 travi)

Vista dall'alto

Vista del giunto corsia nord

Vista del giunto lato ovest

Vista del giunto lato est

- Sovrappasso **n° 140** “”S.P. 13 Campogalliano”- via Canale Carpi” - comune di Campogalliano (MO) (4 travi)

Vista dall’alto

Vista del giunto corsia nord

Vista del giunto lato ovest

Vista del giunto lato est

- Sovrappasso **n° 141** - “via Nacmani” - comune di Campogalliano (MO) (3 travi)

Vista dall’alto

Vista del giunto corsia nord

Vista del giunto lato ovest

Vista del giunto lato est

- Sovrappasso **n° 142** “”S.P. 13 Campogalliano”- via Ponte Alto per Modena ” - comune di Campogalliano (MO) (6 travi)

Vista dall’alto

Vista del giunto corsia nord

Vista del giunto lato ovest

Vista del giunto lato est

- Sovrappasso **n° 143** “”via Barchetta”- via Ponte Alto per Modena ” - comune di Campogalliano (MO) (4 travi)

Vista dall’alto

Vista del giunto corsia nord

Vista del giunto lato ovest

Vista del giunto lato est

4 Calcoli statici della sezione oggetto di intervento

4.1 Caratteristiche dei materiali

Per le strutture esistenti si adottano i seguenti valori derivanti dall'analisi dei documenti di progetto.

Calcestruzzo per travi in cap

R_{ck}	45 MPa
E_{cm}	31220 MPa
f_{ctm}	3.4 MPa
f_{ctk}	1.82 MPa
f_{ck}	37.5 MPa
f_{cd}	$\frac{0.85 \cdot 37.5}{1.6} = 19.8$ MPa

Barre ad aderenza migliorata per armatura lenta longitudinale (acciaio tipo A.L.E.)

f_u	600 MPa
f_{yk}	440 MPa
f_{yd}	$\frac{440}{1.3} = 338.5$ MPa
Allungamento a rottura	12 %
σ_{amm}	220 MPa

Barre lisce per armatura lenta trasversale (acciaio tipo Aq50)

f_u	500 MPa
f_{yk}	320 MPa
f_{yd}	$\frac{320}{1.3} = 246$ MPa
Allungamento a rottura	16 %
σ_{amm}	160 MPa

Acciaio armonico per trefoli da precompressione

σ_R	1700 MPa
σ_{ap}	900 MPa
σ_{api}	1180 MPa

NOTA: Per i coefficienti di sicurezza sui materiali da utilizzare nelle verifiche allo SLU si adottano valori più cautelativi rispetto a quelli prescritti dal DM2008: per il calcestruzzo si usa $\gamma_c = 1.6$ e per l'armatura lenta $\gamma_s = 1.3$.

Per l'intervento di rinforzo strutturale delle selle Gerber si utilizzano fibre di carbonio monodirezionali ad alto modulo elastico con le seguenti caratteristiche.

Tessuto monodirezionale in fibra di carbonio

E_f	39000 MPa
f_{tk}	2500 MPa

4.2 Riferimenti normativi

- Norme Tecniche per le Costruzioni DM 14/01/2008 "Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni" pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale del 04 febbraio 2008.

- Circolare Ministeriale del 2 febbraio 2009 n°617 Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al DM 14/01/2008.

- CNR-DT 200 R1/2013 Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie. Consiglio nazionale delle ricerche commissione incaricata di formulare pareri in materia di normativa tecnica relativa alle costruzioni.

- D.M. 9 gennaio 1996: "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche"

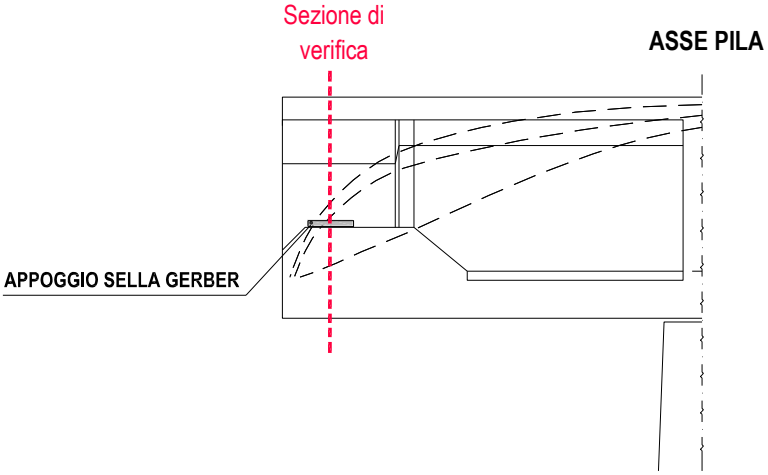
- Circolare n° 384 del 14 febbraio 1962 : "Norme relative ai carichi per il calcolo dei ponti stradali"

4.3 Sollecitazioni agenti in corrispondenza della sella Gerber

Per le sollecitazioni dovute ai carichi permanenti si fa riferimento ai valori derivanti dall'analisi dei documenti di progetto.

Per le sollecitazioni dovute ai carichi mobili si considerano sia i valori derivanti dall'analisi dei documenti di progetto, calcolati secondo la Circolare del 14/02/1962, sia i valori calcolati secondo il DM 14/01/2008.

Per il calcolo del rinforzo si è presa in esame la sezione in asse all'appoggio del dente sulla trave a sbalzo.



Sezione longitudinale della sella Gerber con indicazione della sezione di verifica

4.3.1 Carichi permanenti

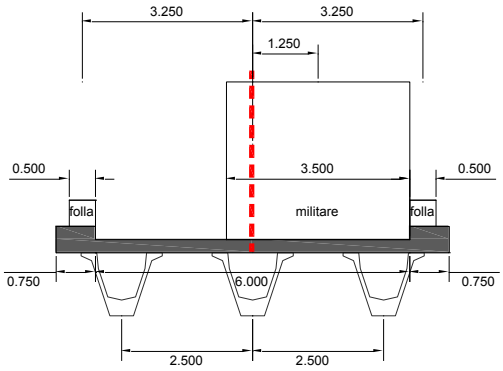
Il taglio sollecitante sulla sezione di verifica vale:

			3 Travi	4 Travi	6 Travi
-	Trave da 31m	=	198,0 kN	198,0 kN	213,0 kN
-	Soletta e traversi	=	152,0 kN	145,0 kN	164,0 kN
-	Finiture	=	85,0 kN	87,0 kN	74,0 kN
-	Precompressione	=	-187,0 kN	-187,0 kN	-187,0 kN
Taglio totale carichi permanenti		**=**	**248,0 kN**	**243,0 kN**	**264,0 kN**

4.3.2 Carichi mobili su sovrappasso tipo 3 travi

4.3.2.1 Carichi da Circolare del 14/02/1962

In fase di progetto, per il sovrappasso 3 travi è stata considerata una colonna di carico militare più il carico da folla da $4\,\frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{m}^2}$ posizionato sui entrambi i cordoli per una larghezza pari a 0,5 m.



Distribuzione trasversale delle colonne di carico di progetto ($i_{travi} = 2.5\ m$)

Incremento dinamico per $L = 31m$:

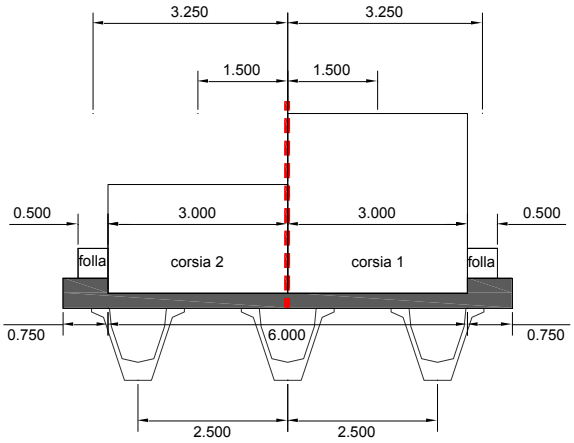
$$\phi = 1 + \frac{(100 - L)^2}{100(250 - L)} = 1.218$$

Il taglio sollecitante sulla sezione di verifica vale:

	e	q_{tagl}	k_i	$\sum V_i \cdot k_i$	$\sum V_i \cdot k_i \cdot \Phi$
	[m]	[kN/m]		[kN]	[kN]
1: Folla	3,250	2,00	0,520	16,12	19,62
2: Militare	1,250	46,35	0,400	303,49	369,35
3: Folla	-3,250	2,00	0,147	308,04	374,88
		Taglio totale accidentali		**=**	**375 kN**

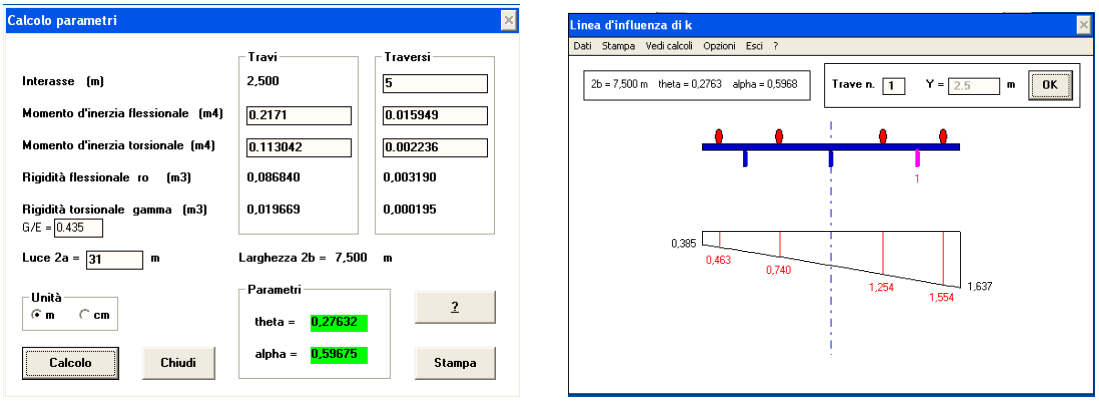
4.3.2.2 Carichi da DM 14/01/2008

Le sollecitazioni di progetto vengono calcolate considerando due corsie convenzionali più un carico da folla pari a $2{,}5\,\frac{kN}{m^2}$ su entrambi i cordoli. La posizione trasversale delle colonne di carico viene scelta in modo da massimizzare il carico sulla trave di bordo che in questa configurazione risulta essere la più sollecitata.



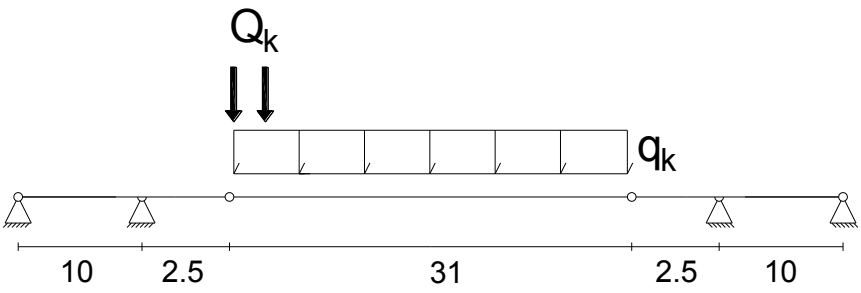
Distribuzione trasversale delle colonne di carico ($i_{travi} = 2.5\ m$)

I coefficienti di ripartizione trasversale per la trave di bordo da 31 m sono calcolati con il metodo di Massonet considerando i parametri riportati qui di seguito, che derivano dall'analisi dei documenti di progetto:



Parametri di calcolo e coefficienti di ripartizione per la trave di bordo da 31 m

Il taglio massimo sulla sezione di verifica si ottiene quando il carico tandem Q_k è posizionato sulla travata centrale in prossimità della sella Gerber come mostrato in figura.



Schema di calcolo adottato per massimizzare taglio sulla sezione di verifica

Considerando questa configurazione di carico il valore di taglio agente è pari a:

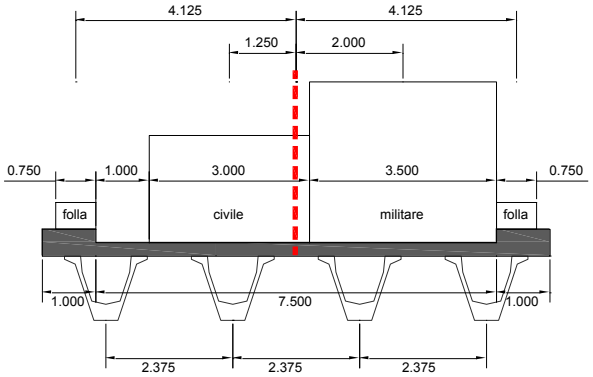
	e [m]	k_i	q_k [kN/m]	V_{q_k-i} [kN]	$\sum V_{qk-i} \cdot k_i$ [kN]	$2 \cdot Q_k$ [kN]	V_{Q_k-i} [kN]	$\sum V_{Qk-i} \cdot k_i$ [kN]
1: marciapiede sx	3,250	0,518	1,25	19,4	10,0	-	-	-
2: corsia 1	1,500	0,418	27,00	418,5	185,0	600	588,4	245,9
3: corsia 2	-1,500	0,247	7,50	116,3	213,6	400	392,2	342,8
5: marciapiede dx	-3,250	0,154	1,25	19,4	216,6	-	-	-
			Taglio totale V_{q_k}=		**216,6**	**Taglio totale V_{Q_k}=**		**342,8**

$$V_{Tot} = V_{q_k} + V_{Q_k} = 216{,}6 + 342{,}8 = 559{,}4 \text{ kN}$$

4.3.3 Carichi mobili su sovrappasso tipo 4 travi

4.3.3.1 Carichi da Circolare del 14/02/1962

In fase di progetto, per il sovrappasso 4 travi sono state considerate una colonna di carico militare affiancata da una di carico civile più il carico da folla da $4\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ posizionato sui entrambi i cordoli per una larghezza pari a 0,75 m.



Distribuzione trasversale delle colonne di carico di progetto ($i_{travi} = 2.375\ m$)

Incremento dinamico per $\mathrm{L} = 31\mathrm{m}$:

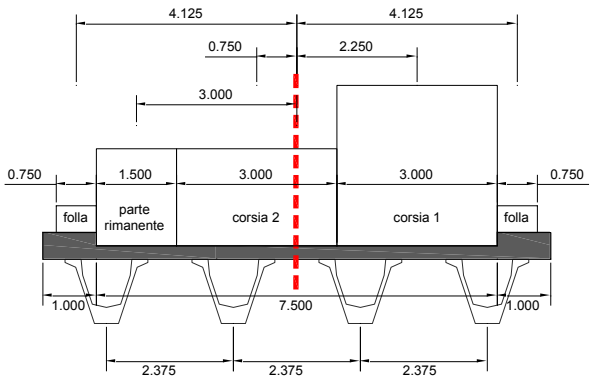
$$\phi = 1 + \frac{(100 - \mathrm{L})^2}{100(250 - \mathrm{L})} = 1.218$$

Il taglio sollecitante sulla sezione di verifica vale:

	$\mathbf{e}$	$\mathbf{q_{tagl}}$	$\mathbf{k_i}$	$\sum \mathbf{V_i \cdot k_i}$	$\sum \mathbf{V_i \cdot k_i \cdot \Phi}$
	[m]	**[kN/m]**		**[kN]**	**[kN]**
1: Folla	4,125	3,00	0,430	19,99	24,33
2: Militare	2,000	46,35	0,335	260,67	317,23
3: Civile	-1,125	22,67	0,193	328,31	399,55
4: Folla	-4,125	3,00	0,090	332,49	404,65
		Taglio totale carichi mobili		**=**	**405,00**

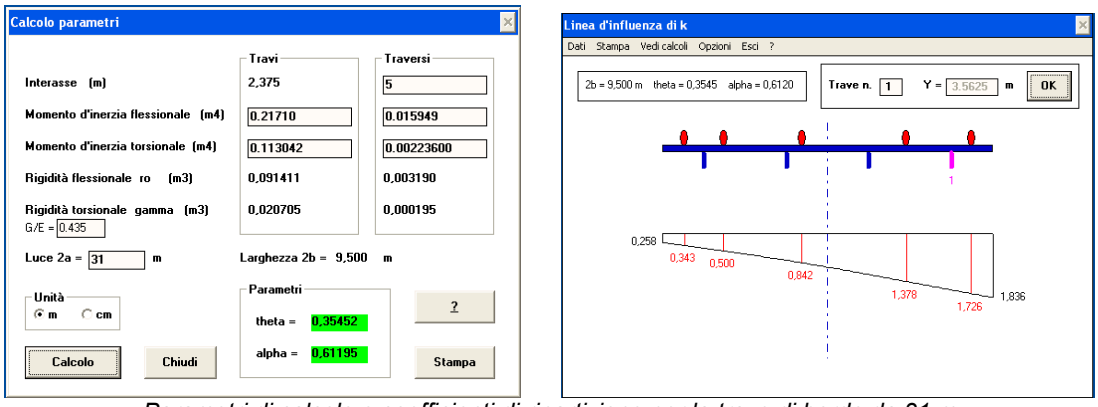
4.3.3.2 Carichi da DM 14/01/2008

Le sollecitazioni di progetto vengono calcolate considerando due corsie convenzionali più la parte rimanente. In aggiunta viene considerato anche un carico da folla pari a $2{,}5\,\frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{m}^2}$ su entrambi i cordoli. La posizione trasversale delle colonne di carico viene scelta in modo tale da massimizzare il carico sulla trave di bordo che in questa configurazione risulta essere la più sollecitata.



Distribuzione trasversale delle colonne di carico ($i_{travi} = 2.375\ m$)

I coefficienti di ripartizione trasversale per la trave di bordo da 31 m sono calcolati con il metodo di Massonet considerando i parametri riportati qui di seguito, che derivano dall'analisi dei documenti di progetto:



Parametri di calcolo e coefficienti di ripartizione per la trave di bordo da 31 m

Il taglio massimo sulla sezione di intervento viene calcolato adottando lo stesso schema di calcolo utilizzato per il sovrappasso a 3 travi. Il taglio risulta quindi essere:

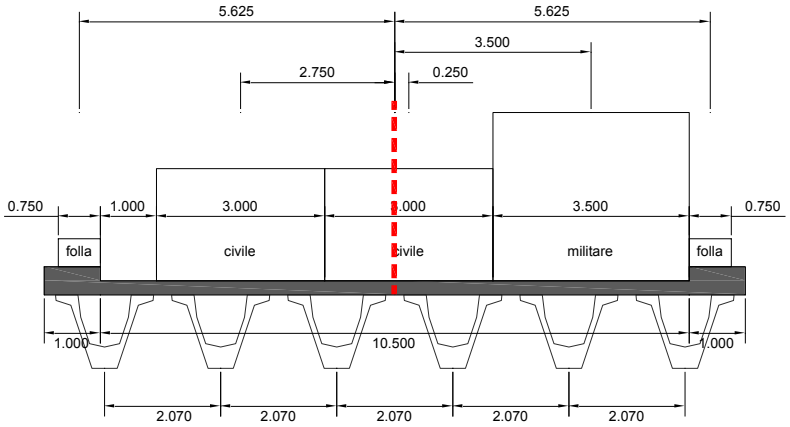
	e [m]	k_i	q_k [kN/m]	V_{q_k-i} [kN]	$\sum V_{qk-i} \cdot k_i$ [kN]	$2 \cdot Q_k$ [kN]	V_{Q_k-i} [kN]	$\sum V_{Qk-i} \cdot k_i$ [kN]
1: folla	4,125	0,432	1,88	29,1	12,6	-	-	-
2: corsia 1	2,250	0,345	27,00	418,5	156,7	600	588,4	203,0
3: corsia 2	-0,750	0,211	7,50	116,3	181,2	400	392,2	285,8
4: parte rimanente	-3,000	0,125	1,75	27,1	184,6	-	-	-
5: folla	-4,125	0,086	1,88	29,1	187,1	-	-	-
			Taglio totale V_{q_k}=		**187,1**	**Taglio totale V_{Q_k}=**		**285,8**

$$V_{Tot} = V_{q_k} + V_{Q_k} = 187{,}1 + 285{,}8 = 472{,}9 \text{ kN}$$

4.3.4 Carichi mobili su sovrappasso tipo 6 travi

4.3.4.1 Carichi da Circolare del 14/02/1962

In fase di progetto, per il sovrappasso 6 travi sono state considerate una colonna di carico militare affiancata da due di carico civile più il carico da folla da $4\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ posizionato su entrambi i cordoli per una larghezza pari a 0,75 m.



Distribuzione trasversale delle colonne di carico di progetto ($i_{travi} = 2.070\ m$)

Incremento dinamico per $\mathrm{L} = 31\mathrm{m}$:

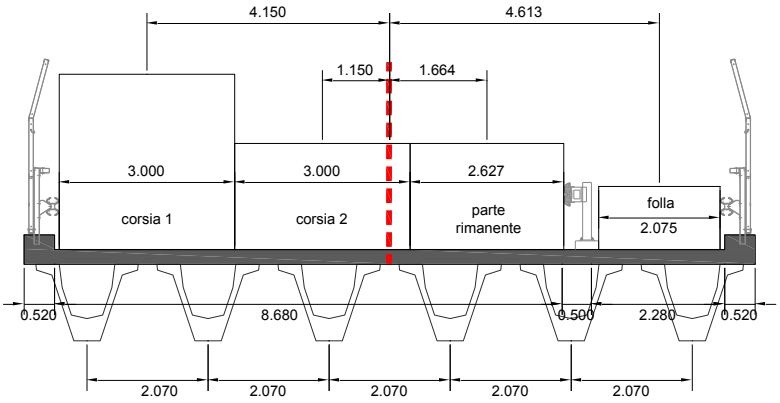
$$\phi = 1 + \frac{(100 - \mathrm{L})^2}{100(250 - \mathrm{L})} = 1.218$$

Il taglio sollecitante sulla sezione di verifica vale:

	$\mathbf{e}$	$\mathbf{q_{tagl}}$	$\mathbf{k_i}$	$\sum \mathbf{V_i} \cdot \mathbf{k_i}$	$\sum \mathbf{V_i} \cdot \mathbf{k_i} \cdot \mathbf{\Phi}$
	[m]	**[kN/m]**		**[kN]**	**[kN]**
1: Folla	5,625	3,00	0,508	23,6	28,8
2: Militare	3,500	46,35	0,342	269,1	327,5
3: Civile	0,250	22,67	0,138	317,5	386,4
3: Civile	-2,750	22,67	0,019	324,2	394,6
4: Folla	-5.625	3,00	0,000	-	-
		Taglio totale carichi mobili		**=**	**394,6**

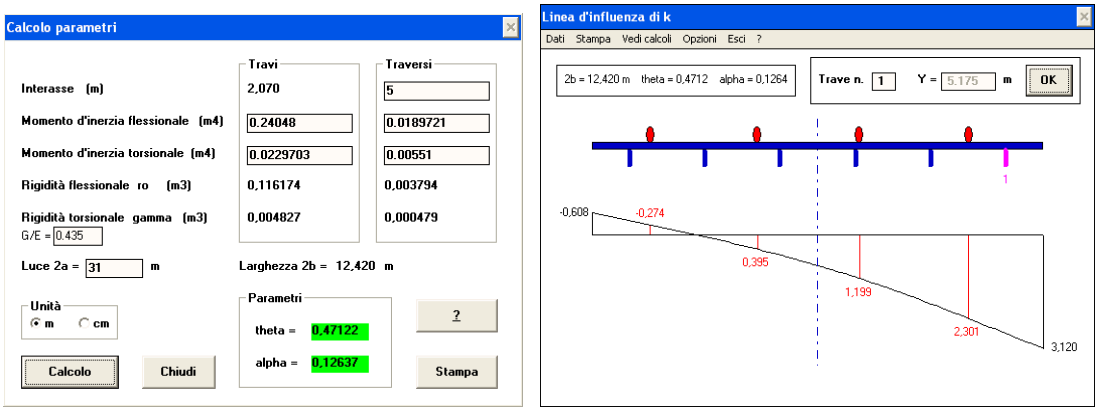
4.3.4.2 Carichi da DM 14/01/2008

Le sollecitazioni di progetto vengono calcolate considerando due corsie convenzionali più la parte rimanente. In aggiunta viene considerato anche un carico da folla pari a $2{,}5\,\frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{m}^2}$ sul marciapiede lato sud. La posizione trasversale delle colonne di carico viene scelta in modo tale da massimizzare il carico sulla trave di bordo che in questa configurazione risulta essere la più sollecitata.



Distribuzione trasversale delle colonne di carico sul svp n° 142 $(i_{travi} = 2.070\ m)$

I coefficienti di ripartizione trasversale per la trave di bordo da 31 m sono calcolati con il metodo di Massonet considerando i parametri riportati qui di seguito, che derivano dall'analisi dei documenti di progetto:



Parametri di calcolo e coefficienti di ripartizione per la trave di bordo da 31 m

Il taglio massimo sulla sezione di intervento viene calcolato adottando lo stesso schema di calcolo utilizzato per il sovrappasso a 3 travi. Il taglio risulta quindi essere:

	e [m]	k_i	q_k [kN/m]	V_{q_k-i} [kN]	$\sum V_{qk-i} \cdot k_i$ [kN]	$2 \cdot Q_k$ [kN]	V_{Q_k-i} [kN]	$\sum V_{Qk-i} \cdot k_i$ [kN]
1: corsia 1	4.150	0,384	27,00	418,5	160,7	600	588,4	225,9
2: corsia 2	1.150	0,199	7,50	116,3	183,8	400	392,2	303,9
3: parte rimanente	-1.664	0,066	6,57	101,8	190,6	-	-	-
4: folla	-4.613	-0.046	5,19	80,4	-	-	-	-
			Taglio totale V_{q_k}=		**190,6**	**Taglio totale V_{Q_k}=**		**303,9**

$$V_{Tot} = V_{q_k} + V_{Q_k} = 190{,}6 + 303{,}9 = 494{,}5\ kN$$

4.3.5 Riepilogo sollecitazioni sulla sezione di intervento

	Svp tipo 3 travi			Svp tipo 4 travi			Svp n°142 6 travi		
Azioni	**V [kN]**	γ_{SLU}	V_{ed} **[kN]**	**V [kN]**	γ_{SLU}	V_{ed} **[kN]**	**V [kN]**	γ_{SLU}	V_{ed} **[kN]**
Trave prefabbricata	198	1,35	267	198	1,35	267	213	1,35	288
Soletta e traversi	152	1,35	196	145	1,35	196	164	1,35	221
Finiture	85	1,50	131	87	1,50	131	74	1,50	111
Precompressione	-187	1,00	-187	-187	1,00	-187	-187	1,00	-187
Accidentali Circ. 14/02/1962	375	1,35	506	405	1,35	547	395	1,35	533
Accidentali DM 14/01/2008	559	1,35	755	473	1,35	638	495	1,35	668
Totale Circ. 14/02/1962	**618**		**913**	**648**		**953**	**659**		**966**
Totale DM 14/01/2008	**802**		**1161**	**716**		**1045**	**759**		**1101**

4.4 Resistenza a taglio della sezione senza rinforzo

Di seguito si calcola la resistenza a taglio allo SLU della sezione di intervento nella configurazione attuale, ovvero senza rinforzo in fibra di carbonio. Il calcolo viene svolto in accordo con il DM 14/01/2008.
Per quanto riguarda le caratteristiche geometriche della sezione si fa riferimento ai valori derivanti dall'analisi dei documenti di progetto riportati nella tabella seguente.

Trave prefabbricata a cavi scorrevoli	
A [m^2]	0,650
Y_g[m da lembo superiore]	0,844
J [m^4]	0,002
Trave completa a cavi iniettati	
A [m^2]	0,962
Y_g[m da lembo superiore]	0,592
J [m^4]	0,231
A_{sw1}	4ϕ12mm
s_1[m]	0,1
A_{sw2}	2ϕ16mm
s_2[m]	0,2

La resistenza a taglio della sezione prefabbricata è data dal valore minore di resistenza tra il contributo a taglio-trazione fornito dalle staffe in acciaio (V_{Rds}) e il contributo a taglio-compressione fornito dal calcestruzzo (V_{Rdc}).

$$V_{Rd} = \min(V_{Rds}; V_{Rdc})$$ [DM2008 eq. 4.1.20]

Resistenza taglio-trazione

$$V_{Rds} = 0.9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot fyd \cdot (ctg\alpha + ctg\theta) \cdot sin\alpha$$ [DM2008 eq. 4.1.18]

Resistenza taglio-compressione

$$V_{Rdc} = 0{,}9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_C \cdot 0{,}5 \cdot f_{cd} \cdot \frac{(ctg\alpha + ctg\theta)}{1 + ctg^2\theta}$$ [DM2008 eq. 4.1.19]

La tensione media è pari a $\sigma_m \leq 0{,}25\, f_{cd} = 4{,}95\ \mathrm{MPa}$ in entrambe le sezioni quindi α_C può essere calcolato come $1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}$.

	σ_{cp}	α_C
Solo precompressione	1,07 MPa	1.06

L'armatura a taglio presente nella sezione risulta essere pari a $4\phi12$ con passo 100 mm.

VRsd		
d=	1385	mm
Asw=	452,16	mm2
Φ1=	12	mm
n1=	4	
Φ2=	0	mm
n2=	0	
Φ3=	0	mm
n3=	0	
s=	100	mm
α=	90	°
θ=	45	°
α=	1,57	Rad
θ=	0,785	Rad
VRsd=	1390	kN

Resistenza a taglio-trazione

VRcd		
d=	1385	mm
bw=	250	mm
αc=	1,06	
α=	90	°
θ=	45	°
α=	1,57	Rad
θ=	0,785	Rad
VRcd=	1640	kN

Resistenza a taglio-compressione

4.5 Parametri di calcolo del rinforzo in fibra di carbonio

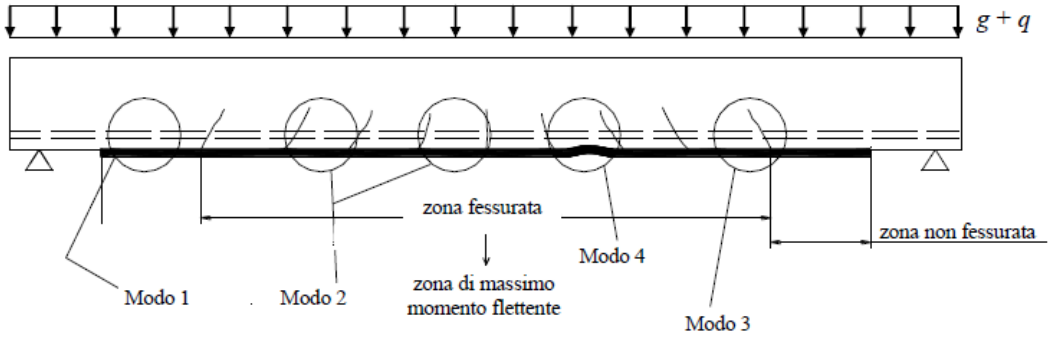
4.5.1 Modi di rottura per distacco del supporto

Dal momento che tali rinforzi vengono applicati su superficie lavorate diventa fondamentale garantire il livello minimo di aderenza tale da poter trasmettere le sollecitazioni. Come specificato al punto 4.1.1 (2)P visto che l'adesivo utilizzato tra i fogli di fibra garantisce il trasferimento delle sollecitazioni senza particolari problemi, le verifiche devono essere rivolte alla superficie in contatto con il calcestruzzo.

In particolare si possono avere 4 modi di rottura :

- Modo 1: Distacco di estremità;
- Modo 2: Distacco intermedio causato da fessure per flessione della trave;

- Modo 3: Distacco causato da fessure diagonali da taglio della trave;
- Modo 4: Distacco causato da irregolarità e rugosità della superficie di calcestruzzo.

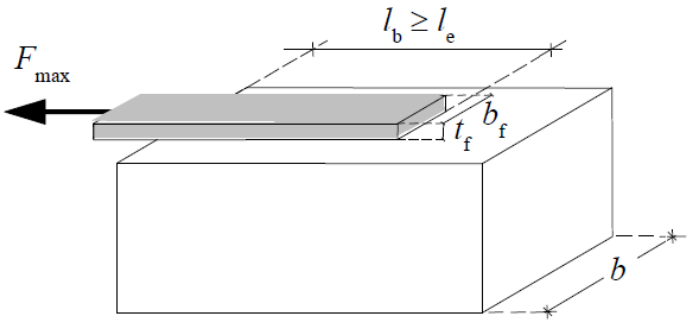


Modi di rottura per i rinforzi in fibra di carbonio

Come indicato al punto 4.1.1 (4) i modi più frequenti che richiedono verifiche specifiche sono il Modo 1 e Modo 2. I rimanenti due possono essere evitati seguendo delle prescrizioni generali riportate nella normativa al punto 4.8.
NOTA: In questa trattazione, vista la presenza della precompressione, si assumerà che non vi siano fessure nella sezione dovute alla flessione della trave quindi oltre alle prescrizioni generiche sul distacco verranno verificate solamente le prescrizioni per il Modo di distacco 1.

4.5.2 Resistenza al distacco

Questa verifica serve a definire la lunghezza di ancoraggio minima tra la superficie lavorata e la fibra in modo da trasferire tutta la forza agente.



Parametri di calcolo per il calcolo della lunghezza efficace

Si può definire la lunghezza ottimale di ancoraggio l_{ed} come segue:

$$l_{ed} = \max\left\{\frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 200\text{mm}\right\} \qquad \text{[CNR-DT 200/2013 eq. 4.1]}$$

dove:

- E_f e t_f sono rispettivamente, il modulo di elasticità normale nella direzione della forza e lo spessore del composito rinforzato;

- $f_{bd} = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fd}}{Su}$ con $s_u = 0.25\text{mm}$ valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto;

- $\gamma_{Rd} = 1.25$ è un coefficiente correttivo per il caso specifico da adottare per la verifica.

- Γ_{Fd} è il valore di progetto dell'energia specifica di frattura che può essere calcolato come segue:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \qquad \text{[CNR-DT 200/2013 eq. 4.2]}$$

dove:

- $f_{cm} = 45{,}4\ \text{MPa}$ e $f_{ctm} = 3{,}4\ \text{MPa}$;

- FC è un fattore di confidenza relativo al meccanismo di rottura. In questo caso, vista l'incertezza sul comportamento dello strato di copriferro risanato e quindi sul conseguente meccanismo di rottura, con riferimento alla Tabella C8A.1.2 della Circolare Ministeriale del 2 febbraio 2009 n°617, a favore di sicurezza si adotta il valore più cautelativo e pari a FC=1.35.

- kb è un fattore correttivo di tipo geometrico calcolato come segue:

$$k_B = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{b}}} \geq 1 \qquad \text{e} \qquad \frac{b}{b_f} \geq 0{,}25; \qquad \text{[CNR-DT 200/2013 eq. 4.3]}$$

  con delle limitazioni legate al rapporto $\frac{b_f}{b}$. In particolare, se $\frac{b}{b_f} < 0{,}25$ il valore assegnato a k_b è pari a 1,18;

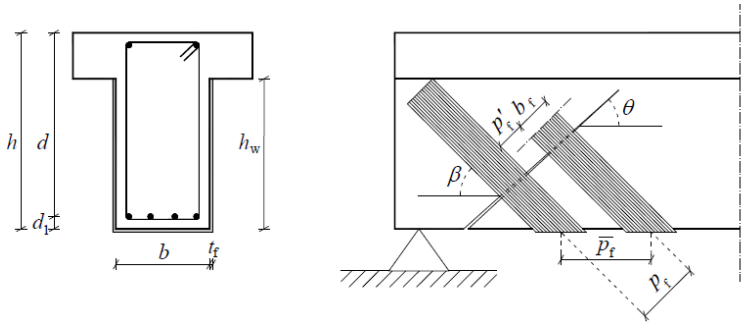
- k_G è un coefficiente correttivo tarato sulla base di risultati sperimentali utilizzati come riferimento nella stesura della normativa e deve essere assunto pari a 0,023 mm per compositi preformati e 0,037 mm per compositi impregnati in situ. Nel caso in esame non si adotteranno compositi preformati quindi si utilizzerà $k_G = 0{,}037\text{mm}$.

Alcune note sui termini b_f, b, p_f:

- b_f e p_f rappresentano la larghezza e la distanza tra le strisce di FRP;

- b rappresenta la larghezza dell'elemento rinforzato.

Qui di seguito viene rappresentata una sezione con rinforzo a taglio con le indicazioni di b_f e b.



Parametri di calcolo per la valutazione della resistenza a taglio dei rinforzi

Considerando che verranno adottate strisce continue, si riportano di seguito i casi particolari da considerare e i valori adottati nella relazione:

- Per il calcolo della resistenza di progetto il rapporto $\frac{b_f}{p_f}$ è stato posto uguale a 1;
- Per rinforzi a taglio con sistemi di rinforzo continui o con strisce adiacenti $b = b_f = \min\{0.9 \cdot d, h_w\} \cdot \frac{\sin(\theta+\beta)}{\sin\theta}$.

4.5.3 Tensione di progetto del sistema di rinforzo

Nell'intervento in esame si è scelto di rispettare la prescrizione sulla lunghezza di ancoraggio ottimale. Alla luce di questo la tensione di progetto del sistema di rinforzo è stata calcolata con la formula:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}}$$ [CNR-DT 200/2013 eq. 4.4]

Il coefficiente $\gamma_{f,d}$ è pari a 1,20.

4.5.4 Resistenza efficace

La normativa indica una verifica ulteriore da operare per ovviare alle problematiche che potrebbero generarsi in prossimità delle fessure per taglio.

Tale tensione efficace si differenzia per applicazioni ad U e quelle in avvolgimento o con ancoraggio dei lembi.

Per il caso di avvolgimento ad U la formula è la seguente:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin\beta}{\min\{0{,}9 \cdot d, h_w\}}\right]$$ [CNR-DT 200/2013 eq. 4.21]

dove:

- f_{fdd} è la tensione di progetto da calcolare tenendo in considerazione tutte le prescrizioni relative a b, b_f, p_f;
- l_{ed} lunghezza ottimale di ancoraggio;

- β è l'angolo di inclinazione delle fibre;
- d è l'altezza utile della sezione;
- h_w è l'altezza dell'anima della trave, da notare che tutta l'anima della trave deve essere ricoperta da FRP.

NOTA: Nei casi in cui la zona compressa si trovi al lembo inferiore della trave come per esempio accade nel caso in esame. Visto che la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto è opportuno pensare a dei sistemi di ancoraggio del rinforzo ad U. Tali dispositivi possono essere anche dispositivi meccanici dedicati.

4.6 Resistenza a taglio della sezione con rinforzo e verifica

La resistenza di progetto dell'elemento rinforzato può essere valutata con la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rsd} + V_{Rfd}, V_{Rcd}\}$$ [CNR-DT 200/2013 eq. 4.18]

Come si può notare il rinforzo a taglio va ad incrementare la resistenza a taglio-trazione ma non contribuisce alla resistenza a taglio-compressione. I rinforzi FRP infatti lavorano solamente a trazione o non hanno di fatto resistenza a compressione.

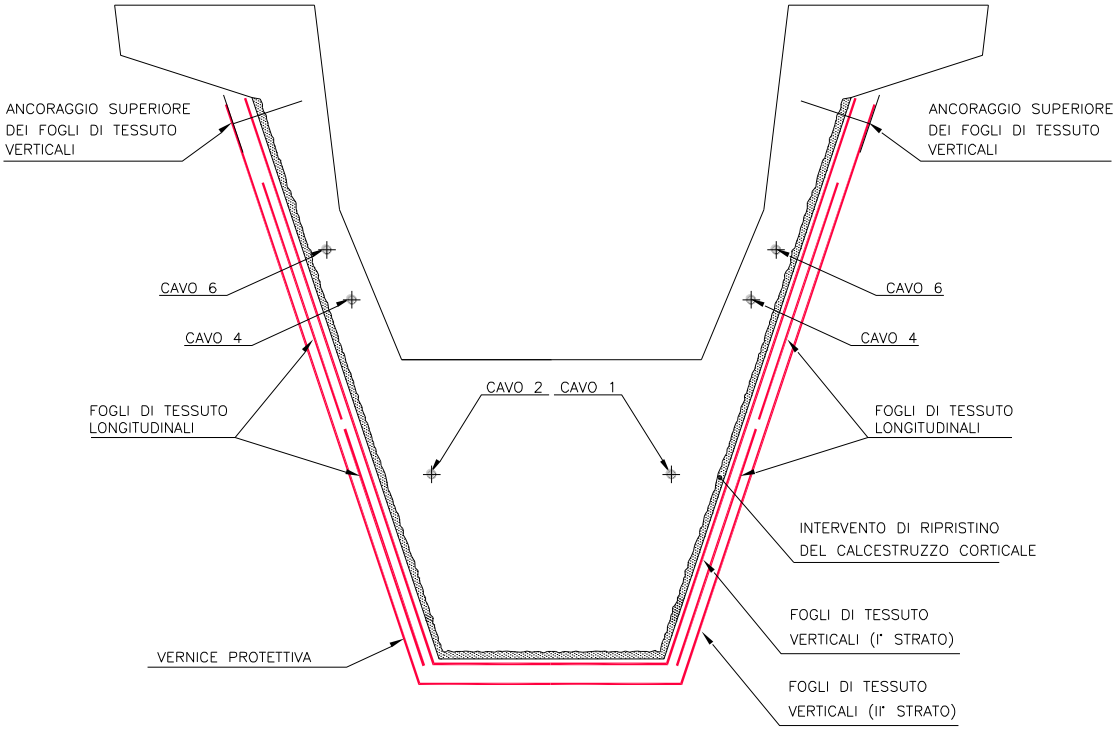
Per il caso di avvolgimento ad U il taglio resistente V_{Rfd} può essere valutato in base al meccanismo di Morsh come segue:

$$V_{Rfd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0{,}9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot tf \cdot (ctg\theta + ctg\beta) \cdot \frac{b_f}{p_f}$$ [CNR-DT 200/2013 eq. 4.19]

Dove:

- d è l'altezza utile della sezione;
- f_{fed} è la resistenza efficace a di calcolo da calcolare come indicato nel paragrafo successivo;
- t_f è lo spessore del rinforzo;
- b_f e p_f sono rispettivamente la larghezza e lo spessore del rinforzo misurati ortogonalmente al rinforzo stesso. Nel caso di strisce adiacenti come nel caso in esame verrà assunto $\frac{b_f}{p_f} = 1$.
- γ_{Rd} verrà assunto pari a 1,20.

Il sistema di rinforzo è stato progettato considerando tre strati di tessuto monodirezionale (2 verticali ed uno longitudinale) con le caratteristiche riportate qui di seguito:



FRP		
Ef=	390000,0	MPa
ftk=	2500,0	MPa
$\gamma_{Rd}(V_{Rd,f})$=	1,20	
γ_{Rd} (led)=	1,25	
$\gamma_{f,d}$ (led)=	1,20	

Fibre di rinforzo in carbonio utilizzate per il calcolo

Di seguito si riporta il calcolo della resistenza a taglio aggiuntiva V_{Rfd} fornita dalle fibre di rinforzo in carbonio (2 strati verticali di tessuto).

VRfd=		
d=	1385	mm
tf=	0,33	mm
bfcont=	871,39	mm
bfstr=	1000	mm
bf=	871,39	mm
pf=	1000	mm
bf/pf=	1	
hw=	870	mm
lb=	200	mm
β=	90	°
θ=	45	°
β=	1,57	Rad
θ=	0,785	Rad
f_{fd}=	0	Mpa
FC=	1,35	
led=	200	mm
fbd=	2,70	
ΓFd=	0,34	
su=	0,25	mm
kb=	1	
bf/b=	1	
kg	0,037	mm
b=	871,39	mm
ffed=	687,69	Rad
$f_{fdd\ [Modo\ 1]}$=	744,76	Mpa
ΦR=	0,24	
rc=	20	mm
VRfd=	472	kN

Parametri di calcolo per la valutazione della resistenza a taglio-trazione aggiuntiva fornita dalle fibre di rinforzo in carbonio

Nelle tabelle seguenti si riassumono i risultati ottenuti dalla verifica a taglio allo SLU della sezione considerando i carichi mobili previsti dal DM 14/01/2008.
La verifica viene eseguita nella configurazione attuale (senza rinforzo), nella configurazione di progetto (con rinforzo mediante 2 strati verticali di tessuto in fibra

di carbonio) e nella configurazione di progetto ma ipotizzando una riduzione dell'armatura trasversale a taglio (-10%, -20% e -30%).

Svp tipo 3 Travi	**senza rinforzo** ($Asw = 4\phi12 / 100mm$)	**con rinforzo** ($Asw = 4\phi12 / 100mm$)	**con rinforzo** ($-10\% A_{sw}$)	**con rinforzo** ($-20\% A_{sw}$)	**con rinforzo** ($-30\% A_{sw}$)
$\mathbf{V_{Rcd}}$	1640 kN	1640 kN	1640 kN	1640 kN	1640 kN
$\mathbf{V_{Rsd}}$	1390 kN	1390 kN	1251 kN	1112 kN	973 kN
$\mathbf{V_{Rfd}}$	-	472 kN	472 kN	472 kN	472 kN
$\mathbf{V_{Rsd} + V_{Rfd}}$	1390 kN	1862 kN	1723 kN	1584 kN	1445 kN
$\mathbf{V_{Rd}}$	**1390 kN**	**1640 kN**	**1640 kN**	**1584 kN**	**1445 kN**
$\mathbf{V_{Ed}}$	**1161 kN**	**1161 kN**	**1161 kN**	**1161 kN**	**1161 kN**
$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}}$	**0,84**	**0,71***	**0,71***	**0,73**	**0,83**

Svp tipo 4 Travi	**senza rinforzo** ($Asw = 4\phi12 / 100mm$)	**con rinforzo** ($Asw = 4\phi12 / 100mm$)	**con rinforzo** ($-10\% A_{sw}$)	**con rinforzo** ($-20\% A_{sw}$)	**con rinforzo** ($-30\% A_{sw}$)
$\mathbf{V_{Rcd}}$	1640 kN	1640 kN	1640 kN	1640 kN	1640 kN
$\mathbf{V_{Rsd}}$	1390 kN	1390 kN	1251 kN	1112 kN	973 kN
$\mathbf{V_{Rfd}}$	-	472 kN	472 kN	472 kN	472 kN
$\mathbf{V_{Rsd} + V_{Rfd}}$	1390 kN	1862 kN	1723 kN	1584 kN	1445 kN
$\mathbf{V_{Rd}}$	**1390 kN**	**1640 kN**	**1640 kN**	**1584 kN**	**1445 kN**
$\mathbf{V_{Ed}}$	**1045 kN**	**1045 kN**	**1045 kN**	**1045 kN**	**1045 kN**
$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}}$	**0,75**	**0,64***	**0,64***	**0,66**	**0,72**

*Rottura lato calcestruzzo.

Svp n°142 6 Travi	senza rinforzo ($Asw = 4\phi12 / 100mm$)	con rinforzo ($Asw = 4\phi12 / 100mm$)	con rinforzo ($-10\% A_{sw}$)	con rinforzo ($-20\% A_{sw}$)	con rinforzo ($-30\% A_{sw}$)
V_{Rcd}	1640 kN	1640 kN	1640 kN	1640 kN	1640 kN
V_{Rsd}	1390 kN	1390 kN	1251 kN	1112 kN	973 kN
V_{Rfd}	-	472 kN	472 kN	472 kN	472 kN
$V_{Rsd} + V_{Rfd}$	1390 kN	1862 kN	1723 kN	1584 kN	1445 kN
V_{Rd}	**1390 kN**	**1640 kN**	**1640 kN**	**1584 kN**	**1445 kN**
V_{Ed}	**1101 kN**	**1101 kN**	**1101 kN**	**1101 kN**	**1101 kN**
$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}}$	**0,79**	**0,67***	**0,67***	**0,69**	**0,76**

*Rottura lato calcestruzzo.

Dai risultati delle verifiche a taglio allo SLU riportati nelle tabelle soprastanti per le diverse configurazioni considerate, si evince che il coefficiente V_{Ed}/V_{Rd} ottenuto nel caso di sezione con rinforzo è inferiore a quello ottenuto per la sezione senza rinforzo anche nell'ipotesi di una riduzione dell'area di armatura trasversale resistente a taglio pari al 30%.

5 Programma dei lavori e tempi di esecuzione

Per la realizzazione dei lavori in progetto si stimano necessari **75 (settantacinque) giorni naturali e consecutivi**, decorrenti dalla data di consegna degli stessi.

Tutte le lavorazioni previste in progetto saranno eseguite esclusivamente di notte con chiusura (dalle ore 20 alle ore 6) delle corsie di marcia e di emergenza (traffico sulla corsia di sorpasso).

Per una descrizione dettagliata della tempistica delle attività di cantiere e delle interferenze con il traffico autostradale si rimanda al cronoprogramma di progetto.

6 Prezzi unitari

Per la predisposizione del progetto sono stati adottati in massima parte i prezzi unitari del listino A.N.A.S. 2017.

Ai sensi dell'art. 32 del D.P.R. 5 ottobre 2010, n. 207, le voci mancanti sono state integrate adottando prezzi stabiliti mediante regolari analisi, eseguite ai sensi del comma 2 del citato art. 32.

I prezzi utilizzati sono al netto dei costi della sicurezza.