

PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO
DIPARTIMENTO INFRASTRUTTURE E TRASPORTI
SERVIZIO GESTIONE STRADE
UFFICIO MANUTENZIONE STRUTTURE E IMPIANTI

PROGETTO:

Viadotto Montevideo al km 153+042 della S.S. 45bis della Gardesana Occidentale - somma urgenza per il rinforzo strutturale del fondo del cassone in acciaio delle campate dalla 2 alla 7 che presentano gravi fenomeni di corrosione con forte riduzione della sezione resistente. CIG: B60202E199 CUP: C47H24001270003

PERIZIA DI SOMMA URGENZA

TITOLO ELABORATO:

RELAZIONE DI CALCOLO

N° PROGR.

R8

SCALA

REVISIONE:

0

DATA REDAZIONE:

OTTOBRE 2025

IL PROGETTISTA:

ing. Antonio Castagna

IL DIRETTORE DEI LAVORI E

PROGETTISTA DELLE STRUTTURE:

ing. Alfonso Dalla Torre

dott. ing. Alfonso Dalla Torre

ISCRIZIONE ALBO INCL. 37/5



VISTO! IL DIRIGENTE - R.U.P.

ing. Sergio Deromedis

GRUPPO DI PROGETTAZIONE:

ing. Loris Michelon

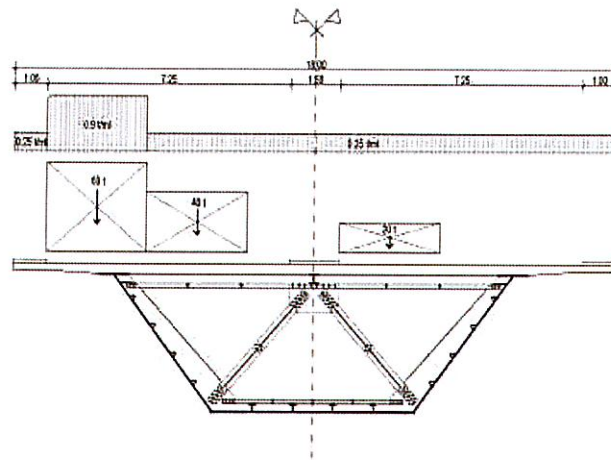
per.ind. Paolo Dallapiccola





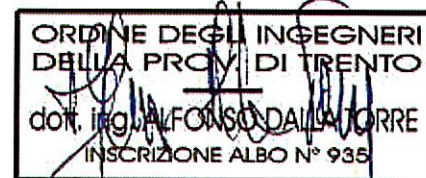
PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO
Servizio Gestione Strade

Lavori: Manutenzione straordinaria del viadotto Montevideo al Km 153+042 della S.S. 45 bis della Gardesana Occidentale - Lavori di somma urgenza per la ristrutturazione della struttura in acciaio del Viadotto Montevideo – Analisi campate dalla 2 alla 7



Valutazione della sicurezza e interventi di adeguamento strutturale delle campate dalla 2 alla 7 ai sensi del capitolo 8.4.33. del D.M. 17.01.2018

RELAZIONE DI CALCOLO



Studio tecnico
Ing. Alfonso Dalla Torre
Via G. Romagnosi n° 30
38122 TRENTO
Tel/fax 0461-986155
E-mail: studioigt@iol.it

Trento, ottobre 2025

Sommario

01. Premesse	2
02. Analisi dei carichi	3
03. Massimi effetti flessionali dovuti ai carichi mobili	3
04. Massimi effetti torsionali dovuti ai carichi mobili	4
05. Analisi statica della campata n° 7 con $R = 200$ m	4
06. Carichi uniformemente distribuiti q con eccentricità y_q	5
07. Carichi concentrati Q con eccentricità y_Q	7
08. Massimo momento flettente dovuto ai pesi propri e ai permanenti portati	9
09. Massimo momento torcente dovuto ai pesi propri e ai permanenti portati	10
10. Massimo momento flettente dovuto ai carichi mobili distribuiti	11
11. Massimo momento flettente dovuto ai carichi mobili concentrati:	12
12. Massimo momento flettente dovuto ai carichi mobili distribuiti e concentrati	13
13. Verifiche di resistenza in mezzera trave con $R = 200$ m	13
14. Massimo momento torcente dovuto ai carichi mobili distribuiti	15
15. Massimo momento torcente dovuto ai carichi mobili concentrati	16
16. Massimo momento torcente dovuto ai carichi mobili distribuiti e concentrati	16
17. Caratteristiche della sollecitazione nelle travi curve	17
18. Tensioni in mezzera della campata con $R = 200$ m - Sezione rinforzata	18
19. I giunti di forza della campata n° 7 con $R = 200$ m	20
20. Tensioni sui giunti G2 e G3 agli SLU - Sezione indeb. dalla corr. e dai fori	20
21. Tensioni sui giunti G2 e G3 agli SLU – Sezione rinforzata	23
22. Verifiche bulloni dei giunti G2 e G3 – Sezione rinforzata	24
23. I giunti G1 e G4	26
24. Verifiche in corso d'opera (sostituzione bulloni)	26
25. Verifiche a ribaltamento della campata n° 7	27
26. Instabilità locale	27
27. Conclusioni	28

01. Premesse

Con Determina n° 1463 di data 17.02.2025 il Servizio Gestione Strade della Provincia Autonoma di Trento ha affidato a chi scrive l'incarico:

Progettazione e Direzione lavori relative ai lavori di somma urgenza per la ristrutturazione della struttura in acciaio del Viadotto Montevideo – Analisi campate dalla 2 alla 7

Il viadotto è stato costruito nei primi anni '80 e, causa le pessime condizioni dell'opera, l'esecuzione dei lavori in progetto è prevista in regime di *Somma urgenza*.

Il viadotto è composto da n° 7 campate in semplice appoggio, con luce di calcolo pari a m 73,10; alcune campate risultano rettilinee, alcune con raggi di curvatura pari a $R = 350$ m e una con $R = 200$ m.

Si precisa che chi scrive nel maggio 2025, durante i lavori di somma urgenza per il risanamento strutturale della prima campata, ha già redatto una prima Relazione avente per oggetto:

Valutazione della sicurezza e interventi di adeguamento strutturale della prima campata ai sensi del capitolo 8.4.3. del D.M. 17.01.2018.

Benché la prima campata risulti in curva solo per metà della luce circa, nei calcoli originali essa venne progettata e calcolata come campata interamente in curva con $R = 350$ m.

Qui di seguito si riporta l'analisi statica delle campate dalla 2 alla 7; si analizza in particolare la campata n° 7 con $R = 200$ m, certamente la più sollecitata a causa degli effetti torsionali indotti dalla curvatura d'asse.

Qui di seguito si determinano in particolare le principali caratteristiche della sollecitazione (M , T e M_t) della travata con $R = 200$ m, caratteristiche da porre poi a confronto con quelle ricavate nella n/s precedente Relazione del maggio 2025 e con quelle riportate Relazione di calcolo originale del 1981 a firma dello Studio Prof. Ing. Fabrizio De Miranda.

La presente Relazione dimostra anche che, per angoli al centro $\alpha < 0,4$ rad, la trasformazione di una trave curva in una trave dritta di lunghezza $L = R \cdot \alpha$ è sufficientemente accurata per quanto riguarda la determinazione dei momenti flettenti e delle forze di taglio; tuttavia questa semplificazione non è ovviamente accettabile per quanto riguarda i momenti torcenti.

Successivamente, nel giugno 2025 il Servizio Gestione Strade della P.A.T. ha affidato anche allo Studio Pojer & Engineering S.r.l. l'incarico di progettazione strutturale dei lavori di completamento

del ripristino strutturale del cassone in acciaio delle campate dalla n° 2 alla n° 7 del viadotto in epigrafe.

Si precisa che i lavori in oggetto sono volti a ripristinare la sicurezza strutturale preesistente e, ai sensi del par. 8.4 delle NTC 2018, sono da classificarsi come:

Interventi di riparazione o locali: interventi che interessino singoli elementi strutturali e che, comunque, non riducano le condizioni di sicurezza preesistenti.

02. Analisi dei carichi

Pesi propri + permanenti portati

$$g_{\text{lacc}} = \text{peso proprio struttura in acciaio} = 4,30 \text{ t/ml (0,24 t/mq)}$$

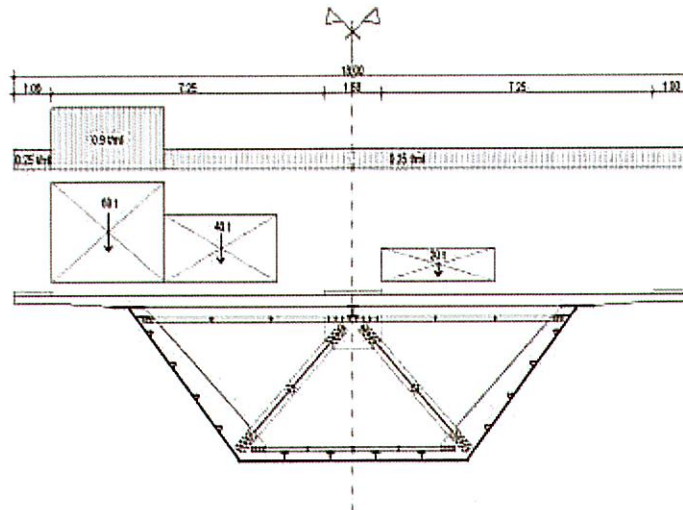
$$g_{\text{1cls}} = \text{peso proprio soletta in c.a.} = 12,90 \text{ t/ml (0,72 t/mq)}$$

$$g_2 = \text{pesi permanenti portati} = 4,50 \text{ t/ml (0,25 t/mq)}$$

$$g = g_{\text{lacc}} + g_{\text{1cls}} + g_2 = 21,7 \text{ t/ml}$$

03. Massimi effetti flessionali dovuti ai carichi mobili

I massimi effetti flessionali si ottengono caricando tutto l'impalcato così come indicato nella seguente sezione:



Eccentricità dovuta ai carichi mobili distribuiti:

$$q = 0,90 \times 3,00 + 0,25 \times (18,00 - 3,00) = 6,45 \text{ t/ml}$$

$$m_i = 0,25 \times 1,00 \times 8,50 + 0,90 \times 3,00 \times 6,50 + 0,25 \times 5,00 \times 2,50 - 0,25 \times 9,00 \times 4,50 = 12,70 \text{ tm/ml}$$

$$y_q = m_i/q = - 2,00 \text{ m}$$

Eccentricità dovuta ai carichi mobili concentrati:

$$Q = 60+40+20 = 120 \text{ t}$$

$$M_i = 60 \times 6,50 + 40 \times 3,50 - 20 \times 2,25 = 485 \text{ tm}$$

$$y_Q = M_i/Q = - 4,00 \text{ m}$$

N.B. L'eccentricità è considerata positiva se diretta verso l'interno della curva.

04. Massimi effetti torsionali dovuti ai carichi mobili

I massimi effetti torsionali si ottengono caricando solo metà impalcato.

Eccentricità dovuta ai carichi mobili distribuiti:

$$q = 0,25 \times 1,00 + 0,9 \times 3,00 + 0,25 \times 5,00 = 4,20 \text{ t/ml}$$

$$m_i = 0,25 \times 1,00 \times 8,50 + 0,9 \times 3,00 \times 6,50 + 0,25 \times 5,00 \times 2,50 = 22,80 \text{ tm/ml}$$

$$y_q = 22,80/4,20 = - 5,40 \text{ m}$$

Eccentricità dovuta ai carichi mobili concentrati:

$$Q = 60+40 = 100 \text{ t}$$

$$M_i = 60 \times 6,50 + 40 \times 3,50 = 530 \text{ tm}$$

$$y_Q = 530/100 = - 5,30 \text{ m}$$

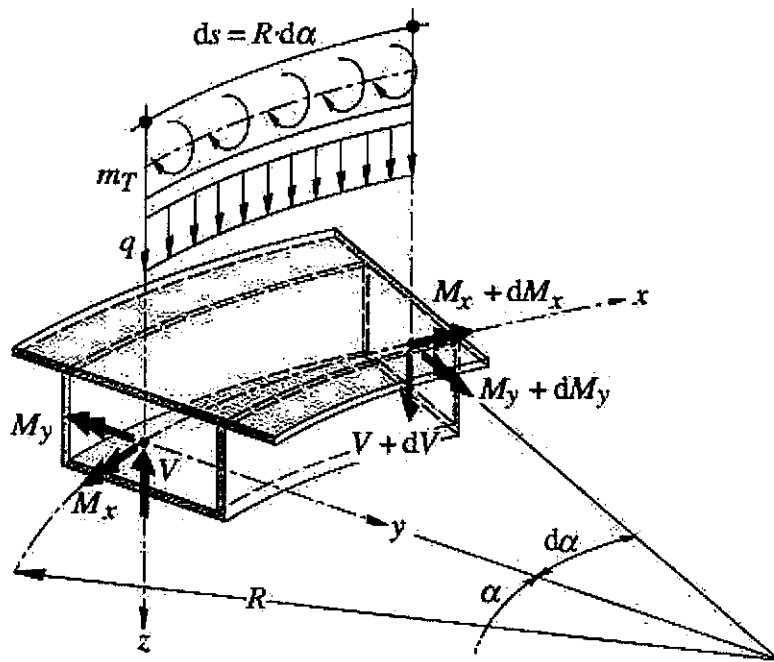
05. Analisi statica della campata n° 7 con R = 200 m

Si considera quindi la campata n° 7 ($L = 73.10 \text{ m}$) che presenta ritegni torsionali alle estremità A e B e raggio di curvatura orizzontale $R = 200 \text{ m}$ costante.

La sezione della trave è chiusa (a cassone), con l'asse x in direzione longitudinale e relativa coordinata curvilinea indicata con s.

L'angolo al centro è pari a:

$$\alpha = \frac{L}{R} = \frac{73.10}{200} \cong 0,37 \text{ rad} \cong 21^\circ$$



Per le travi curve con raggio costante le equazioni differenziali che reggono la flessione M_y nel piano verticale e il momento torsionale M_x sono:

$$\frac{d^2 M_y}{ds^2} + \frac{M_y}{R^2} - \frac{m_t}{R} = -q$$

$$\frac{dM_x}{ds} - \frac{M_y}{R} = -m_t$$

dove:

- s = ascissa curvilinea lungo l'asse x ;
- m_t = coppia torcente applicata lungo l'asse curvilineo x ;
- q = carico lineare centrato lungo l'asse curvilineo x .

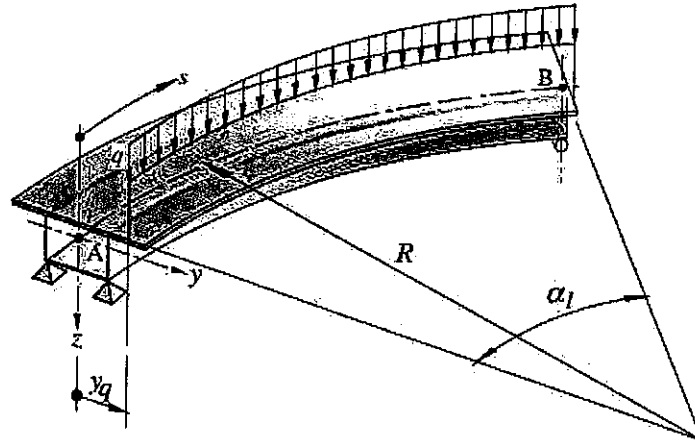
06. Carichi uniformemente distribuiti q con eccentricità y_q

Per una trave soggetta ad carico uniformemente distribuito q con eccentricità y_q , integrando le equazioni differenziali di cui sopra con le seguenti condizioni al contorno:

$$M_y(0) = 0$$

$$M_y(L) = 0$$

$$m_t = q \cdot y_q \text{ (con } y_q \text{ positivo se diretto verso il centro)}$$



si ottengono le seguenti espressioni per i momenti flettenti e torcenti in funzione di s:

$$M_y(s) = (q \cdot R^2 - m_t \cdot R) \cdot \left[\cos\left(\frac{s}{R}\right) + \frac{1 - \cos\left(\frac{L}{R}\right)}{\sin\left(\frac{L}{R}\right)} \cdot \sin\left(\frac{s}{R}\right) - 1 \right]$$

$$M_x(s) = q \cdot R \cdot \left[\frac{L}{2} - s + \left(R - \frac{m_t}{q} \right) \cdot \left(-\frac{1 - \cos\left(\frac{L}{R}\right)}{\sin\left(\frac{L}{R}\right)} \cdot \cos\left(\frac{s}{R}\right) + \sin\left(\frac{s}{R}\right) \right) \right]$$

Per s = 0:

$$M_y(0) = 0$$

$$M_x(0) = q \cdot R \cdot \left[\frac{L}{2} + \left(R - \frac{m_t}{q} \right) \cdot \left(-\frac{1 - \cos\left(\frac{L}{R}\right)}{\sin\left(\frac{L}{R}\right)} \right) \right]$$

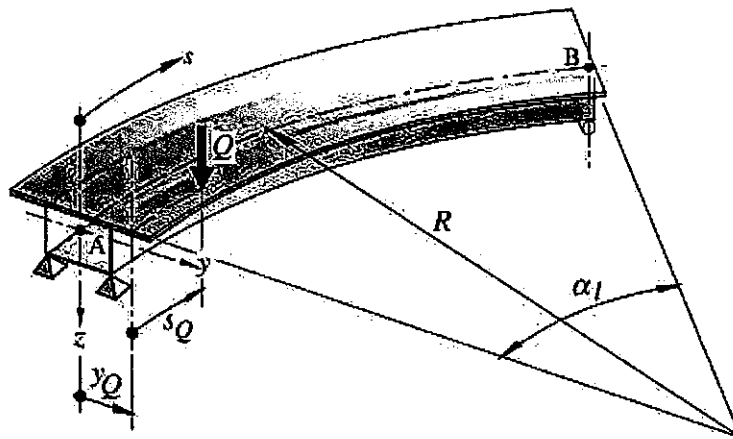
Per $s = L/2$:

$$M_y\left(\frac{L}{2}\right) = (q \cdot R^2 - m_t \cdot R) \cdot \left[\cos\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right) + \frac{1 - \cos\left(\frac{L}{R}\right)}{\sin\left(\frac{L}{R}\right)} \cdot \sin\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right) - 1 \right]$$

$$M_x\left(\frac{L}{2}\right) = q \cdot R \cdot \left[\left(R - \frac{m_t}{q} \right) \cdot \left(-\frac{1 - \cos\left(\frac{L}{R}\right)}{\sin\left(\frac{L}{R}\right)} \cdot \cos\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right) + \sin\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right) \right) \right]$$

$$M_x\left(\frac{L}{2}\right) = 0$$

07. Carichi concentrati Q con eccentricità y_Q



$$V_A = Q \cdot \left(1 - \frac{s_Q}{L} \right)$$

$$M_{x,A} = V_A \cdot R - Q \cdot (R - y_Q) \cdot \frac{\sin\left(\frac{L - s_Q}{R}\right)}{\sin\left(\frac{L}{R}\right)}$$

Per $s_Q = 0$:

$$V_A = Q$$

$$M_{x,A} = Q \cdot y_Q$$

Per $s_Q = L/2$:

$$V_A = \frac{Q}{2}$$

$$M_{x,A} = \frac{Q}{2} \cdot R - Q \cdot (R - y_Q) \cdot \frac{\sin\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right)}{\sin\left(\frac{L}{R}\right)}$$

sostituendo i valori soprariportati nelle equazioni sotto si ottengono le relazioni per i momenti flettenti e torsionali dovuti al carico eccentrico Q.

Per $0 < s < s_Q$:

$$V(s) = V_A$$

$$M_y(s) = V_A \cdot R \cdot \sin\left(\frac{s}{R}\right) - M_{x,A} \cdot \sin\left(\frac{s}{R}\right)$$

$$M_x(s) = M_{x,A} \cdot \cos\left(\frac{s}{R}\right) + V_A \cdot R \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{s}{R}\right)\right)$$

Per $s_Q < s < L$:

$$V(s) = V_A - Q$$

$$M_y(s) = V_A \cdot R \cdot \sin\left(\frac{s}{R}\right) - M_{x,A} \cdot \sin\left(\frac{s}{R}\right) - Q \cdot (R - y_Q) \cdot \sin\left(\frac{s - s_Q}{R}\right)$$

$$M_x(s) = M_{x,A} \cdot \cos\left(\frac{s}{R}\right) + V_A \cdot R \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{s}{R}\right)\right) + Q \cdot (R - y_Q) \cdot \cos\left(\frac{s - s_Q}{R}\right) - Q \cdot R$$

Per $s_Q = 0$ e $s = 0$:

$$V_A = Q$$

$$M_{x,A} = Q \cdot y_Q$$

$$M_y(0) = 0$$

$$M_x(0) = Q \cdot y_Q$$

Per $s_Q = 0$ e $s = L/2$:

$$V_A = Q$$

$$M_{x,A} = Q \cdot y_Q$$

$$M_y\left(\frac{L}{2}\right) = Q \cdot R \cdot \sin\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right) - Q \cdot y_Q \cdot \sin\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right)$$

$$M_x\left(\frac{L}{2}\right) = Q \cdot y_Q \cdot \cos\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right) + Q \cdot R \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right)\right)$$

Per $s_Q = L/2$ e $s = 0$:

$$V_A = \frac{Q}{2}$$

$$M_{x,A} = \frac{Q}{2} \cdot R - Q \cdot (R - y_Q) \cdot \frac{\sin\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right)}{\sin\left(\frac{L}{R}\right)}$$

$$M_y(0) = 0$$

$$M_x(0) = M_{x,A}$$

Per $s_Q = L/2$ e $s = L/2$:

$$V_A = \frac{Q}{2}$$

$$M_{x,A} = \frac{Q}{2} \cdot R - Q \cdot (R - y_Q) \cdot \frac{\sin\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right)}{\sin\left(\frac{L}{R}\right)}$$

$$M_y\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{Q}{2} \cdot R \cdot \sin\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right) - M_{x,A} \cdot \sin\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right)$$

$$M_x\left(\frac{L}{2}\right) = M_{x,A} \cdot \cos\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right) + \frac{Q}{2} \cdot R \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right)\right)$$

08. Massimo momento flettente dovuto ai pesi propri e ai permanenti portati

Il massimo momento flettente dovuto ai carichi g si ricava ponendo $s = L/2$ e $m_t = 0$:

$$M_y(s) = (q \cdot R^2 - m_t \cdot R) \cdot \left[\cos\left(\frac{s}{R}\right) + \frac{1 - \cos\left(\frac{L}{R}\right)}{\sin\left(\frac{L}{R}\right)} \cdot \sin\left(\frac{s}{R}\right) - 1 \right]$$

$$M_y\left(\frac{L}{2}\right) = (21,7 \cdot 200^2) \cdot \left[\cos\left(\frac{73,10}{400}\right) + \frac{1 - \cos\left(\frac{73,10}{200}\right)}{\sin\left(\frac{73,10}{200}\right)} \cdot \sin\left(\frac{73,10}{400}\right) - 1 \right] \cong 14.699 \text{ tm}$$

Per le travi rettilinee il massimo momento dovuto ai pesi propri + permanenti portati è dato da:

$$M_{g \max} \cong \frac{21,7 \cdot 73,10^2}{8} \cong 14.500 \text{ tm}$$

valore inferiore dell'1% circa a quello sopra ricavato.

A pag. 84 della Relazione di calcolo del 1981 del Prof. De Miranda, per la sezione di mezzeria della campata con $R = 200$ m è indicato il seguente valore (per le n° 5 fasi di costruzione):

$$M_{g \max} \cong 51 - 580 + 55 + 11.871 + 2.897 \cong 14.294 \text{ tm}$$

Valore molto vicino a quello qui ricavato.

09. Massimo momento torcente dovuto ai pesi propri e ai permanenti portati

Il momento torcente sui ritegni torsionali di estremità ($s = 0$) è dato da:

$$M_x(s) = q \cdot R \cdot \left[\frac{L}{2} - s + \left(R - \frac{m_t}{q} \right) \cdot \left(-\frac{1 - \cos\left(\frac{L}{R}\right)}{\sin\left(\frac{L}{R}\right)} \cdot \cos\left(\frac{s}{R}\right) + \sin\left(\frac{s}{R}\right) \right) \right]$$

$$M_x(0) = q \cdot R \cdot \left[\frac{L}{2} + \left(R - \frac{m_t}{q} \right) \cdot \left(-\frac{1 - \cos\left(\frac{L}{R}\right)}{\sin\left(\frac{L}{R}\right)} \right) \right]$$

$$M_x(0) = 21,7 \cdot 200 \cdot \left[\frac{73,10}{2} + 200 \cdot \left(-\frac{1 - \cos\left(\frac{73,10}{200}\right)}{\sin\left(\frac{73,10}{200}\right)} \right) \right] = -1.790 \text{ tm}$$

A pag. 80 della Relazione di calcolo del 1981 del Prof. De Miranda, per la sezione $s = 0$ della campata con $R = 200$ m è indicato il seguente valore di poco superiore (in valore assoluto):

$$M_x(0) = 22 + 72 - 7 + 1400 + 374 = 1.861 \text{ tm}$$

10. Massimo momento flettente dovuto ai carichi mobili distribuiti

$$q = 6,45 \text{ t/ml}$$

$$m_t = 12,70 \text{ tm/ml}$$

$$y_q = -m_t/q = -2,00 \text{ m}$$

$$M_y(s) = (q \cdot R^2 - m_t \cdot R) \cdot \left[\cos\left(\frac{s}{R}\right) + \frac{1 - \cos\left(\frac{L}{R}\right)}{\sin\left(\frac{L}{R}\right)} \cdot \sin\left(\frac{s}{R}\right) - 1 \right]$$

$$M_y\left(\frac{L}{2}\right) = (q \cdot R^2 - m_t \cdot R) \cdot \left[\cos\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right) + \frac{1 - \cos\left(\frac{L}{R}\right)}{\sin\left(\frac{L}{R}\right)} \cdot \sin\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right) - 1 \right]$$

$$M_y\left(\frac{L}{2}\right) = (6,45 \cdot 200^2 + 12,70 \cdot 200) \cdot \left[\cos\left(\frac{73,10}{2 \cdot 200}\right) + \frac{1 - \cos\left(\frac{73,10}{200}\right)}{\sin\left(\frac{73,10}{200}\right)} \cdot \sin\left(\frac{73,10}{2 \cdot 200}\right) - 1 \right]$$

$$M_y\left(\frac{L}{2}\right) \cong 4,412 \text{ tm}$$

Da notare che il massimo momento flettente è di poco superiore (2% circa) a quello provocato dallo stesso carico q con eccentricità nulla su una campata rettilinea:

$$M_y^r\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{6,45 \cdot 73,10^2}{8} \cong 4,308 \text{ tm}$$

Momento torcente dovuto ai carichi mobili distribuiti ($s = 0$):

$$M_x(0) = q \cdot R \cdot \left[\frac{L}{2} + \left(R - \frac{m_t}{q} \right) \cdot \left(-\frac{1 - \cos\left(\frac{L}{R}\right)}{\sin\left(\frac{L}{R}\right)} \right) \right]$$

$$M_x(0) = 6,45 \cdot 200 \cdot \left[\frac{73,10}{2} + (200 + 2,00) \cdot \left(-\frac{1 - \cos\left(\frac{73,10}{200}\right)}{\sin\left(\frac{73,10}{200}\right)} \right) \right] = -1,009 \text{ tm}$$

11. Massimo momento flettente dovuto ai carichi mobili concentrati:

$$Q = 60 + 40 + 20 = 120 \text{ t}$$

$$M_t = 485 \text{ tm}$$

$$y_Q = M_t/Q = -4,00 \text{ m}$$

$$s = \frac{L}{2}$$

$$s_Q = \frac{L}{2}$$

$$V_A = Q \cdot \left(1 - \frac{s_Q}{L}\right) = \frac{Q}{2} = 60 \text{ t}$$

$$M_{x,A} = V_A \cdot R - Q \cdot (R - y_Q) \cdot \frac{\sin\left(\frac{L - s_Q}{R}\right)}{\sin\left(\frac{L}{R}\right)}$$

$$M_{x,A} = 60 \cdot 200 - 120 \cdot (200 + 4,00) \cdot \frac{\sin\left(\frac{73,10}{400}\right)}{\sin\left(\frac{73,10}{200}\right)} = -447 \text{ tm}$$

$$M_y(s) = V_A \cdot R \cdot \sin\left(\frac{s}{R}\right) - M_{x,A} \cdot \sin\left(\frac{s}{R}\right)$$

$$M_y\left(\frac{L}{2}\right) = 60 \cdot 200 \cdot \sin\left(\frac{73,10}{400}\right) + 447 \cdot \sin\left(\frac{73,10}{400}\right) =$$

$$M_y\left(\frac{L}{2}\right) = 2.262 \text{ tm}$$

Da notare che anche il momento flettente è di poco superiore (2% circa) a quello provocato dallo stesso carico Q con eccentricità nulla su una campata rettilinea:

$$M_y^r\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{120 \cdot 73,10}{4} \cong 2.193 \text{ tm}$$

Momento torcente agli appoggi ($s = 0$) dovuto ai carichi mobili concentrati in mezzeria ($s_Q = L/2$):

$$M_x(s) = M_{x,A} \cdot \cos\left(\frac{s}{R}\right) + V_A \cdot R \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{s}{R}\right)\right)$$

$$M_x(0) = M_{x,A} = -447 \text{ tm}$$

Momento torcente in mezzeria ($s = L/2$) dovuto ai carichi mobili concentrati in mezzeria ($s_Q = L/2$):

$$M_x(s) = M_{x,A} \cdot \cos\left(\frac{s}{R}\right) + V_A \cdot R \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{s}{R}\right)\right)$$

$$M_x\left(\frac{L}{2}\right) = -447 \cdot \cos\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right) + 60 \cdot 200 \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{L}{2 \cdot R}\right)\right) = -240 \text{ tm}$$

12. Massimo momento flettente dovuto ai carichi mobili distribuiti e concentrati

$$M_{y,\text{tot}}\left(\frac{L}{2}\right) \cong 4.412 + 2.262 = 6.674 \text{ tm}$$

Per la travata rettilinea si era ottenuto un momento flettente massimo pari a 6.500 tm circa.

N.B.

Per i massimi effetti flessionali è quindi confermato che i risultati ottenuti per la travata rettilinea (vedasi n/s precedente Relazione del maggio 2025) possono essere estesi anche alle travate con $R = 350 \text{ m}$ e $R = 200 \text{ m}$.

Analogo discorso vale per la forza di taglio che non risulta influenzata dalla curvatura d'asse.

Qui di seguito si ripetono comunque le verifiche di resistenza per la trave con $R = 200 \text{ m}$.

13. Verifiche di resistenza in mezzera trave con $R = 200 \text{ m}$

Si riporta qui di seguito il calcolo delle tensioni nella sezione di mezzera indebolita dalla corrosione, ovvero con lo spessore della lamiera di fondo pari a mm 27 anziché i mm 30 originari.

Anche i ribs di fondo, ormai pesantemente attaccati dalla ruggine, vengono conteggiati al 50%.

$$t_s = 2,4 \text{ cm}$$

$$t_i = 2,7 \text{ cm} \text{ spessore ridotto dalla corrosione}$$

$$t_{wi} = 1,0 \text{ cm}$$

$$t_{we} = 1,2 \text{ cm}$$

$$A_{\text{sup}} = 408 \text{ cm}^2$$

$$J_{\text{sup}} = 196 \text{ cm}^4$$

$$y_{g,\text{sup}} \cong 408,8 \text{ cm}$$

$$A_{\text{inf}} = 600 \cdot 2,7 = 1.620 \text{ cm}^2$$

$$J_{\text{inf}} = \frac{600 \cdot 2,7^3}{12} \cong 984 \text{ cm}^4$$

$$y_{g,\text{inf}} = 1,35 \text{ cm}$$

$$A_w = \frac{1}{\sin 53,8} \cdot 404,6 \cdot 2,2 = 1.103 \text{ cm}^2$$

$$J_w = \frac{1}{\sin 53,8} \cdot \frac{404,6^3}{12} \cdot 2,2 = 15.047.588 \text{ cm}^4$$

$$y_{g,w} = 205 \text{ cm}$$

$$A_{\text{ribs}} = 198 \cdot 50 / 100 \cong 99 \text{ cm}^2 \quad \text{conteggiati al 50\%}$$

$$J_{\text{ribs}} = 8.880 \cdot 50 / 100 \cong 4.440 \text{ cm}^4$$

$$y_{g,\text{ribs}} = 17 + 2,7 = 19,7 \text{ cm}$$

$$A_L = 118 \text{ cm}^2$$

$$J_L = 14.919 \text{ cm}^4$$

$$y_{g,L} = 397$$

Riepilogo parametri statici in mezzeria – Sezione indebolita dalla corrosione

	$A_{\text{tot}} \text{ (cm}^2\text{)}$	$S_{x-x} \text{ (cm}^3\text{)}$	$y_g \text{ (cm)}$	$J_{x-x} \text{ (cm}^4\text{)}$	$W_{x,\text{sup}} \text{ (cm}^3\text{)}$	$W_{x,\text{inf}} \text{ (cm}^3\text{)}$
n = 6	11.699	3.992.817	341,3	294.462.704	2.983.392	862.770
n = 18	6.132	1.626.984	265,3	219.611.488	1.257.207	827.729

Allo SLU:

$$M_y \left(\frac{L}{2} \right) \cong 14.699 \text{ tm}$$

$$M_g \cong 14.699 \cdot 1,35 \cong 19.844 \text{ tm}$$

$$M_{y, \text{tot}} \left(\frac{L}{2} \right) \cong 4.412 + 2.262 = 6.674 \text{ tm}$$

$$M_q \cong 6.674 \cdot 1,35 \cong 9.010 \text{ tm}$$

$$\sigma_g \cong \frac{19.844 \cdot 10^5}{827.729} \cong 2.397 \text{ Kg/cm}^2 \quad (n = 18)$$

$$\sigma_q \cong \frac{9.010 \cdot 10^5}{862.770} \cong 1.044 \text{ Kg/cm}^2 \quad (n = 6)$$

$$\sigma_{\text{tot}} \cong 2.397 + 1.044 \cong 3.441 \text{ Kg/cm}^2 > \frac{3.550}{1,05} = 3.381$$

N.B. La verifica non risulta soddisfatta per cui nella sezione di mezzeria di tutte le campate dalla 2 alla 7 è da prevedersi l'intervento di rinforzo della lamiera di fondo così come indicato per la campata n° 1.

14. Massimo momento torcente dovuto ai carichi mobili distribuiti

$$q = 4,20 \text{ t/ml}$$

$$m_t = - 22,80 \text{ tm/ml}$$

$$y_q = - 22,80/4,20 = - 5,40 \text{ m}$$

$$s = 0$$

$$M_x(s) = q \cdot R \cdot \left[\frac{L}{2} - s + \left(R - \frac{m_t}{q} \right) \cdot \left(- \frac{1 - \cos\left(\frac{L}{R}\right)}{\sin\left(\frac{L}{R}\right)} \cdot \cos\left(\frac{s}{R}\right) + \sin\left(\frac{s}{R}\right) \right) \right]$$

$$M_x(0) = 4,20 \cdot 200 \cdot \left[\frac{73,10}{2} + (200 + 5,40) \cdot \left(- \frac{1 - \cos\left(\frac{73,10}{200}\right)}{\sin\left(\frac{73,10}{200}\right)} \right) \right] \cong -1.185 \text{ tm}$$

Il momento torcente in mezzeria è ovviamente nullo.

15. Massimo momento torcente dovuto ai carichi mobili concentrati

Eccentricità dovuta ai carichi mobili concentrati:

$$Q = 60 + 40 = 100 \text{ t}$$

$$M_t = 60 \times 6,50 + 40 \times 3,50 = 530 \text{ tm}$$

$$y_Q = 530/100 = -5,30 \text{ m}$$

Per:

$$s = 0$$

$$s_Q = 0$$

$$V_A = Q \cdot \left(1 - \frac{s_Q}{L}\right) = Q = 100 \text{ t}$$

$$M_{x,A} = V_A \cdot R - Q \cdot (R - y_Q) \cdot \frac{\sin\left(\frac{L - s_Q}{R}\right)}{\sin\left(\frac{L}{R}\right)}$$

$$M_{x,A} = 100 \cdot 200 - 100 \cdot (200 + 5,30) = -530 \text{ tm}$$

$$M_x(s) = M_{x,A} \cdot \cos\left(\frac{s}{R}\right) + V_A \cdot R \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{s}{R}\right)\right)$$

$$M_x(0) = M_{x,A} = -530 \text{ tm}$$

$$M_x\left(\frac{L}{2}\right) = -530 \cdot \cos\left(\frac{73,10}{400}\right) + 100 \cdot 200 \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{73,10}{400}\right)\right) = -188 \text{ tm}$$

$$M_x(L) = 0$$

16. Massimo momento torcente dovuto ai carichi mobili distribuiti e concentrati

$$M_{x,tot}(0) \cong -1.185 - 530 = -1.715 \text{ tm}$$

La Relazione di calcolo del 1981 a pag. 80 riporta un valore superiore (in assoluto) pari a 2.017 tm.

17. Caratteristiche della sollecitazione nelle travi curve

Si è visto in precedenza che le sollecitazioni dovute al momento flettente e al taglio nelle travi curve non si discostano molto da quelle ricavate per le travi rettilinee (per valori di α non troppo grandi); quindi i relativi valori delle sollecitazioni indicati nella prima Relazione del maggio 2025 possono essere considerati validi per tutte le campate.

Per quanto sopra sia le campate rettilinee che quelle in curva non presentano variazioni di spessore nella lamiera di fondo sollecitata soprattutto a flessione.

Per far fronte alle maggiori sollecitazioni dovute al momento torcente, rispetto alle travate rettilinee le campate curve presentano lo spessore delle anime esterne maggiorato in prossimità degli appoggi; in particolare lo spessore è stato portato da 14 mm a 16 mm nelle travi con $R = 350$ m e a 18 mm nelle travi con $R = 200$ m.

A titolo di confronto nella tabella che segue si riportano, per le varie campate, i valori massimi dei momenti flettenti, dei momenti torcenti e dei tagli (SLE combinazione rara). I valori indicati in nero sono stati estratti dalla Relazione del 1981 (in t e t_m); i valori indicati in rosso sono quelli ricavati dalla presente analisi.

Nell'ultima riga sono riportate le massime sollecitazioni tangenziali estratte dalla Relazione del 1981 (le sollecitazioni torsionali si sommano a quelle taglianti sulle anime esterne e si sottraggono su quelle interne).

	R = ∞		R = 350		R = 200	
$M_{f,max}$ (pesi pr. + perm.)	13.997	14.500	14.089	14.560	14.294	14.699
$M_{f,max}$ (carichi mobili)	6.687	6.500	6.814	6.578	6.961	6.674
$M_{t,max}$ (pesi pr. + perm.)	0	0	1.002	1.013	1.861	1.790
$M_{t,max}$ (carichi mobili)	1.258	1.363	1.698	1.715	2.017*	1.715
T_{max} (pesi pr. + perm.)	766	793	766	793	766	793
T_{max} (carichi mobili)	360 (238)	356 (296)	360 (296)	356 (296)	364 (299)	356 (296)
τ_{max} (Kg/cm ²)	1.135	1.230	1.116	1.128	1.078	974

Come già evidenziato, si può notare che i massimi momenti flettenti non subiscono incrementi importanti nelle campate in curva rispetto a quelle rettilinee. I momenti torcenti subiscono altresì incrementi significativi.

Nella campata con $R = 200$ m il massimo valore del momento torcente dovuto ai carichi mobili ricavato dal Prof. de Miranda (2.017 tm) supera di circa il 18% quello ottenuto con la presente analisi (1.715 tm). La circostanza è dovuta ai maggiori carichi mobili applicati sulle travi curve in combinazione CM2 (max torcenti) così come indicato a pagg. 28 e 55 della Relazione del 1981. Si sottolinea che tale combinazione di carico non può più verificarsi per la presenta della barriera spartitraffico centrale.

I valori delle sollecitazioni tangenziali sono da confrontare con:

$$\tau_{adm} = \frac{\sigma_{adm}}{\sqrt{3}} \cong 1.500 \text{ Kg/cm}^2$$

Dalla tabella si può notare che le caratteristiche della sollecitazione qui ricavate sono molto prossime a quelle di progetto del 1981 e che anche le sollecitazioni tangenziali rientrano nei valori ammessi dalle norme.

N.B.

Anche per le campate dalla 2 alla 7 si ribadisce quindi la necessità di eseguire gli interventi di rinforzo previsti per la prima campata, così come indicati nei nostri elaborati di data maggio 2025.

Gli interventi indicati per la prima campata valgono quindi quali interventi di adeguamento strutturale anche per tutte le altre campate (ai sensi del capitolo 8.4.3. del D.M. 17.01.2018).

18. Tensioni in mezzeria della campata con $R = 200$ m - Sezione rinforzata

Poiché le tensioni in mezzeria della sezione indebolita dalla corrosione superano quelle di progetto f_{yd} si prevede anche qui un intervento di rinforzo mediante l'aggiunta di n° 3 nuovi ribs con sezione a T con un'anima da 190x15 mm e un'ala da 200x20; l'altezza totale è quindi pari a 190+20= 210 mm. I nuovi ribs, della lunghezza di 13.100 mm saranno collocati a cavallo della mezzeria intervallati a quelli vecchi.

Si riporta qui di seguito il calcolo della tensione in mezzeria supponendo i vecchi ribs ormai inefficaci e sostituiti dai nuovi; ovviamente i nuovi ribs agiranno solo per i carichi mobili ($n = 6$).

$$t_s = 2,4 \text{ cm}$$

$$t_i = 2,7 \text{ cm} \text{ spessore ridotto dalla corrosione}$$

$$t_{wi} = 1,0 \text{ cm}$$

$$t_{we} = 1,2 \text{ cm}$$

Nuovi ribs (n° 3)

$$A_{ribs} = 3 \cdot (20 \cdot 2,0 + 19,0 \cdot 1,5) \cong 205,5 \text{ cm}^2$$

$$J_{ribs} = 3 \cdot 2.706 \cong 8.118 \text{ cm}^4$$

$$y_{g,ribs} \cong 15,6 + 2,7 = 18,3 \text{ cm}$$

Riepilogo parametri statici in mezzeria – Sezione rinforzata con n° 3 ribs

	$A_{tot} \text{ (cm}^2\text{)}$	$S_{x-x} \text{ (cm}^3\text{)}$	$y_g \text{ (cm)}$	$J_{x-x} \text{ (cm}^4\text{)}$	$W_{x,sup} \text{ (cm}^3\text{)}$	$W_{x,inf} \text{ (cm}^3\text{)}$
n = 6	11.805	3.994.628	338,0	305.565.673	3.006.759	903.042

$$\sigma_g \cong 2.397 \text{ Kg/cm}^2 \quad (n = 18)$$

$$M_{y,tot} \left(\frac{L}{2} \right) \cong 4.412 + 2.262 = 6.674 \text{ tm}$$

$$M_q \cong 6.674 \cdot 1,35 \cong 9.010 \text{ tm}$$

$$\sigma_q \cong \frac{9.010 \cdot 10^5}{903.042} \cong 998 \text{ Kg/cm}^2 \quad (n = 6)$$

$$\sigma_{tot} \cong 2.384 + 998 \cong 3.382 \text{ Kg/cm}^2 \cong \frac{3.550}{1,05} = 3.381$$

Si ritiene la verifica soddisfatta.

19. I giunti di forza della campata n° 7 con R = 200 m

A differenza delle altre campate che presentano n° 4 giunti di forza, la campata n° 7 presenta n° 6 giunti denominati qui G1/1, G1/2, G2, G3, G4/2, G4/1.

I giunti G1/1, G1/2, G4/1, G4/2 sono uguali tra loro e corrispondono ai giunti G1 e G4 delle altre travate, sia geometricamente che per il numero di bulloni ($n_b = 224$).

I giunti di forza centrali G2 e G3 della campata con R = 200 m presentano altresì un numero di bulloni maggiore rispetto alle altre, ovvero:

$$R = \infty \Rightarrow n_b = 320$$

$$R = 350 \Rightarrow n_b = 320$$

$$R = 200 \Rightarrow n_b = 418$$

20. Tensioni sui giunti G2 e G3 agli SLU - Sezione indeb. dalla corr. e dai fori

Momenti flettenti sui giunti centrali G2 e G3 (vedasi pag. 83 della Relazione di calcolo del 1981):

$$M_{g1} \cong -20 \text{ tm}$$

$$M_{g2} \cong -899 \text{ tm}$$

$$M_{g3} \cong 84 \text{ tm}$$

$$M_{g4} \cong 11.836 \text{ tm}$$

$$M_{g5} \cong 2.813 \text{ tm}$$

Alle Tensioni ammissibili:

$$M_{g\text{tot}} \cong -20 - 899 + 84 + 11.836 + 2.813 = 13.814 \text{ tm}$$

$$M_q \cong 6.747 \text{ tm (massimo momento flettente)}$$

Allo SLU:

$$M_g \cong -20 \cdot 1,35 - 899 \cdot 1,35 + 84 \cdot 1,35 + 11.836 \cdot 1,35 + 2.813 \cdot 1,50 \cong 19.071 \text{ tm}$$

$$M_q = 6.747 \cdot 1,35 \cong 9.108 \text{ tm}$$

Si determinano qui di seguito le tensioni nella lamiera di fondo indebolita dalla corrosione (spessore mm 24,2 mm anziché mm 28); si considera inoltre la riduzione di superficie causata dai fori per le bullonature.

Area lorda coprigiunti (sp. ridotto = 13,4 mm):

$$A_l = 600 \cdot 1,34 + (109 \cdot 2 + 108 \cdot 3) \cdot 1,34 = 600 \cdot 1,34 + 542 \cdot 1,34 \cong 1.530 \text{ cm}^2$$

Area netta coprigiunti (fori $\varnothing = 25,5$ mm):

$$A_n = 1.530 - (7 \cdot 2 + 6 \cdot 3) \cdot 2,55 \cdot 1,34 \cdot 2 = 1.530 - 32 \cdot 2,55 \cdot 1,34 \cdot 2 = 1.530 - 219 \cong 1.311 \text{ cm}^2$$

Area lorda lamiera (sp. = 24,2 mm):

$$A_l = 610 \cdot 2,42 = 1.476 \text{ cm}^2$$

Area netta lamiera:

$$A_n = 1.476 - (7 \cdot 2 + 6 \cdot 3) \cdot 2,55 \cdot 2,42 = 1.476 - 32 \cdot 2,55 \cdot 2,42 = 1.476 - 197 \cong 1.279 \text{ cm}^2$$

Spessore equivalente:

$$s_{eq} = \frac{1.279}{600} = 2,13 \text{ cm}$$

$$t_s = 2,4 \text{ cm}$$

$$t_i = 2,13 \text{ cm} \text{ spessore equivalente al netto della corrosione e dei fori delle bullonature}$$

$$t_{wi} = 1,2 \text{ cm}$$

$$t_{we} = 1,4 \text{ cm}$$

$$A_{sup} = 408 \text{ cm}^2$$

$$J_{sup} = 196 \text{ cm}^4$$

$$y_{g,sup} \cong 408,8 \text{ cm}$$

$$A_{inf} = 600 \cdot 2,42 = 1.452 \text{ cm}^2$$

$$J_{inf} = \frac{600 \cdot 2,42^3}{12} \cong 709 \text{ cm}^4$$

$$y_{g,inf} = 1,21 \text{ cm}$$

$$A_w = \frac{1}{\sin 53,8} \cdot 404,6 \cdot 2,6 = 1.304 \text{ cm}^2$$

$$J_w = \frac{1}{\sin 53,8} \cdot \frac{404,6^3}{12} \cdot 2,6 = 17.783.513 \text{ cm}^4$$

$$y_{g,w} = 205 \text{ cm}$$

$$A_{\text{ribs}} = 198 \cdot 50 / 100 \cong 99 \text{ cm}^2 \quad \text{conteggiati al 50\%}$$

$$J_{\text{ribs}} = 8.880 \cdot 50 / 100 \cong 4.440 \text{ cm}^4$$

$$y_{g,\text{ribs}} = 17 + 2,13 = 19,1 \text{ cm}$$

$$A_L = 118 \text{ cm}^2$$

$$J_L = 14.919 \text{ cm}^4$$

$$y_{g,L} = 397$$

Giunti di forza G2 e G3 – Sezione indebolita dalla corrosione e dai fori

	$A_{\text{tot}} (\text{cm}^2)$	$S_{x-x} (\text{cm}^3)$	$y_g (\text{cm})$	$J_{x-x} (\text{cm}^4)$	$W_{x,\text{sup}} (\text{cm}^3)$	$W_{x,\text{inf}} (\text{cm}^3)$
n = 6	11.559	4.033.456	349,0	261.131.370	2.867.444	748.372
n = 18	5.993	1.667.622	278,3	198.550.846	1.227.692	713.511

Tensioni nella lamiera di fondo (SLU):

$$\sigma_g \cong \frac{19.071 \cdot 10^5}{713.511} \cong 2.673 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_q \cong \frac{9.108 \cdot 10^5}{748.372} \cong 1.217 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{tot}} \cong 2.673 + 1.217 \cong 3.890 \text{ Kg/cm}^2 > 0,9 \cdot \frac{5.100}{1,25} = 3.672$$

N.B. La verifica non risulta soddisfatta: è quindi necessario procedere al rinforzo dei giunti G2 e G3 di tutte le campate così come previsto per la campata n° 1.

Preme osservare che la presente Perizia di somma urgenza prevede solo la sostituzione dei bulloni e il raddoppio dei coprigiunti; gli interventi di rinforzo in mezzeria (ribs aggiuntivi) e sui giunti di forza G2 e G3 (costole aggiuntive), benché necessari, non sono compresi per rispettare il limite economico di un milione di Euro imposto dall'art. 53 della L.P. n° 26/93.

21. Tensioni sui giunti G2 e G3 agli SLU – Sezione rinforzata

Per il rinforzo dei giunti G2 e G3 delle campate dalla n° 2 alla n° 7 si procede così come previsto per la prima campata, ovvero applicando a cavallo degli stessi dei piatti di rinforzo longitudinali.

Nella nuova configurazione del rinforzo si ha quindi:

Area netta dei n° 15 ≠ 20x180(h) mm saldati a cavallo dei giunti di forza G2 e G3:

$$A = 15 \cdot (18 - 2,6) \cdot 2,0 = 462 \text{ cm}^2$$

Area netta lamiera (sp. = 24,2 mm):

$$A_n \cong 1.279 + 462 = 1.741 \text{ cm}^2$$

Spessore equivalente:

$$s_{eq} = \frac{1.741}{600} \cong 2,9 \text{ cm}$$

Area netta coprigiunti (≠ 15x130 con fori Ø = 26 mm):

$$A_n \cong 1.311 + 15 \cdot (13 - 2,6) \cdot 1,5 \cdot 2 \cong 1.311 + 468 \cong 1.779 \text{ cm}^2$$

Giunti di forza G2 e G3 – Sezione rinforzata

	$A_{tot} \text{ (cm}^2\text{)}$	$S_{x-x} \text{ (cm}^3\text{)}$	$y_g \text{ (cm)}$	$J_{x-x} \text{ (cm}^4\text{)}$	$W_{x,sup} \text{ (cm}^3\text{)}$	$W_{x,inf} \text{ (cm}^3\text{)}$
n = 6	12.079	4.034.219	336,0	314.298.859	3.011.853	936.400

$$\sigma_q \cong \frac{9.108 \cdot 10^5}{936.400} \cong 973 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{tot}} \cong 2.673 + 973 \cong 3.646 \text{ Kg/cm}^2 < 0,9 \cdot \frac{5.100}{1,25} = 3.672$$

La verifica risulta ora soddisfatta.

22. Verifiche bulloni dei giunti G2 e G3 – Sezione rinforzata

Si è già visto che sui giunti G2 e G3 agiscono i seguenti momenti flettenti:

Alle Tensioni ammissibili:

$$M_g = 13.814 \text{ tm}$$

$$M_q \cong 6.747 \text{ tm (massimo momento flettente)}$$

Allo SLU:

$$M_g = 19.071 \text{ tm}$$

$$M_q = 9.108 \text{ tm}$$

Con le rispettive tensioni:

Allo SLU:

$$\sigma_g \cong \frac{19.071 \cdot 10^5}{713.511} \cong 2.673 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_q \cong \frac{9.108 \cdot 10^5}{936.400} \cong 973 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{tot}} \cong 2.673 + 973 \cong 3.646 \text{ Kg/cm}^2 < 0,9 \cdot \frac{5.100}{1,25} = 3.762$$

Allo SLE:

$$\sigma_g \cong \frac{13.814 \cdot 10^5}{713.511} \cong 1.936 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_q \cong \frac{6.747 \cdot 10^5}{936.400} \cong 721 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{tot}} \cong 1.936 + 721 \cong 2.657 \text{ Kg/cm}^2$$

Sforzo di trazione sui giunti allo SLU (con spessore equivalente):

$$S_G \cong 3,646 \cdot 600 \cdot 2,9 \cong 6.344 \text{ t}$$

Sforzo di trazione sui giunti allo SLE:

$$S_G \cong 2,657 \cdot 600 \cdot 2,9 \cong 4.623 \text{ t}$$

Verifica bulloni allo SLU (verifica a taglio)

$$F_{v,Rd} \cong \frac{\alpha \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 10 \cdot 0,75 \cdot 4,52}{1,25} \cong 13,6 \text{ t}$$

Sui giunti G2 e G3 sono presenti n° 418 bulloni 10.9 che allo SLU lavorano a taglio in doppia faccia (vedasi disegni Cimolai):

$$n_b = 5 \cdot 12 \cdot 3 + 8 \cdot 7 \cdot 2 + 9 \cdot 7 \cdot 2 = 418$$

$$F_{v,Ed} \cong \frac{6.344}{2 \cdot 418} \cong 7,6 \text{ t} < 13,6$$

Verifica bulloni allo SLE (verifica ad attrito)

Forza di precarico (serraggio controllato):

$$F_{p,Cd} = 0,7 \cdot \frac{f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M7}} = 0,7 \cdot \frac{10 \cdot 0,75 \cdot 4,52}{1,0} \cong 24 \text{ t}$$

Resistenza allo scorrimento del singolo bullone:

$$F_{s,Rd} = \frac{n \cdot \mu \cdot F_{p,Cd}}{\gamma_{M3}} = \frac{2 \cdot 0,30 \cdot 24}{1,10} \cong 13 \text{ t}$$

Prudenzialmente si è assunto $\mu = 0,30$ valido per superfici spazzolate.

Sui giunti G2 e G3 sono presenti n° 418 bulloni 10.9 che allo SLE lavorano per attrito:

$$F_{v,Ed} \cong \frac{4.623}{418} \cong 11,1 \text{ t} < 13 \text{ t}$$

Le verifiche risultano quindi soddisfatte.

23. I giunti G1 e G4

Come precedentemente detto, i giunti G1/1, G1/2, G4/1, G4/2 sono uguali tra loro e corrispondono ai giunti G1 e G4 delle altre travate, sia geometricamente che per il numero di bulloni ($n_b = 224$).

Inoltre i giunti G1 e G4 sono già stati verificati con esito positivo nella nostra precedente Relazione del maggio 2025.

La verifica dei giunti G1 e G4 della campata n° 7 è quindi superflua in quanto soggetti a momenti flettenti inferiori poiché posizionati più vicini agli appoggi rispetto alle altre travate.

24. Verifiche in corso d'opera (sostituzione bulloni)

Giunti G2 e G3

Qui di seguito si esegue la verifica a scorrimento in corso d'opera per i giunti di forza.

Per il raddoppio dei coprigiunti e la sostituzione dei bulloni sui giunti G2 e G3 della campata n° 7 è previsto di operare per fasce asportando n° 10+10 bulloni per volta al centro e n° 17+17 bulloni ai lati.

Forza di precarico (serraggio controllato):

$$F_{p,Cd} = 0,7 \cdot \frac{f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M7}} = 0,7 \cdot \frac{10 \cdot 0,75 \cdot 4,52}{1,0} \cong 24 \text{ t}$$

Resistenza allo scorrimento del singolo bullone:

$$F_{s,Rd} = \frac{n \cdot \mu \cdot F_{p,Cd}}{\gamma_{M3}} = \frac{2 \cdot 0,30 \cdot 24}{1,10} \cong 13 \text{ t}$$

Prudenzialmente si è assunto $\mu = 0,30$ valido per superfici spazzolate.

Per determinare lo sforzo di trazione sui giunti G2 e G3 si utilizzano prudenzialmente i valori della tensione (3.890 Kg/cm^2) e dello spessore equivalente ($2,13 \text{ cm}$) della sezione indebolita dalla corrosione e dai fori.

L'intervento di rinforzo dei giunti può infatti avvenire solo una volta sostituiti tutti i bulloni.

Sforzo di trazione sui giunti G2 e G3 allo SLE:

$$S_G \cong 3,890 \cdot 600 \cdot 2,13 \cong 4.971 \text{ t}$$

Sui giunti G2 e G3 della campata n° 7 sono presenti n° 418 bulloni 10.9 che allo SLE lavorano per

attrito (si considerano i bulloni ai lati):

$$F_{v,Ed} \cong \frac{4.971}{(418 - 17)} \cong 12,4 \text{ t} < 13 \text{ t}$$

25. Verifiche a ribaltamento della campata n° 7

La Relazione del 1981 dello Studio del Prof. Ing. F. De Miranda a pag. 213 e seguenti riporta le verifiche a ribaltamento delle campate con $R = 350 \text{ m}$ e $R = 200 \text{ m}$.

Per la trave con $R = 200 \text{ m}$ la Relazione indica uno sforzo di trazione sugli appoggi interni pari a 125 t. Sui disegni di officina della Cimolai sono peraltro riportati solo i cunei di compensazione con i relativi fori ($n^\circ 2 \text{ } \varnothing 55 + n^\circ 4 \text{ asole } 65 \times 110$).

Non si conoscono quindi le caratteristiche tecniche e le modalità di ancoraggio dei dispositivi di appoggio.

Diventa quindi di fondamentale importanza acquisire (qualora possibile) le caratteristiche tecniche di tutti i dispositivi di appoggio impiegati nella costruzione del viadotto.

Quanto prima dovranno inoltre essere attentamente ispezionati i dispositivi a carico negativo, le barre di trazione e le modalità di ancoraggio delle stesse.

26. Instabilità locale

La Relazione di calcolo del 1981 contiene anche le verifiche di stabilità all'imbozzamento dei pannelli d'anima effettuate secondo le Istruzioni CNR 10011/80 alle T.A.

Ciascun campo compreso fra i diaframmi intermedi risulta suddiviso dalle nervature in $n^\circ 15$ pannelli con diverse condizioni di vincolo.

Le verifiche forniscono coefficienti di sicurezza sempre superiori a 1,5; da rilevare che le citate verifiche sono da considerarsi certamente a favore di sicurezza in quanto non tengono conto delle riserve di resistenza in fase postcritica.

Le stesse verifiche sono ripetute agli SLU su entrambi i lati del cassone nella Relazione dell'Ing. M. De Miranda del 2021; anche in questo caso le verifiche forniscono esito positivo con buoni margini di sicurezza.

27. Conclusioni

I calcoli precedentemente riportati confermano che la trasformazione di una trave curva in una trave dritta di lunghezza $L = R \cdot \alpha$ è sufficiente accurata per quanto riguarda sia il momento flettente che la forza di taglio (qualora α risulti sufficientemente piccolo).

Da precisare la forza di taglio non è influenzata dalla curvatura d'asse.

Ovviamente la citata trasformazione non è accettabile per quanto riguarda il momento torcente che subisce incrementi significativi a causa della curvatura d'asse.

Le caratteristiche della sollecitazione qui ricavate sono molto prossime sia a quelle della n/s precedente Relazione che a quelle della Relazione di calcolo originale del 1981 a firma dello Studio Prof. Ing. Fabrizio de Miranda.

Per sopportare le maggiori sollecitazioni dovute alla torsione, nella campata con $R = 200$ m le anime esterne del cassone presentano vicino agli appoggi spessori maggiorati rispetto a quelle delle campate rettilinee.

Con riferimento ai giunti bullonati della lamiera di fondo è da sottolineare che la campata n° 7 per ragioni di curvatura ($R = 200$ m) presenta n° 6 giunti di forza anziché n° 4 come le altre travate.

Lo spessore dei coprigiunti rimane invariato ($\neq 15$ e $\neq 16$ mm).

Alla luce di quanto precedentemente riportato, viste anche le maggiori sollecitazioni torsionali dovute alla curvatura d'asse, anche per la campata con $R = 200$ m e per tutte le altre, si conferma la necessità di eseguire tutti gli interventi di rinforzo previsti per la prima campata, così come indicati nei nostri elaborati di data maggio 2025 (Relazione e n° 7 elaborati grafici).

Gli interventi indicati per la prima campata valgono quindi quali interventi di adeguamento strutturale anche per tutte le altre campate (ai sensi del capitolo 8.4.3. del D.M. 17.01.2018).

La presente Perizia di somma urgenza prevede solo la sostituzione dei bulloni e il raddoppio dei coprigiunti; gli interventi di rinforzo in mezzeria (ribs aggiuntivi) e sui giunti di forza G2 e G3 (costole aggiuntive), benché necessari, non sono inseriti per rispettare il limite economico di un milione di Euro imposto dall'art. 53 della L.P. n° 26/93.

Fatte salve le considerazioni precedentemente riportate, è bene che l'analisi degli sforzi e delle sollecitazioni nei vari elementi strutturali (compresi i diaframmi di torsione) che compongono la campata n° 7 con $R = 200$ m venga in ogni caso confermata da una analisi FEM.