

ITINERARIO RAGUSA-CATANIA

Collegamento viario compreso tra lo Svincolo della S.S. 514 "di Chiaramonte" con la S.S. 115 e lo Svincolo della S.S. 194 "Ragusana"

LOTTO 4 - Dallo svincolo n. 8 "Francofonte" (compreso) allo svincolo della "Ragusana"(escluso)

PROGETTO ESECUTIVO

COD. **PA898**

PROGETTAZIONE: ATI SINTAGMA - GP INGEGNERIA - COOPROGETTI -GDG - ICARIA - OMNISERVICE

PROGETTISTA RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

Dott. Ing. Nando Granieri

Ordine degli Ingegneri della Prov. di Perugia n° A351



IL GRUPPO DI PROGETTAZIONE:

MANDATARIA:

| | | |
|---|--------------------------|------------------------------|
|  | Dott. Ing. N. Granieri | Dott. Ing. M. Abram |
| | Dott. Ing. F. Durastanti | Dott. Ing. F. Pambianco |
| | Dott. Ing. V. Truffini | Dott. Ing. M. Briganti Botta |
| | Dott. Arch. A. Bracchini | Dott. Ing. L. Gagliardini |
| | Dott. Ing. L. Nani | Dott. Geol. G. Cerquiglini |

MANDANTI:

| | | |
|---|----------------------------|-------------------------------|
|  | Dott. Ing. G. Guiducci | Dott. Ing. G. Lucibello |
| | Dott. Ing. A. Signorelli | Dott. Arch. G. Guastella |
| | Dott. Ing. E. Moscatelli | Dott. Geol. M. Leonardi |
|  | Dott. Ing. A. Bela | Dott. Ing. G. Parente |
| | Dott. Arch. E. A. E. Crimi | Dott. Ing. L. Ragnacci |
| | Dott. Ing. M. Panfili | Dott. Arch. A. Strati |
|  | Dott. Arch. P. Ghirelli | Archeol. M. G. Liseno |
| | Dott. Ing. D. Pelle | |
| | Dott. Ing. D. Carlaccini | Dott. Ing. F. Aloe |
|  | Dott. Ing. S. Sacconi | Dott. Ing. A. Salvemini |
| | Dott. Ing. C. Consorti | |
| | Dott. Ing. V. Rotisciani | Dott. Ing. G. Verini Supplizi |
|  | Dott. Ing. G. Pulli | Dott. Ing. V. Piunno |
| | Dott. Ing. F. Macchioni | Geom. C. Sugaroni |
| | Dott. Ing. P. Agnello | |

IL RESPONSABILE DI PROGETTO:

IL GEOLOGO:

Dott. Geol. Giorgio Cerquiglini

Ordine dei Geologi della Regione Umbria n° 108

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

Dott. Ing. Filippo Pambianco

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Perugia n° A1373

VISTO IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Dott. Ing. Luigi Mupo

**LOTTO 4
CAVALCAVIA
CAVALCAVIA AL KM 4+982
RELAZIONE DI CALCOLO DELL'IMPALCATO**

| CODICE PROGETTO | | | NOME FILE | REVISIONE | SCALA: |
|-----------------|---|----------|--|---------------|-------------|
| PROGETTO | LIV. PROG. | N. PROG. | T04CV02STRRE01B | | |
| L O 4 0 8 Z | E | 2 1 0 1 | CODICE ELAB. T 0 4 C V 0 2 S T R R E 0 1 | B | - |
| B | REVISIONE A SEGUITO DI RAPPORTO DI VERIFICA | NOV 2021 | M. BOTTA | F. DURASTANTI | N. GRANIERI |
| A | EMISSIONE | GIU 2021 | M. BOTTA | F. DURASTANTI | N. GRANIERI |
| REV. | DESCRIZIONE | DATA | REDATTO | VERIFICATO | APPROVATO |

INDICE

| | |
|---|-----------|
| INDICE | 1 |
| 1. GENERALITA' | 4 |
| 1.1 DESCRIZIONE DELL'OPERA | 4 |
| 1.2 UNITÀ DI MISURA | 5 |
| 2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO | 6 |
| 3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI | 7 |
| 3.1 CARPENTERIA METALLICA S355 | 7 |
| 3.2 SOLETTA IN C.A. | 8 |
| 3.2.1.1 Armatura B450C | 8 |
| 4. ANALISI DEI CARICHI | 9 |
| 4.1 PESO PROPRIO DELLA STRUTTURA (G1) | 9 |
| 4.2 CARICHI PERMANENTI PORTATI (G2) | 9 |
| 4.3 RITIRO DEL CALCESTRUZZO (E2.1) | 10 |
| 4.4 VISCOSITÀ DEL CALCESTRUZZO (E2.2) | 10 |
| 4.5 VARIAZIONE TERMICA (E3) | 11 |
| 4.6 AZIONI VARIABILI DA TRAFFICO (Q1) | 13 |
| 4.6.1 Azioni da traffico per verifiche a fatica | 14 |
| 4.7 AZIONE DI FRENAMENTO ED AVVIAMENTO (Q3) | 14 |
| 4.8 AZIONE DEL VENTO (Q5) | 15 |
| 4.8.1 Calcolo della pressione del vento | 15 |
| 4.8.2 Vento a ponte carico | 17 |
| 4.8.3 Vento a ponte scarico | 17 |
| 4.8.4 Vento in fase di montaggio | 17 |
| 4.9 AZIONI SISMICHE (Q6) | 18 |
| 4.10 URTO DI VEICOLO IN SVIO (Q8) | 19 |
| 5. COMBINAZIONI DI CARICO | 21 |
| 5.1 GRUPPI DI CARICO | 21 |
| 5.2 COEFFICIENTI PARZIALI E DI COMBINAZIONE | 22 |
| 5.3 COMBINAZIONI AGLI SLU | 23 |
| 5.4 COMBINAZIONI AGLI SLE | 23 |
| 6. MODELLI DI CALCOLO E METODO DI ANALISI | 24 |
| 6.1 ORIGINE E CARATTERISTICHE DEI CODICI DI CALCOLO | 24 |
| 6.2 MODELLO DI CALCOLO STATICO E SISMICO | 25 |
| 6.2.1 Modello di calcolo statico | 25 |
| 6.2.2 Modello di calcolo sismico | 26 |
| 6.3 DETERMINAZIONE DELLA LARGHEZZA EFFICACE DI SOLETTA | 28 |
| 6.4 EFFETTI DEL RITIRO E DELLA VISCOSITÀ | 28 |
| 6.5 FASI DI CALCOLO | 30 |
| 6.6 CARATTERISTICHE DI CALCOLO DELLE SEZIONI | 31 |
| 6.7 METODO DI ANALISI GLOBALE E CLASSIFICAZIONE DELLE SEZIONI | 33 |
| 6.8 METODI DI VERIFICA | 34 |
| 6.8.1 Verifiche allo Stato Limite Ultimo delle nervature principali | 34 |
| 6.8.1.1 Verifiche di resistenza | 34 |

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

| | | |
|------------|---|-----------|
| 6.8.1.2 | Verifiche di stabilità a taglio dei pannelli d'anima | 35 |
| 6.8.1.3 | Verifiche all'imbozzamento dei pannelli d'anima..... | 36 |
| 6.8.1.4 | Verifiche delle connessioni trave-soletta..... | 37 |
| 6.8.2 | Verifiche allo Stato Limite Ultimo delle membrature secondarie..... | 37 |
| 6.8.2.1 | Verifiche dei collegamenti bullonati | 37 |
| 6.8.3 | Verifiche allo Stato Limite Ultimo di Fatica | 39 |
| 6.8.4 | Verifiche allo Stato Limite di Esercizio..... | 40 |
| 6.8.4.1 | Verifica di deformabilità | 40 |
| 6.8.4.2 | Verifica di limitazione delle tensioni di esercizio | 40 |
| 6.8.4.3 | Verifica di fessurazione | 40 |
| 7. | RISULTATI DELL'ANALISI STRUTTURALE | 42 |
| 7.1 | RISULTATI IN FASE DI GETTO..... | 42 |
| 7.2 | RISULTATI A T ₀₀ | 42 |
| 7.2.1 | Ritiro e viscosità..... | 44 |
| 7.3 | RISULTATI IN FASE FINALE | 45 |
| 7.3.1 | Stato limite ultimo (SLU)..... | 45 |
| 7.3.2 | Stato limite d'esercizio (SLE-R)..... | 46 |
| 7.4 | MODI DI VIBRAZIONE DELL'IMPALCATO..... | 47 |
| 8. | VERIFICHE DELLE TRAVI PRINCIPALI..... | 48 |
| 8.1 | VERIFICHE ALLO SLU IN FASE DI GETTO..... | 48 |
| 8.2 | VERIFICHE ALLO SLU IN FASE FINALE | 50 |
| 8.2.1 | Verifiche di resistenza | 50 |
| 8.2.2 | Verifiche di stabilità locale a taglio dei pannelli d'anima | 52 |
| 8.2.3 | Stabilità all'imbozzamento dei pannelli d'anima | 54 |
| 8.2.4 | Verifiche delle connessioni trave-soletta..... | 55 |
| 8.2.5 | Verifiche allo stato limite di fatica..... | 57 |
| 8.3 | VERIFICHE ALLO SLE IN FASE FINALE | 58 |
| 8.3.1 | Verifiche di deformabilità | 58 |
| 8.3.1.1 | Contromonta | 58 |
| 8.3.2 | Verifiche di limitazione delle tensioni in esercizio | 59 |
| 9. | VERIFICHE DEGLI ELEMENTI DI CARPENTERIA SECONDARIA..... | 61 |
| 9.1 | VERIFICA DEI CONTROVENTI SUPERIORI | 62 |
| 9.2 | VERIFICA DEI TRAVERSI INTERMEDI E DI TESTATA..... | 62 |
| 9.3 | VERIFICA DEI COLLEGAMENTI BULLONATI | 64 |
| 9.3.1 | Controventi superiori | 64 |
| 9.3.2 | Giunti di continuità travi principali (piattabanda superiore)..... | 64 |
| 9.3.3 | Giunti di continuità travi principali (piattabanda inferiore)..... | 65 |
| 9.3.4 | Giunti di continuità travi principali (anima) | 66 |
| 9.3.5 | Traversi | 66 |
| 10. | VERIFICA DELLA SOLETTA..... | 68 |
| 10.1 | CARICHI APPLICATI..... | 68 |
| 10.1.1 | Pesi propri e carichi permanenti | 68 |
| 10.1.2 | Carichi stradali | 68 |
| 10.1.3 | Urto di un veicolo in svio | 71 |
| 10.1.4 | Combinazioni di carico..... | 71 |
| 10.2 | RISULTATI DELL'ANALISI..... | 71 |

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

| | | |
|--------|---|----|
| 10.3 | VERIFICHE STRUTTURALI..... | 73 |
| 10.3.1 | Verifiche allo SLU..... | 73 |
| 10.3.2 | Verifiche allo SLE..... | 74 |
| 10.3.3 | Verifica locale del cordolo per azioni d'urto..... | 75 |
| 10.3.4 | Verifiche della soletta per carichi mobili disposti in prossimità dei giunti..... | 77 |
| 11. | ISOLATORI, APPOGGI E GIUNTI..... | 80 |
| 11.1 | SCARICHI SUGLI APPARECCHI DI APPOGGIO..... | 82 |
| 11.2 | VERIFICA DEI BAGGIOLI..... | 84 |
| 12. | ADDENDUM - VARIAZIONE CARATTERISTICHE ISOLATORI - VALUTAZIONE COMPORTAMENTO GLOBALE..... | 85 |
| 12.1 | INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA..... | 85 |
| 12.2 | CONCLUSIONI..... | 86 |
| 12.2.1 | Reazioni sui baggioli..... | 86 |
| 12.2.2 | Sollecitazioni su spalla e relativi pali..... | 86 |
| 12.2.3 | Spostamenti ai giunti..... | 86 |

1. GENERALITA'

Nell'ambito dei lavori di ammodernamento dell'Itinerario Ragusa-Catania e nello specifico, del collegamento viario compreso tra lo Svincolo della S.S. 514 di "Chiaromonte" con la S.S. 115 e lo Svincolo della "Ragusana", nell'ambito del Lotto 4, è prevista la realizzazione del Cavalcavia T04CV02 al km 4+982 (al km 4+321 ex lotto 7).

La presente relazione ha per oggetto la verifica delle strutture di impalcato, mentre, per quanto concerne la verifica delle sottostrutture, si rimanda a specifico elaborato.

1.1 DESCRIZIONE DELL'OPERA

L'impalcato del cavalcavia T04CV02 è costituito da una campata semplicemente appoggiata avente luce in asse appoggi pari a 41 m.

La sezione trasversale dell'impalcato presenta una larghezza complessiva di 8.5 m, con cordoli di 0.75 m per lato e pavimentazione di ampiezza pari a 7.0 m.

L'impalcato è a struttura mista in acciaio – calcestruzzo ed è costituito da due travi longitudinali principali saldate di altezza costante e pari a 2.0 m, poste a 3.0 m di interasse in direzione trasversale rispetto a una trave di spina centrale di altezza costante costituita da un profilo HE600A.

Le travi sono suddivise in conci di 3 tipologie differenti in direzione longitudinale (C1, C2, C3). Nel dettaglio i conci C1 e C2 costituiscono i conci in prossimità degli appoggi, mentre il concio C3 è quello posizionato in corrispondenza della mezzera dell'impalcato.

Le caratteristiche geometriche delle diverse tipologie di conci utilizzate, realizzate in acciaio ad alta resistenza S355, sono riepilogate nella tabella a seguire.

Tabella 1 – Caratteristiche geometriche delle nervature principali

| Concio | H mm | B _{sup} mm | t _{sup} mm | B _{inf} mm | t _{inf} mm | t _w mm | h _w mm |
|--------|---------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| C1 | 2000 | 750 | 32 | 900 | 40 | 20 | 1938 |
| C2-A | 2000 | 750 | 32 | 1200 | 40 | 18 | 1928 |
| C2-B | 2000 | 750 | 32 | 1200 | 50 | 18 | 1918 |
| C3 | 2000 | 750 | 40 | 1200 | 50 | 15 | 1910 |

La carpenteria principale è completata da:

- diaframmi di testata, costituiti da profili a doppio a T in parete piena irrigidita di altezza pari a 1.34m;
- diaframmi intermedi, da profili a doppio a T in parete piena irrigidita di altezza pari a 0.80 m;
- controventi superiori di montaggio, costituiti da profili accoppiati ad L 70x7.

La soletta in calcestruzzo è sagomata a schiena d'asino ed è gettata su predalles tralicciate. Il pacchetto complessivo soletta + predalles presenta uno spessore pari a 0.26 m. I cordoli laterali hanno, invece, spessore pari a 0.44 m

Nelle figure seguenti si riportano pianta, profilo e sezioni trasversali dell'opera in esame. Si rimanda agli elaborati grafici per maggiori dettagli.

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

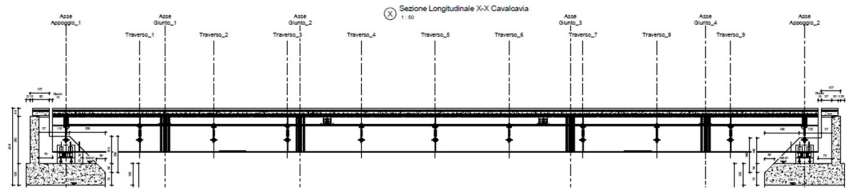


Figura 1 – Profilo longitudinale

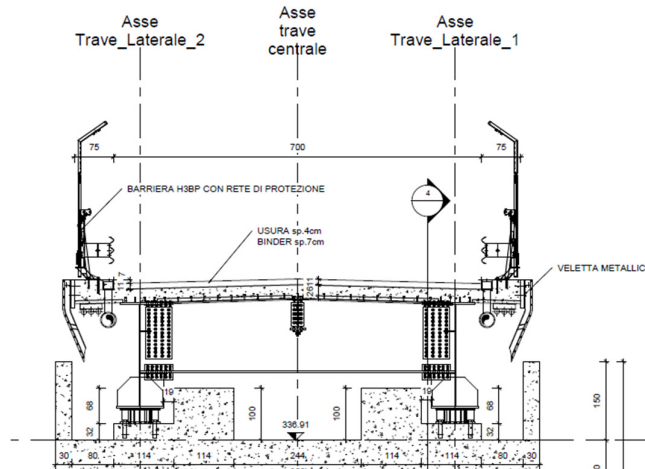


Figura 2 – Sezione trasversale

Il viadotto è dotato di un sistema di isolamento sismico dell'impalcato mediante dispositivi elastomerico a nucleo di piombo aventi stessa rigidezza in direzione longitudinale e trasversale. L'opera è progettata per una vita nominale di 50 anni e ricade in classe d'uso IV.

1.2 UNITÀ DI MISURA

Nel seguito si adotteranno le seguenti unità di misura:

- per le lunghezze ⇒ m, mm
- per i carichi ⇒ kN, kN/m², kN/m³
- per le azioni di calcolo ⇒ kN, kNm
- per le tensioni ⇒ MPa

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Nella redazione del progetto esecutivo si è fatto riferimento ai seguenti documenti normativi.

- D.M. 14/01/2008.
Norme tecniche per le costruzioni (NTC).
- Circolare n. 617 del 02/02/2009.
Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. del 14/01/2008.
- UNI EN1993 -1-1.
EUROCODICE 3, parte 1.3. Progettazione delle strutture in acciaio. Regole generali e regole per gli edifici.
- UNI EN1993 -1-5.
EUROCODICE 3, Parte 1.5. Progettazione delle strutture in acciaio. Elementi strutturali a lastra.
- UNI EN1993 -1- 8.
EUROCODICE 3, Parte 1.8. Progettazione delle strutture in acciaio. Progettazione dei collegamenti.
- UNI EN1993-1-9.
EUROCODICE 3. Parte 1.9. Progettazione delle strutture in acciaio. Fatica.
- UNI EN1993 -1-2.
EUROCODICE 3. Parte 2. Progettazione delle strutture in acciaio. Ponti di acciaio.
- UNI EN1994 -1-1.
EUROCODICE 4. Parte 1.1. Progettazione delle strutture composte acciaio- cls. Regole generali e regole per gli edifici.
- UNI EN1994 -2.
EUROCODICE 4. Parte 2. Progettazione delle strutture composte acciaio- cls. Regole generali e regole per i ponti.
- CNR-UNI 10011/97.
Costruzioni in acciaio. Istruzioni per il calcolo, l'esecuzione, il collaudo e la manutenzione.
- CNR 10030/87.
Anime irrigidite di travi a parete piena.

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI

Nella redazione del progetto esecutivo si è fatto riferimento ai materiali specificati di seguito. Per i controlli si fa riferimento a quanto previsto dal DM 14/01/2008

3.1 CARPENTERIA METALLICA S355

Acciaio da carpenteria

Analisi elastica S.L.U.

$f_{yk} = 355 \text{ N/mm}^2$ per spessori $\leq 40 \text{ mm}$.

$\gamma_m = 1.05$

$f_{yd} = 338 \text{ N/mm}^2$ per spessori $\leq 40 \text{ mm}$.

$f_{yd} = 319 \text{ N/mm}^2$ per spessori $40 \text{ mm} < s \leq 80 \text{ mm}$.

Bulloni Classe 10.9

Giunzioni ad attrito sabbiato

$\mu = 0.30$

coefficiente d'attrito

$\gamma_{M3} = 1.25$

coefficiente di sicurezza

Saldature

Da realizzarsi secondo DM 14/01/2008. Saldature su piatto di sostegno ceramico. Giunti travi principali piena penetrazione 1° classe con preparazione secondo dettaglio 14 del DM 14/01/2008. Le saldature devono essere iniziate e terminate su tacchi d'estremità, da rimuovere una volta completata la saldatura. I bordi esterni delle saldature devono essere molati in direzione degli sforzi.

Pioli di ancoraggio

Secondo UNI EN ISO 13918 e DM 14/01/2008

Pioli tipo NELSON $\phi = 19 \text{ mm}$

$H = 0.6 \times H_{soletta}$ (se non diversamente indicato)

Acciaio ex ST 37 – 3K (S235J2G3+C450)

$f_y > 350 \text{ MPa}$

$f_u > 450 \text{ MPa}$

Allungamento $> 15\%$

Strizione $> 50\%$

Riferimenti normativi specifici per la carpenteria metallica

Bulloni conformi per caratteristiche dimensionali alle norme UNI EN ISO 4016 2002 e UNI 5592 1968.

Viti: secondo UNI EN ISO 898-1 2001

Dadi: secondo UNI EN 20898-2 1994

Rosette e piastrine: riferimento UNI EN 14399 2005, parti 5 e 6.

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

Rosette in acciaio C50 temperato e rinvenuto HRC32-40, secondo UNI EN 10083-2 2006

Piastrelle in acciaio C50 temperato e rinvenuto HRC32-40, secondo UNI EN 10083-2 2006

Coppie di serraggio secondo D.M. 14/01/2008

3.2 SOLETTA IN C.A.

Calcestruzzo C32/40

- | | |
|--|--|
| • $R_{ck} = 40$ MPa | resistenza caratteristica cubica a 28 giorni |
| • $f_{ck} = 32$ MPa | resistenza caratteristica cilindrica a 28 giorni |
| • $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 40$ MPa | resistenza cilindrica valore medio |
| • $f_{ctm} = 0.30 \cdot f_{ck}^{2/3} = 3.02$ MPa | resistenza media a trazione semplice (assiale) |
| • $f_{ctk} = 0.7 \cdot f_{ctm} = 2.12$ MPa | resistenza caratteristica a trazione |
| • $E_{cm} = 22000 [f_{cm}/10]^{0.3} = 33346$ MPa | modulo elastico |
| • $\gamma = 25.0$ kN/m ³ | peso per unità di volume |

Resistenze di progetto allo SLU

- | | |
|---|---------------------------------------|
| • $f_{cd} = 0.85 \cdot f_{ck} / \gamma_c = 18.1$ MPa; $\gamma_c = 1.50$ | resistenza di progetto a compressione |
| • $f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_c = 1.50$ MPa | resistenza di progetto a trazione |

Resistenze di progetto allo SLE

- | | |
|---|--|
| • $\sigma_{c,r} = 0.60 \cdot f_{ck} = 19.2$ MPa | tensione limite in combinazione (rara) |
| • $\sigma_{c,f} = 0.45 \cdot f_{ck} = 14.4$ MPa | tensione limite in comb. quasi permanente |
| • $\sigma_t = f_{ctm} / 1.2 = 2.52$ MPa | tensione limite di fessurazione (trazione) |

3.2.1.1 Armatura B450C

- | | |
|----------------------|--|
| • $f_{yk} = 450$ MPa | resistenza caratteristica di snervamento |
| • $f_{tk} = 540$ MPa | resistenza caratteristica a rottura |
| • $E_s = 210000$ MPa | modulo elastico |

Resistenza di progetto allo SLU

- | | |
|---|---------------------------------------|
| • $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 391$ MPa; $\gamma_s = 1.15$ | resistenza di progetto a compressione |
|---|---------------------------------------|

Resistenza di progetto allo SLE

- | | |
|--|--|
| • $\sigma_{s,r} = 0.80 \cdot f_{yk} = 360$ MPa | tensione limite in combinazione (rara) |
|--|--|

4. ANALISI DEI CARICHI

4.1 PESO PROPRIO DELLA STRUTTURA (G1)

I pesi propri strutturali sono stati valutati considerando un peso specifico dell'acciaio pari 78.5 kN/mc e un peso specifico del calcestruzzo pari a 25 kN/mc.

Peso proprio della carpenteria in acciaio (G1.1), calcolato in automatico dal software di calcolo. Il peso degli elementi di carpenteria principale, viene incrementato del 10% per tener conto del peso dei vari elementi secondari (piatti di irrigidimento trasversali e longitudinali, bullonature etc.):

$$G1.1 = 25.4 \text{ kN/m} \quad (2.98 \text{ kN/m}^2)$$

È stata pertanto valutata un'incidenza della carpenteria metallica pari a circa 300 kg per m² di impalcato.

Peso della soletta (G1.2), considerando uno spessore variabile linearmente da 36 cm alle estremità e 41.5 cm al centro, per una larghezza complessiva di piattaforma pari a 11.20m.

$$G1.2 = 25 \times 7.0 \times 0.26 = 45.5 \text{ kN/m}$$

Peso dei cordoli (G1.3), considerando uno spessore complessivo dei cordoli di 44 cm, per una larghezza complessiva dei cordoli di 1.5 m

$$G1.3 = 25 \times (2 \times 0.75) \times 0.44 = 16.5 \text{ kN/m}$$

da cui:

$$G1.2 + G1.3 = 45.5 + 16.5 = 62.0 \text{ kN/m}$$

4.2 CARICHI PERMANENTI PORTATI (G2)

Pavimentazione (G2.1)

La pavimentazione adottata ha un spessore di 11 cm. Nell'analisi dei carichi è stato considerato un peso di 2.4 kN/m²

$$G2.1 = 7.0 \times 2.4 \text{ kN/m}^2 \quad 16.8 \text{ kN/m};$$

Guard Rail con reti di protezione (G2.2)

$$G2.2 = 2 \times 2.0 \text{ kN/m} \quad 4.0 \text{ kN/m};$$

Velette (G2.3)

$$G2.3 = 2 \times 1.5 \text{ kN/m} \quad 3.0 \text{ kN/m};$$

Elementi di completamento (impianti, reti) (G2.4)

$$G2.4 = 2 \times 1.5 \text{ kN/m} \quad 3.0 \text{ kN/m;}$$

Totale

$$G2 = 26.8 \text{ kN/m}$$

4.3 RITIRO DEL CALCESTRUZZO (E2.1)

Il calcolo delle deformazioni da ritiro nella soletta è stato eseguito secondo quanto specificato nel Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008. Si riporta la valutazione della deformazione da ritiro secondo le indicazioni previste dalle norme. La deformazione totale da ritiro è data dalla somma della deformazione per ritiro da essiccamento e della deformazione da ritiro autogeno.

Tabella 2 – Deformazione da ritiro

| Valutazione della deformazione da ritiro a 10000 gg. | | |
|--|-----------|---------------------------------------|
| $A_c =$ | 1.7 | m ² |
| $u =$ perimetro di calcestruzzo esposto all'aria = | 8.9 | m |
| $k = 2 A_c/u =$ | 0.38 | m |
| $U =$ umidità relativa = | 80.0 | % |
| $R_{ck} =$ | 40 | Mpa |
| $\Phi_{r,10000gg} =$ | -2.41E-04 | (EN 1992-1, Classe S, $t_0 = 10$ gg.) |

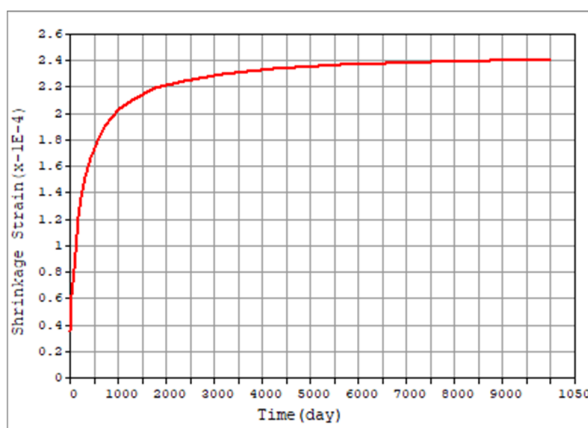


Figura 3 - Andamento della deformazione da ritiro nel tempo

La valutazione riportata indica che a 10.000 gg, la deformazione da ritiro raggiunge il valore 0.24‰. Gli effetti del ritiro impedito, che si sviluppano nel tempo, si traducono in una forza di trazione nella soletta e in una forza assiale di compressione e di momento flettente agenti sulla sezione mista omogenizzata trave + soletta.

4.4 VISCOSITÀ DEL CALCESTRUZZO (E2.2)

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

Di seguito si riporta il calcolo del coefficiente di viscosità per il calcestruzzo della soletta secondo quanto specificato nel Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008.

Tabella 3 – Coefficienti di Viscosità

| Valutazione dei Coefficienti di Viscosità a 10000 gg. | | |
|---|------|---------------------------------------|
| $A_c =$ | 1.7 | mq |
| $u =$ perimetro di calcestruzzo esposto all'aria = | 8.9 | m |
| $k = 2 A_c / u =$ | 0.38 | m |
| $U =$ umidità relativa = | 80.0 | % |
| $R_{ck} =$ | 40 | Mpa |
| $\varphi(t_{oo}, t_0) =$ | 2.33 | (EN 1992-1, Classe S, $t_0 = 3$ gg.) |
| $\varphi(t_{oo}, t_0) =$ | 1.51 | (EN 1992-1, Classe S, $t_0 = 30$ gg.) |

Il coefficiente di viscosità viene modellato come una funzione che si evolve nel tempo t e il cui valore dipende dall'età del cls, in giorni, t_0 , al momento dell'applicazione del carico. Nella tabella precedente sono stati valutati i coefficienti di viscosità per $t = 10000$ gg e per t_0 pari rispettivamente a 3 gg. (età del cls al momento dell'attivazione delle azioni da ritiro) e a 30 gg. (età presunta del cls al momento di applicazione dei carichi permanenti portati).

L'evolversi nel tempo del coefficiente di viscosità è diagrammato nelle figure seguenti.

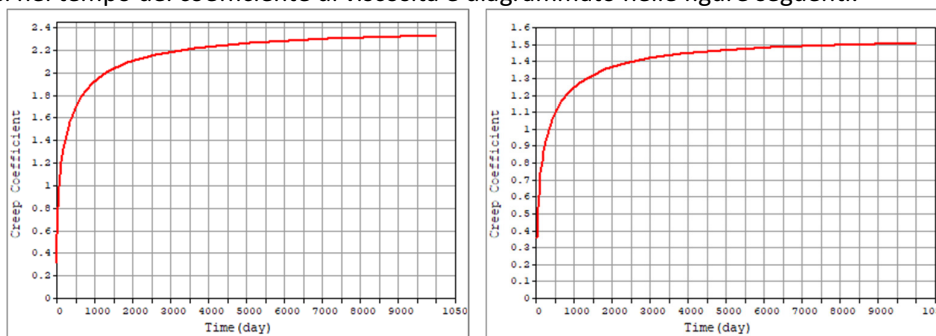


Figura 4 – Andamento del coefficiente di viscosità nel tempo per $t_0 = 3$ gg. e per $t_0 = 30$ gg.

4.5 VARIAZIONE TERMICA (E3)

L'azione della variazione termica è valutata, in termini di temperatura massima estiva e minima invernale dell'aria nel sito della costruzione, con periodo di ritorno di 50 anni, attraverso le indicazioni generali fornite dal DM 2008 (punto 3.5.2) e quelle specifiche contenute nella UNI EN 1991-1-5.

In prima analisi, sono state determinate la minima e la massima temperatura dell'aria esterna. Queste grandezze, funzione della posizione geografica (Sicilia, zona IV) e dell'altitudine del sito (circa 330 m s.l.m.), sono espresse nel seguente modo

$$T_{\min} = -2 - 9 \cdot a_s / 1000$$

$$T_{\max} = 42 - 2 \cdot a_s / 1000$$

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02



Figura 5: Mappe nazionali delle linee isotermitiche; Tmax a sinistra e Tmin a destra (Appendici nazionali, 2007)

Per il sito in cui sorge il viadotto in esame i valori sono quindi pari a:

$$T_{max} = 41.3^{\circ}$$

$$T_{min} = -5.0^{\circ}$$

Per gli impalcati da ponte si fa riferimento all'EN 1991-1-5 - Figura 6.1. Per ponti di gruppo 2 (tipologia impalcato a struttura composta), si ottiene

$$T_{e,max} = 45.0^{\circ}$$

$$T_{e,min} = -10^{\circ}$$

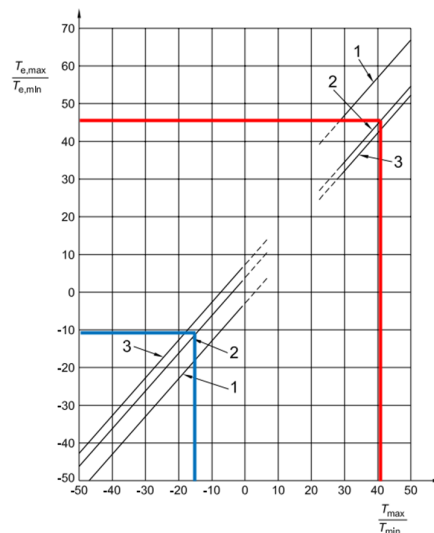


Figura 6 - Correlazione tra temperatura dell'aria all'ombra minima/massima (Tmin/Tmax) e componente di temperatura uniforme del ponte minima/massima (Te.min/Te.max)

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

La componente uniforme può essere calcolata come differenza tra la temperatura calcolata e quella iniziale alla data di costruzione T_0 che, in mancanza di determinazioni più precise, può essere assunta pari a 15°C (NTC 3.5.4).

$$\Delta T = T - T_0$$

In definitiva, quindi si ottiene l'escursione termica uniforme:

$$\Delta T_N \text{ comp} = -10 - 15 = -25^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_N \text{ exp} = 45 - 15 = 30^\circ\text{C}$$

Oltre la variazione termica uniforme, è stata considerata anche una differenza di temperatura di 5°C con andamento a farfalla tra la soletta in calcestruzzo e la trave in acciaio.

4.6 AZIONI VARIABILI DA TRAFFICO (Q1)

Coerentemente con quanto indicato al punto 5.1.3.3.3 del DM 14/01/2008 per l'analisi globale del ponte si fa riferimento allo Schema di Carico 1.

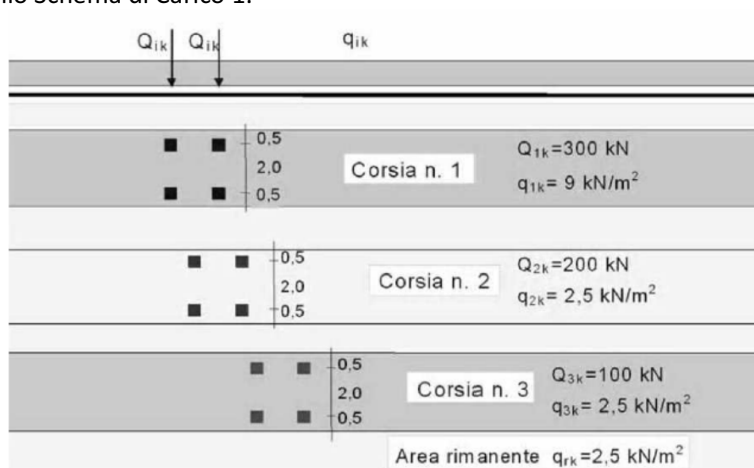


Figura 7 – Schema di carico 1

Nel caso in oggetto si impiegano tre corsie di carico costituite da:

- una colonna di carichi (ingombro = 3 m) costituita da un automezzo convenzionale Q_{1k} di 600 kN dotato di 2 assi di 2 ruote ciascuno, distanti 1.20 m in senso longitudinale e con interasse ruote in senso trasversale di 2.00 m; un carico ripartito q_{1k} di 9 kN/m² uniformemente distribuito;
- una seconda colonna di carichi (ingombro = 3 m), analoga alla precedente, ma con carichi pari rispettivamente a 400 kN di Q_{1k} e 2.5 kN/m² di q_{1k} e posta ad interasse di 3.00 m. da essa;
- una colonna di carico (ingombro = 1.0 m) $q_{rk} = 2.5 \text{ kN/m}^2$ nella zona di carreggiata non impegnata dai carichi precedenti (area rimanente).

Per l'analisi trasversale della soletta è stato inoltre considerato lo schema di carico 2, costituito da un singolo asse applicato su specifiche impronte di pneumatico di forma rettangolare, di larghezza 0,60 m ed

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

altezza 0,35 m. La diffusione locale del carico e l'applicazione di quest'ultimo sul modello di calcolo viene trattata nel paragrafo relativo all'analisi della soletta.

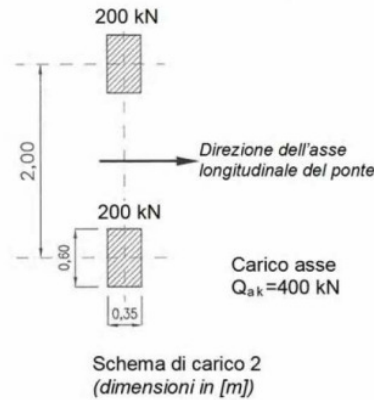


Figura 8 – Schema di carico 2

4.6.1 Azioni da traffico per verifiche a fatica

Si utilizza il modello di carico di fatica 1, costituito:

- dallo schema di carico 1 con valore dei carichi concentrati ridotti del 30% e con valore dei carichi distribuiti ridotti del 70%;
- dallo schema di carico 2 con valore del carico ridotto del 30%.

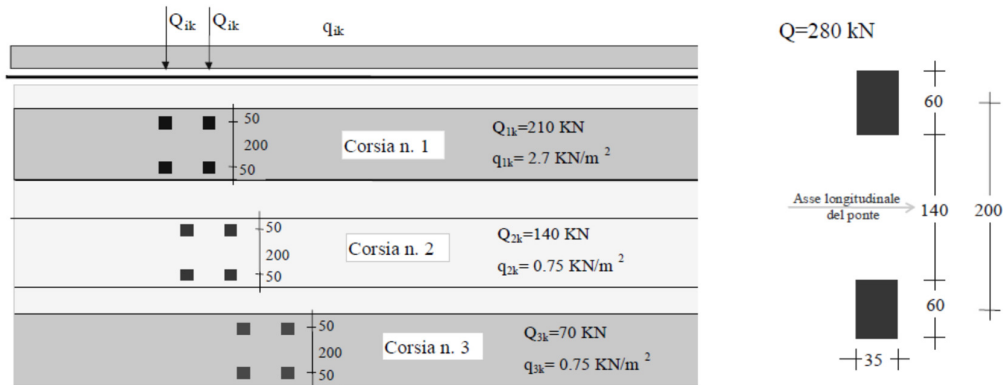


Figura 9 – Modello di carico a fatica: schemi di carico 1 e 2

4.7 AZIONE DI FRENAMENTO ED AVVIAMENTO (Q3)

Secondo il D.M. 14/01/2008 l'azione longitudinale di frenamento è funzione del carico verticale totale agente sulla corsia convenzionale n. 1, ed è uguale a:

$$180\text{ kN} \leq q_3 = 0.6(2 \cdot Q_{1k}) + 0.1 \cdot q_{1k} \cdot w_1 \cdot L \leq 900\text{ kN}$$

Nel caso in oggetto risulta:

$$Q_3 = 360 + 111 = 471\text{ kN} = 11.5\text{ kN/m}$$

L'azione di frenatura è applicata convenzionalmente a quota pavimentazione.

4.8 AZIONE DEL VENTO (Q5)

4.8.1 Calcolo della pressione del vento

Si valuta la pressione del vento in accordo con il paragrafo 3.3 del DM. 14/01/2008.

La velocità di base di riferimento v_b riferita ad un periodo di ritorno di 50 anni, viene fornita dalle NTC (3.3.1) con la seguente espressione:

$$v_b = v_{b,0} \cdot c_a = 28 \text{ m/s}$$

dove:

- $v_{b,0}$ = è la velocità al livello del mare
- c_a = è il coefficiente di altitudine, fornito dalla relazione:

$$c_a = 1 \quad \text{per } a_s \leq a_0$$

$$c_a = 1 + k_s \left(\frac{a_s}{a_0} - 1 \right) \quad \text{per } a_0 < a_s \leq 1500 \text{ m} \quad [3.3.1.b]$$

dove:

a_0, k_s sono parametri forniti nella Tab. 3.3.I in funzione della zona in cui sorge la costruzione (Fig. 3.3.1);
 a_s è l'altitudine sul livello del mare del sito ove sorge la costruzione.

Tab. 3.3.I - Valori dei parametri $v_{b,0}$, a_0 , k_s

| Zona | Descrizione | $v_{b,0}$ [m/s] | a_0 [m] | k_s |
|------|--|-----------------|-----------|-------|
| 4 | Sicilia e provincia di Reggio Calabria | 28 | 500 | 0,36 |

Nel caso in esame, assunto, cautelativamente, un periodo di ritorno di progetto per l'azione del vento pari alla vita nominale dell'opera (50 anni), dalla velocità di base di riferimento è possibile dedurre la velocità di riferimento dalla seguente relazione (NTC – 3.3.2):

$$v_r = v_b \cdot c_r = 28 \cdot 1.0 = 28.0 \text{ m/s}$$

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

dove

v_b è la velocità base di riferimento, di cui al § 3.3.1;

c_r è il coefficiente di ritorno, funzione del periodo di ritorno di progetto T_R .

In mancanza di specifiche e adeguate indagini statistiche, il coefficiente di ritorno è fornito dalla relazione:

$$c_r = 0.75 \sqrt{1 - 0.2 \times \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T_R} \right) \right]} \quad [3.3.3]$$

dove T_R è il periodo di ritorno espresso in anni.

La pressione del vento da applicare all'opera è data dall'espressione:

$$p = q_r \cdot c_e \cdot c_p \cdot c_d,$$

dove:

- q_r = è la pressione cinetica di riferimento;
- c_e = è il coefficiente di esposizione;
- c_p = è il coefficiente di forma o aerodinamico;
- c_d = è il coefficiente dinamico.

con:

$$q_b = \rho \cdot (v_r)^2 / 2 = 491 \text{ N/m}^2;$$

dove v_r è stato precedentemente calcolato.

Considerando una classe di rugosità D (tabella 3.3.III), l'altezza del sito sul livello del mare (circa 330 m s.l.m.), dalla figura 3.3.2 si evince che la struttura si trova in categoria di esposizione II e dunque, in accordo con la tabella 3.3.II si assumono i seguenti parametri:

- $k_r = 0.19$;
- $z_0 = 0.05 \text{ m}$;
- $z_{\min} = 4 \text{ m}$.

quindi ipotizzando che l'opera abbia altezza media dal suolo $z \approx 10 \text{ m} > z_{\min}$ risulta

- $c_e(z) = k^2 c_t \ln(z/z_0) [7 + c_t \ln(z/z_0)] = 2.35$

Secondo le indicazioni della Circolare n. 7 del 21/01/2019 (C3.3.8.6.1), si determina il coefficiente aerodinamico per l'impalcato in esame:

- $c_p = 1.4$, essendo per travi ad anima piena $\phi = 1$

Si considera un coefficiente dinamico (c_d) cautelativamente pari a 1 (par. 3.3.8 D.M. 14/01/2008).

Procedendo al calcolo della pressione si ottiene:

- $p = q_r \cdot c_e \cdot c_p \cdot c_d = 491 \text{ N/m}^2 \times 2.35 \times 1.4 \times 1 = 1.62 \text{ kN/m}^2$

Nel caso di più travi multiple (C3.3.8.6.2), disposte parallelamente a distanza d non maggiore del doppio dell'altezza h ($d/h \leq 2$), il valore della pressione sull'elemento successivo sarà pari a quello sull'elemento precedente moltiplicato per un coefficiente di riduzione dato da:

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

- $\mu = 1 - 1.2\phi$ per $\phi \leq 2/3$;
- $\mu = 0.2$ per $\phi > 2/3$.

Per $d/h \geq 5$ gli elementi vengono considerati come isolati ($\mu = 1$).

Per $2 < d/h < 5$ si procede all'interpolazione lineare tra μ e 1.

Nel caso in esame, $\phi = 1$ e $d/h = 6/2 = 3.0$, per cui si procede per interpolazione lineare ottenendo $\mu = 0.47$. Quindi sulla seconda trave viene applicato un carico da vento pari al 47% di quello applicato sulla prima trave.

4.8.2 Vento a ponte carico

Cautelativamente si considera su tutto il ponte la sagoma dei veicoli per un'altezza pari a 3.0 al di sopra della livelletta. I valori dell'azione del vento per le due travi sono pari a:

- $q_w = (2 + 0.44 \times 3) \times 1.62 \text{ kN/m} = 8.8 \text{ kN/m}$;
- $q_{w,2} = 0.47 q_{w,1} = 4.1 \text{ kN/m}$

4.8.3 Vento a ponte scarico

In tal caso l'azione del vento viene considerata agente su un'altezza pari a quella dell'impalcato (travi e soletta). I valori dell'azione del vento per le due travi sono pari a:

- $q_{w,1} = (2 + 0.44) \times 1.62 \text{ kN/m} = 3.9 \text{ kN/m}$;
- $q_{w,2} = 0.47 q_{w,1} = 1.9 \text{ kN/m}$

4.8.4 Vento in fase di montaggio

In questa fase l'altezza complessiva della struttura è pari all'altezza delle nervature in acciaio e quindi $h = 2.0 \text{ m}$.

- $q_{wm,1} = 2.0 \times 1.62 \text{ kN/m} = 3.2 \text{ kN/m}$
- $q_{wm,2} = 0.47 q_{wm,1} = 1.5 \text{ kN/m}$

4.9 AZIONI SISMICHE (Q6)

Il viadotto in oggetto è progettato per una vita nominale V_N pari a 50 anni. Gli si attribuisce inoltre una classe d'uso IV ai sensi del D. Min. 14/01/2008, da cui scaturisce un coefficiente d'uso $C_U = 2.0$.

L'azione sismica di progetto è valutata a partire dalla pericolosità sismica di base del sito su cui l'opera insiste, descritta in termini geografici e temporali:

- attraverso i valori di accelerazione orizzontale di picco a_g (attesa in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale) e le espressioni che definiscono le ordinate del relativo spettro di risposta elastico in accelerazione $S_e(T)$;
- in corrispondenza del punto del reticolo che individua la posizione geografica dell'opera;
- con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} .

In particolare, la forma spettrale prevista dalla normativa è definita, su sito di riferimento rigido orizzontale, in funzione di tre parametri:

- a_g , accelerazione orizzontale massima del terreno
- F_0 , valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
- T_c^* , periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

I suddetti parametri sono calcolati come media pesata dei valori assunti nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento che contiene il punto caratterizzante la posizione dell'opera, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione ed i quattro vertici.

In particolare, si può notare come F_0 descriva la pericolosità sismica locale del sito su cui l'opera insiste. Infatti, da quest'ultimo, attraverso le espressioni fornite dalla normativa, sono valutati i valori d'amplificazione stratigrafica e topografica. Di seguito sono riassunti i valori dei parametri assunti per l'opera in oggetto.

- Vita nominale V_N = 50 anni;
- Classe d'uso = IV;
- Coefficiente d'uso C_U = 2.0;
- Periodo di riferimento V_R = 100 anni;
- $T_{R,SLV}$ = 949 anni;
- $a_{g,SLV}$ = **0.385 g**;
- $F_{0,SLV}$ = **2.332**;
- $T_{c,SLV}^*$ = **0.472 s**.

Tabella 4 - Accelerazione (a_g), fattore (F_0) e periodo (T_c^*) per sito di riferimento

| SLATO LIMITE | T_R [anni] | a_g [g] | F_0 [-] | T_c^* [s] |
|--------------|-----------------|--------------|--------------|----------------|
| SLO | 60 | 0.076 | 2.492 | 0.275 |
| SLD | 101 | 0.109 | 2.328 | 0.306 |
| SLV | 949 | 0.385 | 2.332 | 0.472 |
| SLC | 1950 | 0.542 | 2.335 | 0.531 |

Lo spettro di risposta elastico per la descrizione della componente orizzontale del moto sismico è infine costruito a partire dai parametri seguenti.

- Categoria di suolo = B
- Categoria topografica = T1;
- S_s , fattore stratigrafico = 1.04;
- S_T , fattore topografico = 1.00;
- C_c , fattore correttivo del periodo T_c^* = 1.28.

Si riportano nell'immagine seguente, a titolo di riferimento, gli spettri elastici allo SLV e allo SLC in accelerazione in direzione orizzontale e verticale.

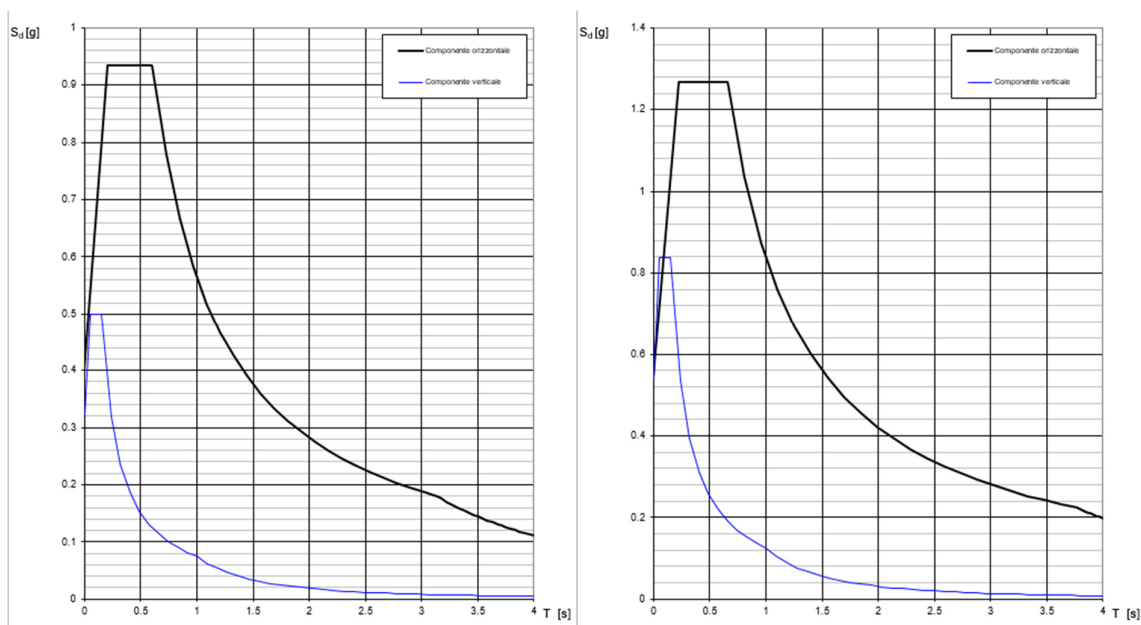


Figura 10 – Spettri elastici in accelerazione ($q = 1$) allo SLV e allo SLC

4.10 URTO DI VEICOLO IN SVIO (Q8)

I sicurvia e gli elementi strutturali ai quali sono collegati devono essere dimensionati in funzione della classe di contenimento richiesta per l'impiego specifico (vedi D.M. 21-06-04 n.2367). Il sistema di forze orizzontali può essere determinato con riferimento alla resistenza caratteristica degli elementi strutturali principali coinvolti nel meccanismo d'insieme della barriera e deve essere applicato ad una quota h , misurata dal piano viario, pari alla minore delle dimensioni h_1 , h_2 , dove $h_1 = (\text{altezza della barriera} - 0.10\text{m})$, $h_2 = 1.00\text{m}$.

Ai sensi del DM 14/01/2008 nel progetto dell'impalcato deve essere considerata una condizione di carico eccezionale nella quale alla forza orizzontale d'urto su sicurvia si associa un carico verticale isolato

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

costituito dallo schema di carico 2, posizionato in adiacenza al sicurvia stesso e disposto nella posizione più gravosa.

Tale condizione non è però dimensionante per la statica globale dell'impalcato e sarà considerata per la verifica locale del cordolo della soletta in calcestruzzo. Per il dimensionamento dell'impalcato, le forze orizzontali così determinate devono essere amplificate di un fattore pari ad 1.50.

5. COMBINAZIONI DI CARICO

Le combinazioni di carico considerate sono stabilite in conformità a quanto prescritto al Cap. 2 del D.M. 14/01/2008.

5.1 GRUPPI DI CARICO

Nella tabella seguente, in accordo a quanto specificato in tabella 5.1.3.14 del D.M. 14/01/2008, sono esplicitati i gruppi di carico considerati per i carichi accidentali da traffico.

Tabella 5 – Valori caratteristici delle azioni da traffico

| Gruppo di azioni | Carichi sulla superficie carrabile | | | | | Carichi su marciapiedi e piste ciclabili non sormontabili |
|------------------|--|----------------------------------|---|-----------------------|-----------------------|--|
| | Carichi verticali | | | Carichi orizzontali | | Carichi verticali |
| | Modello principale (schemi di carico 1, 2, 3, 4 e 6) | Veicoli speciali | Folla (Schema di carico 5) | Frenatura | Forza centrifuga | Carico uniformemente distribuito |
| 1 | Valore caratteristico | | | | | Schema di carico 5 con valore di combinazione 2,5kN/m ² |
| 2a | Valore frequente | | | Valore caratteristico | | |
| 2b | Valore frequente | | | | Valore caratteristico | |
| 3 (*) | | | | | | Schema di carico 5 con valore caratteristico 5,0kN/m ² |
| 4 (**) | | | Schema di carico 5 con valore caratteristico 5,0kN/m ² | | | Schema di carico 5 con valore caratteristico 5,0kN/m ² |
| 5 (***) | Da definirsi per il singolo progetto | Valore caratteristico o nominale | | | | |

(*) Ponti pedonali
 (**) Da considerare solo se richiesto dal particolare progetto (ad es. ponti in zona urbana)
 (***) Da considerare solo se si considerano veicoli speciali

Coerentemente nel seguito si fa riferimento ai gruppi di azioni da traffico 1, 2a e 2b.

5.2 COEFFICIENTI PARZIALI E DI COMBINAZIONE

Si utilizzano i coefficienti parziali di sicurezza e i coefficienti di combinazione di seguito riportati.

Tabella 6 – Coefficienti parziali di sicurezza agli SLU

| | | Coefficiente | EQU [Ⓜ] | A1 | A2 |
|--|-------------|---|-------------------|-------------------|------|
| Azioni permanenti g_1 e g_3 | favorevoli | γ_{G1} e γ_{G3} | 0,90 | 1,00 | 1,00 |
| | sfavorevoli | | 1,10 | 1,35 | 1,00 |
| Azioni permanenti non strutturali [Ⓜ] g_2 | favorevoli | γ_{G2} | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | sfavorevoli | | 1,50 | 1,50 | 1,30 |
| Azioni variabili da traffico | favorevoli | γ_Q | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | sfavorevoli | | 1,35 | 1,35 | 1,15 |
| Azioni variabili | favorevoli | γ_{Qi} | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | sfavorevoli | | 1,50 | 1,50 | 1,30 |
| Distorsioni e presollecitazioni di progetto | favorevoli | $\gamma_{\epsilon 1}$ | 0,90 | 1,00 | 1,00 |
| | sfavorevoli | | 1,00 [Ⓜ] | 1,00 [Ⓜ] | 1,00 |
| Ritiro e viscosità, Cedimenti vincolari | favorevoli | $\gamma_{\epsilon 2}, \gamma_{\epsilon 3}, \gamma_{\epsilon 4}$ | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | sfavorevoli | | 1,20 | 1,20 | 1,00 |

[Ⓜ] Equilibrio che non coinvolga i parametri di deformabilità e resistenza del terreno; altrimenti si applicano i valori della colonna A2.

[Ⓜ] Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali, o di una parte di essi (ad esempio carichi permanenti portati), sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

[Ⓜ] 1,30 per instabilità in strutture con precompressione esterna

[Ⓜ] 1,20 per effetti locali

Tabella 7 – Coefficienti di combinazione

| Azioni | Gruppo di azioni (Tab. 5.1.IV) | Coefficiente ψ_0 di combinazione | Coefficiente ψ_1 (valori frequenti) | Coefficiente ψ_2 (valori quasi permanenti) |
|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---|
| Azioni da traffico (Tab. 5.1.IV) | Schema 1 (carichi tandem) | 0,75 | 0,75 | 0,0 |
| | Schemi 1, 5 e 6 (carichi distribuiti) | 0,40 | 0,40 | 0,0 |
| | Schemi 3 e 4 (carichi concentrati) | 0,40 | 0,40 | 0,0 |
| | Schema 2 | 0,0 | 0,75 | 0,0 |
| | 2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | 3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | 4 (folla) | -- | 0,75 | 0,0 |
| | 5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Vento | a ponte scarico SLU e SLE | 0,6 | 0,2 | 0,0 |
| | in esecuzione | 0,8 | 0,0 | 0,0 |
| | a ponte carico SLU e SLE | 0,6 | 0,0 | 0,0 |
| Neve | SLU e SLE | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | in esecuzione | 0,8 | 0,6 | 0,5 |
| Temperatura | SLU e SLE | 0,6 | 0,6 | 0,5 |

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

5.3 COMBINAZIONI AGLI SLU

Di seguito si esplicitano i coefficienti utilizzati per le singole combinazioni di carico rilevanti per le verifiche strutturali dell'impalcato agli SLU.

L'espressione per le combinazioni di verifica strutturali (A1 - STR) è:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Mentre quella per le combinazioni sotto SISMA o ECCEZIONALI è:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Tabella 8 - Coefficienti nelle combinazioni di carico agli SLU

| Combinazione | | G1 | G2 | E1 | E2 | E3 | Gr.1 | Gr.2a | Gr.2b | Q5 | Q6 | q9 |
|--------------|-------|------|------|----|-----|-----|---------------------|-------|-------|-----|----|----|
| A1 STR | Gr.1 | 1.35 | 1.35 | 0 | 1.2 | 0.9 | 1.35 | 0 | 0 | 0.9 | 0 | 0 |
| | Gr.2a | 1.35 | 1.35 | 0 | 1.2 | 0.9 | 0 | 1.35 | 0 | 0.9 | 0 | 0 |
| | Gr.2b | 1.35 | 1.35 | 0 | 1.2 | 0.9 | 0 | 0 | 1.35 | 0.9 | 0 | 0 |
| | Q5 | 1.35 | 1.35 | 0 | 1.2 | 0.9 | 1.35 $\psi_0^{(*)}$ | 0 | 0 | 1.5 | 0 | 0 |
| | E3 | 1.35 | 1.35 | 0 | 1.2 | 1.5 | 1.35 $\psi_0^{(*)}$ | 0 | 0 | 0.9 | 0 | 0 |
| SISMA | SLV Z | 1 | 1 | 0 | 1 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| ECCEZIONALE | - | 1 | 1 | 0 | 1 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

(*) per schema di carico 1, $\psi_0 = 0.75$ per i carichi tandem e $\psi_0 = 0.40$ per i carichi distribuiti

5.4 COMBINAZIONI AGLI SLE

Di seguito si esplicitano i coefficienti utilizzati per le combinazioni di carico rilevanti agli SLE.

L'espressione per le combinazioni di verifica RARE è:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{j \geq 1} \psi_{0,j} Q_{k,j}$$

L'espressione per le combinazioni di verifica FREQUENTI è:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

L'espressione per le combinazioni di verifica QUASI PERMANENTI è:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Tabella 9 - Combinazioni agli SLE

| Combinazione | | G1 | G2 | E1 | E2 | E3 | Gr.1 | Gr.2a | Gr.2b | Q5 |
|------------------|-------|----|----|----|----|-----|---------------|-------|-------|-----|
| RARA | Gr.1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0.6 | 1 | 0 | 0 | 0.6 |
| | Gr.2a | 1 | 1 | 0 | 1 | 0.6 | 0 | 1 | 0 | 0.6 |
| | Gr.2b | 1 | 1 | 0 | 1 | 0.6 | 0 | 0 | 1 | 0.6 |
| | Q5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.6 | ψ_0 | 0 | 0 | 1 |
| | E3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | ψ_0 | 0 | 0 | 0 |
| FREQUENTE | Gr.1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0.5 | 0.75 | 0 | 0 | 0 |
| | Gr.2a | 1 | 1 | 0 | 1 | 0.5 | 0.75 ψ_0 | 0.75 | 0 | 0 |
| | Q5 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0.2 |
| | E3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0.6 | 0 | 0 | 0 | 0.2 |
| QUASI PERMANENTE | - | 1 | 1 | 0 | 1 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 |

(*) per schema di carico 1, $\psi_0 = \psi_1 = 0.75$ per i carichi tandem e $\psi_0 = \psi_1 = 0.40$ per i carichi distribuiti

6. MODELLI DI CALCOLO E METODO DI ANALISI

Le analisi sono state condotte mediante l'ausilio del *MIDAS/CIVIL 2020*. Il software è stato impiegato per la modellazione dell'intera opera, finalizzata all'analisi strutturale. Dal modello sono state dedotte, per le combinazioni di calcolo statiche e sismiche descritte in precedenza, le sollecitazioni complessive agenti sull'impalcato al fine di procedere con le verifiche di sicurezza previste dalle normative di riferimento. Dallo stesso modello sono state poi ricavate le sollecitazioni agenti sulle sottostrutture necessarie ai fini delle verifiche geotecniche del sistema terreno-fondazione e delle verifiche strutturali, entrambe riportate nella specifica relazione di calcolo e pertanto non contenute nel presente documento.

6.1 ORIGINE E CARATTERISTICHE DEI CODICI DI CALCOLO

Nell'ambito del presente paragrafo si riporta una descrizione delle caratteristiche dei software utilizzati per l'effettuazione delle analisi e verifiche strutturali esposte ai precedenti paragrafi.

Nello specifico, l'analisi del comportamento globale delle strutture d'impalcato è stato effettuato con l'ausilio del software *MIDAS/CIVIL 2021*, distribuito in Italia dalla **CSPFea** (Padova).

Per l'esecuzione di verifiche di sezioni in cemento armato si è invece utilizzato il software **PresFle+**, prodotto e distribuito dalla **Concrete srl** (Padova).

Infine si è ricorso a fogli di calcolo elettronici auto-prodotti, per l'automatizzazione di ulteriori verifiche effettuate quali elementi in acciaio e/o elementi strutturali secondari.

Affidabilità dei codici di calcolo

Un attento esame preliminare della documentazione a corredo dei software impiegati ha consentito di valutarne l'affidabilità. La documentazione fornita dal produttore dei software contiene un'esauriente descrizione delle basi teoriche, degli algoritmi impiegati e l'individuazione dei campi d'impiego. Le stesse società produttrici hanno verificato l'affidabilità e la robustezza dei codice di calcolo attraverso un numero significativo di casi prova in cui i risultati sono contenuti in apposita documentazione fornita a corredo dell'acquisto del prodotto, che per brevità espositiva si omette di allegare al presente documento.

Giudizio motivato di accettabilità dei risultati

I risultati delle elaborazioni esposte nel documento sono state inoltre sottoposte a controlli dal sottoscritto utente del software. Tale valutazione ha compreso il confronto con i risultati di semplici calcoli, eseguiti con metodi tradizionali, che per brevità espositiva si omette dall'allegare al presente documento.

Inoltre sulla base di considerazioni riguardanti gli stati tensionali e deformativi determinati, si è valutata la validità delle scelte operate in sede di schematizzazione e di modellazione della struttura e delle azioni. In base a quanto sopra, Il Progettista dichiara pertanto che l'elaborazione è corretta ed idonea al caso specifico, validando conseguentemente i risultati dei calcoli esposti nella presente relazione.

6.2 MODELLO DI CALCOLO STATICO E SISMICO

6.2.1 Modello di calcolo statico

Il viadotto è stato modellato con elementi monodimensionali rappresentativi rispettivamente:

- delle travi longitudinali a sezione composta;
- dei traversi intermedi;
- dei traversi di testata in parete piena
- Elementi di trave simulanti la soletta, disposti in direzione trasversale per modellare correttamente la ripartizione trasversale dei carichi accidentali.

Il riferimento di assi globali è orientato come segue:

- X = asse longitudinale impalcato;
- Y = asse trasversale impalcato;
- Z = asse verticale impalcato.

Gli assi locali degli elementi di carpenteria principale sono orientati in maniera analoga al riferimento globale. Nelle figure seguenti sono rappresentate alcune viste del modello utilizzato.

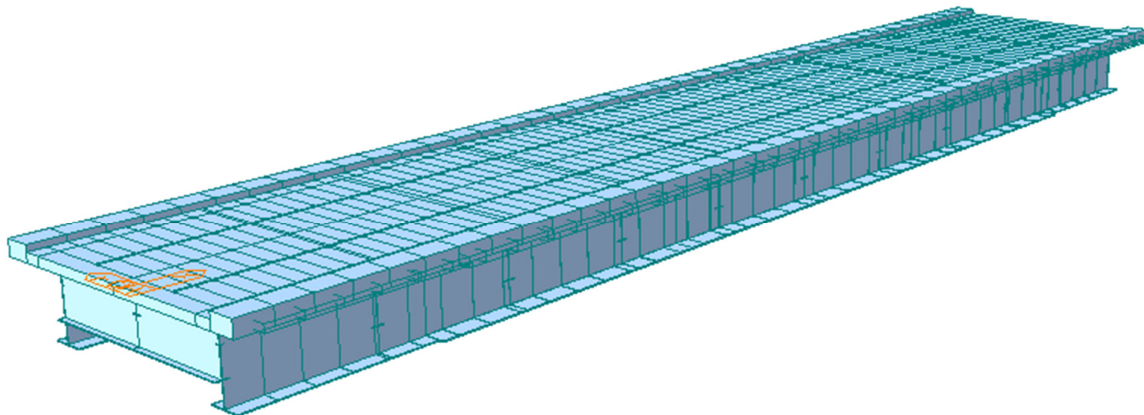


Figura 11 –Modello FEM vista estrusa

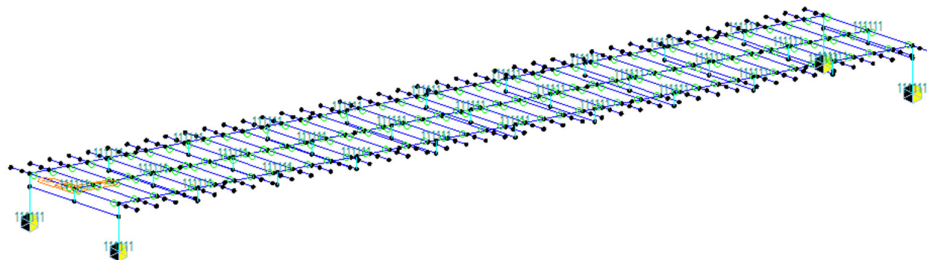


Figura 12 – Modello FEM vista wireframe

Nel modello sono utilizzate le seguenti condizioni di vincolo:

- bracci rigidi tra l'estradosso (asse) delle travi e l'intradosso;

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

- rilascio dei momenti trasversali di estremità negli elementi di soletta;
- point spring supports (elastic) in corrispondenza degli isolatori

In corrispondenza delle sottostrutture sono state utilizzate molle elastiche a cui sono state attribuite le rigidità elastiche equivalente corrispondenti agli isolatori elastomerici (vedi paragrafo successivo). Da tale modello sono state ricavati gli scarichi agenti sulle sottostrutture, per il quale calcolo si rimanda alla specifica relazione.

6.2.2 Modello di calcolo sismico

La valutazione delle azioni sismiche e dei criteri di dimensionamento delle sottostrutture e dei dispositivi di isolamento è stata sviluppata nel rispetto delle indicazioni e prescrizioni riportate nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008) tramite analisi lineare dinamica con spettro di risposta.

Per la valutazione delle azioni sismiche e per la definizione delle caratteristiche meccaniche dei dispositivi di isolamento, si è proceduto con i seguenti criteri e considerazioni:

- obiettivo del sistema di isolamento sismico è il contenimento delle azioni orizzontali trasmesse alle sottostrutture.
- il dispositivo di isolamento sismico longitudinale o trasversale comporta durante l'evento sismico uno spostamento relativo tra sottostrutture ed impalcato il cui valore risulta determinante per l'abbattimento dell'azione sismica. Tale valore non può d'altra parte risultare troppo elevato e quindi incompatibile con il funzionamento degli apparecchi di appoggio e dei giunti. Per il dimensionamento del sistema di isolamento è stato fissato come spostamento relativo massimo in condizione sismica un valore di circa ± 170 mm per gli isolatori longitudinali e trasversali.

I dispositivi scelti sono del tipo elastomerico con nucleo in piombo che, mediante la plasticizzazione del nucleo, consentono di ottenere un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente fino a circa il 30%.

Le analisi dinamiche dell'opera sono state condotte sul modello di calcolo precedentemente descritto, in cui i vincoli di appoggio sono stati modellati attraverso molle (*point spring support*) con caratteristiche elastiche equivalenti del dispositivo scelto K_e e il coefficiente di smorzamento ξ_e sullo spettro di progetto fornito dalle tabelle del produttore (21%). Per ulteriori dettagli sul dispositivo utilizzato si rimanda al paragrafo 11.

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato II SLV

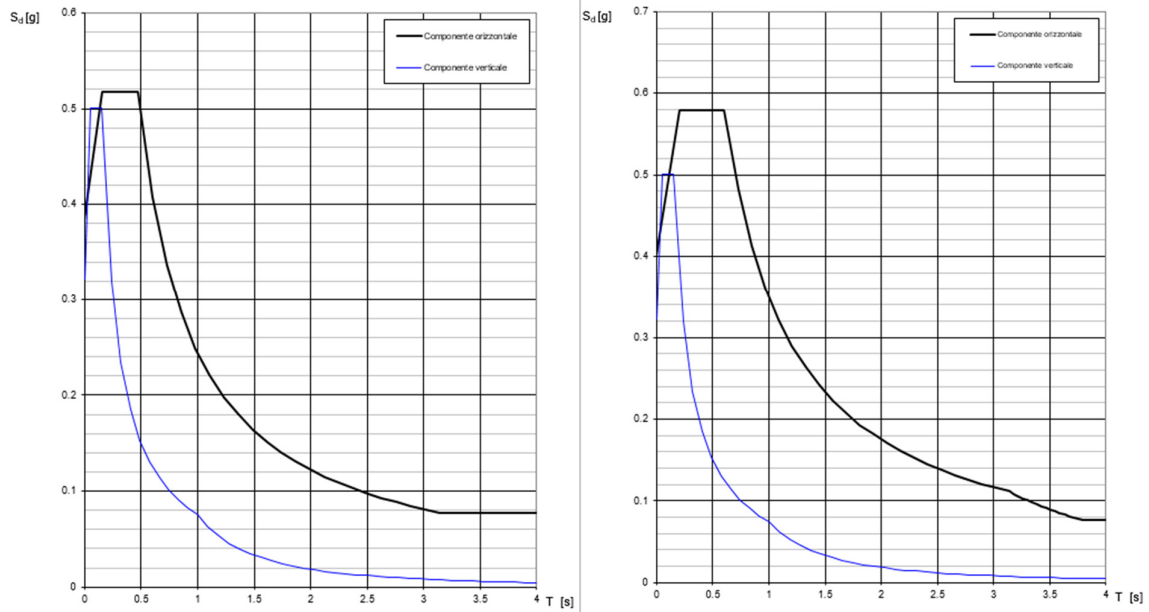


Figura 13 – Spettri di risposta allo SLV e allo SLC con coefficiente di smorzamento viscoso equivalente pari al 21%

6.3 DETERMINAZIONE DELLA LARGHEZZA EFFICACE DI SOLETTA

La distribuzione delle tensioni normali nelle sezioni composte viene determinata utilizzando nel modello di calcolo la larghezza efficace come descritto in §4.3.2.3 del D. Min. 14/01/2008.

La larghezza di soletta collaborante, necessaria per la determinazione delle caratteristiche geometriche delle sezioni in fase 2 è stata quindi determinata con riferimento alla figura seguente, come $b_{eff} = b_0 + b_{ei} + b_{e2}$.

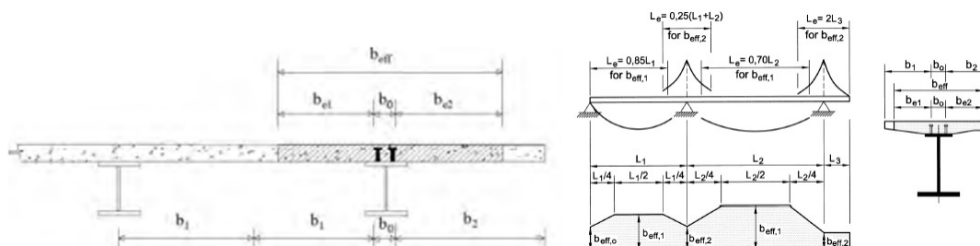


Figura 14 - Larghezza di soletta collaborante

Dove $b_{ei} = \min (L_e/8, b_i)$ con L_e luce equivalente da valutarsi, per travi continue, secondo lo schema riportato in figura.

Per gli appoggi di estremità l'espressione della larghezza efficace è stata corretta come $b_{eff} = b_0 + \beta_1 b_{ei} + \beta_2 b_{e2}$ con $\beta_i = (0.55 + 0.025 L_e/b_{eff,i}) \leq 1$. In definitiva si ottiene:

Tabella 10 - Calcolo della Larghezza Efficace di Soletta

| | | |
|-----------|-----|------|
| L_1 | [m] | 41.0 |
| L_2 | [m] | - |
| L_e | [m] | 41.0 |
| b_0 | [m] | 0.55 |
| b_1 | [m] | 1.30 |
| b_2 | [m] | 1.30 |
| b_{e1} | [m] | 1.30 |
| b_{e2} | [m] | 1.30 |
| β_1 | - | 1.00 |
| β_2 | - | 1.00 |
| b_{eff} | [m] | 3.15 |

Viene quindi adottata sempre una larghezza di soletta collaborante pari a 3.15 m.

6.4 EFFETTI DEL RITIRO E DELLA VISCOSITÀ

Gli effetti della viscosità possono essere messi in conto tramite un'analisi esatta, che tenga conto dello sviluppo nel tempo delle deformazioni anelastiche del calcestruzzo, oppure tramite metodo semplificato, che utilizzi differenti coefficienti di omogenizzazione – definiti dalla normativa vigente – per i diversi tipi di azioni applicate alla struttura. I due approcci sono chiariti di seguito. L'analisi sviluppata è basata sul "Metodo Esatto" fornendo tuttavia per verifica un confronto con i risultati che si otterrebbero tramite metodo approssimato.

Metodo Esatto - Analisi al Passo

Il software utilizzato consente di discretizzare nel tempo gli effetti delle deformazioni anelastiche del calcestruzzo. Gli effetti del ritiro sono valutati come effetti di n incrementi di deformazione anelastica da ritiro che si sviluppa nel tempo secondo la funzione rappresentata in Figura 3: ad ognuno di questi incrementi è associato lo sviluppo di una deformazione anelastica viscosa, variabile nel tempo. Ambedue le componenti di deformazione anelastica sono modellate come azioni equivalenti, "primary effects", applicate alla sezione composta e tramite i relativi effetti, "secondary effects". Tali componenti sono esplicitate di seguito. Le azioni equivalenti, "primary effects", associate alla contrazione impedita da ritiro sono:

- uno sforzo normale di compressione $N_r(t, t_0)$ applicato baricentricamente sulla sezione composta da trave e soletta;
- un momento flettente positivo $M_r(t, t_0)$ applicato alla sezione composta da trave e soletta;

dove:

- $N_r(t, t_0) = A_c \times E_c \times \varepsilon_r(t, t_0)$ con A_c area della soletta, E_c modulo istantaneo del calcestruzzo, $\varepsilon_r(t, t_0)$ deformazione da ritiro al tempo t e $t_0 = 3gg$.
- $M_r(t, t_0) = N_r(t, t_0) \times e_y$ con e_y eccentricità tra baricentro soletta e sezione composta omogeneizzato con modulo istantaneo del calcestruzzo E_c .

Tali azioni sono ripartite, imponendo l'equilibrio e la congruenza, tra soletta e trave e si traducono in azioni di sforzo normale baricentrico e momento flettente, "secondary effects", ovvero $N_{r1}(t, t_0)$ ed $M_{r1}(t, t_0)$ sulla trave (parte 1 della sezione composta) ed $N_{r2}(t, t_0)$ ed $M_{r2}(t, t_0)$ sulla soletta (parte 2 della sezione composta). Lo stato di sforzo nelle due parti della sezione composta è quindi:

- nella trave $N_{r1}(t, t_0)$ ed $M_{r1}(t, t_0)$;
- nella soletta $N_{r2}(t, t_0)$ ed $M_{r2}(t, t_0)$.

Le azioni equivalenti, "primary effects", associate alle deformazioni viscose sono:

- uno sforzo normale $\Delta N_\phi(t, t_i)$ applicato baricentricamente sulla sezione composta da trave e soletta;
- un momento flettente $M_\phi(t, t_i)$ applicato alla sezione composta da trave e soletta.

dove:

- $\Delta N_\phi(t, t_i) = A_c \times E_c \times \Delta \varepsilon_\phi(t, t_i)$ con A_c area della soletta, E_c modulo istantaneo del calcestruzzo, $\Delta \varepsilon_\phi(t, t_i)$ deformazione viscosa al tempo t dovuta a un incremento di tensione $\Delta \sigma(t_i)$ applicata all'istante t_i .
- $\Delta M_\phi(t, t_i) = \Delta N_\phi(t, t_i) \times e_y$ con e_y eccentricità tra baricentro soletta e sezione composta omogeneizzato con modulo istantaneo del calcestruzzo E_c .

Tali azioni sono ripartite, imponendo l'equilibrio e la congruenza, tra soletta e trave e si traducono in azioni di sforzo normale baricentrico e momento flettente, "secondary effects", ovvero $\Delta N_{\phi1}(t, t_i)$ ed $\Delta M_{\phi1}(t, t_i)$ sulla trave (parte 1 della sezione composta) ed $\Delta N_{\phi2}(t, t_i)$ ed $\Delta M_{\phi2}(t, t_i)$ sulla soletta (parte 2 della sezione composta). Lo stato di sforzo nelle due parti della sezione composta è quindi:

- nella trave $\Delta N_{\phi1}(t, t_i)$ ed $\Delta M_{\phi1}(t, t_i)$;

- nella soletta $\Delta N_{\phi 2}(t, t_i) - \Delta N_{\phi}(t, t_i)$ ed $\Delta M_{\phi 2}(t, t_i)$.

Metodo Semplificato - Coefficienti di omogeneizzazione da Normativa

Come specificato al punto 5.4.2.2. dell'UNI EN 1994-1-1:2005, si può tenere conto degli effetti della viscosità del calcestruzzo utilizzando differenti coefficienti di omogeneizzazione n_L in funzione del tipo di carico, secondo l'espressione:

- $n_L = n_0 (1 + \psi_L \phi_{tL})$

dove:

- n_0 è il coefficiente di omogeneizzazione per carichi di breve durata pari ad E_a/E_c ;
- ϕ_{tL} è il coefficiente di viscosità del calcestruzzo a tempo infinito funzione dell'età del calcestruzzo all'atto dell'applicazione del carico considerato;
- ψ_L è il moltiplicatore del coefficiente di viscosità dipendente dal tipo di carico, con valori che possono essere assunti pari ad 1.1 per carichi permanenti e a 0.55 per il ritiro.

In definitiva i coefficienti di omogeneizzazione nel caso in esame risultano:

Tabella 11 - Coefficienti di Omogeneizzazione

| Coefficienti di Omogeneizzazione | | | |
|---|--|------|-----------------------------------|
| per carichi accidentali e di breve durata | | | $n_0 = 6.3$ |
| per gli effetti del ritiro | $\phi(t_{oo}, t_0 = 3 \text{ gg.}) =$ | 2.33 | $\psi_L = 0.55$ $n_{r,oo} = 14.4$ |
| per carichi permanenti | $\phi(t_{oo}, t_0 = 30 \text{ gg.}) =$ | 1.51 | $\psi_L = 1.1$ $n_{p,oo} = 22.4$ |

Gli effetti del ritiro in tal caso si valutano come un'azione di trazione sulla sola soletta pari a:

- $N_{r,oo} = A_c \times (n_{r,oo}/n_0) \times E_c \times \epsilon_{r,oo}$.

e come delle azioni equivalenti sulla sezione composta pari a:

- $N_{r,oo} = A_c \times (n_{r,oo}/n_0) \times E_c \times \epsilon_{r,oo}$;
- $M_{r,oo} = N_{r,oo} \times e_y$ con e_y eccentricità tra baricentro soletta e sezione composta omogeneizzato coefficiente $n_{r,oo}$.

Gli effetti dei carichi di lunga durata (carichi permanenti portati) si valutano invece utilizzando un coefficiente di omogeneizzazione $n_{p,oo}$.

6.5 FASI DI CALCOLO

I modelli studiati e le fasi di calcolo e di verifica considerano le fasi di montaggio, maturazione e gli effetti differiti conseguenti alle varie età della struttura. Si distinguono le seguenti fasi di riferimento:

- **fase 1.1:** corrispondente al varo dell'impalcato sulle sottostrutture. In questa fase, l'impalcato è soggetto al solo peso proprio della carpenteria metallica;
- **fase 1.2:** corrispondente al getto della soletta. In questa fase sono presenti il peso proprio della carpenteria metallica e il peso della soletta non ancora collaborante applicata come carico distribuito sulle travi;

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

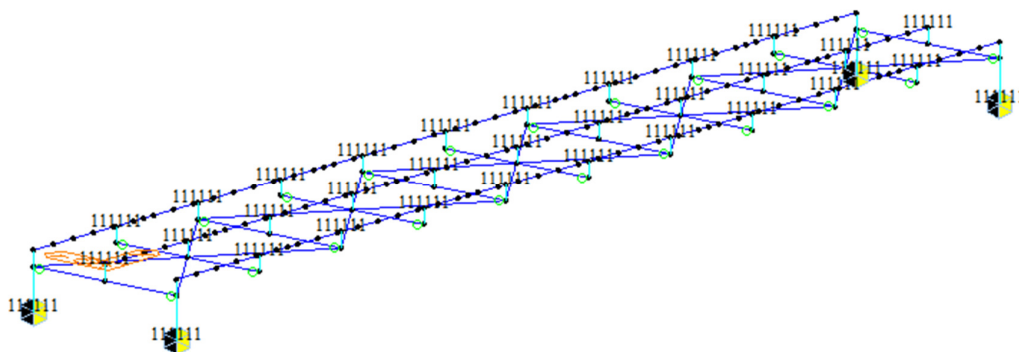


Figura 15 - Fasi di calcolo 1.1 e 1.2

- **fase 2.1:** impalcato in esercizio completo con soletta collaborante, di durata pari a 30 gg., considera gli effetti dovuti al ritiro iniziale e alla relativa viscosità del calcestruzzo variabili nel tempo.
- **fase 2.2:** impalcato in esercizio completo con soletta collaborante e carichi permanenti portati, di durata pari a 10000 gg., considera gli effetti dovuti ai carichi applicati, al ritiro a lungo termine e alla relativa viscosità del calcestruzzo variabili nel tempo.

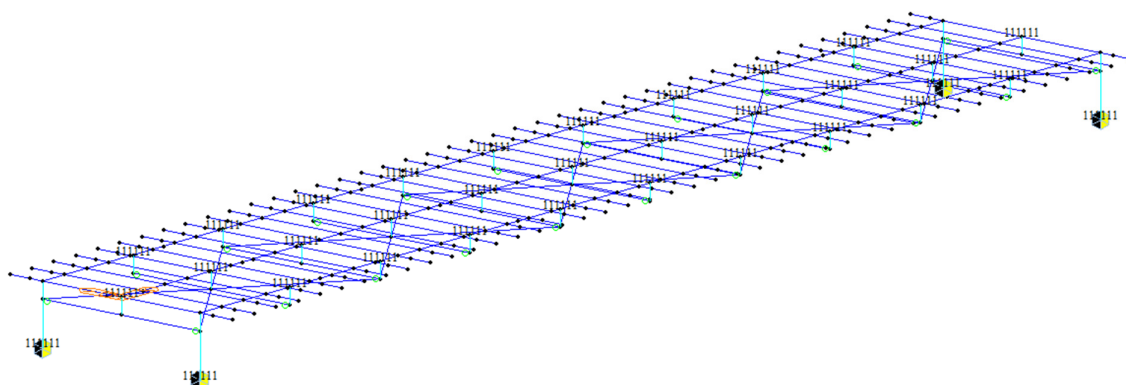


Figura 16 - Fasi di calcolo 2.1 e 2.2

- **fase 3 (fase finale):** impalcato in esercizio per carichi di breve durata, quali quelli mobili, variazioni di temperatura, vento. In questa fase la sezione resistente risulta composta, ovvero acciaio + soletta collaborante, con modulo elastico istantaneo non ridotto.

6.6 CARATTERISTICHE DI CALCOLO DELLE SEZIONI

Si riportano di seguito le caratteristiche meccaniche dei conci delle nervature principali utilizzate per il calcolo delle sollecitazioni. Si precisa che per l'analisi globale delle sollecitazioni, sviluppata secondo il metodo elastico, vengono utilizzate le sezioni lorde delle nervature in acciaio

Si considera collaborante la sola soletta con spessore pari allo spessore minimo di 300 mm.

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

Nel seguito si fa riferimento alla sezione in acciaio e alle sezioni composte con coefficienti di omogeneizzazione n_0 , n_{roo} e n_{poo} , così come specificati precedentemente.

Le caratteristiche meccaniche dei singoli conci sono riportate di seguito. Si è considerato il contributo dell'acciaio, del calcestruzzo e di un'armatura longitudinale di soletta superiore e inferiore pari a $\phi 22/200$.

Tabella 12 - Proprietà meccaniche conci

| Concio | A [mm ²] | zinf [mm] | Acciaio | | | Jt [mm ⁴] |
|---|-------------------------|--------------|--------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| | | | zsup [mm] | lyy [mm ⁴] | lzz [mm ⁴] | |
| 1 | 8.98E+04 | 9.66E+02 | 1.03E+03 | 6.15E+10 | 2.95E+09 | 2.15E+07 |
| 2a | 1.07E+05 | 7.82E+02 | 1.22E+03 | 7.50E+10 | 6.89E+09 | 3.76E+07 |
| 2b | 1.19E+05 | 7.08E+02 | 1.29E+03 | 8.08E+10 | 8.33E+09 | 6.20E+07 |
| 3 | 1.19E+05 | 7.56E+02 | 1.24E+03 | 8.75E+10 | 8.61E+09 | 6.82E+07 |
| Mista + armatura t_0 (carichi di breve durata) | | | | | | |
| Concio | A [mm ²] | zinf [mm] | zsup [mm] | lyy [mm ⁴] | lzz [mm ⁴] | Jt [mm ⁴] |
| 1 | 2.02E+05 | 1.62E+03 | 6.36E+02 | 1.32E+11 | 8.78E+10 | 5.45E+09 |
| 2a | 2.19E+05 | 1.48E+03 | 7.76E+02 | 1.78E+11 | 9.18E+10 | 5.47E+09 |
| 2b | 2.31E+05 | 1.41E+03 | 8.50E+02 | 2.01E+11 | 9.32E+10 | 5.49E+09 |
| 3 | 2.31E+05 | 1.43E+03 | 8.26E+02 | 2.00E+11 | 9.35E+10 | 5.50E+09 |
| Mista + armatura t_{00} (effetti del ritiro) | | | | | | |
| Concio | A [mm ²] | zinf [mm] | zsup [mm] | lyy [mm ⁴] | lzz [mm ⁴] | Jt [mm ⁴] |
| 1 | 1.44E+05 | 1.41E+03 | 8.51E+02 | 1.08E+11 | 4.23E+10 | 2.54E+09 |
| 2a | 1.61E+05 | 1.24E+03 | 1.02E+03 | 1.42E+11 | 4.63E+10 | 2.56E+09 |
| 2b | 1.73E+05 | 1.16E+03 | 1.10E+03 | 1.58E+11 | 4.77E+10 | 2.58E+09 |
| 3 | 1.73E+05 | 1.19E+03 | 1.07E+03 | 1.59E+11 | 4.80E+10 | 2.59E+09 |
| Mista + armatura t_{00} (carichi di lunga durata) | | | | | | |
| Concio | A [mm ²] | zinf [mm] | zsup [mm] | lyy [mm ⁴] | lzz [mm ⁴] | Jt [mm ⁴] |
| 1 | 1.37E+05 | 1.37E+03 | 8.89E+02 | 1.04E+11 | 3.70E+10 | 2.20E+09 |
| 2a | 1.54E+05 | 1.20E+03 | 1.06E+03 | 1.36E+11 | 4.09E+10 | 2.21E+09 |
| 2b | 1.66E+05 | 1.12E+03 | 1.14E+03 | 1.50E+11 | 4.23E+10 | 2.24E+09 |
| 3 | 1.66E+05 | 1.15E+03 | 1.11E+03 | 1.53E+11 | 4.26E+10 | 2.24E+09 |

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

6.7 METODO DI ANALISI GLOBALE E CLASSIFICAZIONE DELLE SEZIONI

Il DM 2008 prevede per le strutture in acciaio e in acciaio calcestruzzo la possibilità di utilizzare i seguenti metodi di analisi globale:

- elastica;
- plastica;
- elasto-plastica.

Tali metodi di analisi sono associati al metodo di valutazione della resistenza delle sezioni trasversali e alle classi di appartenenza delle sezioni come definite al punto 4.2.3.1 del DM 2008.

Tabella 13 - Metodi di analisi globale e classificazione delle sezioni.

| Metodo di analisi globale | Metodo di calcolo della capacità resistente della sezione | Tipo di sezione |
|---------------------------|---|-------------------------|
| (E) | (E) | tutte (*) |
| (E) | (P) | compatte (classi 1 e 2) |
| (E) | (EP) | tutte (*) |
| (P) | (P) | compatte di classe 1 |
| (EP) | (EP) | tutte (*) |

(*) per le sezioni di classe 4 la capacità resistente può essere calcolata con riferimento alla sezione efficace.

Nel caso in esame si adotta un **metodo di verifica globale elastico**. La verifica in campo elastico è ammessa per tutti i tipi di sezione, con l'avvertenza di tenere conto degli effetti di instabilità locale per le sezioni di classe 4. Pertanto di seguito viene riportata la classificazione delle sezioni condotta per le travi che costituiscono il ponte in esame. Non viene riportata la classificazione delle piattabande inferiori che per la tipologia di opera in esame risultano sempre tese.

Si omette la classificazione della sezione trasversale della trave secondaria centrale (trave di spina), che ricade evidentemente in Classe 3.

Tabella 14 – Classificazione delle piattabande superiori

| Ali superiori | Concio | H | B _{sup} | t _{sup} | B _{inf} | t _{inf} | t _w | h _w | C _{sup} | ε | 14 ε | C/t | Classe |
|---------------|--------|------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|----------------|------------------|------|------|------|--------|
| | | mm | mm | mm | mm | mm | mm | mm | mm | - | - | - | - |
| | 1 | 2000 | 750 | 30 | 900 | 30 | 20 | 1940 | 365 | 0.81 | 11.3 | 12.2 | 4 |
| | 2a | 2000 | 750 | 32 | 1200 | 40 | 18 | 1928 | 366 | 0.81 | 11.3 | 11.4 | 4 |
| | 2b | 2000 | 750 | 32 | 1200 | 50 | 18 | 1918 | 366 | 0.81 | 11.3 | 11.4 | 4 |
| | 3 | 2000 | 750 | 40 | 1200 | 50 | 15 | 1910 | 368 | 0.81 | 11.3 | 9.2 | 3 |

Tabella 15 – Classificazione dei pannelli d'anima

| Concio | = | 1 | 2A | 2B | 3 |
|---------------------|-----------------|-------|--------|--------|--------|
| H | mm | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| B _{sup} | mm | 750 | 750 | 750 | 750 |
| t _{f, sup} | mm | 30 | 32 | 32 | 40 |
| B _{inf} | mm | 900 | 1200 | 1200 | 1200 |
| t _{f, inf} | mm | 30 | 40 | 50 | 50 |
| h _a | mm | 1940 | 1928 | 1918 | 1910 |
| t | mm | 20 | 18 | 18 | 15 |
| Area sezione | mm ² | 88300 | 106704 | 118524 | 118650 |
| C/t | = | 97.00 | 107.11 | 106.56 | 127.33 |
| ε | = | 0.81 | 0.81 | 0.81 | 0.81 |

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

| | | | | | |
|--|---|----------|----------|----------|----------|
| Classe Pannello compressione semplice | | | | | |
| 42 € | = | 34.2 | 34.2 | 34.2 | 34.2 |
| Classe Pannello | = | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Classe Pannello flessione pura | | | | | |
| 72 € | = | 58.6 | 58.6 | 58.6 | 58.6 |
| Classe Pannello | = | 4 | 4 | 4 | 4 |

Le verifiche in campo elastico, per gli stati di sforzo piani tipici delle travi, si eseguono con riferimento al seguente criterio:

$$\sigma_{x.Ed}^2 + \sigma_{z.Ed}^2 - \sigma_{z.Ed} \sigma_{x.Ed} + 3\tau_{Ed}^2 \leq (f_{vk} / \gamma_{M0})^2$$

Dove:

- σ_x è il valore di calcolo della tensione normale nel punto in esame, agente in direzione parallela all'asse della membratura;
- σ_z è il valore di calcolo della tensione normale nel punto in esame, agente in direzione ortogonale all'asse della membratura;
- τ è il valore di calcolo della tensione tangenziale nel punto in esame, agente nel piano della sezione della membratura;

Facendo riferimento ad una procedura di comprovata validità, come consentito ai punti 4.2.4.1.2 e 4.2.4.1.3.4 del DM 2008 e C4.2.4.1.3.4 della circolare applicativa, le verifiche saranno eseguite facendo riferimento al limite elastico degli elementi (stato limite ultimo elastico), indipendentemente dalla classificazione delle sezioni. In tali ipotesi, le verifiche di resistenza e stabilità saranno svolte con il metodo tensionale. In sostanza, ciò significa considerare tutte le sezioni in classe 4 verificandone poi la stabilità locale senza impiegare il metodo delle larghezze efficaci.

Nel caso in esame, la verifica di instabilità locale sarà condotta unicamente per i pannelli d'anima compresi tra due irrigidimenti longitudinali e due irrigidimenti trasversali, soggetti a compressione, in quanto le piattabande inferiori risultano sempre tese e le piattabande superiori non vanno incontro al rischio di instabilità grazie alla presenza della soletta.

Si evidenzia che nell'analisi dei modelli e nella verifica a taglio, in conformità alla Normativa vengono utilizzate comunque le sezioni lorde anche per le eventuali sezioni di Classe 4.

6.8 METODI DI VERIFICA

6.8.1 Verifiche allo Stato Limite Ultimo delle nervature principali

Le nervature principali sono vincolate lateralmente dalla presenza dei diaframmi intermedi a passo 6000 mm e dalla soletta in corrispondenza delle piattabande compresse. Le sollecitazioni torcenti applicate all'impalcato sono prevalentemente assorbite dal sistema travi-soletta-traversi. Pertanto in accordo a quanto previsto al punto 4.2.4.1.3.2 del DM 2008, non si rendono necessarie verifiche di stabilità globali, flessionale e flesso-torsionale, delle membrature. Si svolgono pertanto nel seguito le sole verifiche di resistenza delle nervature, le verifiche per instabilità a taglio dei pannelli d'anima e le verifiche a fatica.

6.8.1.1 Verifiche di resistenza

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

Le verifiche si svolgono in campo elastico in accordo a quanto previsto al punto 4.2.4.1.2 e 4.3.4.2.1.1 del DM 2008. Le verifiche sono pertanto svolte come verifiche tensionali, nei seguenti punti.

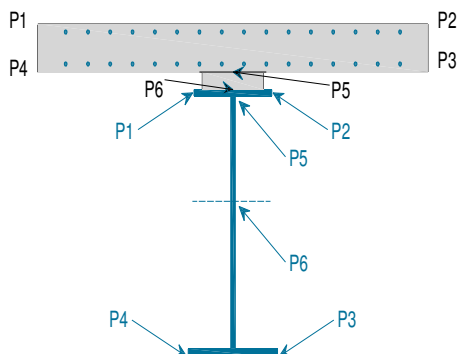


Figura 17 - Punti di verifica

Le tensioni ideali d'anima (P6) sono valutate in corrispondenza del baricentro della sezione lorda d'acciaio. Le coordinate dei punti di verifica della nervatura in acciaio sono riportate nella tabella seguente.

Tabella 16 - Coordinate punti di verifica acciaio

| Coordinate punti di verifica acciaio | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Concio | y1 mm | z1 mm | y2 mm | z2 mm | y3 mm | z3 mm | y4 mm | z4 mm | y5 mm | z5 mm | y6 mm | z6* mm |
| 1 | -375 | 2000 | 375 | 2000 | 450 | 0 | -450 | 0 | 0 | 1968 | 0 | 966 |
| 2a | -375 | 2000 | 375 | 2000 | 600 | 0 | -600 | 0 | 0 | 1968 | 0 | 782 |
| 2b | -375 | 2000 | 375 | 2000 | 600 | 0 | -600 | 0 | 0 | 1968 | 0 | 708 |
| 3 | -375 | 2000 | 375 | 2000 | 600 | 0 | -600 | 0 | 0 | 1960 | 0 | 756 |

Per le nervature in acciaio la verifica viene svolta sulla tensione ideale:

$$\sigma_{id}^2 = \sigma_n^2 + 3\tau^2 \leq \left(\frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}}\right)^2$$

per acciaio S355:

- $\sigma_{id} \leq 338 \text{ MPa}$ per $t \leq 40 \text{ mm}$;
- $\sigma_{id} \leq 319 \text{ MPa}$ per $t > 40 \text{ mm}$.

In progetto, per i piatti delle ali delle travi principali, è possibile adoperare sempre spessori inferiori o uguali a 40 mm, al fine di garantire sempre il massimo valore di resistenza allo snervamento possibile. Eventuali spessori maggiori sono da coprire con piatti aggiuntivi.

Per il calcestruzzo della soletta la verifica viene svolta sulla tensione normale minima (verifica a compressione).

- $\sigma_{cd} \leq f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_M = 19.8 \text{ N/mm}^2$

6.8.1.2 Verifiche di stabilità a taglio dei pannelli d'anima

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

Le verifiche sono svolte conformemente a quanto previsto al punto C4.2.4.1.3.4.1 della CM 2009 e al punto 4.3 del EN 1993-1-5.

La valutazione della resistenza all'instabilità per taglio risulta necessaria per i pannelli privi di irrigidimenti longitudinali se non è soddisfatta la seguente relazione:

$$\frac{h_w}{t} \leq 72 \frac{\varepsilon}{\eta}$$

Mentre nel caso di pannelli irrigiditi è:

$$\frac{h_w}{t} \leq 31 \frac{\varepsilon}{\eta} \sqrt{k_\tau}$$

dove:

- h_w è l'altezza totale del pannello d'anima;
- t : è lo spessore del pannello;
- $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.81$;
- $\eta = 1.2 \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} / \frac{1.1}{\gamma_{M0}} = 1.2 \cdot \frac{1.1}{1.05} = 1.25$;
- k_τ è il minimo coefficiente d'instabilità per taglio del pannello.

Nel caso in cui si renda necessaria, la verifica della resistenza all'instabilità per taglio consiste nel verificare che il taglio di progetto sia inferiore al taglio resistente definito come:

$$V_{cRd} = \chi_v f_{ywd} h_w t / \sqrt{3}$$

dove V_{cRd} è definito dalla normativa citata.

Il coefficiente k_τ è funzione del rapporto d'allungamento $\alpha = a/h_w$ e del numero di irrigiditori, dove a è la lunghezza del pannello compresa tra due irrigiditori trasversali. In particolare, se gli irrigiditori longitudinali sono più di due o se il rapporto di allungamento $\alpha \geq 3$, il coefficiente k_τ è dato da:

$$k_\tau = 5.34 + 4.00 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 + k_{\tau 1} \quad \text{se } \alpha = a / h_w \geq 1$$

$$k_\tau = 4.00 + 5.34 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 + k_{\tau 1} \quad \text{se } \alpha = a / h_w < 1$$

Con:

$$k_{\tau 1} = \max \left[\left(\frac{3}{\alpha} \right)^2 \sqrt[4]{\left(\frac{I_{sl}}{t^3 h_w} \right)^3}; \frac{2.1}{t} \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{h_w}} \right]$$

Dove con I_{sl} si intende la somma delle singole inerzie ($I_{sl,1}$) degli irrigidimenti longitudinali rispetto ai singoli assi baricentrici paralleli al piano d'anima, considerando una l'arghezza d'anima collaborante pari a 15 ε t.

Se, invece, gli irrigiditori sono uno o due e $\alpha < 3$, il coefficiente k_τ è:

$$k_\tau = 4.1 + \left(\frac{1}{\alpha^2} \right) + \left(6.3 + 0.18 \frac{I_{sl}}{t^3 h_w} \right) + 2.2 \cdot \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{t^3 h_w}}$$

6.8.1.3 Verifiche all'imbozzamento dei pannelli d'anima

I pannelli d'anima, indipendentemente dalla classe della sezione, sono stati verificati anche nei confronti dell'imbozzamento per effetto dell'azione combinata di taglio momento e sforzo normale. La verifica per imbozzamento è stata condotta secondo il metodo fornito al par. 7.6.2.1 dalla norma CNR10011.

6.8.1.4 Verifiche delle connessioni trave-soletta

Le connessioni trave-soletta sono realizzate mediante pioli tipo Nelson, disposti in numero di 3 per trave ad interasse di 150 mm. I pioli hanno diametro di 19 mm ed altezza di 200 mm.

Con riferimento al D.M. 14/01/2008 p.to 4.3.4.3.1.2 la resistenza di calcolo a taglio di un piolo allo SLU può essere assunta pari al minore dei seguenti valori:

- $P_{rd,a} = 0,8 f_t (\pi d^2 / 4) / \gamma_v$
- $P_{rd,c} = 0,29 \alpha d^2 (f_{ck} E_c)^{0,5} / \gamma_v$

con:

- $\gamma_v = 1.25$ coefficiente di sicurezza
- $f_t = 450$ MPa resistenza a rottura dell'acciaio del piolo
- $d = 19$ mm diametro piolo
- $f_{ck} = 35$ MPa resistenza cilindrica del calcestruzzo della soletta
- $E_c = 34077$ MPa modulo elastico del calcestruzzo della soletta
- $\alpha = 1$ per $h/d > 4$
- $h = 200$ mm altezza del piolo

Per Stato Limite di Esercizio si considera il minore tra:

- $P_{rd,a SLE} = 0,6 * P_{rd,a}$
- $P_{rd,c SLE} = 0,6 * P_{rd,c}$

Le resistenze ricavate vanno confrontate con i valori dello scorrimento trave-soletta determinati come:

$$S_c = S_{c_{ritiro}} + V_{Ed} S_G / I_G$$

6.8.2 Verifiche allo Stato Limite Ultimo delle membrature secondarie

Le membrature secondarie sono sollecitate essenzialmente da sforzi normali di compressione o trazione. Per questi elementi viene quindi eseguita una verifica di stabilità, secondo quanto specificato al punto 4.2.4.1.3.1 del DM 2008 (a cui si rimanda per maggiori dettagli) confrontando lo sforzo di progetto N_{Ed} con la resistenza all'instabilità $N_{b,Rd}$ dell'asta:

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$$

6.8.2.1 Verifiche dei collegamenti bullonati

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

Le verifiche dei collegamenti bullonati della carpenteria metallica secondaria (controventi, correnti e traversi diagonali) vengono eseguite in accordo con il p.to 4.2.8.1.1. Si considerano unioni ad attrito con bulloni ad alta resistenza per le quali vengono eseguite le seguenti verifiche:

- verifiche a taglio dei bulloni;
- verifica a scorrimento dei bulloni (SLU e SLE);
- verifica a rifollamento del piatto dell'unione.

La resistenza ultima per taglio dei bulloni si valuta con l'espressione (4.2.64) del D.M. 2008:

$$F_{V,Rd} = \frac{\alpha_v f_{tbk} A_{res}}{\gamma_{M2}}$$

dove:

- A_{res} è l'area resistente del bullone;
- α_v è un coefficiente che vale 0.6 per i bulloni classe 8.8 e 0.5 per i bulloni di classe 10.9;
- f_{tbk} è la tensione di rottura per trazione del bullone;
- $\gamma_{M2} = 1.25$ è il coefficiente di sicurezza parziale per le unioni bullonate.

La resistenza ultima per taglio per attrito dei bulloni (scorrimento) si valuta con l'espressione (4.2.72) del D.M. 2008:

$$F_{V,Rd} = n \cdot \mu \cdot \frac{F_{p,c}}{\gamma_{M3}}$$

dove:

- n è il numero delle superfici di attrito;
- μ è il coefficiente di attrito, pari a 0.30 per superfici pulite mediante spazzolatura o alla fiamma, esenti da incrostazioni di ruggine;
- $F_{p,c}$ è la forza di precarico del bullone che, in caso di serraggio controllato, può essere assunta pari a $0.7 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}$;
- $\gamma_{M3} = 1.25$ è il coefficiente di sicurezza parziale per le verifiche a scorrimento delle unioni agli SLU;
- $\gamma_{M3} = 1.10$ è il coefficiente di sicurezza parziale per le verifiche a scorrimento delle unioni agli SLE.

La resistenza a rifollamento dei fori della piastra si valuta con l'espressione (4.2.67) del D.M. 2008:

$$F_{V,Rd} = k \cdot \alpha \cdot d \cdot t \cdot \frac{f_{tk}}{\gamma_{M3}}$$

dove:

- d è il diametro nominale del gambo del bullone;
- t è lo spessore della piastra;
- f_{tk} è la resistenza a rottura del materiale della piastra;
- k è un coefficiente che dipende dalla distanza tra i fori e dalla distanza dai bordi della piastra in direzione perpendicolare al carico applicato;

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

- α è un coefficiente che dipende dalla distanza tra i fori, dalla distanza dai bordi della piastra in direzione del carico applicato, dal diametro del foro e dalla resistenza relativa tra bullone e piastra;

Il posizionamento dei bulloni viene realizzato nel rispetto dei minimi di normativa indicati in Tabella 4.2.XIII (riportata di seguito) in modo da garantire che non ci siano problemi relativi all'eccessiva vicinanza o lontananza tra i fori.

Tab. 4.2.XVIII - Posizione dei fori per unioni bullonate e chiodate.

| Distanze e interassi (Fig. 4.2.5) | Minimo | Massimo | | |
|-----------------------------------|-----------|--|--|--|
| | | Unioni esposte a fenomeni corrosivi o ambientali | Unioni non esposte a fenomeni corrosivi o ambientali | Unioni di elementi in acciaio resistente alla corrosione (UNI EN10025-5) |
| e_1 | $1,2 d_0$ | $4t+40$ mm | - | $\max(8t;12$ mm) |
| e_2 | $1,2 d_0$ | $4t+40$ mm | - | $\max(8t;125$ mm) |
| p_1 | $2,2 d_0$ | $\min(14t;200$ mm) | $\min(14t;200$ mm) | $\min(14t;175$ mm) |
| $p_{1,0}$ | - | $\min(14t;200$ mm) | - | - |
| $p_{1,i}$ | - | $\min(28t;400$ mm) | - | - |
| p_2 | $2,4 d_0$ | $\min(14t;200$ mm) | $\min(14t;200$ mm) | $\min(14t;175$ mm) |

L'instabilità locale del piatto posto tra i bulloni/chiodi non deve essere considerata se $(p_1/t) < [9(235/f_y)^{0.5}]$: in caso contrario si assumerà una lunghezza di libera inflessione pari a $0.6 \cdot p_1$.

t è lo spessore minimo degli elementi esterni collegati.

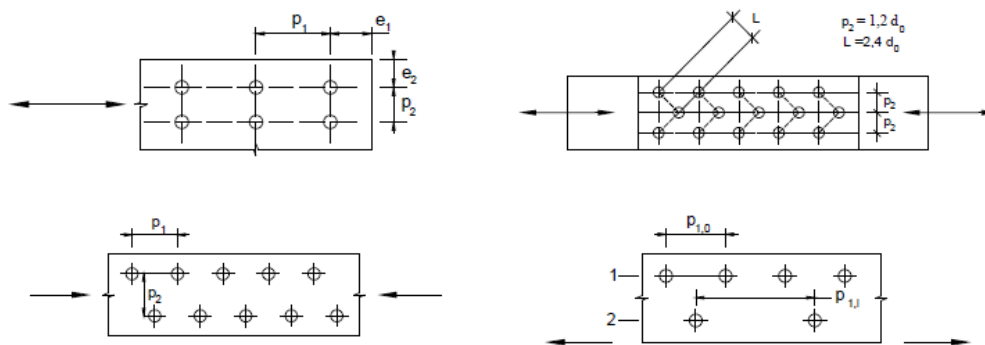


Figura 18 – Estratto dal DM 14/01/2008 Tab. 4.2.XVIII e Fig. 4.2.5

6.8.3 Verifiche allo Stato Limite Ultimo di Fatica

Le verifiche a fatica sono svolte per vita illimitata, facendo riferimento a dettagli caratterizzati da limiti di fatica ad ampiezza costante sul massimo delta di tensione ideale $\Delta\sigma_{\max} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$ e tangenziale $\Delta\tau_{\max} = (\tau_{\max} - \tau_{\min})$.

Nel caso in esame si fa riferimento ai seguenti dettagli:

- saldature di composizione delle travi principali;
- giunto trasversale saldato delle travi principali;
- saldature degli irrigidenti trasversali sulle piattabande e sull'anima delle travi principali;
- saldature degli irrigidenti longitudinali sull'anima delle travi principali;
- saldature dei pioli alle piattabande superiori;

- giunto trasversale bullonato della trave di spina.

La classe di dettaglio definisce le classi di resistenza a fatica in termini di range tensionali, $\Delta\sigma_c$ e $\Delta\tau_c$ espressi in MPa per $N = 2 \times 10^6$ cicli, e i limiti a fatica ad ampiezza costante, $\Delta\sigma_D$ e $\Delta\tau_D$ espressi in MPa per $N = 5 \times 10^6$ cicli e per $N = 1 \times 10^8$ cicli rispettivamente.

La verifica consiste quindi nel soddisfare i seguenti criteri:

- $\Delta\sigma_{\max} \leq \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf}$;
- $\Delta\tau_{\max} \leq \Delta\tau_D / \gamma_{Mf}$.

Le classi di dettaglio a cui si fa riferimento sono riepilogate nel seguito.

- saldature a completa penetrazione di composizione delle travi principali**

$\Delta\sigma_c = 125$ MPa (ref. Circolare del 21/01/2019, Tab. C4.2.XIII, dettaglio 1);

$\Delta\sigma_D = 0.737 \Delta\sigma_c = 92.13$ MPa;

$\gamma_{Mf} = 1.35$.

- saldature dei pioli alle piattabande superiori**

$\Delta\sigma_c = 80$ MPa (ref. Circolare del 21/0/2019, Tab. C4.2.XV, dettaglio 9);

$\Delta\sigma_D = 0.737 \Delta\sigma_c = 58.96$ MPa;

$\gamma_{Mf} = 1.15$.

6.8.4 Verifiche allo Stato Limite di Esercizio

Le verifiche svolte sotto combinazioni di carico di esercizio sono:

- inflexione dell'impalcato nel piano verticale;
- verifica di limitazione delle tensioni in esercizio negli elementi in c.a.;
- verifiche a fessurazione della soletta.

6.8.4.1 Verifica di deformabilità

La verifica allo stato limite di deformazione è stata condotta imponendo dei limiti massimi in relazione alle esigenze del traffico, all'aspetto della struttura, nonché dei vincoli e dei dispositivi di giunto previsti in progetto.

Per le verifiche di deformabilità si è assunto come limite per il rapporto freccia/luce il valore 1/500 sotto carichi variabili da traffico.

6.8.4.2 Verifica di limitazione delle tensioni di esercizio

La massima tensione di compressione del cls deve rispettare la limitazione:

- $\sigma_c < 0.60 f_{ck}$ per combinazione caratteristica;
- $\sigma_c < 0.45 f_{ck}$ per combinazione quasi permanente.

La massima tensione dell'acciaio deve rispettare la limitazione:

- $\sigma_s < 0.8 f_{yk}$ per combinazione caratteristica.

6.8.4.3 Verifica di fessurazione

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

Si svolgono le verifiche allo stato limite di apertura delle fessure, verificando che il valore di apertura delle fessure rispetti i valori limite di apertura prescritti dalla normativa, a seconda dell'elemento strutturale da verificare, ovvero delle condizioni ambientali e della sensibilità delle armature ai fenomeni di corrosione.

Per la soletta in calcestruzzo armato, i limiti di apertura delle fessure sono scelti, a partire dalla classe di esposizione del calcestruzzo, considerando condizioni ambientali aggressive e armature poco sensibili ai fenomeni di corrosione. In accordo con la Tabella 4.2.IV del D.M. 14/01/2008, i valori limiti di apertura delle fessure sono:

- $w_1 = 0.2$ mm per combinazione dei carichi quasi permanente;
- $w_2 = 0.3$ mm per combinazione dei carichi frequente.

7. RISULTATI DELL'ANALISI STRUTTURALE

Si utilizza un'analisi lineare elastica per gli effetti delle azioni tenendo in conto fenomeni differiti quali la viscosità e ritiro, gli effetti delle azioni termiche e le fasi costruttive. In questa sezione sono rappresentati alcuni risultati dell'analisi, in termini di sollecitazioni (kN, kNm) e spostamenti (mm), in forma grafica e per le sole nervature principali. Negli allegati sono riportati, in forma grafica, i risultati per tutte le condizioni di carico in corrispondenza degli elementi di carpenteria principale e secondaria.

7.1 RISULTATI IN FASE DI GETTO

Si riportano di seguito le sollecitazioni nella fase 1.2, in presenza della sola carpenteria di acciaio come elemento resistente e di tutti i pesi propri strutturali come carichi applicati.

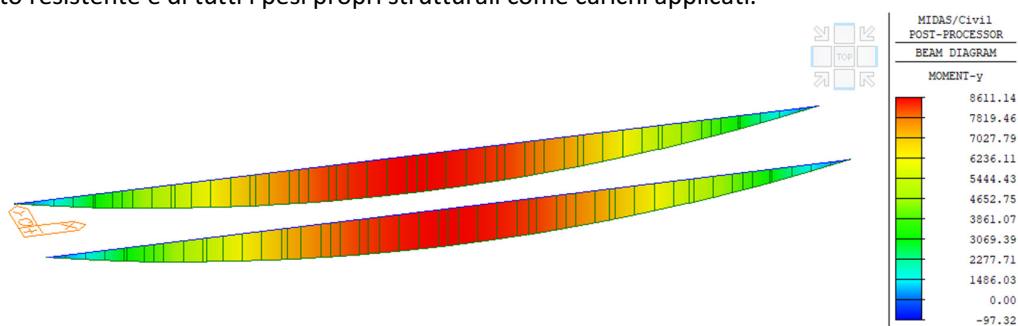


Figura 19 – G1.1+G1.2 – Momento flettente My

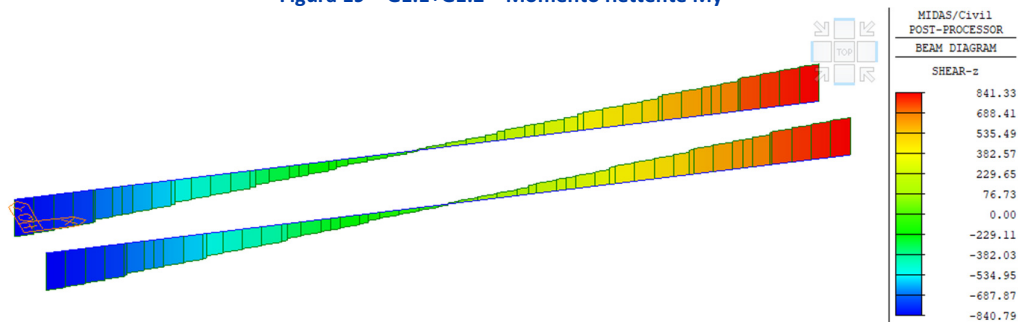


Figura 20 – G1.1+G1.2 – Taglio Vz

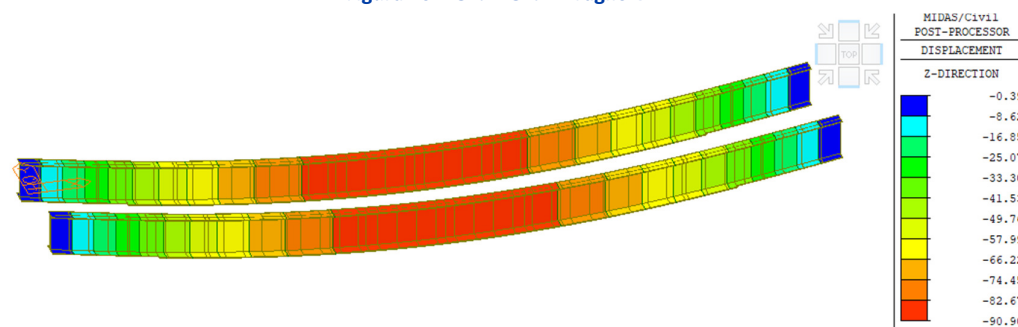


Figura 21 – G1.1+G1.2 – Spostamenti verticali Dz

7.2 RISULTATI A T₀₀

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

Si riportano di seguito le sollecitazioni al termine della fase 3, sulla sezione composta e sulle due parti trave (parte 1) e soletta (parte 2), dove i carichi applicati sono:

- pesi propri (G1);
- carichi permanenti portati (G2);
- effetti del ritiro e della viscosità (E2.1, E2.2).

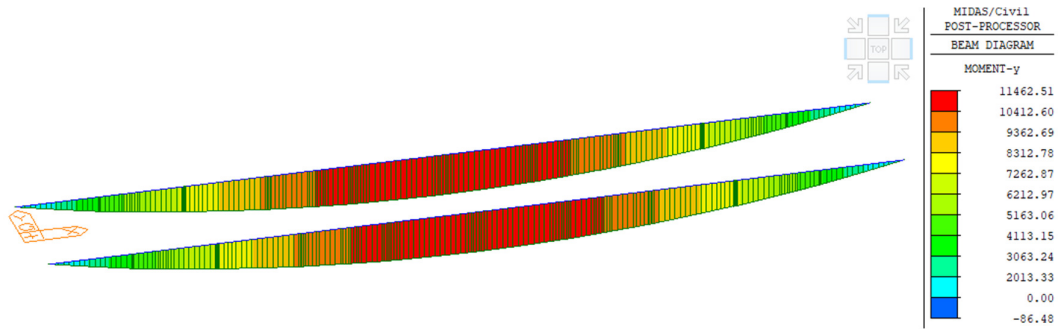


Figura 22 – G1+G2+E – Momento flettente My

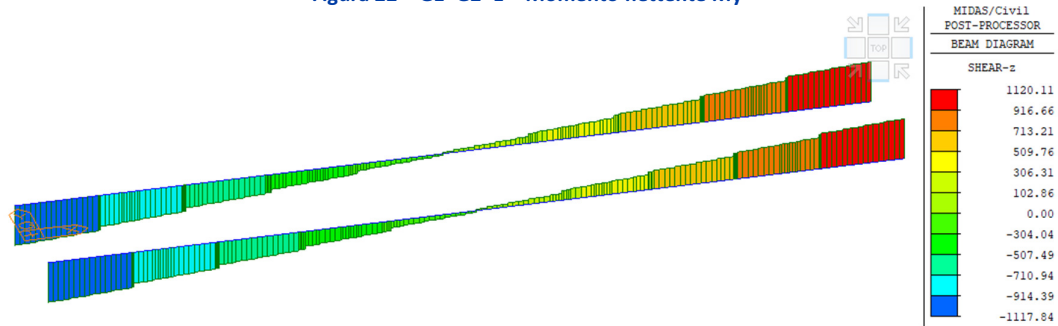


Figura 23 – G1+G2+E – Taglio Vz

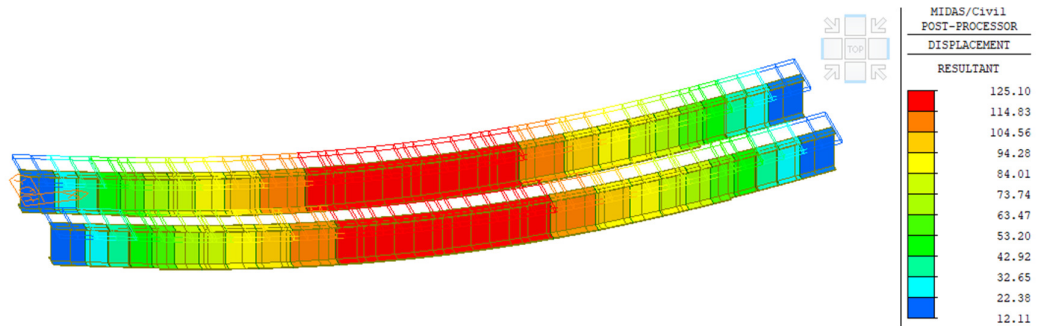


Figura 24 – G1+G2+E – Spostamenti verticali DZ [mm]

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

7.2.1 Ritiro e viscosità

Nelle immagini seguenti si esplicitano gli effetti delle azioni "primarie" dovute al ritiro (E2.1) e quelle "secondarie" dovute al ritiro e alla viscosità ad esso associata (E2.1+E2.2).

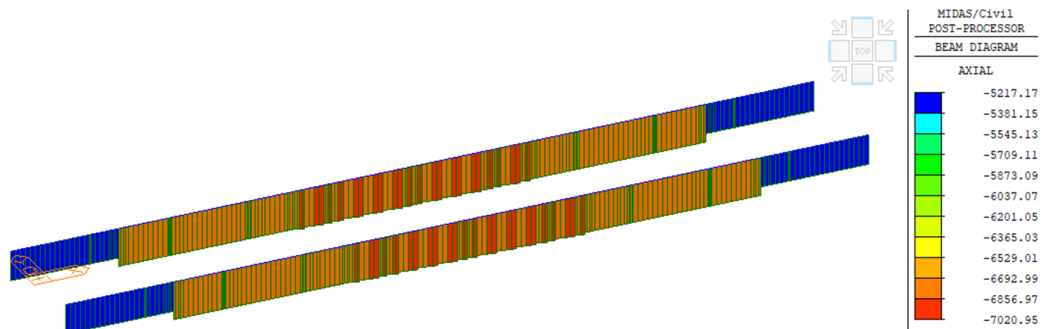


Figura 25 – Effetti primari da ritiro (E2.1) – Sforzo normale Fx

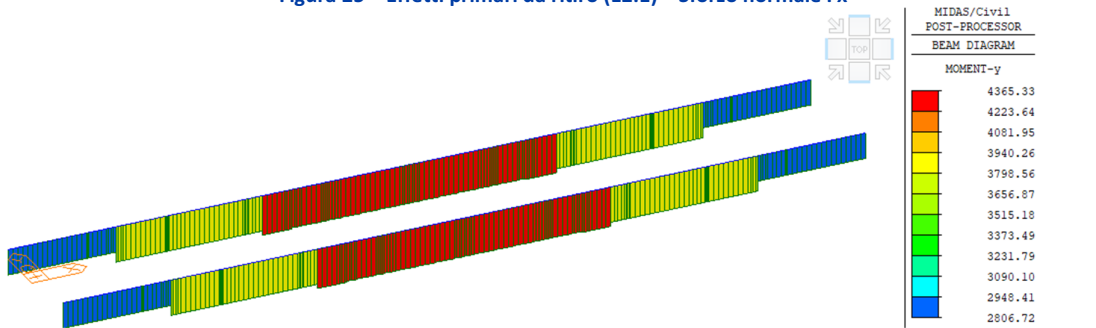


Figura 26 – Effetti primari da ritiro (E2.1) – Momento flettente My

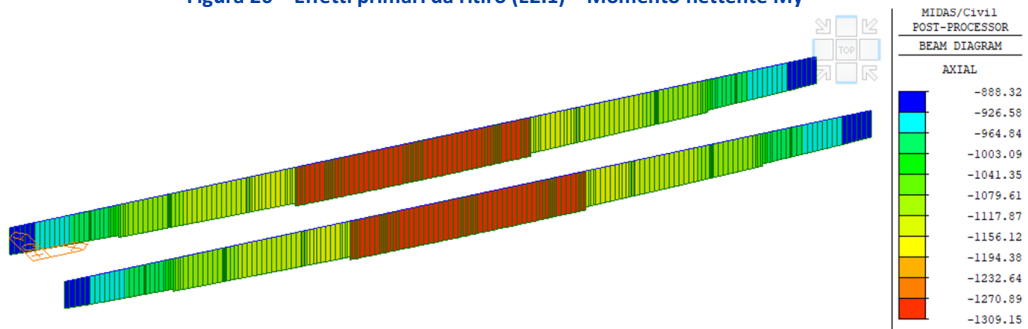


Figura 27 – Effetti secondari da ritiro e viscosità (E2.1+E2.2) – Sforzo normale nelle nervature Fx

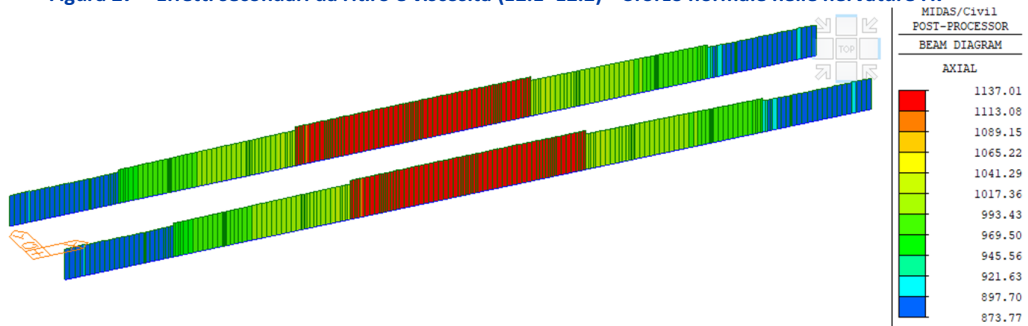


Figura 28 – Effetti secondari da ritiro e viscosità (E2.1+E2.2) – Sforzo normale nella soletta Fx

7.3 RISULTATI IN FASE FINALE

7.3.1 Stato limite ultimo (SLU)

Si riportano di seguito i diagrammi involuppo delle sollecitazioni agli SLU.

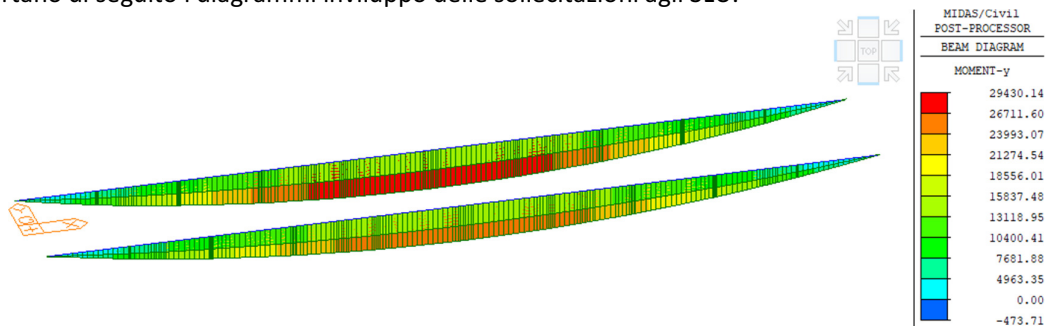


Figura 29 – Inviluppo delle combinazioni SLU – Momento flettente My

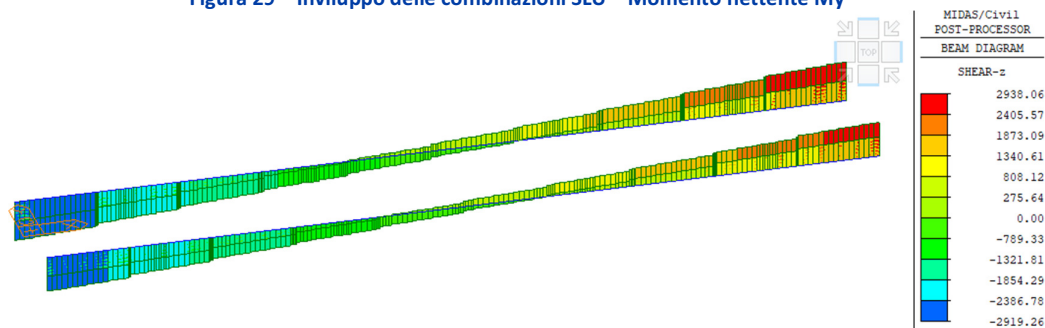


Figura 30 – Inviluppo delle combinazioni SLU – Taglio Vz

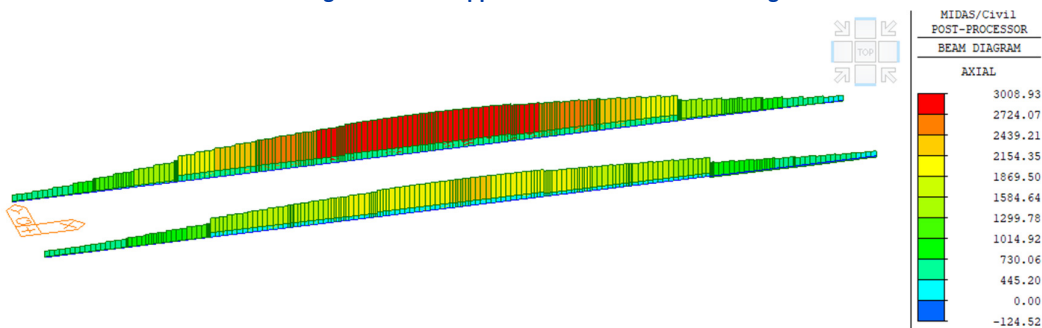


Figura 31 – Inviluppo delle combinazioni SLU – Sforzo normale Fx

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

7.3.2 Stato limite d'esercizio (SLE-R)

Nelle figure a seguire si riportano le sollecitazioni e gli spostamenti nelle combinazioni caratteristiche (rare) agli SLE.

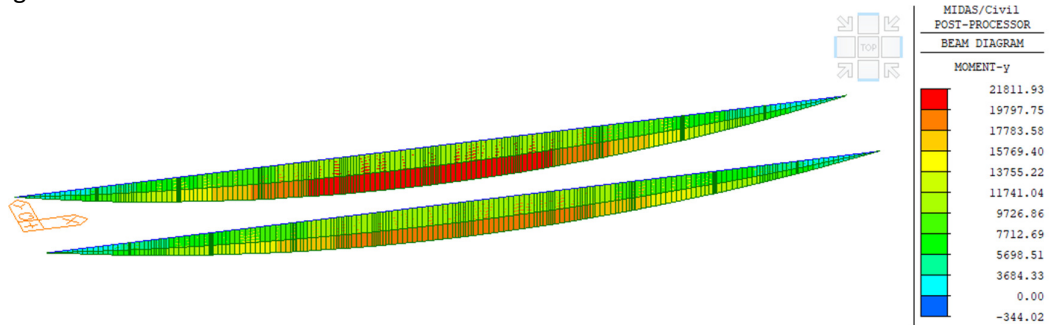


Figura 32 – Involuppo delle combinazioni SLE-R – Momento flettente My

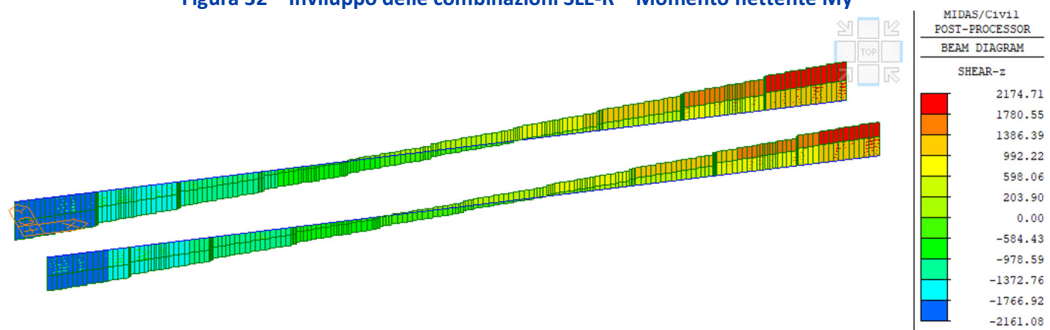


Figura 33 – Involuppo delle combinazioni SLE-R – Taglio Vz

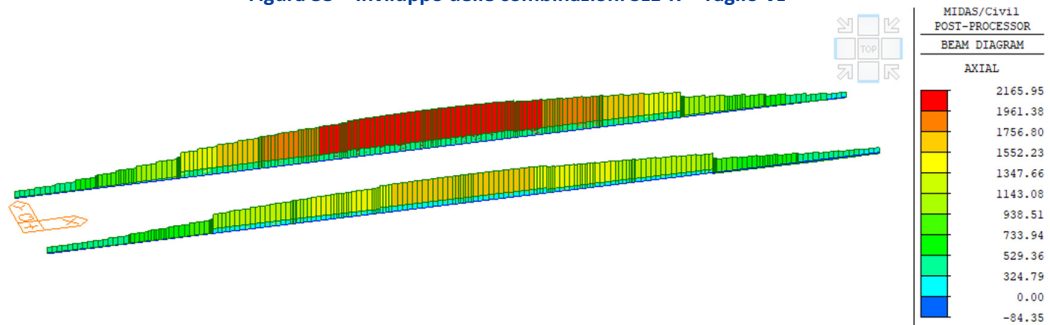


Figura 34 – Involuppo delle combinazioni SLE-R – Sforzo normale Fx

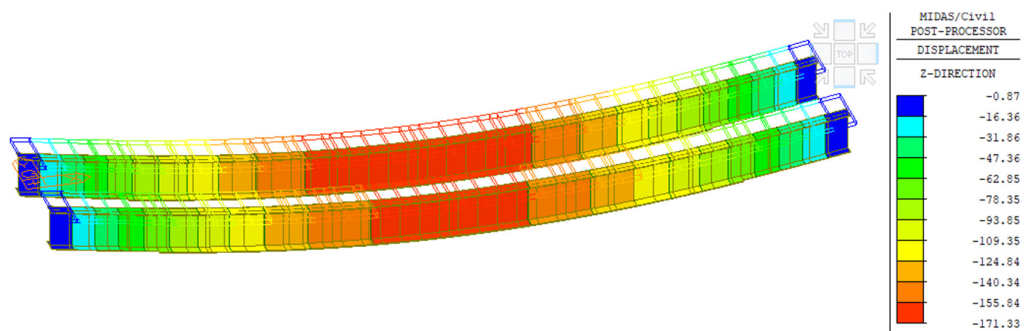


Figura 35 – Involuppo delle combinazioni SLE-R – Spostamenti verticali DZ [mm]

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

7.4 MODI DI VIBRAZIONE DELL'IMPALCATO

Nelle figure a seguire si riportano i tre principali modi di vibrazione dell'impalcato a seguito dell'analisi modale eseguita.

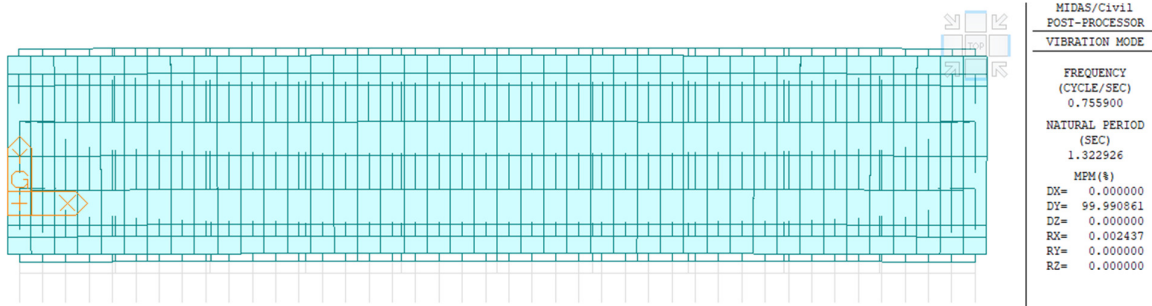


Figura 36 – Primo modo di vibrazione

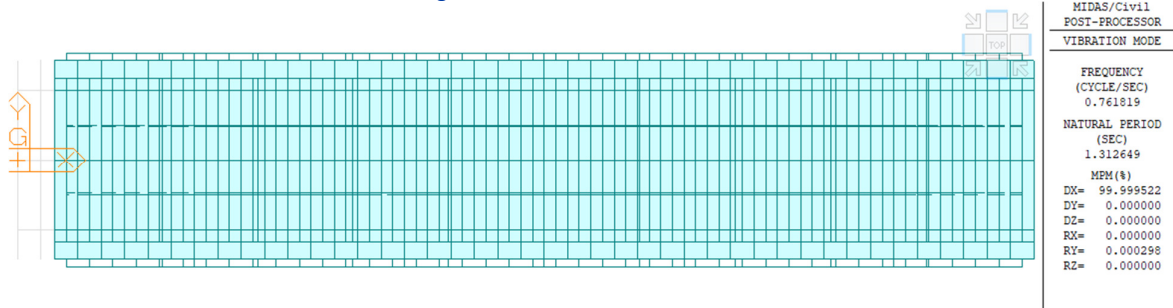


Figura 37 – Secondo modo di vibrazione

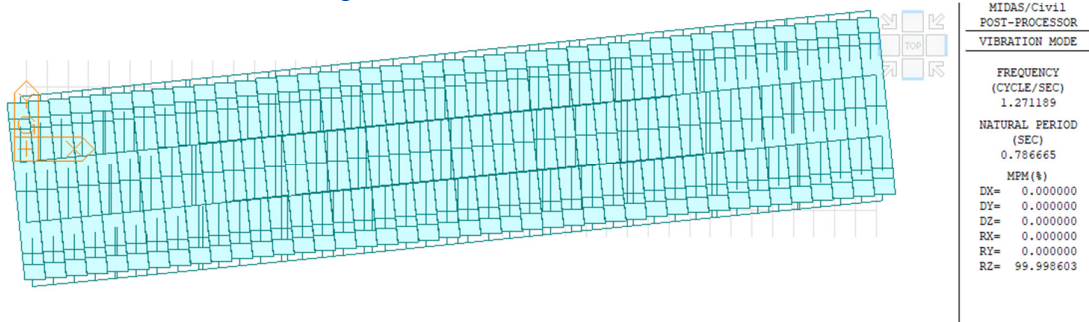


Figura 38 – Terzo modo di vibrazione

8. VERIFICHE DELLE TRAVI PRINCIPALI

Nella seguente sezione vengono mostrate le verifiche di resistenza, fatica e deformabilità eseguite secondo i criteri esposti nei paragrafi 6.8.1, 6.8.2, 6.8.3 e 6.8.4.

8.1 VERIFICHE ALLO SLU IN FASE DI GETTO

Si riportano nel diagramma a seguire le tensioni normali (non fattorizzate, ovvero con coefficienti unitari sulle azioni) nei punti di verifica.

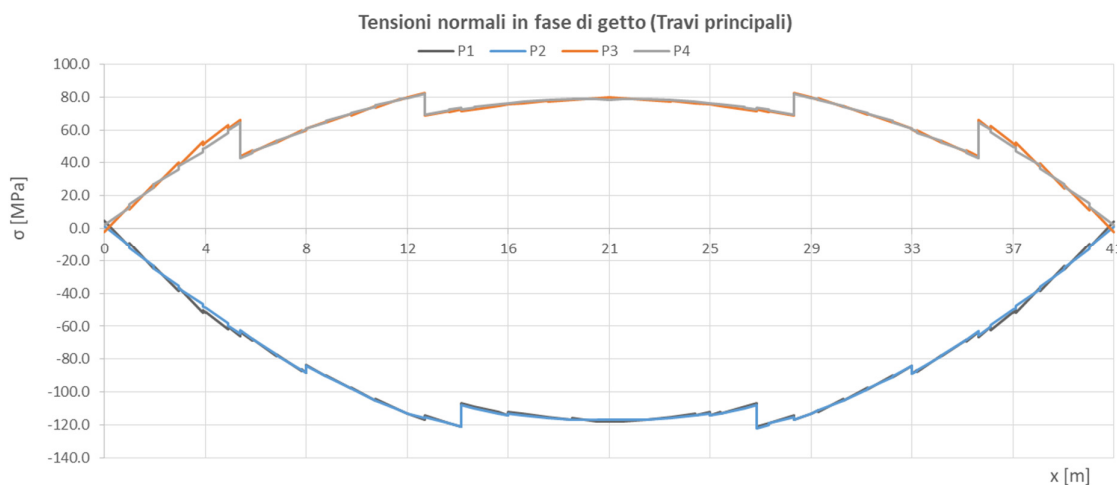


Figura 39 – Tensioni normali in fase di getto

Per il calcolo delle tensioni tangenziali nei punti di verifica è stata utilizzata la relazione di Jourawsky:

$$\tau_i = V_{Edz} S_i / (I_{yy} b_i).$$

Si ribadisce che per il calcolo tensioni tangenziali non si fa riferimento alla sezione efficace. I coefficienti di scorrimento $S_i / (I_{yy} b_i)$ per la sezione in acciaio dei conci, sono riepilogati nella tabella a seguire.

Tabella 17 – Coefficienti di scorrimento per il calcolo delle tensioni tangenziali in fase di getto

| Concio | Acciaio | | | | | |
|--------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | S1/(I _{yy} b1) | S2/(I _{yy} b2) | S3/(I _{yy} b3) | S4/(I _{yy} b4) | S5/(I _{yy} b5) | S6/(I _{yy} b6) |
| 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.99E-05 | 2.80E-05 |
| 2a | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.14E-05 | 3.07E-05 |
| 2b | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.11E-05 | 3.09E-05 |
| 3 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.80E-05 | 3.63E-05 |

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

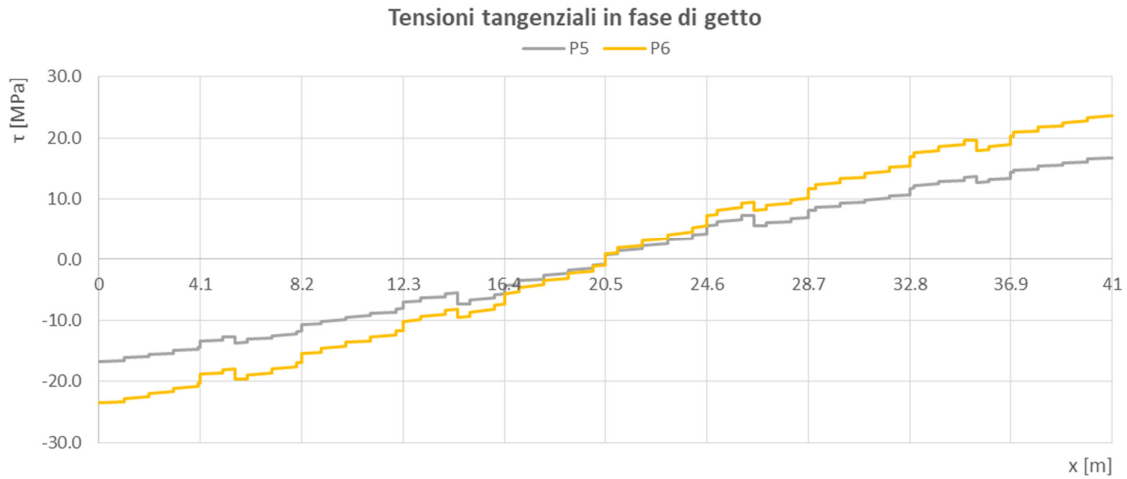


Figura 40 – Tensioni tangenziali in fase di getto

Come mostrato nella seguente immagine le tensioni ideali in fase di getto nei diversi punti di verifica sono significativamente inferiori alla resistenza di progetto f_{yd} dell'acciaio utilizzato, per cui le verifiche sono soddisfatte.

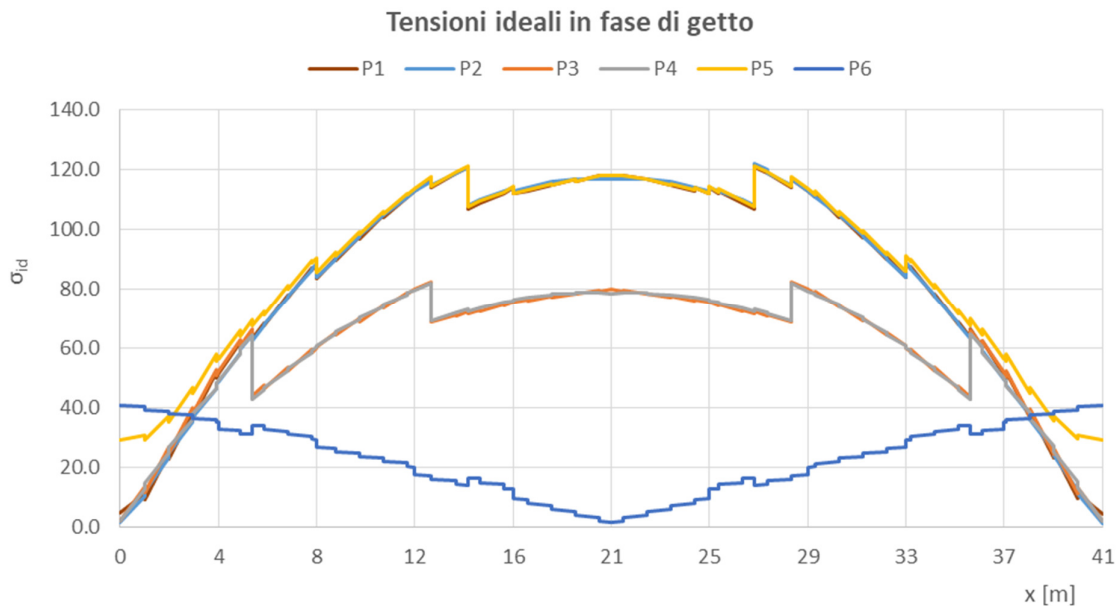
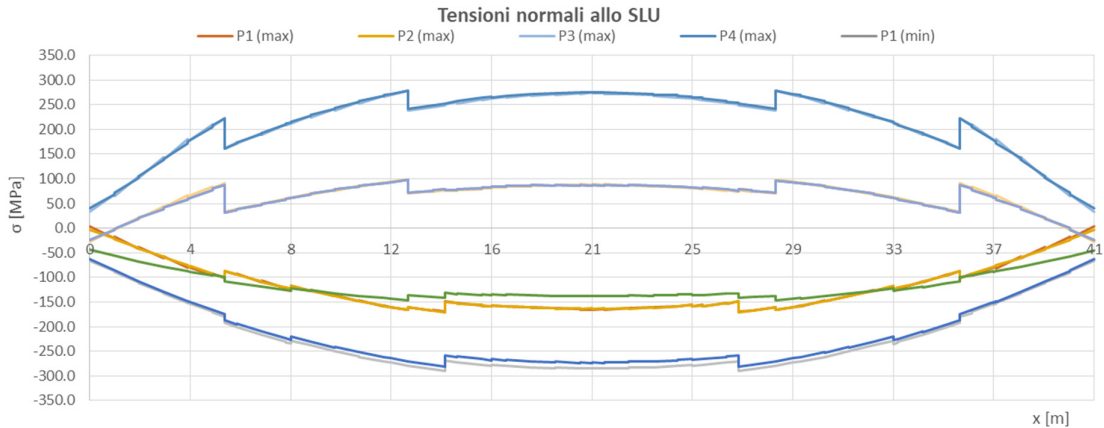


Figura 41 – Tensioni ideali in fase di getto

8.2 VERIFICHE ALLO SLU IN FASE FINALE

8.2.1 Verifiche di resistenza

Nel diagramma a seguire sono riportate le massime e minime tensioni normali nei punti di verifica per la combinazione iniluppo agli SLU e per la trave maggiormente sollecitata.



| 1 | | 2a | | 2b | | 4 | |
|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN | MAX | MIN |
| 223.0 | -182.0 | 279.0 | -279.0 | 252.0 | -290.0 | 275.0 | -285.0 |

Figura 42 – Tensioni normali allo SLU e valori massimi e minimi per conci

Per il calcolo delle tensioni tangenziali, nelle sezioni composte e nei punti di verifica, sono stati utilizzati i seguenti coefficienti di scorrimento.

Tabella 18 – Coefficienti di scorrimento per il calcolo delle tensioni tangenziali

| Sec. Id. | Concio | Acciaio | | | | | |
|----------|--------|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | S1/(l _{yyb} 1) | S2/(l _{yyb} 2) | S3/(l _{yyb} 3) | S4/(l _{yyb} 4) | S5/(l _{yyb} 5) | S6/(l _{yyb} 6) |
| 1 | 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.99E-05 | 2.80E-05 |
| 2 | 2a | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.14E-05 | 3.07E-05 |
| 3 | 2b | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.11E-05 | 3.09E-05 |
| 4 | 3 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.80E-05 | 3.63E-05 |
| Sec. Id. | Concio | Mista + armatura t ₀ (carichi di breve durata) | | | | | |
| | | S1/(l _{yyb} 1) | S2/(l _{yyb} 2) | S3/(l _{yyb} 3) | S4/(l _{yyb} 4) | S5/(l _{yyb} 5) | S6/(l _{yyb} 6) |
| 1 | 1 | 2.19E-05 | 2.19E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.52E-05 | 2.40E-05 |
| 2 | 2a | 2.29E-05 | 2.29E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.66E-05 | 2.59E-05 |
| 3 | 2b | 2.24E-05 | 2.24E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.62E-05 | 2.58E-05 |
| 4 | 3 | 2.62E-05 | 2.62E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.16E-05 | 3.12E-05 |
| Sec. Id. | Concio | Mista + armatura t ₀ (carichi di lunga durata) | | | | | |
| | | S1/(l _{yyb} 1) | S2/(l _{yyb} 2) | S3/(l _{yyb} 3) | S4/(l _{yyb} 4) | S5/(l _{yyb} 5) | S6/(l _{yyb} 6) |
| 1 | 1 | 1.64E-05 | 1.64E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.34E-05 | 2.44E-05 |
| 2 | 2a | 1.71E-05 | 1.71E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.48E-05 | 2.64E-05 |
| 3 | 2b | 1.68E-05 | 1.68E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.45E-05 | 2.63E-05 |
| 4 | 3 | 1.92E-05 | 1.92E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.01E-05 | 3.17E-05 |

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

Nel diagramma a seguire sono riportate le tensioni tangenziali nei punti di verifica per la combinazione involuppo agli SLU, per taglio massimo e taglio minimo, e per la trave maggiormente sollecitata.

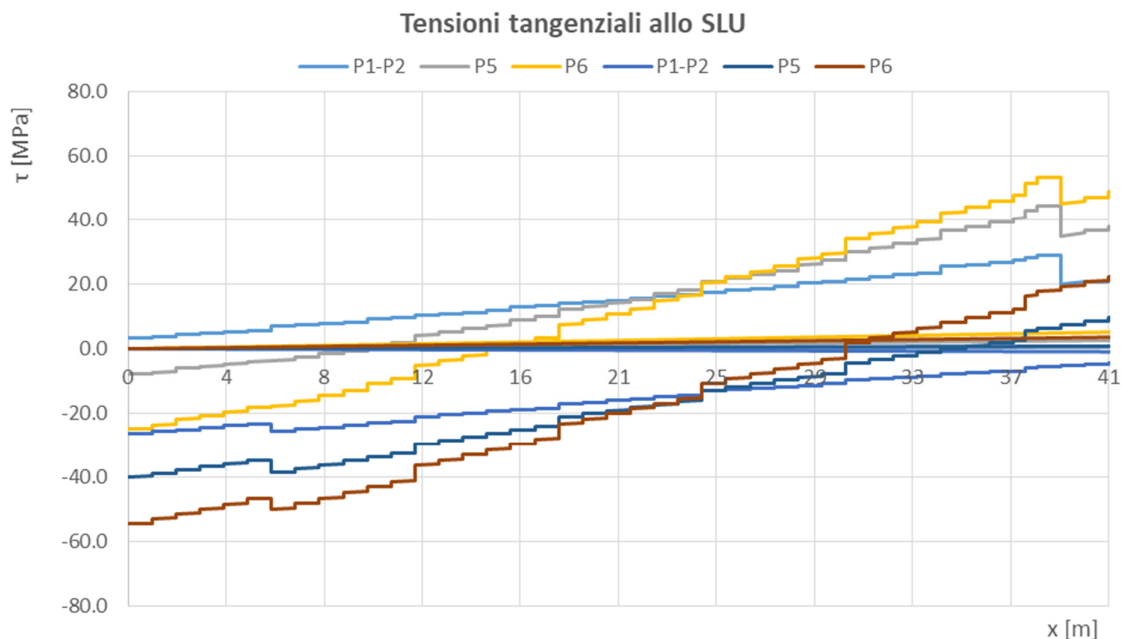


Figura 43 – Tensioni tangenziali allo SLU

Le tensioni normali e tangenziali massime sono quindi combinate per ottenere il valore della tensione ideale nei punti di verifica.

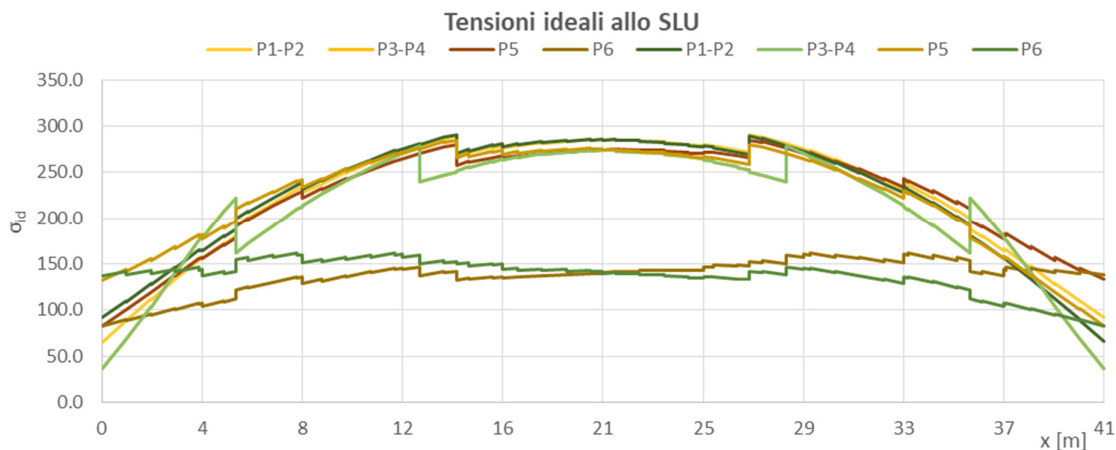


Figura 44 – Tensioni ideali allo SLU

Il rapporto tensione ideale e resistenza di progetto dell'acciaio (tasso di sfruttamento del materiale) è diagrammato nella figura seguente, dalla quale si evince che la verifica delle nervature è ovunque soddisfatta.

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

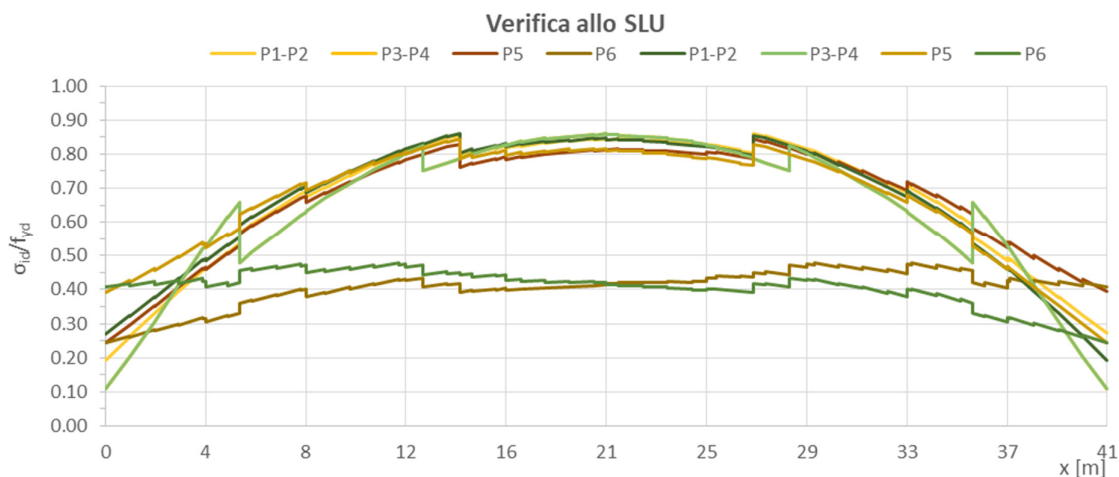


Figura 45 – Tasso di sfruttamento del materiale (SLU)

Si riportano inoltre il diagramma delle tensioni agenti nella soletta in calcestruzzo (zone cls reagente) e il diagramma delle tensioni nelle barre di armature nelle zone in cui il calcestruzzo è stato considerato non reagente (cls fessurato). La tensioni agenti sono sempre inferiori alle resistenze di progetto del calcestruzzo f_{cd} e dell'acciaio d'armatura f_{yd} .

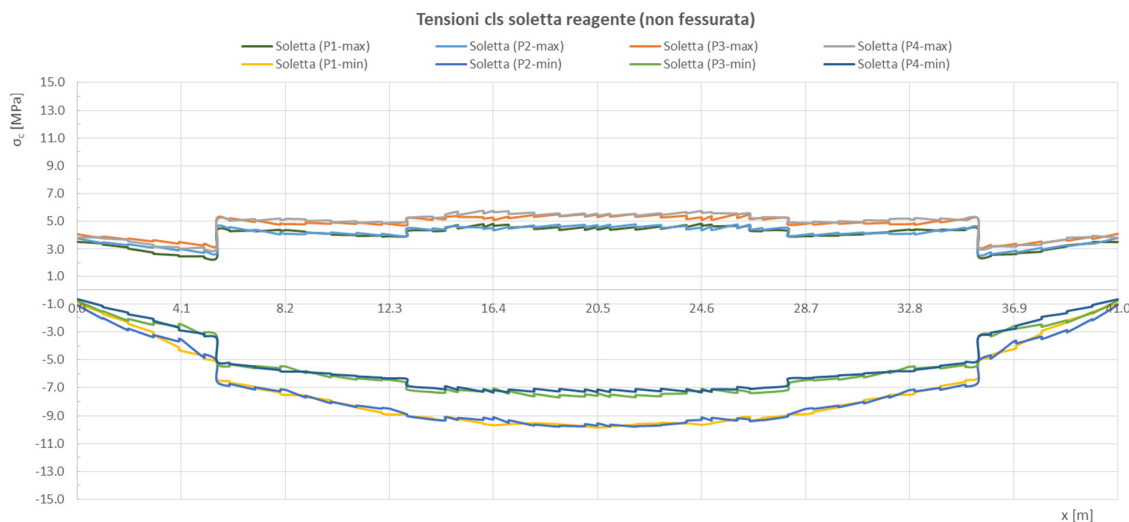


Figura 46 – Tensioni nella soletta nelle zone a calcestruzzo reagente (cls non fessurato)

8.2.2 Verifiche di stabilità locale a taglio dei pannelli d'anima

I pannelli d'anima delle travi principali sono irrigiditi longitudinalmente mediante un piatto saldato all'anima di larghezza pari a 150 mm e spessore pari a 18 e, e trasversalmente mediante traversi disposti ad interasse pari a 4.1 m. È previsto un irrigidimento su ciascun concio.ca

In accordo a quanto illustrato al paragrafo 6.8.1.2, è stato preliminarmente verificato che per le anime di ciascun concio fosse necessaria la verifica di instabilità. Conformemente a quanto previsto dalla normativa

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

citata la rigidità flessionale dell'irrigidimento intorno all'asse baricentrico verticale viene valutato considerando una collaborazione di pannello d'anima per un'ampiezza pari a $15 \epsilon t_w$. Di seguito sono riportate le sezioni considerate per il calcolo del momento di inerzia degli irrigidimenti longitudinali:

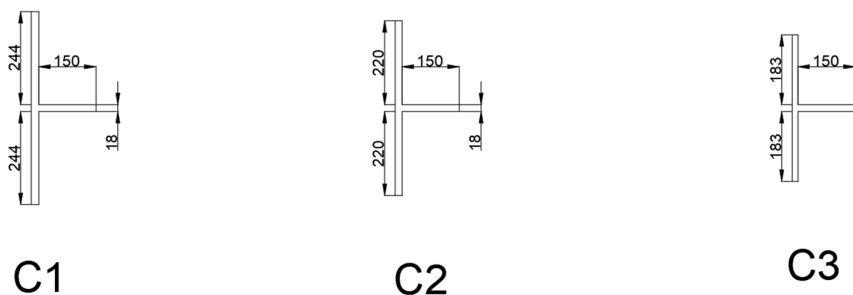


Figura 47 – Geometria per il calcolo dei momenti di inerzia degli irrigiditori longitudinali

Di seguito sono riportate le verifiche per i pannelli di ciascun concio:

Tabella 19 – Verifica dei pannelli d'anima

| Verifica geometrica pannello d'anima non irrigidito | | | | | |
|---|------|------------|------------|------------|------------|
| CONCIO | | 1 | 2a | 2b | 3 |
| h_w | [mm] | 1938 | 1928 | 1918 | 1910 |
| t | [mm] | 20 | 18 | 18 | 15 |
| h_w/t | [-] | 96.9 | 107.1 | 106.6 | 127.3 |
| ϵ | [-] | 0.81 | 0.81 | 0.81 | 0.81 |
| η | [-] | 1.2 | 2.2 | 3.2 | 4.2 |
| $(h_w/t)_{lim}$ | [-] | 48.8 | 26.6 | 18.3 | 13.9 |
| Verifica di stabilità | | Necessaria | Necessaria | Necessaria | Necessaria |

| Verifica geometrica pannello d'anima irrigidito | | | | | |
|---|--------------------|------------|------------|------------|------------|
| CONCIO | | 1 | 2a | 2b | 3 |
| a | [mm] | 4100 | 4100 | 4100 | 4100 |
| α | [-] | 2.12 | 2.13 | 2.14 | 2.15 |
| n_{irr} | [-] | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $15\epsilon t$ | [mm] | 244 | 220 | 220 | 183 |
| $I_{sI,1}$ | [mm ⁴] | 2.08E+07 | 1.96E+07 | 1.96E+07 | 1.77E+07 |
| I_{sI} | [mm ⁴] | 2.08E+07 | 1.96E+07 | 1.96E+07 | 1.77E+07 |
| $k_{\tau 1}$ | [-] | - | - | - | - |
| k_{τ} | [-] | 8.0 | 8.2 | 8.2 | 8.7 |
| $(h_w/t)_{lim}$ | [-] | 59.4 | 32.9 | 22.6 | 17.7 |
| Verifica di stabilità | | Necessaria | Necessaria | Necessaria | Necessaria |

| Verifica di stabilità dei pannelli soggetti a taglio | | | | | |
|--|-------|--------|--------|--------|--------|
| CONCIO | | 1 | 2a | 2b | 3 |
| σ_E | [MPa] | 20.2 | 16.6 | 16.7 | 11.7 |
| τ_{cr} | [MPa] | 161.6 | 136.0 | 137.2 | 101.4 |
| λ_w | [-] | 1.13 | 1.23 | 1.22 | 1.42 |
| χ_w | [-] | 0.74 | 0.68 | 0.68 | 0.58 |
| $V_{b,Rd,lim}$ | [kN] | 8666 | 14226 | 20585 | 22421 |
| $V_{b,Rd}$ | [kN] | 5322 | 4371 | 4368 | 3116 |
| $V_{ed,w}$ | [kN] | 2955.0 | 2287.8 | 1301.3 | 1257.4 |

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

| | | | | | |
|------|-----|------|------|------|------|
| F.S. | [-] | 1.80 | 1.91 | 3.36 | 2.48 |
|------|-----|------|------|------|------|

8.2.3 Stabilità all'imbozzamento dei pannelli d'anima

Nel seguito si riportano le tabelle di calcolo utilizzate per la verifica di instabilità all'imbozzamento, per ciascuno dei conci che costituiscono la trave in acciaio. In particolare la verifica, coerentemente con quanto prescritto dalla norma CNR10011, è stata condotta su ciascun campo rettangolare avente altezza pari a "h" e lunghezza pari a "a", intendendosi con a l'interasse degli irrigidimenti trasversali dell'anima e con h la distanza netta tra gli irrigidimenti longitudinali contigui.

Tabella 20 – Verifica di imbozzamento dei pannelli d'anima

| VERIFICA ALL'IMBOZZAMENTO SECONDO NORMA UNI - 10011 | | | | | |
|--|-----------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| CONCI | | 1 | 2a | 2b | 3 |
| CARATTERISTICHE GEOMETRICHE PANNELLO | | | | | |
| Altezza trave | H trave (mm) = | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| Passo irrigidimenti trasv. | a (cm) = | 410 | 410 | 410 | 410 |
| numero irrigidimenti long. | n | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Altezza pannello irrigid. | h1 (mm) = | 551 | 549 | 549 | 531 |
| Altezza pannello irrigid. | h2 (mm) = | 1403 | 1393 | 1383 | 1383 |
| Altezza pannello irrigid. | h3 (mm) = | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Altezza pannello irrigid. | h4 (mm) = | 0 | 0 | 0 | 0 |
| spessore pannello anima | s(mm) = | 20 | 20 | 18 | 15 |
| a/h1 | $\alpha_1 =$ | 7.44 | 7.47 | 7.47 | 7.72 |
| a/h2 | $\alpha_1 =$ | 2.92 | 2.94 | 2.96 | 2.96 |
| a/h3 | $\alpha_1 =$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| a/h3 | $\alpha_1 =$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Area pannello 1 | At(mm²)= | 11020 | 10980 | 9882 | 7965 |
| Area pannello 2 | At(mm²)= | 28060 | 27860 | 24894 | 20745 |
| Area pannello 3 | At(mm²)= | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Area pannello 4 | At(mm²)= | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Area anima | Aw(mm²)= | 40000 | 40000 | 36000 | 30000 |
| DETERMINAZIONE COEFFICIENTI DI IMBOZZAMENTO (+ COMPRESSIONE ; - TRAZIONE) | | | | | |
| Tensione max di compressione | $\alpha^2 \cdot \sigma_c$ (MPa)= | 178.3 | 275.9 | 286.3 | 284.0 |
| Ala | - | superiore | superiore | superiore | superiore |
| Tensione di trazione corrispondente | $\sigma^2 \cdot \sigma_t$ (MPa) = | -222.1 | -278.7 | -251.6 | -274.2 |
| Ala | - | inferiore | inferiore | inferiore | inferiore |
| Asse neutro (da lembo inferiore) | x (mm) | 1109 | 1005 | 935 | 982 |
| Tensione a quota irrig. 1 | $\sigma^{irrig.1}$ (MPa) = | 68.00 | 123.67 | 150.40 | 232.30 |
| Tensione a quota irrig. 2 | $\sigma^{irrig.2}$ (MPa) = | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Tensione a quota irrig. 3 | $\sigma^{irrig.3}$ (MPa) = | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Coeff. di variazione | $\psi_{1,1} =$ | 0.38 | 0.45 | 0.53 | 0.82 |
| Coeff. di variazione | $\psi_{1,2} =$ | -3.27 | -2.25 | -1.67 | -1.18 |
| Coeff. di variazione | $\psi_{1,3} =$ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Coeff. di variazione | $\psi_{1,4} =$ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Condizione di carico di riferimento per tensioni normali (I - II -III) | pannello 1 | I | I | I | I |
| | pannello 2 | III | III | III | III |
| | pannello 3 | - | - | - | - |
| | pannello 4 | - | - | - | - |
| Coeff. d'imbozzamento | $K\sigma,1 =$ | 5.7 | 5.4 | 5.2 | 4.4 |
| | $K\sigma,2 =$ | 23.9 | 23.9 | 23.9 | 23.9 |
| | $K\sigma,3 =$ | - | - | - | - |
| | $K\sigma,4 =$ | - | - | - | - |
| | $Kt,1 =$ | 5.4 | 5.4 | 5.4 | 5.4 |
| | $Kt,2 =$ | 5.8 | 5.8 | 5.8 | 5.8 |
| | $Kt,3 =$ | - | - | - | - |
| | $Kt,4 =$ | - | - | - | - |
| TENSIONI IDEALI DI IMBOZZAMENTO | | | | | |
| Tensione di riferimento 1 | $\sigma_{cr,0}$ (Mpa)= | 245.3 | 247.1 | 200.2 | 148.6 |

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

| | | | | | |
|---|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Tensione di riferimento 2 | $\sigma_{cr,0}$ (Mpa)= | 37.8 | 38.4 | 31.5 | 21.9 |
| Tensione di riferimento 3 | $\sigma_{cr,0}$ (Mpa)= | - | - | - | - |
| Tensione di riferimento 4 | $\sigma_{cr,0}$ (Mpa)= | - | - | - | - |
| Tensione normale critica 1 | σ_{cr} (Mpa)= | 1391.1 | 1340.7 | 1034.5 | 650.8 |
| Tensione normale critica 2 | σ_{cr} (Mpa)= | 904.3 | 917.4 | 753.8 | 523.5 |
| Tensione normale critica 3 | σ_{cr} (Mpa)= | - | - | - | - |
| Tensione normale critica 4 | σ_{cr} (Mpa)= | - | - | - | - |
| Tensione tangenziale critica 1 | t_{cr} (Mpa)= | 1327.7 | 1337.3 | 1083.2 | 803.4 |
| Tensione tangenziale critica 2 | t_{cr} (Mpa)= | 204.8 | 207.7 | 170.7 | 118.4 |
| Tensione tangenziale critica 3 | t_{cr} (Mpa)= | - | - | - | - |
| Tensione tangenziale critica 4 | t_{cr} (Mpa)= | - | - | - | - |
| TENSIONI DI RIFERIMENTO PER VERIFICA | | | | | |
| pannello 1 | σ_1 (Mpa)= | 178.3 | 275.9 | 286.3 | 284.0 |
| pannello 2 | σ_1 (Mpa)= | 68.0 | 123.7 | 150.4 | 232.3 |
| pannello 3 | σ_1 (Mpa)= | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| pannello 4 | σ_1 (Mpa)= | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Taglio sollecitante | T (KN)= | 2955.0 | 2287.8 | 1301.3 | 1257.4 |
| Tensione tangenziale | t (Mpa)= | 73.9 | 57.2 | 36.1 | 41.9 |
| Tensione critica ideale 1 | $\sigma_{crit, id}$ (Mpa)= | 1514.09 | 1379.00 | 1046.73 | 663.10 |
| Tensione critica ideale 2 | $\sigma_{crit, id}$ (Mpa)= | 430.12 | 555.75 | 579.02 | 432.02 |
| Tensione critica ideale 3 | $\sigma_{crit, id}$ (Mpa)= | - | - | - | - |
| Tensione critica ideale 4 | $\sigma_{crit, id}$ (Mpa)= | - | - | - | - |
| Tensione critica ridotta 1 | $\sigma_{cr, red}$ (Mpa)= | 353.04 | 352.64 | 350.89 | 344.66 |
| Tensione critica ridotta 2 | $\sigma_{cr, red}$ (Mpa)= | 329.61 | 340.15 | 341.35 | 329.85 |
| Tensione critica ridotta 3 | $\sigma_{cr, red}$ (Mpa)= | - | - | - | - |
| Tensione critica ridotta 4 | $\sigma_{cr, red}$ (Mpa)= | - | - | - | - |
| pannello 1 | $\frac{\sigma_{cr, id}}{\sqrt{\sigma_1^2 + 3 \tau^2}}$ | 1.61 | 1.20 | 1.20 | 1.18 |
| pannello 2 | | 2.27 | 2.15 | 2.10 | 1.36 |
| pannello 3 | | - | - | - | - |
| pannello 4 | | - | - | - | - |
| pannello 1 | β = | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| pannello 2 | β = | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| pannello 3 | β = | - | - | - | - |
| pannello 4 | β = | - | - | - | - |
| | v = | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| pannello 1 | βv = | 1.61 | 1.20 | 1.20 | 1.18 |
| pannello 2 | βv = | 2.27 | 2.15 | 2.10 | 1.36 |
| pannello 3 | βv = | - | - | - | - |
| pannello 4 | βv = | - | - | - | - |
| F.S. | | 1.61 | 1.20 | 1.20 | 1.18 |

8.2.4 Verifiche delle connessioni trave-soletta

Le verifiche dei connettori trave-soletta per i conci maggiormente sollecitati delle travi in acciaio sono eseguite in accordo con quanto esplicitato nel paragrafo 6.8.1.4.

Tabella 21 – Verifica connettori trave-soletta

| CARATTERISTICHE CONNETTORI TRAVE SOLETTA | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|--------------|-----|--------|--------|--------|--------|
| CONCIO | | | | | | |
| Diametro connettori | ϕ | mm | 19 | 19 | 19 | 19 |
| Numero di connettori su ogni fila | nf | | 4 | 4 | 4 | 3 |
| distanza minima tra i connettori in direzione longitudinale (passo) | $d_{x, min}$ | mm | 250 | 250 | 250 | 250 |
| distanza minima tra i connettori in direzione trasversale | $d_{y, min}$ | mm | 185 | 185 | 185 | 185 |
| Resistenza ultima connettore | f_{tk} | MPa | 450 | 450 | 450 | 450 |
| Resistenza cilindrica caratteristica del calcestruzzo della soletta | f_{ck} | MPa | 32 | 32 | 32 | 32 |
| Valore medio del modulo elastico secante del calcestruzzo della soletta | E_{cm} | MPa | 33346 | 33346 | 33346 | 33346 |
| Modulo elastico acciaio | E_s | MPa | 210000 | 210000 | 210000 | 210000 |
| Equazione 4.3.9 NTC2008 | $P_{RD,a}$ | kN | 81.7 | 81.7 | 81.7 | 81.7 |
| Equazione 4.3.10 NTC2008 | $P_{RD,c}$ | kN | 86.5 | 86.5 | 86.5 | 86.5 |
| Resistenza a taglio del singolo connettore | $P_{RD,a}$ | kN | 81.7 | 81.7 | 81.7 | 81.7 |
| CALCOLO SFORZO DA SCORRIMENTO A TIRO IMPEDITO | | | | | | |

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

| | | | | | | |
|---|---------------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Deformazione ultima da ritiro | $\epsilon_{c,200}$ | | -2.41E-04 | -2.41E-04 | -2.41E-04 | -2.41E-04 |
| Area soletta collaborante trave | A_c | m ² | 0.63 | 0.63 | 0.63 | 0.63 |
| Coeff. di viscosità a $t=\infty$ | $\phi_{\infty}(t_0)$ | | 2.33 | 2.33 | 2.33 | 2.33 |
| Coeff. Omogenizzazione a tempo infinito | $\eta_{r,\infty}$ | | 14.4 | 14.4 | 14.4 | 14.4 |
| Sforzo di trazione nella soletta dovuto alla contrazione da ritiro impedita | N_{ritiro} | kN | 6710 | 6710 | 6710 | 6710 |
| Sforzo di trazione nella soletta dovuto alla contrazione da ritiro impedita allo SLU (1,2 x Nr) | $N_{ritiro,SLU}$ | kN | 8052 | 8052 | 8052 | 8052 |
| Numero travi | n° travi | | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Sforzo di trazione nella singola trave | $N_{ritiro,SLU,trav}$ | kN | 8052 | 8052 | 8052 | 8052 |
| Lunghezza totale impalcato | L_s | m | 41 | 41 | 41 | 41 |
| Lunghezza interessata dallo sviluppo del ritiro (si assume pari a metà luce) | L_{sr} | | 20.5 | 20.5 | 20.5 | 20.5 |
| Sforzo di scorrimento dovuto alla contrazione da ritiro impedita ($N_{r,SLU}/L_{sr}$) | $S_{ritiro,SLU}$ | kN/m | 393 | 393 | 393 | 393 |
| CALCOLO SFORZO DA SCORRIMENTO A TAGLIO | | | | | | |
| Taglio totale massimo di progetto agli SLU | $V_{z,SLU}$ | kN | 2955 | 2288 | 1301 | 1257 |
| area della nervatura in acciaio | A_s | mm ² | 88300 | 106704 | 118524 | 118650 |
| area della soletta in cls su ogni trave | A_c | mm ² | 630000 | 630000 | 630000 | 630000 |
| coefficiente di omogenizzazione per azioni istantanee | $\eta_0 = E_s/E_c$ | | 6.3 | 6.3 | 6.3 | 6.3 |
| Inerzia complessiva della sezione composta per azioni istantanee | I_{yy} | mm ² | 1.32E+1 | 1.78E+1 | 2.01E+1 | 2.00E+1 |
| distanza del baricentro della soletta dal baricentro della sezione composta | Y_{sup} | mm | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Taglio sulla sola nervatura agli SLU | $V_{z,SLU,trave}$ | kN | 305 | 378 | 448 | 426 |
| Taglio di progetto per verifica connettori agli SLU | $V_{z,SLU,sol}$ | kN | 1385 | 1181 | 706 | 682 |
| Momento Statico Finale / Inerzia Finale (x carichi breve durata) | S/I | 1/m | 1570 | 1107 | 596 | 575 |
| Scorrimento complessivo a taglio | $S_{Dx,SLU}$ | kN/m | 0.231 | 0.212 | 0.223 | 0.213 |
| | | | 363 | 235 | 133 | 122 |
| CALCOLO SFORZO DA DISTORSIONE TERMICA DIFFERENZIALE | | | | | | |
| Differenziale termico | Δt | | 5 | 5 | 5 | 5 |
| coefficiente di dilatazione termica | α | | 1.20E-05 | 1.20E-05 | 1.20E-05 | 1.20E-05 |
| | $N_{\Delta t}$ | kN | 1260 | 1260 | 1260 | 1260 |
| | n° travi | | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | $N_{\Delta t,trave}$ | kN | 630.2 | 630.2 | 630.2 | 630.2 |
| Sforzo di scorrimento dovuto alla distorsione termica ($N_{\Delta t,SLU}/L_{sr}$) | $S_{\Delta t,SLU}$ | kN/m | 37 | 37 | 37 | 37 |
| RISULTATI VERIFICHE SLU | | | | | | |
| Scorrimento complessivo di progetto trave-soletta | $S_{Dx,SLU}$ | kN/m | 995 | 822 | 684 | 670 |
| Numero di connettori / m per singola trave | N_c | n°/m | 16 | 16 | 16 | 12 |
| Sforzo nel singolo connettore agli SLU | P_{di} | kN | 62.2 | 51.4 | 42.7 | 55.8 |
| Coefficiente di sicurezza | P_{RD}/P_{Di} | - | 1.31 | 1.59 | 1.91 | 1.46 |
| VERIFICA AGLI SLE CONNETTORI (C.4.3.3.3) | | | | | | |
| Sforzo di trazione nella singola trave a ritiro impedito (SLE) | $N_{ritiro,SLE,trav}$ | kN | 6710 | 6710 | 6710 | 6710 |
| Lunghezza della campata di riva | L_s | m | 41 | 41 | 41 | 41 |
| Lunghezza interessata dallo sviluppo del ritiro (si assume pari a metà campata) | L_{sr} | | 20.5 | 20.5 | 20.5 | 20.5 |
| Sforzo di scorrimento dovuto alla contrazione da ritiro impedita ($N_{r,SLE}/L_{sr}$) | $S_{ritiro,SLE}$ | kN/m | 327 | 327 | 327 | 327 |
| Taglio totale massimo di progetto agli SLE | $V_{z,SLE}$ | kN | 2165 | 1690 | 963 | 923 |
| Taglio sulla sola nervatura agli SLE | $V_{z,SLE,trave}$ | kN | 1015 | 872 | 522 | 501 |
| Taglio di progetto per verifica connettori agli SLU | $V_{z,SLE,sol}$ | kN | 1150 | 818 | 441 | 422 |
| Momento Statico Finale / Inerzia Finale (x carichi breve durata) | S/I | 1/m | 0.231 | 0.212 | 0.223 | 0.213 |
| Scorrimento complessivo a taglio | $S_{Dx,SLE}$ | kN/m | 235 | 185 | 116 | 107 |
| Sforzo di scorrimento dovuto alla distorsione termica ($N_{\Delta t,SLE}/L_{sr}$) | $S_{\Delta t,SLE}$ | kN/m | 31 | 31 | 31 | 31 |
| RISULTATI VERIFICHE SLE | | | | | | |
| Scorrimento complessivo di progetto trave-soletta | $S_{Dx,SLE}$ | kN/m | 580 | 531 | 462 | 452 |
| Numero di connettori / m per singola trave | N_c | n°/m | 16.0 | 16.0 | 16.0 | 12.0 |
| Sforzo nel singolo connettore agli SLU | P_{di} | kN | 36.3 | 33.2 | 28.9 | 37.7 |
| Coefficiente di sicurezza | $0,6 \cdot P_{RD}/P_{Di}$ | - | 1.35 | 1.48 | 1.70 | 1.30 |

8.2.5 Verifiche allo stato limite di fatica

Si riportano di seguito i risultati dell'analisi ottenuti utilizzando i modelli di carico 1 e 2 previsti dalla normativa per le verifiche a fatica.

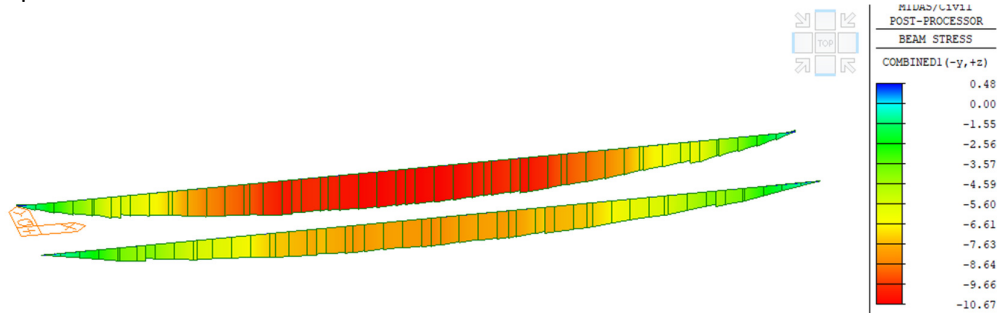


Figura 48 – Tensioni normali sulla piattabanda superiore (Modello di carico a fatica 1)

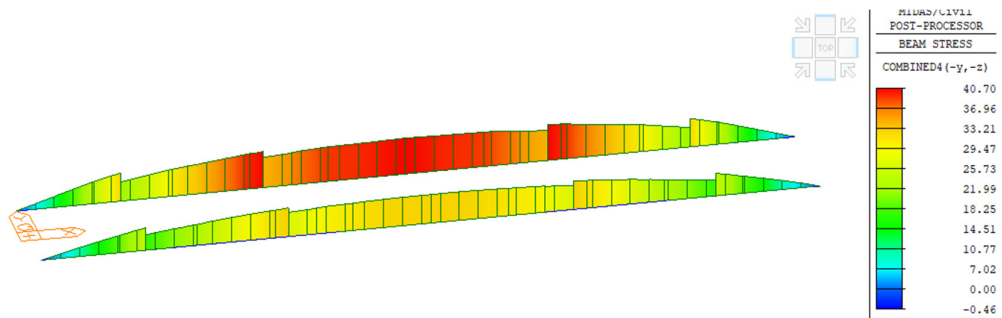


Figura 49 – Tensioni normali sulla piattabanda inferiore (Modello di carico a fatica 1)

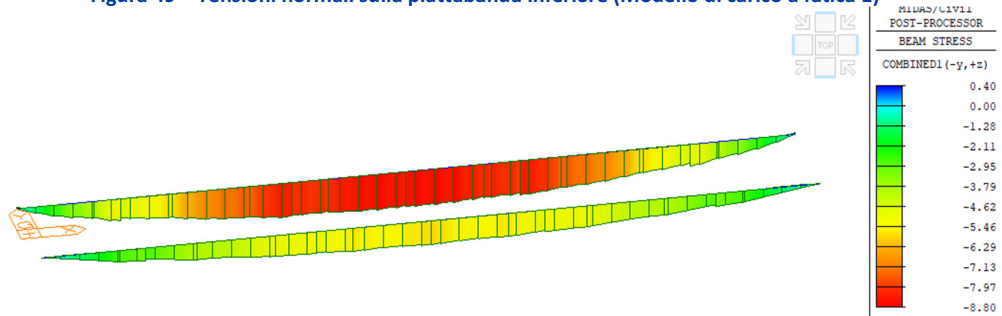


Figura 50 – Tensioni normali sulla piattabanda superiore (Modello di carico a fatica 2)

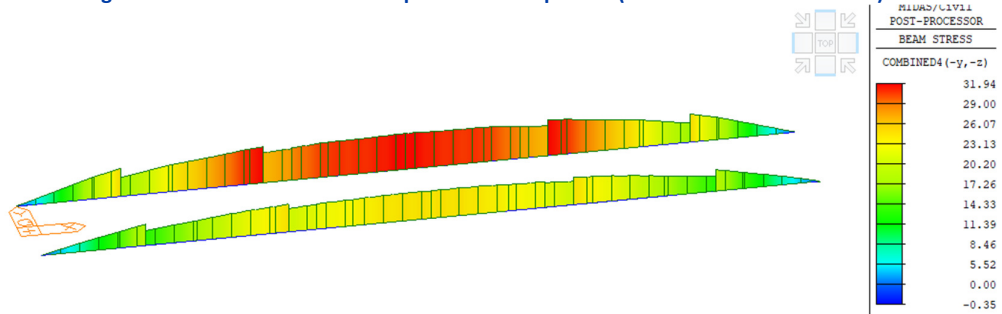


Figura 51 – Tensioni normali sulla piattabanda inferiore (Modello di carico a fatica 2)

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

Nella tabella sono riportate quindi le verifiche a fatica per i dettagli costruttivi richiamati al paragrafo 6.8.3.

Tabella 22 – Riepilogo verifiche a fatica

| VERIFICA A FATICA | | | | | 1 | 2a | 2b | 3 |
|--|------------------|-------|---------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | $\Delta\sigma_D$ | k_t | γ_{Mf} | $\Delta\sigma_D k_t / \gamma_{Mf}$ | $\Delta\sigma_{max}$ | $\Delta\sigma_{max}$ | $\Delta\sigma_{max}$ | $\Delta\sigma_{max}$ |
| Piattabanda superiore | Mpa | - | - | Mpa | Mpa | Mpa | Mpa | Mpa |
| Limite su saldatura di composizione delle travi principali | 92.13 | 1 | 1.35 | 68.24 | -6.4 | -9.7 | -10.3 | -10.7 |
| Limite su saldature dei pioli alle piattabande superiori | 58.96 | 1 | 1.15 | 51.27 | -6.4 | -9.7 | -10.3 | -10.7 |
| Piattabanda inferiore | Mpa | - | - | Mpa | Mpa | Mpa | Mpa | Mpa |
| Limite su saldatura di composizione delle travi principali | 92.13 | 1 | 1.35 | 68.24 | 31.9 | 40.7 | 35.8 | 40.6 |
| Anima Concio | Mpa | - | - | Mpa | Mpa | Mpa | Mpa | Mpa |
| Limite su saldature degli irrigidenti longitudinali | 41.27 | 1 | 1.15 | 35.89 | 5.1 | 3.2 | 3.5 | 4.7 |

8.3 VERIFICHE ALLO SLE IN FASE FINALE

8.3.1 Verifiche di deformabilità

Come indicato al paragrafo 6.8.4.1, si è verificato che le deformazioni di impalcato per effetto dei carichi mobili siano inferiori ad 1/500 della luce di impalcato. Di seguito è riportato l'andamento delle massime deformazioni verticali per effetto del carico mobile viaggiante lungo l'opera (valori caratteristici).

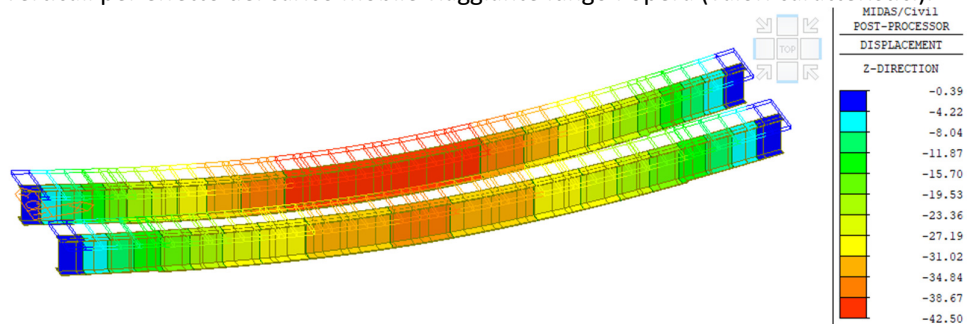


Figura 52 – Spostamenti verticali per effetto dei carichi mobili

Lo spostamento ottenuto è pari a 42.5 mm, inferiore al limite pari a $41 \cdot 10^3 / 500 = 82$ mm.

8.3.1.1 Contromonta

Nella seguente tabella si riportano i valori degli spostamenti ricavati per le condizioni di carico permanenti (cfr. Figura 21 e Figura 24) dai quali, considerando anche un contributo pari al 20% dei carichi mobili, sono stati dedotti i valori delle contromonte.

| Concio | Freccia pesi propri (G1) [mm] | Freccia carichi permanenti (G2) [mm] | Freccia totale (G1+G2) [mm] | Freccia carichi mobili (20%) [mm] | CONTROMONTA [mm] |
|--------|----------------------------------|---|-----------------------------------|---|---------------------|
| C1 | 39.1 | 5.2 | 44.3 | 3.6 | 50 |
| C2 | 82.3 | 10.7 | 93.0 | 7.6 | 110 |
| C3 | 90.9 | 11.9 | 102.8 | 8.5 | 120 |

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

I valori di contromonta indicati fanno riferimento al valore massimo rilevato su ciascun concio, per cui per i primi due conci il valore indicato corrisponde alla fine del concio. In accordo con quanto riportato sugli elaborati grafici, a cui si rimanda per maggiori dettagli, il concio 3 potrà essere disposto in orizzontale.

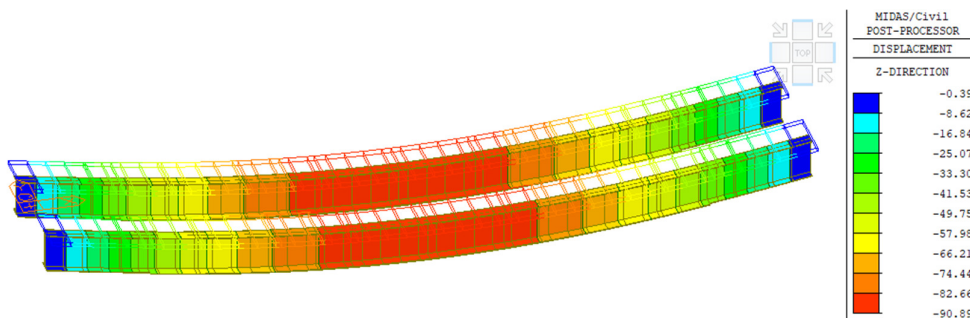


Figura 53 – Spostamenti verticali per carichi permanenti strutturali (G1)

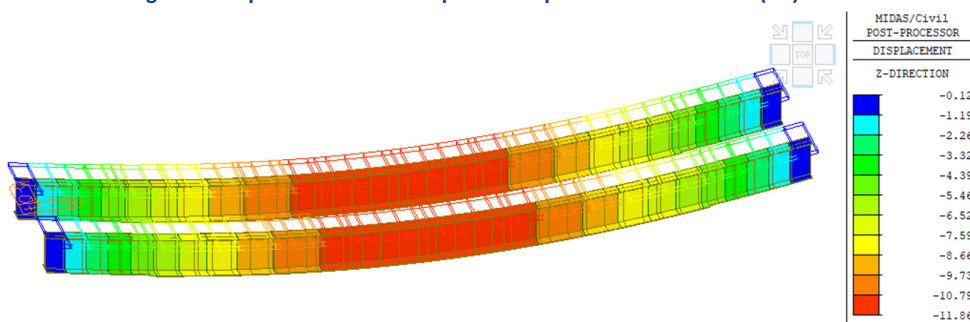


Figura 54 – Spostamenti verticali per carichi permanenti non strutturali (G2)

8.3.2 Verifiche di limitazione delle tensioni in esercizio

Si riportano quindi i diagrammi delle tensioni di compressione agenti nella soletta in direzione longitudinale per le combinazioni di esercizio rare e quasi permanente.

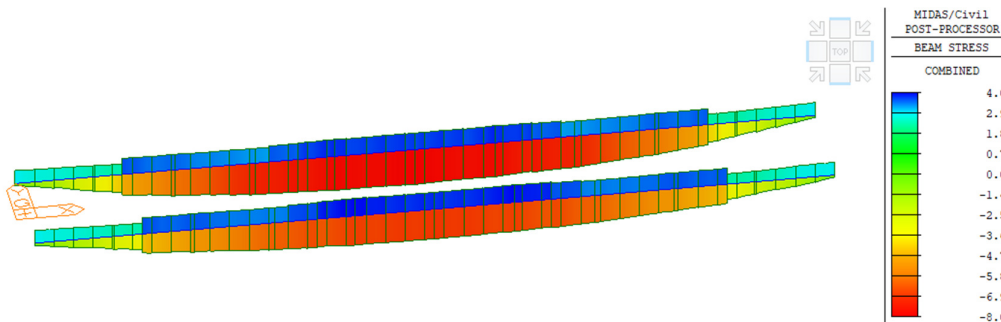


Figura 55 – Involuppo delle combinazioni rare (SLE-R) - Tensioni normali nella soletta (zone cls non fessurato reagente)

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

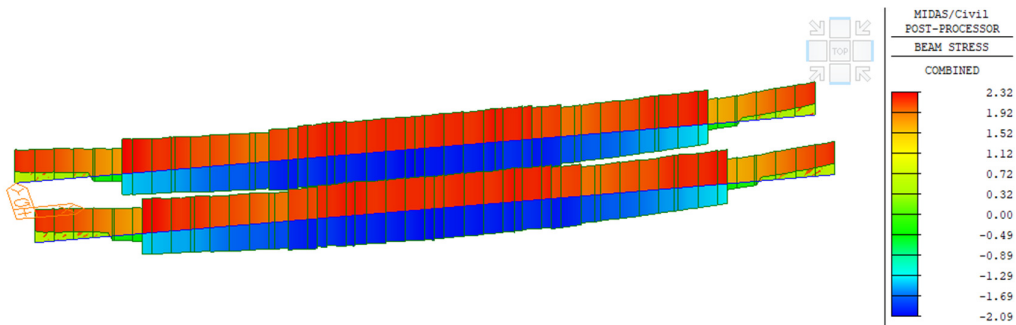


Figura 56 – Combinazione quasi permanente (SLE-QP) - Tensioni normali nella soletta (zone cls non fessurato reagente)

Le tensioni normali di compressione nel calcestruzzo nelle diverse combinazioni di esercizio risultano quindi inferiori ai limiti previsti dalla normativa. In combinazione caratteristica (rara) risulta infatti:

- $\sigma_c = 8.0 \text{ MPa} < \sigma_{c,R} = 19.2 \text{ MPa}$;

In combinazione quasi permanente, la tensione di trazione nel calcestruzzo è inferiore al limite di fessurazione per il calcestruzzo della soletta ($\sigma_t = 2.52 \text{ MPa}$) per cui la soletta non risulta fessurata.

9. VERIFICHE DEGLI ELEMENTI DI CARPENTERIA SECONDARIA

Nei paragrafi successivi sono riportate le verifiche di instabilità degli elementi di carpenteria secondaria. Le sollecitazioni agenti sugli elementi costituenti il traverso vengono ricavate attraverso il modello di calcolo completo.

I controventi superiori vengono verificati in condizioni di montaggio, in funzione delle sollecitazioni che derivano dall'azione tagliante del vento. Ipotizzando la presenza di una sola diagonale di controvento compressa tra due travi principali e tra tre diaframmi contigui, l'azione risultante del vento risulta pari a:

- $F_{wm,1,SLE} = 3.2 \text{ kN/m} \cdot 16.4 \text{ m} = 52.5 \text{ kN}$;
- $F_{wm,1,SLU} = 1.5 \cdot F_{wm,1,SLE} = 78.7 \text{ kN}$.

Per cui lo sforzo normale nel controvento risulta pari a:

- $N_{cs,SLE} = F_{wm,1,SLE} / \cos\alpha / 2 = 29 \text{ kN}$;
- $N_{cs,SLU} = F_{wm,1,SLU} / \cos\alpha / 2 = 44 \text{ kN}$;

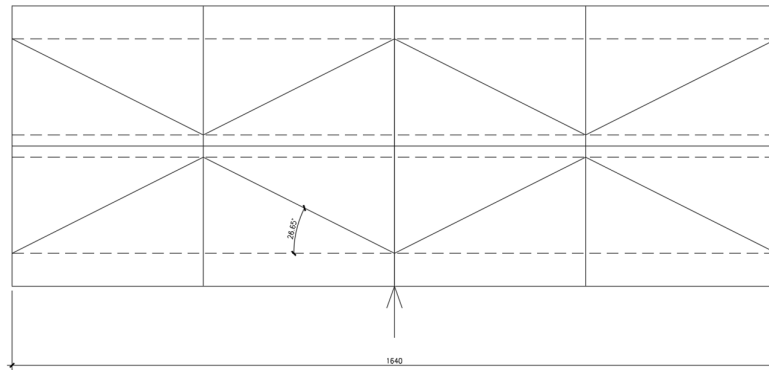


Figura 57 – Schema di calcolo controventatura superiore

Per i traversi intermedi, le sollecitazioni di verifica sono ricavate direttamente dal modello di calcolo completo.

9.1 VERIFICA DEI CONTROVENTI SUPERIORI

Nella tabella a seguire si sviluppa la verifica della classe di appartenenza e il calcolo della resistenza all'instabilità dell'asta. Si evidenzia che, essendo la resistenza maggiore del massimo sforzo di compressione calcolato precedentemente in fase di montaggio, la verifica è soddisfatta.

Tabella 23 – Verifica di stabilità per controventi superiore

| f_{yk} [MPa] | E [kPa] | h [mm] | b [mm] | t [mm] | h/t [-] | (b+h)/(2t) [-] | ϵ [-] | 14 ϵ [-] | CLASSE |
|-------------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------------|-------------------|----------------------|--------|
| 355 | 2.10E+08 | 80 | 80 | 8 | 10.00 | 10.00 | 0.81 | 11.34 | 3 |

| A [m ²] | J_{yy} [m ⁴] | J_{zz} [m ⁴] | J_{min} [m ²] | L [m] | L_0/L [-] | L_0 [m] | i_{min} [m] | 15 i_{min} [m] |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------|----------------|--------------|------------------|---------------------|
| 1.23E-03 | 7.22E-07 | 7.22E-06 | 7.22E-07 | 4.6 | 1 | 4.6 | 0.024 | 0.36 |

| CALCOLO DELLA RESISTENZA ALL'INSTABILITA' DELL'ASTA | | | | | | | | | |
|---|------------------|------------------|-----------------|---------------|---------------|----------------------|--------------------|------------------|------------------------|
| ω (λ) [-] | N_{cr} [kN] | λ [-] | α [-] | ϕ [-] | χ [-] | γ_{M1} [-] | $N_{b,Rd}$ [kN] | N_{Ed} [kN] | σ_{Ed} [MPa] |
| 189.9 | 70.7 | 2.48 | 0.34 | 3.98 | 0.14 | 1.1 | 56.1 | 44.0 | 35.8 |

9.2 VERIFICA DEI TRAVERSI INTERMEDI E DI TESTATA

I traversi hanno le seguenti caratteristiche:

- traversi di testata (asse appoggi): sezione ad I avente altezza pari a 1.34 m e flange superiori e inferiori aventi larghezza pari a 350 mm e spessori pari a 25 mm. Lo spessore dell'anima è pari a 20 mm.
- traversi intermedi (disposti con passo 4.1 m): sezione ad I avente altezza pari a 0.80 m e flange superiori e inferiori aventi larghezza pari a 350 mm e spessori pari a 25 mm. Lo spessore dell'anima è pari a 20 mm.

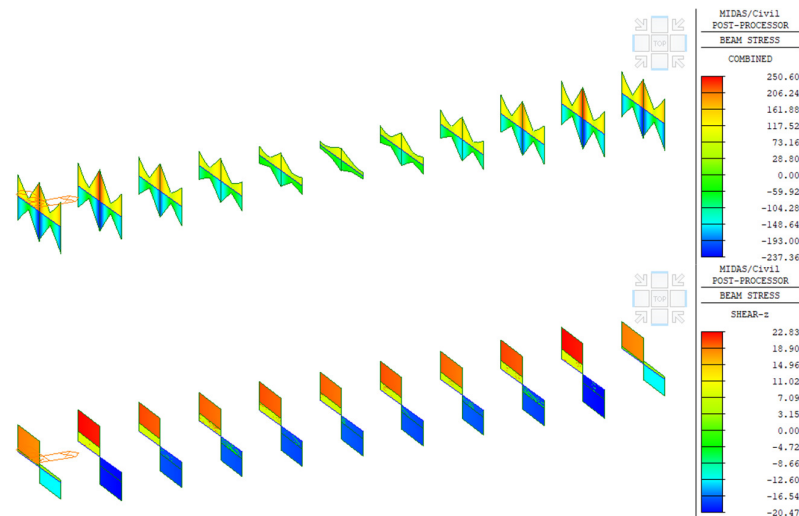


Figura 58 – Tensioni normali e tangenziali allo SLU agenti nei traversi

Si ottiene quindi una tensione ideale massima in tali elementi pari a:

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

- trasversi di testata
 $\sigma_{id} = (236 + 3 \cdot 19^2)^{0.5} = 238.3 \text{ MPa} < f_{yd} = 355/1.05 = 338 \text{ MPa}$
- trasversi intermedi
 $\sigma_{id} = (251^2 + 3 \cdot 23^2)^{0.5} = 254.1 \text{ MPa} < f_{yd} = 355/1.05 = 338 \text{ MPa}$

Per i trasversi di testata è da analizzare anche la condizione di sollevamento dell'impalcato per sostituzione appoggi in fase di manutenzione. Nell'ipotesi di utilizzo di n. 2 martinetti per testata, posti a 750 mm dalle travi di bordo, utilizzando un apposito modello di calcolo di trave su due appoggi (martinetti) e caricata, in corrispondenza delle due travi principali, dalle azioni derivanti dai pesi propri e dall'azione del vento si ottengono i seguenti risultati:

$$1.35 \cdot (G1+G2) \pm 1.5 \cdot Q_{5,s} = 1.35 \cdot (910+285) \pm 1.5 \cdot 25 = 1613.2 \pm 37.5 \text{ kN}$$

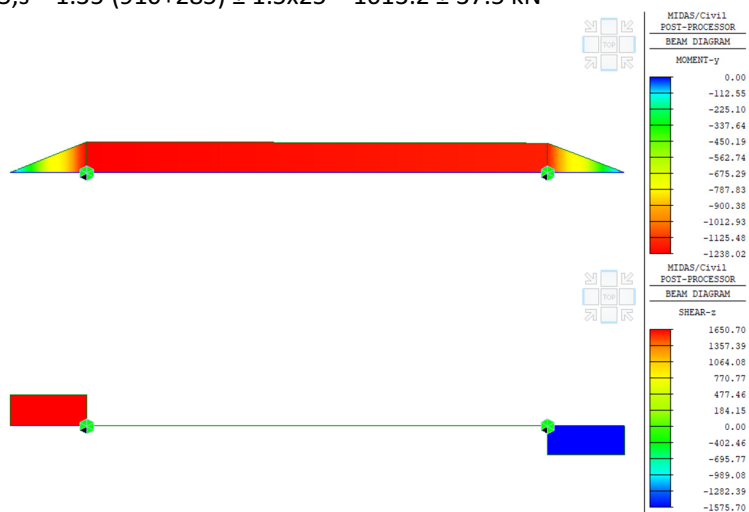


Figura 59 – Sollecitazioni allo SLU agenti nei trasversi di testata in fase di sollevamento

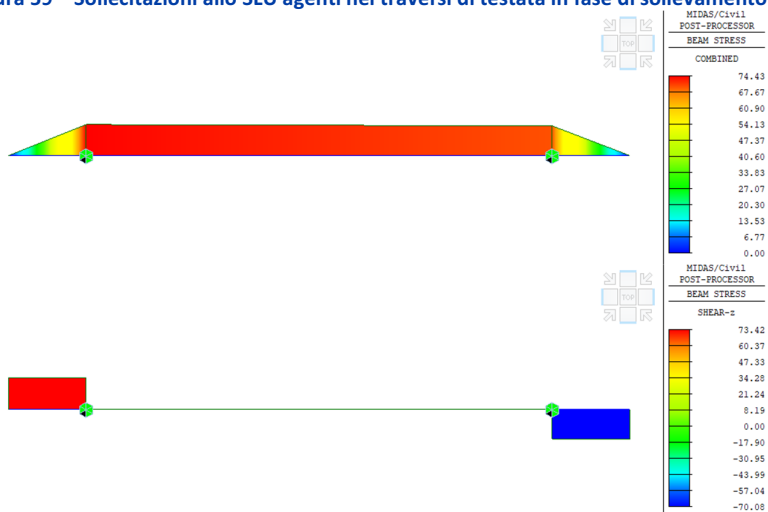


Figura 60 – Tensioni allo SLU agenti nei trasversi di testata in fase di sollevamento

Si ottiene quindi una tensione ideale massima in tali elementi pari a:

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

- $\sigma_{id} = (74.4^2 + 3 \cdot 73.4^2)^{0.5} = 147.3 \text{ MPa} < f_{yd} = 355/1.05 = 338 \text{ MPa}$

In fase di sollevamento, le tensioni risultano superiori a quelle di esercizio ma ad ogni modo al di sotto della resistenza di progetto.

9.3 VERIFICA DEI COLLEGAMENTI BULLONATI

Le verifiche dei collegamenti bullonati sono eseguite in accordo con la normativa vigente secondo quanto riportato al paragrafo 6.8.2.1. Si ricorda che le giunzioni sono ad attrito ed è previsto un apposito trattamento di sabbiatura delle superfici collegate.

9.3.1 Controventi superiori

Il collegamento dei controventi inferiori è costituito da 2 bulloni, diametro M20, classe 10.9. Le verifiche sono riportate qui di seguito.

| SOLLECITAZIONI | | |
|----------------|-------|-------|
| V_{Ed} | n_b | V_b |
| | [-] | [kN] |
| 44 | 2 | 22 |

| VERIFICA A TAGLIO DEI BULLONI | | | | | |
|-------------------------------|--------|-----|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | n | $F_{v,Rd}$ | $F_{v,Sd}$ | ρ |
| | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 20 | 10.9 | 2 | 235.2 | 22 | 0.09 |

| VERIFICA A RIFOLLAMENTO DELLA LAMIERA | | | | | | |
|---------------------------------------|--------|----------|------|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | α | k | $F_{b,Rd}$ | $F_{v,Sd}$ | ρ |
| [mm] | [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 20 | 10.9 | 0.8 | 2.50 | 129.5 | 22.0 | 0.17 |

| VERIFICA A SCORRIMENTO DEI BULLONI (SLU) | | | | | | | |
|--|--------|-----|-------|-----------|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | n | μ | $F_{p,c}$ | $F_{s,Rd}$ | $F_{s,Sd}$ | ρ |
| [mm] | [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 20 | 10.9 | 2 | 0.30 | 171.5 | 82.3 | 22.0 | 0.27 |

| VERIFICA A SCORRIMENTO DEI BULLONI (SLE) | | | | | | | |
|--|--------|-----|-------|-----------|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | n | μ | $F_{p,c}$ | $F_{s,Rd}$ | $F_{s,Sd}$ | ρ |
| [mm] | [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 20 | 10.9 | 2 | 0.20 | 171.5 | 62.4 | 14.7 | 0.24 |

9.3.2 Giunti di continuità travi principali (piattabanda superiore)

I giunti di continuità tra i differenti conci delle travi principali sono costituiti da piatti bullonati sulle ali e sull'anima.

In corrispondenza delle piattabande superiori il giunto è costituito da 64 bulloni, diametro M27, classe 10.9. Il taglio sui bulloni è calcolato in funzione della tensione normale massima/minima sui conci in corrispondenza delle giunzioni con il concio successivo.

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

| Concio | σ [Mpa] | S_{piatt} [mm] | b_{piatt} [mm] | V_{Ed} [kN] | n_b [-] | V_b [kN] |
|--------|-------------------|---------------------|---------------------|------------------|--------------|---------------|
| C1 | 153 | 32 | 750 | 3672 | 64 | 57 |
| C2-a | 149.7 | 32 | 750 | 3593 | 64 | 56 |
| C2-b | 251.5 | 32 | 750 | 6036 | 64 | 94 |
| C3 | 229.7 | 40 | 750 | 6891 | 64 | 108 |

| VERIFICA A TAGLIO DEI BULLONI | | | | | |
|-------------------------------|--------|-----|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | n | $F_{v,Rd}$ | $F_{v,Sd}$ | ρ |
| [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 27 | 10.9 | 2 | 367.2 | 107.7 | 0.29 |

| VERIFICA A RIFOLLAMENTO DELLA LAMIERA | | | | | | |
|---------------------------------------|--------|----------|------|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | α | k | $F_{b,Rd}$ | $F_{v,Sd}$ | ρ |
| [mm] | [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 27 | 10.9 | 0.6 | 2.50 | 483.2 | 107.7 | 0.22 |

| VERIFICA A SCORRIMENTO DEI BULLONI (SLU) | | | | | | | |
|--|--------|-----|-------|-----------|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | n | μ | $F_{p,C}$ | $F_{s,Rd}$ | $F_{s,Sd}$ | ρ |
| [mm] | [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 27 | 10.9 | 2 | 0.45 | 321.3 | 231.3 | 107.7 | 0.47 |

| VERIFICA A SCORRIMENTO DEI BULLONI (SLE) | | | | | | | |
|--|--------|-----|-------|-----------|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | n | μ | $F_{p,C}$ | $F_{s,Rd}$ | $F_{s,Sd}$ | ρ |
| [mm] | [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 27 | 10.9 | 2 | 0.45 | 321.3 | 262.9 | 82.8 | 0.32 |

9.3.3 Giunti di continuità travi principali (piattabanda inferiore)

I giunti di continuità tra i differenti conci delle travi principali sono costituiti da piatti bullonati sulle ali e sull'anima.

In corrispondenza delle piattabande inferiori il giunto è costituito da 64 bulloni, diametro M27, classe 10.9. Il taglio sui bulloni è calcolato in funzione della tensione normale massima/minima sui conci in corrispondenza delle giunzioni con il concio successivo.

| Concio | σ [Mpa] | S_{piatt} [mm] | b_{piatt} [mm] | V_{Ed} [kN] | n_b [-] | V_b [kN] |
|--------|-------------------|---------------------|---------------------|------------------|--------------|---------------|
| C1 | 208.8 | 30 | 900 | 5638 | 64 | 88 |
| C2-a | 147.8 | 40 | 1200 | 7094 | 64 | 111 |
| C2-b | 225.5 | 50 | 1200 | 13530 | 64 | 211 |
| C3 | 229.5 | 50 | 1200 | 13770 | 64 | 215 |

| VERIFICA A TAGLIO DEI BULLONI | | | | | |
|-------------------------------|--------|-----|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | n | $F_{v,Rd}$ | $F_{v,Sd}$ | ρ |
| [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 27 | 10.9 | 2 | 367.2 | 215.2 | 0.59 |

| VERIFICA A RIFOLLAMENTO DELLA LAMIERA | | | | | | |
|---------------------------------------|--------|----------|------|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | α | k | $F_{b,Rd}$ | $F_{v,Sd}$ | ρ |
| [mm] | [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 27 | 10.9 | 0.6 | 2.50 | 483.2 | 215.2 | 0.45 |

| VERIFICA A SCORRIMENTO DEI BULLONI (SLU) | | | | | | | |
|--|--------|-----|-------|-----------|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | n | μ | $F_{p,C}$ | $F_{s,Rd}$ | $F_{s,Sd}$ | ρ |
| [mm] | [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 27 | 10.9 | 2 | 0.45 | 321.3 | 231.3 | 215.2 | 0.93 |

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

| VERIFICA A SCORRIMENTO DEI BULLONI (SLE) | | | | | | | |
|--|---------------|----------|--------------|-------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| d_b [mm] | Classe [-] | n [-] | μ [-] | $F_{p,c}$ [kN] | $F_{s,Rd}$ [kN] | $F_{s,Sd}$ [kN] | ρ [D/C] |
| 27 | 10.9 | 2 | 0.45 | 321.3 | 262.9 | 165.5 | 0.63 |

9.3.4 Giunti di continuità travi principali (anima)

I giunti di continuità tra i differenti conci delle travi principali sono costituiti da piatti bullonati sulle ali e sull'anima.

In corrispondenza delle anime il giunto è costituito da 108 bulloni, diametro M27, classe 10.9. Il taglio sui bulloni è calcolato in funzione del taglio agente sui conci in corrispondenza delle giunzioni con il concio successivo.

| Concio | V_{Ed} [kN] | n_b [-] | V_b [kN] |
|--------|------------------|--------------|---------------|
| | C1 | 2297 | 108 |
| C2-a | 2297 | 108 | 21.3 |
| C2-b | 1221 | 108 | 11.3 |
| C3 | 1221 | 108 | 11.3 |

| VERIFICA A TAGLIO DEI BULLONI | | | | | |
|-------------------------------|---------------|----------|--------------------|--------------------|-----------------|
| d_b [mm] | Classe [-] | n [-] | $F_{v,Rd}$ [kN] | $F_{v,Sd}$ [kN] | ρ [D/C] |
| 27 | 10.9 | 2 | 367.2 | 21.3 | 0.06 |

| VERIFICA A RIFOLLAMENTO DELLA LAMIERA | | | | | | |
|---------------------------------------|---------------|-----------------|----------|--------------------|--------------------|-----------------|
| d_b [mm] | Classe [-] | α [-] | k [-] | $F_{b,Rd}$ [kN] | $F_{v,Sd}$ [kN] | ρ [D/C] |
| 27 | 10.9 | 0.6 | 2.50 | 257.7 | 21.3 | 0.08 |

| VERIFICA A SCORRIMENTO DEI BULLONI (SLU) | | | | | | | |
|--|---------------|----------|--------------|-------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| d_b [mm] | Classe [-] | n [-] | μ [-] | $F_{p,c}$ [kN] | $F_{s,Rd}$ [kN] | $F_{s,Sd}$ [kN] | ρ [D/C] |
| 27 | 10.9 | 2 | 0.45 | 321.3 | 231.3 | 21.3 | 0.09 |

| VERIFICA A SCORRIMENTO DEI BULLONI (SLE) | | | | | | | |
|--|---------------|----------|--------------|-------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| d_b [mm] | Classe [-] | n [-] | μ [-] | $F_{p,c}$ [kN] | $F_{s,Rd}$ [kN] | $F_{s,Sd}$ [kN] | ρ [D/C] |
| 27 | 10.9 | 2 | 0.45 | 321.3 | 262.9 | 16.4 | 0.06 |

9.3.5 Traversi

I giunti di collegamento tra i traversi e le travi principali sono costituiti da piatti bullonati sulle ali e sull'anima del traverso.

In corrispondenza delle piattabande superiori e inferiori il giunto è costituito da 12 bulloni, diametro M27, classe 10.9. Il taglio sui bulloni è calcolato in funzione della tensione normale massima/minima alle estremità dei traversi.

| σ [Mpa] | s_{piatt} [mm] | b_{piatt} [mm] | V_{Ed} [kN] | n_b [-] | V_b [kN] |
|-------------------|---------------------|---------------------|------------------|--------------|---------------|
| 206.8 | 25 | 350 | 1810 | 12 | 151 |

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

| VERIFICA A TAGLIO DEI BULLONI | | | | | |
|-------------------------------|--------|-----|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | n | $F_{v,Rd}$ | $F_{v,Sd}$ | ρ |
| [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 27 | 10.9 | 2 | 367.2 | 150.8 | 0.41 |

| VERIFICA A RIFOLLAMENTO DELLA LAMIERA | | | | | | |
|---------------------------------------|--------|----------|------|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | α | k | $F_{b,Rd}$ | $F_{v,Sd}$ | ρ |
| [mm] | [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 27 | 10.9 | 0.6 | 2.50 | 402.6 | 150.8 | 0.37 |

| VERIFICA A SCORRIMENTO DEI BULLONI (SLU) | | | | | | | |
|--|--------|-----|-------|-----------|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | n | μ | $F_{p,c}$ | $F_{s,Rd}$ | $F_{s,Sd}$ | ρ |
| [mm] | [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 27 | 10.9 | 2 | 0.45 | 321.3 | 231.3 | 150.8 | 0.65 |

| VERIFICA A SCORRIMENTO DEI BULLONI (SLE) | | | | | | | |
|--|--------|-----|-------|-----------|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | n | μ | $F_{p,c}$ | $F_{s,Rd}$ | $F_{s,Sd}$ | ρ |
| [mm] | [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 27 | 10.9 | 2 | 0.45 | 321.3 | 262.9 | 116.0 | 0.44 |

In corrispondenza dell'anima il giunto è costituito da 30 bulloni, diametro M27, classe 10.9. Il taglio sui bulloni è calcolato in funzione del taglio massimo agente all'estremità (cautelativamente tale verifica può essere estesa anche ai traversi sugli appoggi aventi un maggior numero di bulloni sull'anima).

| V_{Ed} | n_b | V_b |
|----------|-------|-------|
| [kN] | [-] | [kN] |
| 431 | 30 | 14.4 |

| VERIFICA A TAGLIO DEI BULLONI | | | | | |
|-------------------------------|--------|-----|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | n | $F_{v,Rd}$ | $F_{v,Sd}$ | ρ |
| [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 27 | 10.9 | 2 | 367.2 | 14.4 | 0.04 |

| VERIFICA A RIFOLLAMENTO DELLA LAMIERA | | | | | | |
|---------------------------------------|--------|----------|------|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | α | k | $F_{b,Rd}$ | $F_{v,Sd}$ | ρ |
| [mm] | [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 27 | 10.9 | 0.6 | 2.50 | 322.1 | 14.4 | 0.04 |

| VERIFICA A SCORRIMENTO DEI BULLONI (SLU) | | | | | | | |
|--|--------|-----|-------|-----------|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | n | μ | $F_{p,c}$ | $F_{s,Rd}$ | $F_{s,Sd}$ | ρ |
| [mm] | [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 27 | 10.9 | 2 | 0.45 | 321.3 | 231.3 | 14.4 | 0.06 |

| VERIFICA A SCORRIMENTO DEI BULLONI (SLE) | | | | | | | |
|--|--------|-----|-------|-----------|------------|------------|--------|
| d_b | Classe | n | μ | $F_{p,c}$ | $F_{s,Rd}$ | $F_{s,Sd}$ | ρ |
| [mm] | [-] | [-] | [-] | [kN] | [kN] | [kN] | [D/C] |
| 27 | 10.9 | 2 | 0.45 | 321.3 | 262.9 | 11.1 | 0.04 |

10. VERIFICA DELLA SOLETTA

L'analisi delle sollecitazioni flettenti e taglianti nella direzione trasversale della soletta di larghezza pari a 13.00 m è stata sviluppata considerando, una striscia di soletta di larghezza pari ad 1 m, schematizzata come trave continua semplicemente appoggiata in corrispondenza delle ali delle travi principali e della trave di spina, secondo lo schema riportato nella figura seguente. Il modello di calcolo è stato realizzato tramite il software di calcolo Midas Civil 2020.

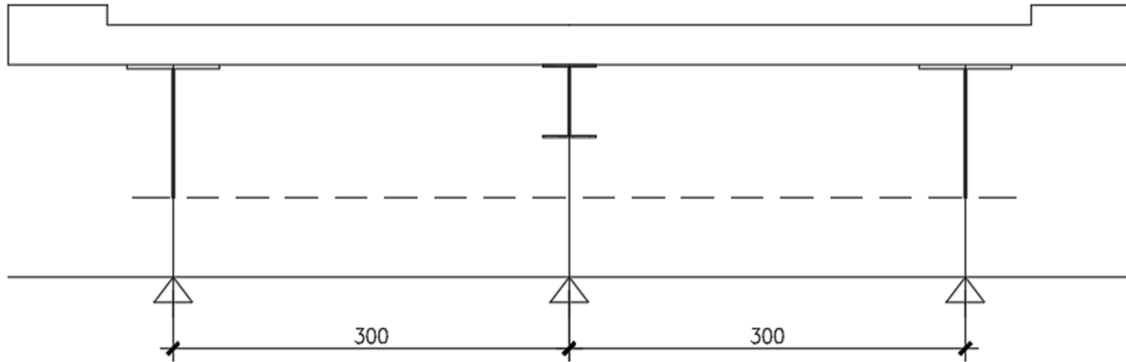


Figura 61 – Schema di calcolo della soletta in direzione trasversale

10.1 CARICHI APPLICATI

La trave è soggetta ai carichi permanenti (G1, G2) ed ai carichi mobili previsti dal D.M. 14/01/2008.

10.1.1 Pesì propri e carichi permanenti

Il peso proprio della soletta e dei cordoli è valutato in automatico dal software di calcolo considerando un peso per unità di volume del calcestruzzo pari a 25 kN/m³ ed assegnando gli opportuni spessori agli elementi monodimensionali (0.36-0.41 m per la soletta, 0.51 m per i cordoli).

È stato inoltre applicato il carico distribuito dovuto al peso della pavimentazione pari a 2 kN/m² e i carichi concentrati dovuti a guardrail, velette, corrimano e impianti.

10.1.2 Carichi stradali

I carichi applicati e la larghezza della striscia di soletta collaborante su cui si considera ripartito l'effetto di tali carichi sono stati definiti con le seguenti modalità. Sono state considerate le azioni Qk e qk con gli schemi di carico 1 e 2, così come definiti nel punto 5.1.3.3.3 del D.M. 14/01/2008.

La valutazione della diffusione all'interno della soletta degli effetti dei carichi concentrati è stata sviluppata tenendo conto dello spessore della pavimentazione, dello spessore della soletta e della luce tra gli appoggi nella direzione trasversale.

In direzione trasversale la diffusione del carico attraverso la pavimentazione e la soletta è assunta, a partire dall'impronta dei pneumatici, con inclinazione a 45° fino al piano medio della soletta. Studi sperimentali hanno dimostrato che in direzione longitudinale si può considerare un'ulteriore diffusione

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

degli effetti del carico e pertanto la larghezza della striscia di soletta collaborante è incrementata di un valore al massimo pari ad $L/4$, dove L è l'interasse tra gli appoggi dello schema statico utilizzato (nel caso in esame pari a 3.5 m). La ripartizione avviene quindi secondo gli schemi rappresentati nella seguente figura.

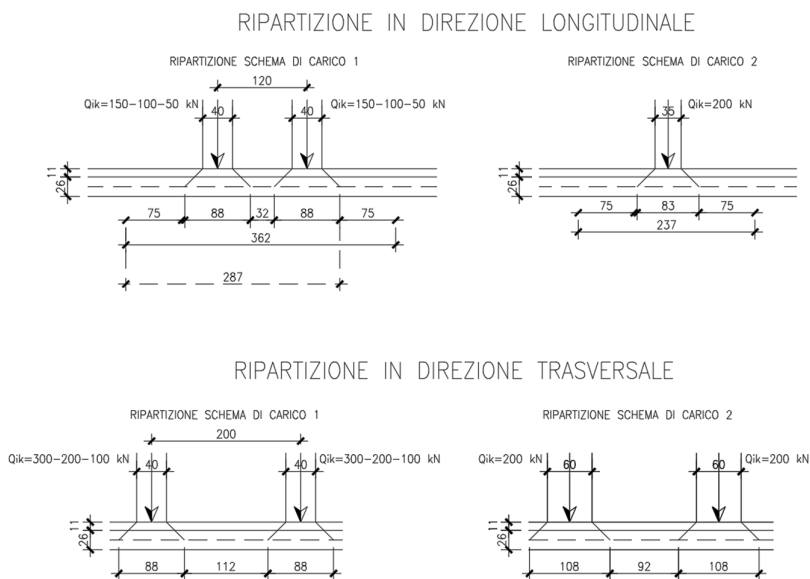


Figura 62 – Diffusione dei carichi stradali in senso longitudinale e trasversale

L'analisi della soletta è stata condotta comunque su uno schema di trave continua di larghezza di 1 m e pertanto i carichi considerati sulla trave continua sono i seguenti:

Schema di carico 1

Il carico Q_{ik} si ripartisce a partire dall'impronta del pneumatico pari a 0.40×0.40 m². La diffusione a 45° fino al piano medio della soletta permette di applicare il carico su una superficie pari a 0.88×0.88 m². Come detto, si considera un'ulteriore diffusione degli effetti del carico nella direzione longitudinale e pertanto la larghezza della striscia di soletta collaborante è incrementata di un valore massimo di $L/4 = 3.0/4 = 0.75$ m da entrambi i lati.

In definitiva tenendo conto dell'interasse di 1.2 m tra i due carichi risulta, nella direzione longitudinale, come evidenziato in figura, una larghezza collaborante di soletta pari a 3.91 m.

I carichi distribuiti corrispondenti agli assi dei carichi tandem considerati sono pertanto pari a:

- Corsia 1 $q_1 = 300 / (3.62 \times 0.88) = 94.2$ KN/m/m;
- Corsia 2 $q_2 = 200 / (3.62 \times 0.88) = 62.8$ KN/m/m;

Ai carichi tandem sono stati aggiunti i carichi distribuiti previsti dallo schema di carico 1, proposto dalla normativa. Conseguentemente, in corrispondenza del carico Q_{1k} è stato applicato un carico pari a 9 kN/m² sull'intera larghezza della corsia e, analogamente, è stato applicato un carico distribuito pari a 2.5 kN/m² in corrispondenza di Q_{2k} .

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

In senso trasversale sono state considerate due possibili posizioni delle tre corsie di carico, disponendo la corsia 1 una volta con la massima eccentricità e una volta in posizione centrata rispetto all'asse dell'impalcato.

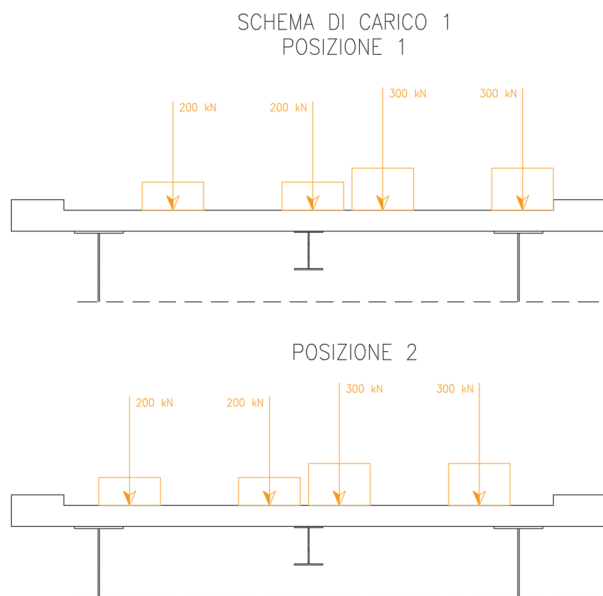


Figura 63 – Posizione trasversale dei carichi mobili concentrati (schema di carico 1)

Schema di carico 2

Lo schema di carico 2 delle azioni variabili da traffico è costituito da una coppia di due carichi da 200 kN posti trasversalmente a distanza di 2 m. Ognuno di essi si ripartisce in maniera analoga a quanto visto per lo schema 1, a partire dall'impronta del pneumatico pari a $0.35 \times 0.60 \text{ m}^2$ fino ad un'area pari $2.37 \times 1.08 \text{ m}^2$, ottenendo una pressione pari a 78.1 kN/m^2 .

In senso trasversale sono state considerate due possibili posizioni del carico, disponendo le aree di carico una volta con in maniera centrata rispetto all'interasse tra due appoggi e una volta in posizione centrata rispetto all'asse dell'impalcato. Tale schema è da associarsi alle azioni di veicolo in svio per la verifica in combinazione eccezionale.

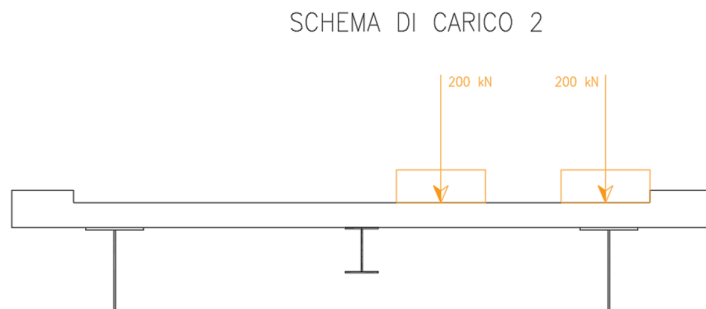


Figura 64 – Posizione trasversale dei carichi mobili (schema di carico 2)

10.1.3 Urto di un veicolo in svio

Le azioni di progetto sono state definite secondo le indicazioni del paragrafo 3.6.3.3.2 delle NTC08. Il carico di progetto è costituito da una forza orizzontale di $A_k = 100$ KN, applicata alla quota minima fra 1,0 m sopra il piano di marcia e 100 mm sotto la sommità della barriera. Nel caso in esame si assume che la forza agisca ad una distanza $d = 0.90$ m dalla base della barriera. Tali carichi vengono amplificati per un coefficiente pari ad 1.5.

Questa forza è stata sia applicata nel modello monodimensionale della soletta (considerando una combinazione di carichi eccezionale SLU-E), ma è stata anche utilizzata per eseguire una verifica locale del cordolo per azioni d'urto.

10.1.4 Combinazioni di carico

Sono state considerate le seguenti combinazioni di carico agli SLU e SLE.

Tabella 24 – Combinazioni di carico per la verifica della soletta

| COMBINAZIONE | G1 | G2 | Qk | AK |
|--------------|------|------|---------|------|
| SLU | 1.35 | 1.35 | 1.35 | 0.00 |
| SLU - E | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 1.00 |
| SLE-R | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| SLE-F | 1.00 | 1.00 | 0.75/40 | 0.00 |
| SLE-QP | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |

10.2 RISULTATI DELL'ANALISI

Nel presente paragrafo si riportano i diagrammi involuppo di momento flettente e taglio per le diverse combinazioni di carico. Si noti che i diagrammi sono stati spuntati in corrispondenza della piattabanda superiore delle travi principali di impalcato.

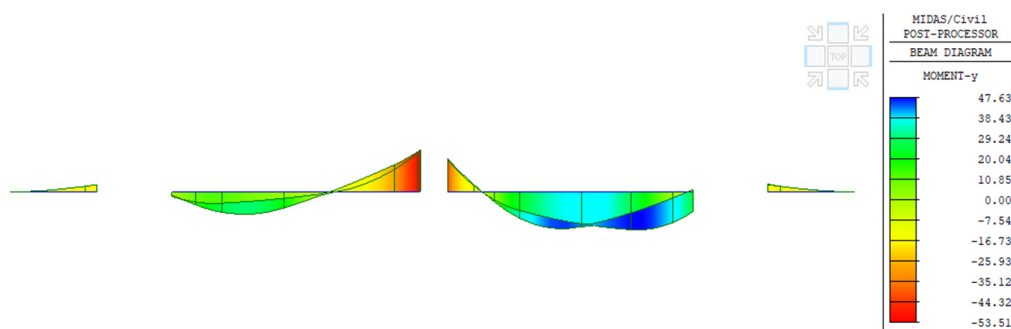


Figura 65 – Involuppo SLU – Momento flettente

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

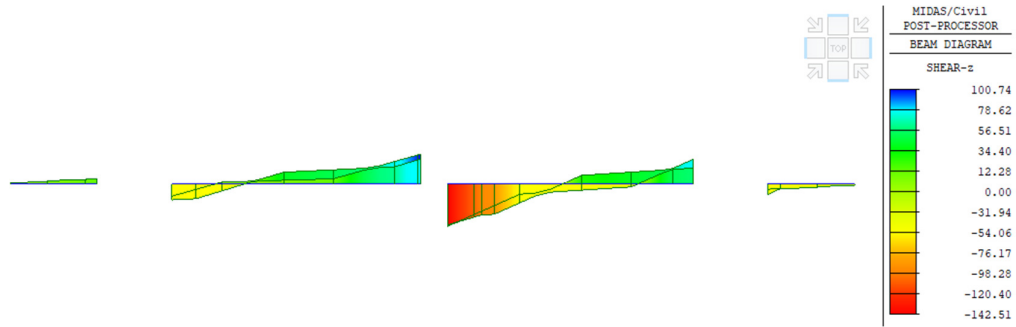


Figura 66 – Involuppo SLU – Taglio

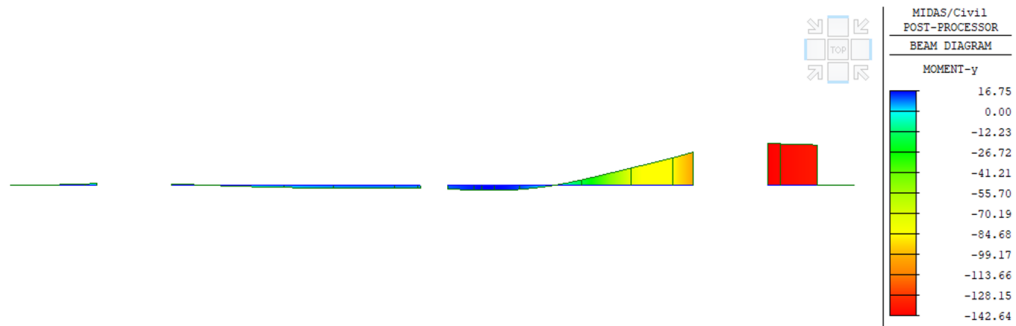


Figura 67 – Involuppo SLU-E – Momento flettente

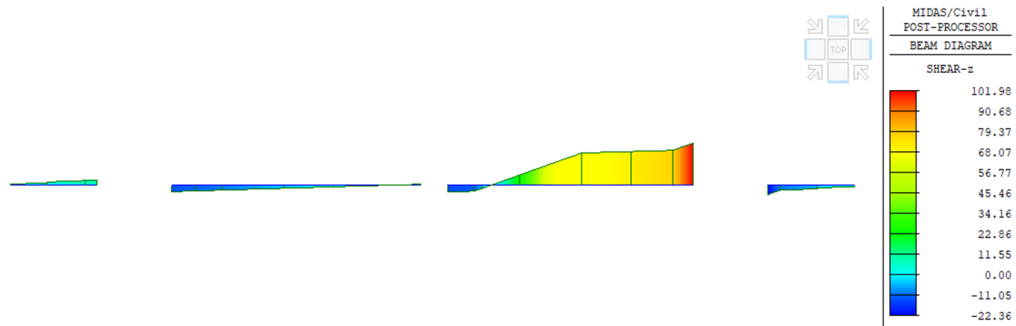


Figura 68 – Involuppo SLU-E – Taglio

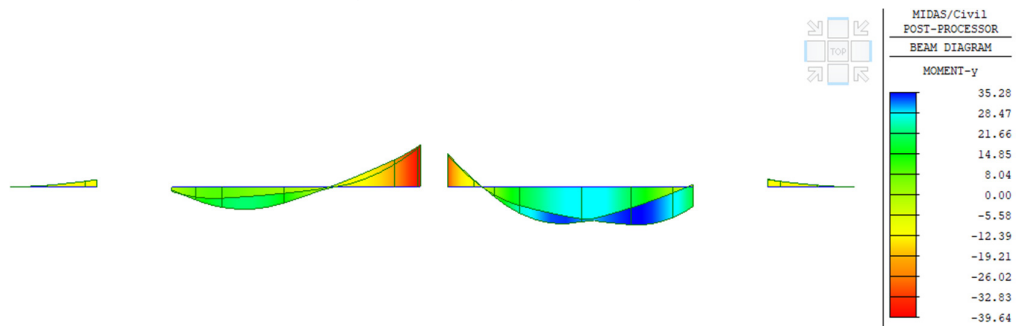


Figura 69 – Involuppo SLE-R – Momento flettente

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

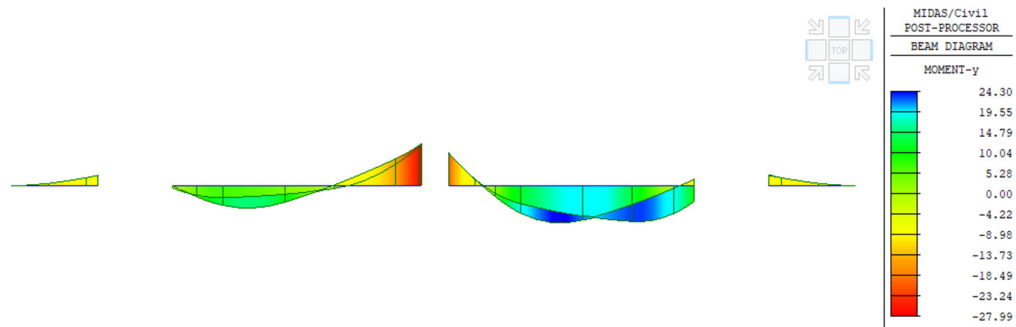


Figura 70 – Involuppo SLE-F – Momento flettente

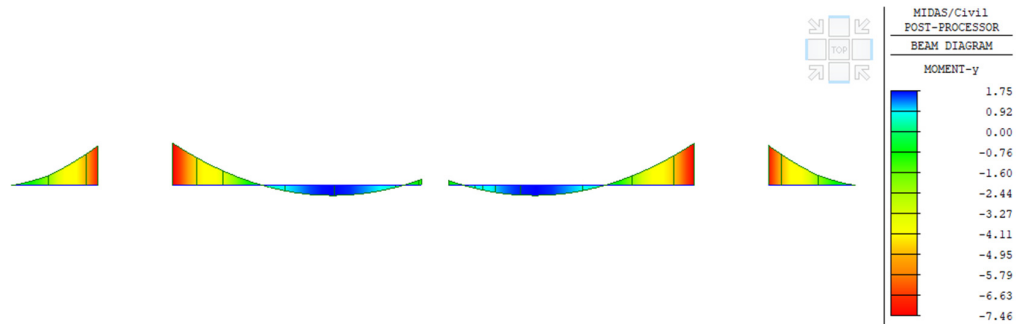


Figura 71 – Involuppo SLE-QP – Momento flettente

10.3 VERIFICHE STRUTTURALI

10.3.1 Verifiche allo SLU

Di seguito sono riportate le verifiche a flessione e taglio allo SLU.

| Combinazione | $M_{max,sup}$ [kNm] | $M_{max,inf}$ [kNm] | V_{max} [kN] |
|--------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| SLU | -53.5 | 47.6 | 142.5 |
| SLU-E | -142.6 | 16.8 | 102.0 |

Vista la presenza della predalle in calcestruzzo, la verifica a flessione allo SLU viene effettuata considerando le seguenti sezioni resistenti:

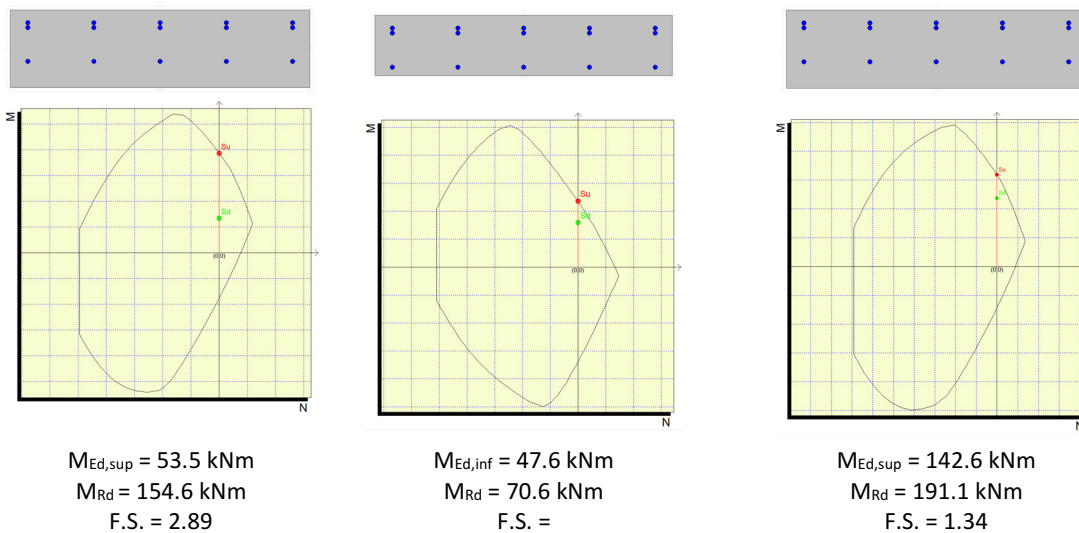
- Momento flettente negativo (fibre tese superiori): $B = 1.00$ m, $H = 0.26$ m, $c_{sup} = 3.5$ cm, $c_{inf} = 7$ cm.
- Momento flettente positivo (fibre tese inferiori): $B = 1.00$ m, $H = 0.20$ m, $c_{sup} = 3.5$ cm, $c_{inf} = 2$ cm;

L'armatura considerata al lembo superiore in corrispondenza degli appoggi sulle travi è di $1\Phi 16/20+1\Phi 16/20$, mentre l'armatura al lembo inferiore è di $1\Phi 16/20$. Le verifiche in combinazione eccezionale sono eseguite con coefficienti di sicurezza sui materiali unitari.

SLU

SLU-E

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02



La verifica a taglio per elementi non armati a taglio viene condotta come previsto dal D.M. 14/01/2008 p.to 4.1.2.1.3.1. Considerando un taglio sollecitante massimo di 142.5 kN, la verifica, riportata nella seguente tabella, risulta soddisfatta.

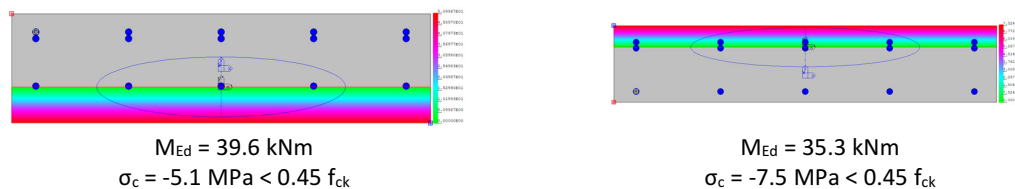
| VERIFICA PER ELEMENTI NON ARMATI A TAGLIO: $V_{Ed} < V_{Rd}$ | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------------|-----------------------------|-----------------|----------------------|------------------------|------------------|------------------|------|
| $V_{Ed,max}$ [kN] | b [mm] | h [mm] | c [mm] | d [mm] | k [-] | Armatura tesa | A_l [mm ²] | ρ_l [-] | $N_{Ed,min}$ [kN] | σ_{cp} [MPa] | V_{min} [-] | V_{Rd} [kN] | FS |
| 142.5 | 1000 | 260 | 30 | 230 | 1.93 | 1Φ16/20+1Φ16/20 | 2011 | 8.7E-03 | 0.0 | 0.000 | 0.53 | 161.9 | 1.14 |

10.3.2 Verifiche allo SLE

Di seguito sono riportate le verifiche agli SLE di limitazione delle tensioni in esercizio e di fessurazione. In accordo con il D.M. 14/01/2008 p.to 4.1.2.2, i limiti di fessurazione assunti sono stati scelti considerando condizioni ambientali aggressive e armature poco sensibili ai fenomeni di corrosione, per cui si utilizza il limite $w_2=0.3\text{mm}$ per le combinazioni frequenti e il limite $w_1=0.2\text{mm}$ per la combinazione quasi permanente.

| Combinazione | $M_{max,sup}$ [kNm] | $M_{max,inf}$ [kNm] |
|--------------|------------------------|------------------------|
| SLE-R | -39.6 | 35.3 |
| SLE-F | -28.0 | 24.3 |
| SLE-QP | -7.5 | 1.8 |

Verifica di limitazione delle tensioni in esercizio

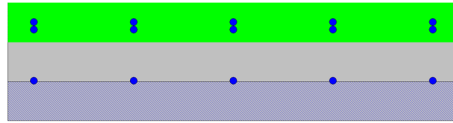


RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

$$\sigma_s = 115.8 \text{ MPa} < 0.8 f_{yk}$$

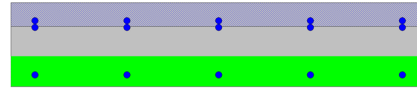
$$\sigma_s = 231.9 \text{ MPa} < 0.8 f_{yk}$$

Verifica di fessurazione (SLE-F)



$$M_{Ed} = 28.0 \text{ kNm}$$

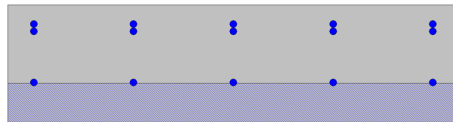
$$w_k = 0.028 \text{ mm} < w_2$$



$$M_{Ed} = 24.3 \text{ kNm}$$

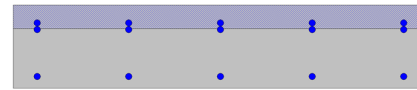
$$w_k = 0.072 \text{ mm} < w_2$$

Verifica di fessurazione (SLE-QP)



$$M_{Ed} = 7.5 \text{ kNm}$$

$$w_k = 0.0 \text{ mm}$$



$$M_{Ed} = 1.8 \text{ kNm}$$

$$w_k = 0.0 \text{ mm}$$

10.3.3 Verifica locale del cordolo per azioni d'urto

In questo paragrafo sono riportati i risultati ottenuti dalle verifiche locali dei cordoli che ospitano le barriere di sicurezza. Le azioni di progetto sono state definite secondo le indicazioni del paragrafo 3.6.3.3.2 delle NTC08. Il carico di progetto è costituito da una forza orizzontale di $F=100 \text{ KN}$, applicata alla quota minima fra 1,0 m sopra il piano di marcia e 100 mm sotto la sommità della barriera.

Nel caso in esame si assume che la forza agisca ad una distanza $d=0.90 \text{ m}$ dalla base della barriera. Lo spessore della soletta all'attacco del cordolo è pari ad $s=0.26$ quello del cordolo a 0.44 m per cui l'estradosso del cordolo si trova ad una distanza sopra l'estradosso di soletta pari a $c=0.18 \text{ m}$.

Verifica a tenso-flessione della soletta

Il momento sollecitante a quota piano medio della soletta, che nasce in caso di urto di un veicolo sulla barriera, vale:

- $\Delta M = N \cdot (d + c + 0.5s) = F \cdot 1.21 \text{ m} = 121.0 \text{ kNm}$

Tali sollecitazioni si applicano ipotizzando una diffusione a 45° delle azioni dalla piastra metallica di base della barriera (che si ipotizza larga 40cm) al piano medio della soletta. La larghezza collaborante nel meccanismo di tenso-flessione vale pertanto:

$$B = 0.4 \text{ m} + 2(c + 0.5s) = 1.02 \text{ m}$$

La variazione di momento calcolata va a sommarsi al momento dovuto ai carichi permanenti, ricavato dal modello di calcolo precedentemente mostrato in corrispondenza dell'attacco del sicurvia. Tale momento vale $M_{perm} = 7.5 \text{ KNm}$. Il momento totale, dunque, vale:

$$M = 121.0 + 7.5 = 128.5 \text{ KNm}$$

Nell'ipotesi in cui la variazione del momento calcolata sia assorbita completamente dalle armature poste al lembo inferiore della soletta, la trazione agente nell'armatura superiore tesa vale:

$$T_d = M / (0.9s) = 548.1 \text{ kN}$$

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

Tale trazione è equilibrata dalle barre $\Phi 16/10$, disposte in estradosso, che riescono a fornire una trazione resistente pari a:

$$T_r = 201.1 \cdot (1.02/0.10) \cdot 391.3 \cdot 10^{-3} = 802.6 \text{ KN} > T_d.$$

Verifica delle staffe disposte all'interno del cordolo

La funzione di tali staffe è duplice:

- Equilibrare l'azione orizzontale F;
- Equilibrare la trazione dei tirafondi della barriera nel meccanismo di pull out.

La forza orizzontale F è equilibrata dalle barre $\Phi 16/20$ che sono sempre presenti all'interno del cono di rottura evidenziato nella seguente figura.

In dettaglio la forza orizzontale rappresenta l'azione di urto, che è pari a $F=100 \text{ KN}$.

Gli spilli $\Phi 12/20$ oppongono una resistenza a tale forza espressa dalla seguente relazione:

$$F_{rd} = f_{yd} \cdot n \cdot A_s / \sqrt{3}$$

Dove n è il numero dei tondini compresi nel cono di rottura ed è pari a 10, come sarà illustrato nel seguito.

Conseguentemente:

$$F_{rd} = 391.3 \times 10 \times 113 / 1.73 \times 10^{-3} = 255.59 \text{ kN}$$

La verifica risulta soddisfatta.

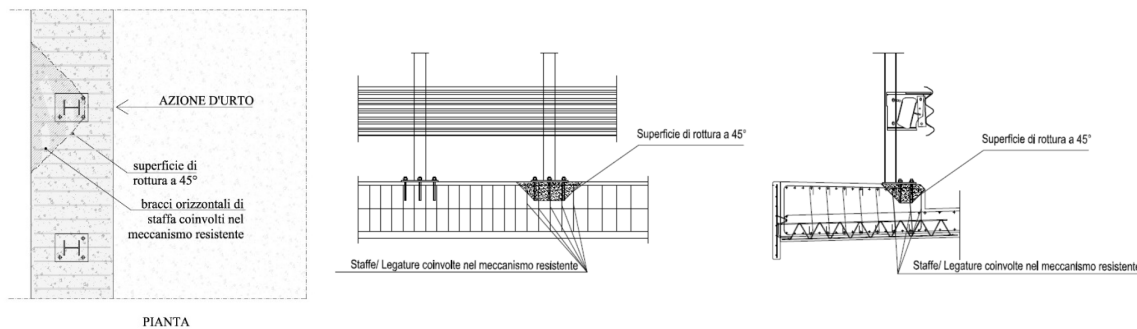


Figura 72 – Meccanismi di rottura locali per azioni d'urto – schemi tipo

La trazione T_d dei tirafondi della barriera è equilibrata dai bracci verticali delle staffe e dalle legature di cui alla figura precedente.

Ipotizzando un braccio di leva delle forze interne della piastra di base della barriera pari a 0.22 m e un'altezza della forza d'urto sopra tale piastra di 0.90 m, si stima T_d come:

$$T_d = 0.90 \text{ m} \cdot N / 0.22 \text{ m} = 409 \text{ kN}$$

Avendo disposto le staffe $\Phi 16/20$ e legature $\Phi 12/20$ ed ipotizzando una lunghezza dei tirafondi di almeno 19 cm (nonché l'interasse tra i due tirafondi tesi di 0.30 m), risulta che i bracci verticali compresi nel cono di rottura sono disposti su 3 filari per un numero complessivo pari a:

$$n = 3 \cdot (1 \cdot 0.30 \text{ m} + 2 \cdot 0.19 \text{ m}) / 20 \text{ cm} = 10.2 \text{ bracci}$$

che corrisponde ad una trazione resistente pari a :

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

$$T_r = n \cdot 201.1 \cdot f_{yd} \cdot 10^{-3} = 451 \text{ kN} > T_d$$

10.3.4 Verifiche della soletta per carichi mobili disposti in prossimità dei giunti

Nelle zone terminali degli impalcato, per la presenza del giunto, diminuisce la lunghezza di diffusione dei carichi in senso longitudinale. Conseguentemente le sollecitazioni assumono valori maggiori delle sollecitazioni individuate in corrispondenza della mezzeria dell'impalcato. Con riferimento agli schemi di diffusione longitudinale precedentemente mostrati, considerando nulla la diffusione lato giunto, si ottiene un incremento delle sollecitazioni pari a circa 1.3.

Inoltre, in prossimità di un giunto di espansione, la vigente normativa suggerisce di considerare un fattore di amplificazione dinamica addizionale da applicare a tutti i carichi, dato da:

$$\Delta\phi_{fat} = 1,30 \cdot \left(1 - \frac{d}{26}\right) \geq 1,0$$

dove d è la distanza della sezione considerata dalla sezione di giunto, espressa in m. Per d=0, il fattore di amplificazione vale 1.3.

In definitiva, le sollecitazioni in corrispondenza dei giunti possono essere considerate al massimo pari a circa 1.7 volte quelle ottenute in mezzeria dell'impalcato.

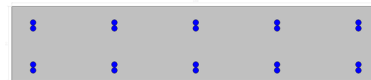
| Combinazione | M _{max,sup} [kNm] | M _{max,inf} [kNm] | V _{max} [kN] |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| SLU | -91.0 | 80.9 | 242.3 |
| SLE-R | -67.3 | 60.0 | - |
| SLE-F | -47.6 | 41.3 | - |
| SLE-QP | -12.8 | 3.1 | - |

Conseguentemente, in tali zone, l'armatura a flessione è stata incrementata ed è stata aggiunta un'armatura per le sollecitazioni taglianti. In dettaglio, in prossimità degli appoggi, è stata prevista la seguente armatura:

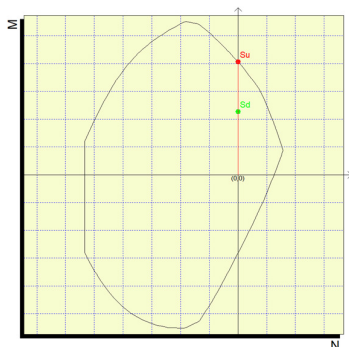
- armatura a taglio costituita da spilli $\phi 10/20 \times 20$
- una armatura trasversale superiori di $\phi 16/10$ ed inferiore di $\phi 16/10$.

Di seguito vengono riportate le verifiche a flessione e taglio condotte sulle sollecitazioni incrementate come sopra descritto.

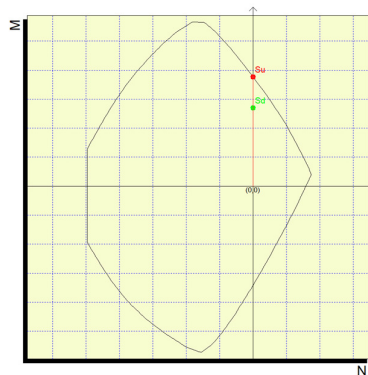
Verifica SLU



RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02



$M_{Ed} = 91.0 \text{ kNm}$
 $M_{Rd} = 162.5 \text{ kNm}$
F.S. = 1.78



$M_{Ed} = 80.9 \text{ kNm}$
 $M_{Rd} = 113.3 \text{ kNm}$
F.S. = 1.40.

Verifica a taglio

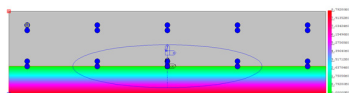
| SEZIONE CLS | | |
|-------------|------|------|
| h | d | b |
| [mm] | [mm] | [mm] |
| 260 | 230 | 1000 |

| ARMATURA A TAGLIO | | | |
|-------------------|--------|--------------------|--------------------|
| ϕ_{legat} | Bracci | A_{ϕ} | A_{sw} |
| [mm] | [-] | [mm ²] | [mm ²] |
| 10 | 5.0 | 78.5 | 392.7 |

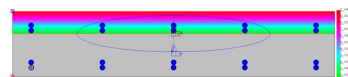
| CALCOLO DEI TAGLI RESISTENTI | | | | | | | | |
|------------------------------|------------|----------------------|---------------|-----------|-----------------|-----------|-----------|------|
| V_{Ed} | α_c | TAGLIO COMPRESSIONE | | | TAGLIO TRAZIONE | | | FS |
| | | f'_{cd} | $\cotg\theta$ | V_{Rcd} | $\cotg\alpha$ | s_{eff} | V_{Rsd} | |
| [kN] | [-] | [N/mm ²] | [-] | [kN] | [-] | [mm] | [kN] | |
| 242 | 1.00 | 9.07 | 2.5 | 647 | 0.0 | 200 | 281.2 | 1.16 |

Verifiche SLE

Verifica di limitazione delle tensioni in esercizio

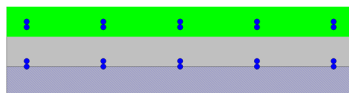


$M_{Ed} = 67.3 \text{ kNm}$
 $\sigma_c = -8.8 \text{ MPa} < 0.45 f_{ck}$
 $\sigma_s = 192.9 \text{ MPa} < 0.8 f_{yk}$

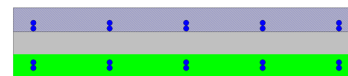


$M_{Ed} = 60.0 \text{ kNm}$
 $\sigma_c = -10.4 \text{ MPa} < 0.45 f_{ck}$
 $\sigma_s = 235.5 \text{ MPa} < 0.8 f_{yk}$

Verifica di fessurazione (SLE-F)



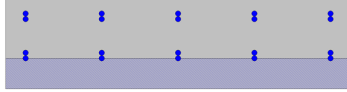
$M_{Ed} = 47.6 \text{ kNm}$
 $w_k = 0.053 \text{ mm} < w_2$



$M_{Ed} = 41.3 \text{ kNm}$
 $w_k = 0.062 \text{ mm} < w_2$

Verifica di fessurazione (SLE-QP)

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02



$M_{Ed} = 12.8 \text{ kNm}$
 $w_k = 0.0 \text{ mm}$



$M_{Ed} = 3.1 \text{ kNm}$
 $w_k = 0.0 \text{ mm}$

11. ISOLATORI, APPOGGI E GIUNTI

Nel seguente paragrafo si illustrano le caratteristiche degli isolatori sismici, degli apparecchi di appoggio e dei giunti in corrispondenza delle spalle.

Il ponte è dotato di un sistema di isolamento sismico con isolatori elastomerici a nucleo di piombo sia in direzione trasversale che longitudinale.

La tipologia di appoggi adottata nella presente modellazione ha preso come riferimento le caratteristiche dissipative riportate nella tabella seguente, capaci di garantire uno spostamento massimo in combinazione sismica allo SLC pari a 200 mm. I dispositivi di appoggio installati dovranno avere caratteristiche meccaniche conformi e compatibili con quelle previste in progetto.

| V | F _{zd} | K _e | ξ _e | F ₂ | F ₁ | d ₁ | K _v | D _g | t _e | h | H | Z |
|--|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|-----|-----|
| kN | kN | kN/mm | % | kN | kN | mm | kN/mm | mm | mm | mm | mm | mm |
| per d ₂ ^{SLV} = 167 mm | | | | | | | | | | | | |
| 6780 | 14260 | 2.73 | 21 | 455 | 180 | 10 | 2339 | 700 | 126 | 227 | 287 | 750 |

Legenda

| | |
|-----------------|--|
| V | Carico verticale massimo agente sull'isolatore in presenza del sisma corrispondente allo SLC (allo spostamento d ₂ ^{SLC}) |
| F _{zd} | Carico verticale massimo agente sull'isolatore in assenza di sisma (SLU), concomitante con rotazione 0 e spostamento orizzontale 10 mm |
| K _e | Rigidezza orizzontale equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLC}) |
| ξ _e | Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLC}) |
| F ₂ | Forza massima (allo spostamento d ₂ ^{SLC}) |
| F ₁ | Forza al limite elastico |
| d ₁ | Spostamento al limite elastico |
| K _v | Rigidezza verticale |
| D _g | Diametro elastomero |
| t _e | Spessore totale gomma |
| h | Altezza escluse piastre di ancoraggio |
| H | Altezza totale incluse piastre di ancoraggio |
| Z | Lato piastre di ancoraggio |

Come dimostrato dalle tabelle riepilogative degli scarichi degli apparecchi di appoggio riportate al paragrafo successivo, si evidenzia che il valore di soglia elastica F1-d1 del dispositivo scelto garantisce un adeguato margine di sicurezza nei confronti delle azioni statiche e delle deformazioni termiche, assicurando quindi un comportamento elastico dell'apparecchio in condizioni di esercizio. Analogamente, sono garantiti ampi margini di sicurezza rispetto agli scarichi verticali massimi sopportabili in combinazione sismica (V) e allo SLU (Fzd).

La tipologia costruttiva prevista per gli apparecchi di appoggio e dei giunti è riportata nell'elaborato grafico specifico.

Di seguito si riporta la valutazione delle corse degli apparecchi di appoggio e l'escursione dei giunti sulle due spalle in direzione trasversale e longitudinale.

Direzione trasversale

Lo spostamento massimo in combinazione sismica allo SLC in corrispondenza della spalla vale circa ± 168 mm. La corsa trasversale degli apparecchi di appoggio è quindi fissata pari a ± 200 mm.

Direzione longitudinale

Sono stati valutati i seguenti spostamenti:

- 1) spostamento relativo massimo longitudinale dell'isolatore in corrispondenza della spalla sismica d_2 ;
- 2) spostamento relativo massimo dell'impalcato per effetto delle variazioni termiche d_t ;

In corrispondenza della spalla, la corsa degli apparecchi di appoggio e l'escursione del giunto è pari a:

- $\Delta_{sp,m} = \pm (d_2 + 0.5d_t)$

Lo spostamento d_2 allo SLC è stato valutato pari:

- $d_2 = \pm 170$ mm

Gli spostamenti dovuti alla dilatazione termica possono essere valutati come segue:

- $d_t = \alpha \cdot \Delta T \cdot L = 1 \cdot 10^{-5} \cdot 30 \cdot 41 \cdot 10^3 = 12$ mm

Pertanto lo spostamento massimo in combinazione sismica in corrispondenza della spalla vale circa ± 176 mm, per cui si adottano giunti di continuità aventi escursione pari a ± 200 mm.

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

11.1 SCARICHI SUGLI APPARECCHI DI APPOGGIO

Nelle seguenti tabelle si riportano gli scarichi massimi e minimi per condizione e combinazione di carico sui singoli apparecchi di appoggio:

Tabella 25 – Scarichi sugli apparecchi di appoggio delle spalle per condizione di carico

| Node | Load | FX (kN) | FY (kN) | FZ (kN) | Node | Load | FX (kN) | FY (kN) | FZ (kN) |
|------|----------------|---------|---------|---------|------|----------------|---------|---------|---------|
| 1 | G1.1 | 4.1 | 0.1 | 257.2 | 3 | G1.1 | -4.1 | 0.1 | 257.2 |
| 1 | G1.2 | 7.5 | 0.2 | 477.8 | 3 | G1.2 | -7.5 | 0.2 | 477.8 |
| 1 | G1.3 | 2.7 | 0.0 | 173.3 | 3 | G1.3 | -2.7 | 0.0 | 173.3 |
| 1 | G2.1 | 2.8 | 0.1 | 176.4 | 3 | G2.1 | -2.8 | 0.1 | 176.4 |
| 1 | G2.2 | 0.7 | 0.0 | 42.0 | 3 | G2.2 | -0.7 | 0.0 | 42.0 |
| 1 | G2.3 | 0.5 | 0.0 | 31.5 | 3 | G2.3 | -0.5 | 0.0 | 31.5 |
| 1 | G2.4 | 0.5 | 0.0 | 31.5 | 3 | G2.4 | -0.5 | 0.0 | 31.5 |
| 1 | E3.1+ | -2.6 | 0.0 | 0.0 | 3 | E3.1+ | 2.6 | 0.0 | 0.0 |
| 1 | E3.1- | 2.6 | 0.0 | 0.0 | 3 | E3.1- | -2.6 | 0.0 | 0.0 |
| 1 | E3.2com | -18.5 | 0.0 | 0.0 | 3 | E3.2com | 18.5 | 0.0 | 0.0 |
| 1 | E3.3exp | 22.3 | 0.0 | 0.0 | 3 | E3.3exp | -22.3 | 0.0 | 0.0 |
| 1 | Q3 | -117.9 | 0.0 | -14.3 | 3 | Q3 | 117.9 | 0.0 | 13.2 |
| 1 | Q5 s | 0.1 | -59.5 | -24.3 | 3 | Q5 s | -0.1 | -59.5 | -24.6 |
| 1 | Q5 c | -0.5 | -132.3 | -120.3 | 3 | Q5 c | 0.6 | -132.2 | -120.7 |
| 1 | EX_SLV_21%(RS) | 376.0 | 0.0 | 35.6 | 3 | EX_SLV_21%(RS) | 376.0 | 0.0 | 35.6 |
| 1 | EY_SLV_21%(RS) | 0.3 | 373.1 | 241.9 | 3 | EY_SLV_21%(RS) | 0.3 | 373.1 | 241.9 |
| 1 | EX_SLC_21%(RS) | 598.0 | 0.0 | 56.4 | 3 | EX_SLC_21%(RS) | 598.0 | 0.0 | 56.4 |
| 1 | EY_SLC_21%(RS) | 0.5 | 593.3 | 384.6 | 3 | EY_SLC_21%(RS) | 0.5 | 593.3 | 384.6 |
| 1 | ML-SLU(max) | 12.6 | 1.3 | 906.0 | 3 | ML-SLU(max) | 0.0 | 1.3 | 905.8 |
| 1 | ML-SLE(max) | 7.0 | 0.9 | 523.4 | 3 | ML-SLE(max) | 0.0 | 0.9 | 523.3 |
| 1 | ML-SLU(min) | 0.0 | 0.0 | -0.1 | 3 | ML-SLU(min) | -12.6 | 0.0 | -0.1 |
| 1 | ML-SLE(min) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 3 | ML-SLE(min) | -7.0 | 0.0 | 0.0 |
| 1 | E2 | 2.0 | 1.1 | 0.0 | 3 | E2 | -2.0 | 1.1 | 0.0 |
| 2 | G1.1 | 4.1 | -0.1 | 257.2 | 4 | G1.1 | -4.1 | -0.1 | 257.2 |
| 2 | G1.2 | 7.5 | -0.2 | 477.8 | 4 | G1.2 | -7.5 | -0.2 | 477.8 |
| 2 | G1.3 | 2.7 | 0.0 | 173.3 | 4 | G1.3 | -2.7 | 0.0 | 173.3 |
| 2 | G2.1 | 2.8 | -0.1 | 176.4 | 4 | G2.1 | -2.8 | -0.1 | 176.4 |
| 2 | G2.2 | 0.7 | 0.0 | 42.0 | 4 | G2.2 | -0.7 | 0.0 | 42.0 |
| 2 | G2.3 | 0.5 | 0.0 | 31.5 | 4 | G2.3 | -0.5 | 0.0 | 31.5 |
| 2 | G2.4 | 0.5 | 0.0 | 31.5 | 4 | G2.4 | -0.5 | 0.0 | 31.5 |
| 2 | E3.1+ | -2.6 | 0.0 | 0.0 | 4 | E3.1+ | 2.6 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | E3.1- | 2.6 | 0.0 | 0.0 | 4 | E3.1- | -2.6 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | E3.2com | -18.5 | 0.0 | 0.0 | 4 | E3.2com | 18.5 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | E3.3exp | 22.3 | 0.0 | 0.0 | 4 | E3.3exp | -22.3 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | Q3 | -117.9 | 0.0 | -14.3 | 4 | Q3 | 117.9 | 0.0 | 13.2 |
| 2 | Q5 s | -0.1 | -59.4 | 24.3 | 4 | Q5 s | 0.1 | -59.5 | 24.6 |
| 2 | Q5 c | 0.5 | -132.3 | 120.3 | 4 | Q5 c | -0.6 | -132.2 | 120.7 |
| 2 | EX_SLV_21%(RS) | 376.0 | 0.0 | 35.6 | 4 | EX_SLV_21%(RS) | 376.0 | 0.0 | 35.6 |
| 2 | EY_SLV_21%(RS) | 0.3 | 373.1 | 241.9 | 4 | EY_SLV_21%(RS) | 0.3 | 373.1 | 241.9 |
| 2 | EX_SLC_21%(RS) | 598.0 | 0.0 | 56.4 | 4 | EX_SLC_21%(RS) | 598.0 | 0.0 | 56.4 |
| 2 | EY_SLC_21%(RS) | 0.5 | 593.3 | 384.6 | 4 | EY_SLC_21%(RS) | 0.5 | 593.3 | 384.6 |
| 2 | ML-SLU(max) | 15.1 | 0.1 | 1136.6 | 4 | ML-SLU(max) | 0.0 | 0.1 | 1136.1 |
| 2 | ML-SLE(max) | 8.5 | 0.0 | 673.0 | 4 | ML-SLE(max) | 0.0 | 0.0 | 672.8 |
| 2 | ML-SLU(min) | 0.0 | -1.3 | -0.1 | 4 | ML-SLU(min) | -15.1 | -1.3 | 0.0 |
| 2 | ML-SLE(min) | 0.0 | -0.9 | 0.0 | 4 | ML-SLE(min) | -8.5 | -0.9 | 0.0 |
| 2 | E2 | 2.0 | -1.1 | 0.0 | 4 | E2 | -2.0 | -1.1 | 0.0 |

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

Tabella 26 – Scarichi sugli apparecchi di appoggio delle spalle per combinazione di carico

| Node | Load | FX (kN) | FY (kN) | FZ (kN) | Node | Load | FX (kN) | FY (kN) | FZ (kN) |
|------|------------------|---------|---------|---------|------|------------------|---------|---------|---------|
| 1 | SLU_A1_Gr1(max) | 69.2 | -115.3 | 2720.7 | 3 | SLU_A1_Gr1(max) | -15.4 | -115.2 | 2720.1 |
| 1 | SLU_A1_Gr2a(max) | -97.5 | -115.8 | 2184.9 | 3 | SLU_A1_Gr2a(max) | -174.5 | -115.7 | 2221.5 |
| 1 | SLU_A1 Q5s(max) | 52.8 | -87.1 | 1569.4 | 3 | SLU_A1 Q5s(max) | -16.1 | -87.1 | 1569.0 |
| 1 | SLU_A1 E3(max) | 75.5 | 3.3 | 2312.5 | 3 | SLU_A1 E3(max) | -4.8 | 3.3 | 2312.3 |
| 1 | SLE_RA_Gr1(max) | 50.0 | -76.4 | 2023.4 | 3 | SLE_RA_Gr1(max) | -12.9 | -76.4 | 2022.9 |
| 1 | SLE_RA_Gr2a(max) | -73.5 | -76.8 | 1626.5 | 3 | SLE_RA_Gr2a(max) | -130.8 | -76.8 | 1653.6 |
| 1 | SLE_RA Q5s(max) | 37.9 | -57.8 | 1165.2 | 3 | SLE_RA Q5s(max) | -13.4 | -57.8 | 1164.9 |
| 1 | SLE_RA E3(max) | 53.6 | 2.5 | 1712.9 | 3 | SLE_RA E3(max) | -5.8 | 2.5 | 1712.8 |
| 1 | SLE_FR_Gr1(max) | 45.0 | 2.6 | 1869.1 | 3 | SLE_FR_Gr1(max) | -15.1 | 2.6 | 1868.9 |
| 1 | SLE_FR_Gr2a(max) | -47.6 | 2.3 | 1571.4 | 3 | SLE_FR_Gr2a(max) | -103.5 | 2.3 | 1591.9 |
| 1 | SLE_FR Q5s(max) | 35.5 | -10.2 | 1184.7 | 3 | SLE_FR Q5s(max) | -15.1 | -10.2 | 1184.6 |
| 1 | SLE_FR E3(max) | 37.7 | 1.6 | 1189.6 | 3 | SLE_FR E3(max) | -13.3 | 1.6 | 1189.6 |
| 1 | SLE_QP(max) | 35.5 | 1.6 | 1189.6 | 3 | SLE_QP(max) | -15.1 | 1.6 | 1189.6 |
| 1 | SLU_A1_Gr1(min) | 15.4 | -117.1 | 1497.5 | 3 | SLU_A1_Gr1(min) | -69.1 | -117.0 | 1497.2 |
| 1 | SLU_A1_Gr2a(min) | -143.7 | -117.0 | 1478.3 | 3 | SLU_A1_Gr2a(min) | -220.7 | -117.0 | 1515.0 |
| 1 | SLU_A1 Q5s(min) | 16.1 | -87.2 | 1569.4 | 3 | SLU_A1 Q5s(min) | -52.8 | -87.2 | 1569.0 |
| 1 | SLU_A1 E3(min) | 4.8 | 2.0 | 1605.8 | 3 | SLU_A1 E3(min) | -75.5 | 2.0 | 1605.8 |
| 1 | SLE_RA_Gr1(min) | 12.9 | -77.8 | 1117.3 | 3 | SLE_RA_Gr1(min) | -50.0 | -77.7 | 1117.1 |
| 1 | SLE_RA_Gr2a(min) | -105.0 | -77.8 | 1103.0 | 3 | SLE_RA_Gr2a(min) | -162.3 | -77.7 | 1130.2 |
| 1 | SLE_RA Q5s(min) | 13.4 | -57.8 | 1165.2 | 3 | SLE_RA Q5s(min) | -37.9 | -57.8 | 1164.9 |
| 1 | SLE_RA E3(min) | 5.8 | 1.6 | 1189.5 | 3 | SLE_RA E3(min) | -53.6 | 1.6 | 1189.5 |
| 1 | SLE_FR_Gr1(min) | 15.1 | 1.6 | 1189.5 | 3 | SLE_FR_Gr1(min) | -45.0 | 1.6 | 1189.5 |
| 1 | SLE_FR_Gr2a(min) | -73.3 | 1.6 | 1178.8 | 3 | SLE_FR_Gr2a(min) | -129.2 | 1.6 | 1199.4 |
| 1 | SLE_FR Q5s(min) | 15.1 | -10.3 | 1184.7 | 3 | SLE_FR Q5s(min) | -35.5 | -10.3 | 1184.6 |
| 1 | SLE_FR E3(min) | 13.3 | 1.6 | 1189.6 | 3 | SLE_FR E3(min) | -37.7 | 1.6 | 1189.6 |
| 1 | SLE_QP(min) | 15.1 | 1.6 | 1189.6 | 3 | SLE_QP(min) | -35.5 | 1.6 | 1189.6 |
| 2 | SLU_A1_Gr1(max) | 73.5 | -121.0 | 3248.7 | 4 | SLU_A1_Gr1(max) | -16.4 | -120.9 | 3248.2 |
| 2 | SLU_A1_Gr2a(max) | -94.5 | -121.0 | 2603.5 | 4 | SLU_A1_Gr2a(max) | -175.5 | -120.9 | 2640.5 |
| 2 | SLU_A1 Q5s(max) | 52.4 | -91.2 | 1642.4 | 4 | SLU_A1 Q5s(max) | -15.7 | -91.2 | 1642.8 |
| 2 | SLU_A1 E3(max) | 77.5 | -2.0 | 2514.5 | 4 | SLU_A1 E3(max) | -4.8 | -2.0 | 2514.2 |
| 2 | SLE_RA_Gr1(max) | 53.1 | -80.9 | 2398.4 | 4 | SLE_RA_Gr1(max) | -13.6 | -80.9 | 2398.0 |
| 2 | SLE_RA_Gr2a(max) | -71.3 | -81.0 | 1920.5 | 4 | SLE_RA_Gr2a(max) | -131.4 | -80.9 | 1947.9 |
| 2 | SLE_RA Q5s(max) | 37.6 | -61.1 | 1213.9 | 4 | SLE_RA Q5s(max) | -13.1 | -61.1 | 1214.2 |
| 2 | SLE_RA E3(max) | 55.2 | -1.6 | 1862.6 | 4 | SLE_RA E3(max) | -5.8 | -1.6 | 1862.3 |
| 2 | SLE_FR_Gr1(max) | 46.8 | -1.6 | 2042.0 | 4 | SLE_FR_Gr1(max) | -15.1 | -1.6 | 2041.6 |
| 2 | SLE_FR_Gr2a(max) | -46.5 | -1.6 | 1683.6 | 4 | SLE_FR_Gr2a(max) | -103.5 | -1.6 | 1704.0 |
| 2 | SLE_FR Q5s(max) | 35.5 | -13.5 | 1194.4 | 4 | SLE_FR Q5s(max) | -15.1 | -13.5 | 1194.5 |
| 2 | SLE_FR E3(max) | 37.7 | -1.6 | 1189.6 | 4 | SLE_FR E3(max) | -13.3 | -1.6 | 1189.6 |
| 2 | SLE_QP(max) | 35.5 | -1.6 | 1189.6 | 4 | SLE_QP(max) | -15.1 | -1.6 | 1189.6 |
| 2 | SLU_A1_Gr1(min) | 16.4 | -122.8 | 1714.1 | 4 | SLU_A1_Gr1(min) | -73.5 | -122.8 | 1714.5 |
| 2 | SLU_A1_Gr2a(min) | -142.8 | -122.3 | 1694.9 | 4 | SLU_A1_Gr2a(min) | -223.8 | -122.2 | 1732.2 |
| 2 | SLU_A1 Q5s(min) | 15.7 | -91.2 | 1642.4 | 4 | SLU_A1 Q5s(min) | -52.4 | -91.2 | 1642.8 |
| 2 | SLU_A1 E3(min) | 4.8 | -3.3 | 1605.8 | 4 | SLU_A1 E3(min) | -77.5 | -3.3 | 1605.9 |
| 2 | SLE_RA_Gr1(min) | 13.6 | -82.3 | 1261.7 | 4 | SLE_RA_Gr1(min) | -53.1 | -82.2 | 1261.9 |
| 2 | SLE_RA_Gr2a(min) | -104.3 | -81.9 | 1247.5 | 4 | SLE_RA_Gr2a(min) | -164.5 | -81.9 | 1275.1 |
| 2 | SLE_RA Q5s(min) | 13.1 | -61.1 | 1213.9 | 4 | SLE_RA Q5s(min) | -37.6 | -61.1 | 1214.2 |
| 2 | SLE_RA E3(min) | 5.8 | -2.5 | 1189.5 | 4 | SLE_RA E3(min) | -55.2 | -2.5 | 1189.5 |
| 2 | SLE_FR_Gr1(min) | 15.1 | -2.6 | 1189.5 | 4 | SLE_FR_Gr1(min) | -46.8 | -2.6 | 1189.5 |
| 2 | SLE_FR_Gr2a(min) | -73.3 | -2.3 | 1178.8 | 4 | SLE_FR_Gr2a(min) | -130.3 | -2.3 | 1199.4 |
| 2 | SLE_FR Q5s(min) | 15.1 | -13.5 | 1194.4 | 4 | SLE_FR Q5s(min) | -35.5 | -13.5 | 1194.5 |
| 2 | SLE_FR E3(min) | 13.3 | -1.6 | 1189.6 | 4 | SLE_FR E3(min) | -37.7 | -1.6 | 1189.6 |
| 2 | SLE_QP(min) | 15.1 | -1.6 | 1189.6 | 4 | SLE_QP(min) | -35.5 | -1.6 | 1189.6 |

11.2 VERIFICA DEI BAGGIOLI

Il dimensionamento delle armature nei baggioli previsti per l'alloggiamento degli apparecchi di appoggio sono condotti in base a quanto riportato nell'Eurocodice 2 del 1990 e/o nel Model Code CEB-FIP 1990, secondo un meccanismo resistente tipo "shear-friction". Le formulazioni utilizzate sono in particolare, quelle di cui al P.to 6.10 - CEB-FIP Model Code 1990, per la valutazione della resistenza alle azioni orizzontali, ovvero quella del (P.to 6.7 - EC2 parte 1-1) per il calcolo della resistenza per azioni verticali.

Di seguito si riportano i risultati delle verifiche effettuate in accordo alle formulazioni citate per le massime sollecitazioni verticali ed orizzontali previste in progetto.

| TIPO | V | H _L | H _T |
|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------|
| APPOGGIO | 3250 | 375 | 375 |
| Materiali | | | |
| Calcestruzzo | | | |
| Resistenza caratteristica cubica | $R_{ck} =$ | 40 | MPa |
| Resistenza caratteristica cilindrica | $f_{ck} = 0,83 * R_{ck} =$ | 32 | MPa |
| Resistenza a compressione di calcolo | $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c =$ | 21.33 | MPa |
| Resistenza a trazione media | $f_{ctm} = 0,27 * (R_{ck})^{2/3} =$ | 3.16 | MPa |
| Resistenza caratteristica a trazione | $f_{ctk} = 0,7 * f_{ctm} =$ | 2.21 | MPa |
| Resistenza car. a trazione per flessione | $f_{ctfk} = 1,2 * f_{ctm} =$ | 3.79 | MPa |
| Resistenza a trazione di calcolo | $f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_c =$ | 1.47 | MPa |
| Acciaio | | | |
| Tensione caratteristica di snervamento | $f_{yk} =$ | 450 | MPa |
| Tensione di snervamento di calcolo | $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s =$ | 391 | MPa |
| Dimensioni piastre inferiore appoggi | | a (long.) | b (trasv.) |
| Appoggio | | 750 | 750 |
| Tipo e dimensioni baggioli | | a' (long.) | b' (trasv.) |
| Baggiolo | | 1000 | 1000 |
| VERIFICHE STRUTTURALI DEL BAGGIOLO | | | |
| Resistenza alle forze orizzontali (P.to 6.10 - CEB-FIP Model Code 1990) | | | |
| Azione tagliante ultima | $F_{sdu} = (H_L^2 + H_T^2)^{1/2} =$ | 530 | KN |
| Utilizzando un meccanismo resistente di shear-friction si ottiene: $\mu = 0.6$ (coefficiente di attrito cls-cls) $\beta = 0.2$, essendo βf_{ctd} la coesione del calcestruzzo (resistenza per attrito) σ_{cd} = tensione di compressione dovuta ai carichi esterni La condizione di resistenza al taglio si esprime con la: $\tau_{sd} < \tau_{rd}$ $\tau_{rd} = \beta f_{ctd} + \mu (\rho f_{yd} + \sigma_{cd}) < 0.25 f_{cd}$ Trascurando l'influenza dell'attrito e della tensione di compressione σ_{cd} si ha: Num. ferri : 40 Diametro singolo ferro: 24 mm Area complessiva $A_s =$ 18096 mm ² Perc. di armatura $\rho =$ 0.01810 (≥ 0.001) OK Resistenza a taglio teorica $\tau_{rd} =$ 4.25 N/mm ² Resistenza a taglio di calcolo $\tau_{rd} =$ 4.25 N/mm ² Taglio agente di progetto $\tau_{sd} =$ 0.53 N/mm ² OK | | | |
| Resistenza alle forze verticali (P.to 6.7 - EC2 parte 1-1) | | | |
| Azione di progetto ultima | $F_{sdu} = V =$ | 3250 | KN |
| area caricata $A_{c0} =$ | 562500 | mm ² | |
| massima area di diffusione $A_{c1} =$ | 1000000 | mm ² | |
| Resistenza ultima $F_{rdv} = A_{c0} * f_{cd} * (A_{c1} / A_{c0})^{1/2} =$ | 16000.00 | KN | |
| $F_{rdv} < 3 * f_{cd} * A_{c0} =$ | 36000 kN | OK | |
| Armatura di frettaggio per assorbire la reazione verticale | | | |
| Azione di progetto ultima | $F_{sdu} = V =$ | 3250 | KN |
| Area necessaria $A_s = 0.25 * F_{sdu} * (1 - (\min(a/a' - b/b'))) / f_{yd} =$ | 5 | cm ² | |
| Avendo disposto staffe $\phi 14$ a 4 braccia risulta per un totale di 2 staffe collaboranti nel tratto Area resistente totale 9.0 cm ² OK | | | |

12. ADDENDUM – VARIAZIONE CARATTERISTICHE ISOLATORI – VALUTAZIONE COMPORTAMENTO GLOBALE

12.1 INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA

Il comportamento globale della struttura è fortemente influenzato dalla presenza dei dispositivi di vincolo ad alta dissipazione che, ai fini delle analisi e delle conseguenti verifiche, sono stati implementati attraverso le opportune caratteristiche equivalenti "nominali".

Nello spirito di quanto indicato da NTC 2008, obiettivo del presente capitolo è la valutazione delle ripercussioni sulla struttura di eventuali variazioni delle predette caratteristiche che, come previsto dalle pertinenti norme di prodotto, possono variare entro prefissati "range" in conseguenza ai seguenti effetti:

- Tolleranza di produzione
- Invecchiamento
- Temperatura di esercizio

Per la tipologia di dispositivi previsti, si valutano quindi gli effetti di una variazione complessiva delle rigidzze equivalenti per i succitati effetti, determinando per tale parametro un valore "Upper Bound" ed un "Lower Bound". Non essendo, allo stato attuale del progetto, in possesso dei certificati di prova e/o qualificazione delle apparecchiature effettivamente in via di installazione, per i suddetti parametri si fa preliminare riferimento a quanto previsto da NTC2008, cap. 11.9.7, che fissa, in termini generali, le seguenti tolleranze:

- Produzione: +/- 20 %
- Temperatura: +/- 20 % (*)
- Invecchiamento: +/- 20 % (*)

Per gli effetti di temperatura ed invecchiamento, come tra l'altro confermato da EN 1998-2, è possibile riferirsi solamente a variazioni di segno "positivo", dato che gli effetti di temperatura ed invecchiamento tendono in generale a fornire solo un incremento di rigidzza.

La valutazione dei "bound" upper e lower è stata quindi effettuata combinando le varie tolleranze, seguendo e regole indicate in EN 15129, che prevedono (cfr. 8.2.1.1.) una riduzione al 70 % dei valori inerenti fornitura e temperatura, quando poste in combinazione assieme ai rimanenti effetti invecchiamento).

Tale regola di combinazione è intesa a tenere conto della scarsa probabilità di sovrapposizione di tutti i valori lower o upper per tutte le apparecchiature installate.

A valle della combinazione, si è quindi valutato il rapporto tra il valore di Upper Bound e Lower Bound, che, come previsto da EN 15129 8.2.1.1. viene limitato al valore massimo 1.8.

Pertanto, con riferimento ai valori di tolleranza indicati poco sopra, i valori del "Design Parameter" della rigidzza presenteranno i seguenti "Bounds" (Lower/Upper):

$$UBDP = [1+(0.2 \times 0.7)] \times [1+(0.2 \times 0.7)] \times [1 + 0.2] = 1.56 \text{ DP}$$

$$LBDP = [1-(0.2)] = 0.8 \text{ DP}$$

Dove con DP si è indicato, genericamente, il "Design Parameter" di riferimento, che in questo caso è rappresentato dalla rigidzza.

Il rapporto tra massima e minima variazione restituisce $1.56/0.8 = 1.95$.

In accordo con EN 15129, si tiene conto della limitazione a 1.8 di tale valore, riducendo il termine maggiormente "disperso", ovvero l'Upper Bound, ottenendo quindi:

$$UBDP = 1.44 \text{ DP}$$

$$LBDP = 0.8 \times \text{DP}$$

Limitando lo studio al comportamento sismico-dinamico della struttura, si effettueranno pertanto due ulteriori analisi considerando le indicate variazioni di rigidzza.

Tenendo conto del fatto che, in linea generale, un incremento di rigidzza dei dispositivi opera "sfavorevolmente" sul quadro delle sollecitazioni, mentre, inversamente, un suo decremento, opera "sfavorevolmente" sul quadro

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

deformativo si procederà pertanto alle seguenti verifiche:

- Per l'analisi "Upper Bound"
 - o Esame dei risultati ottenuti in termini di domanda sulle sottostrutture (elevazioni e fondazioni)
 - o Confronto con le sollecitazioni di progetto ottenute attraverso l'utilizzo dei valori nominali, valutazione dei nuovi rapporti di sfruttamento ed (eventuale) incremento delle capacità maggiormente influenzate. Verranno prese in esame le seguenti grandezze:
 - Periodo di Vibrazione
 - Sollecitazioni ai baggioli
 - Sollecitazioni al piede sostegni (pile e spalle)
 - Sollecitazioni intradosso fondazione

- Per l'analisi "Lower Bound"
 - o Esame dei risultati ottenuti in termini di domanda in spostamento
 - o Confronto ed eventuale aggiornamento delle capacità in spostamento progettate con riferimento ai valori nominali. Verranno prese in esame le seguenti grandezze:
 - Massima escursione di "Chiusura" in corrispondenza del giunto di dilatazione.

In sostanza, l'analisi lower bound verrà impiegata per la valutazione della capacità dei varchi giunti.

12.2 CONCLUSIONI

In un documento di appendice dei viadotti si è effettuato il confronto delle grandezze maggiormente rappresentative, influenzate dalla potenziale variazione delle caratteristiche di rigidezza degli isolatori e di seguito la sintesi dei controlli.

12.2.1 Reazioni sui baggioli

Si rileva un incremento della massima reazione SLC all'appoggio del 20 %.

L'influenza di tale variazione è stata valutata sull'esito delle verifiche dei meccanismi resistenti dei baggioli, confermando, nel complesso, l'esito delle verifiche.

In particolare, considerando anche il contributo resistente indotto dalla minima componente verticale concomitante, la variazione del rapporto di sfruttamento risulta soddisfatto con ampio margine anche con riferimento al valore Upper Bound.

12.2.2 Sollecitazioni su spalla e relativi pali

Le sollecitazioni lungo la spalla (spiccato paramento e fondazione) risultano dominate dalle azioni originate sulla spalla stessa, dovuta alle spinte ed alle masse in gioco, risultando le azioni trasmesse dall'impalcato di minore rilievo.

Per questo motivo, l'incremento di sollecitazione trasmesse dall'impalcato induce sul comportamento flessionale longitudinale della spalla variazioni dell'ordine del 1-2 %, quindi ininfluenti sulle verifiche.

12.2.3 Spostamenti ai giunti

Si rileva un incremento del quadro deformativo sotto sisma di circa il 15 %.

Si evidenzia che gli spostamenti rilevati in condizioni LB per sisma SLV risultano comunque pienamente compatibili

RELAZIONE DI CALCOLO IMPALCATO CV02

con il varco prescelto.

Per quanto riguarda il dimensionamento del giunto, nell'ipotesi di ammettere il danneggiamento locale dell'apparecchiatura in fase sismica, l'incremento risulta ininfluente.