

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



DIREZIONE TECNICA

U.O. INFRASTRUTTURE CENTRO

PROGETTO DEFINITIVO

RADDOPPIO LINEA FERROVIARIA ROMA - VITERBO

TRATTA CESANO - VIGNA DI VALLE

VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA Progr. REV.

NR1J 01 D 29 CL VI0107 001 B

| Rev. | Descrizione         | Redatto  | Data    | Verificato  | Data    | Approvato    | Data    | Autorizzato Data  |
|------|---------------------|----------|---------|-------------|---------|--------------|---------|---|
| A    | Emissione esecutiva |          | 10.2018 | P. DI NUCCI | 10.2018 | PAOLETTI<br> | 10.2018 | ARDUINI<br>02.2020  |
| B    | Revisione           | USAI<br> | 02.2020 | M. MONDA    | 02.2020 | PAOLETTI<br> | 02.2019 |   |
|      |                     |          |         |             |         |              |         | ITALFERR S.p.A.<br>Direzione Tecnica<br>Infrastrutture Centro<br>Dott. Ing. Fabrizio Arduini<br>Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma<br>n. 18362/01-A |
|      |                     |          |         |             |         |              |         |   |

File: NR1J01D29CLVI0107001B.doc

n. Elab.: 310

## INDICE

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>PREMESSA .....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>2</b> | <b>NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....</b>                          | <b>7</b>  |
| 2.1      | NORMATIVE .....   | 7         |
| 2.2      | ELABORATI DI RIFERIMENTO .....  | 8         |
| <b>3</b> | <b>MATERIALI.....</b>   | <b>9</b>  |
| 3.1      | ACCIAIO PER PROFILI LAMINATI.....   | 9         |
| 3.2      | ACCIAIO PER TIRANTI .....   | 9         |
| 3.3      | ACCIAIO IN BARRE PER GETTI .....  | 10        |
| 3.4      | CALCESTRUZZO.....   | 10        |
| <b>4</b> | <b>GEOMETRIA IMPALCATO .....</b>  | <b>11</b> |
| 4.1      | CARATTERISTICHE TRACCIATO.....  | 11        |
| 4.2      | CARATTERISTICHE GEOMETRICHE IMPALCATO .....                               | 11        |
| <b>5</b> | <b>ANALISI DEI CARICHI .....</b>  | <b>13</b> |
| 5.1      | PESO PROPRIO E SOVRACCARICHI PERMANENTI .....                             | 13        |
| 5.2      | CARICHI VARIABILI .....   | 15        |
| 5.2.1    | COEFFICIENTE DINAMICO .....   | 15        |
| 5.2.2    | TRENO LM71.....   | 15        |
| 5.2.3    | TRENO SW/2 .....  | 17        |
| 5.2.4    | FRENATURA ED AVVIAMENTO.....  | 17        |
| 5.2.5    | SERPEGGIO .....   | 18        |
| 5.2.6    | CENTRIFUGA.....   | 18        |
| 5.2.7    | VENTO.....  | 19        |
| 5.2.8    | EFFETTI AERODINAMICI ASSOCIATI AL PASSAGGIO DEI CONVOGLI FERROVIARI ..... | 25        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 5.2.9    | CARICO SUI MARCIAPIEDI.....  | 25        |
| 5.2.10   | AZIONE SISMICA.....  | 25        |
| 5.2.11   | RESISTENZE PARASSITE NEI VINCOLI.....                                | 31        |
| 5.2.12   | DERAGLIAMENTO.....   | 31        |
| <b>6</b> | <b>SOLLECITAZIONI.....</b>   | <b>32</b> |
| 6.1      | SOLLECITAZIONI.....  | 32        |
| 6.1.1    | MOMENTO FLETTENTE E TAGLIO.....                                      | 32        |
| 6.1.2    | COPPIE TORCENTI A METRO LINEARE DI IMPALCATO.....                    | 33        |
| 6.2      | SOLLECITAZIONI SULLA TRAVE DI BORDO DELLA FASCIA.....                | 35        |
| 6.2.1    | AZIONI VERTICALI.....  | 35        |
| 6.2.2    | AZIONI ORIZZONTALI.....  | 36        |
| 6.2.3    | RIEPILOGO DELLE SOLLECITAZIONI ELEMENTARI SULLA TRAVE DI BORDO.....  | 38        |
| 6.2.4    | RIEPILOGO DELLE SOLLECITAZIONI DI PROGETTO SULLA TRAVE DI BORDO..... | 40        |
| <b>7</b> | <b>VERIFICHE DI RESISTENZA.....</b>                                  | <b>42</b> |
| 7.1      | SOLLECITAZIONI DI VERIFICA SULLA TRAVE DI BORDO.....                 | 42        |
| 7.2      | VERIFICHE DEL PROFILO HEB900.....                                    | 43        |
| <b>8</b> | <b>VERIFICHE DI DEFORMABILITA'.....</b>                              | <b>44</b> |
| 8.1      | VALUTAZIONE RIGIDEZZA DELL'IMPALCATO.....                            | 44        |
| 8.2      | FREQUENZA PROPRIA DELL'IMPALCATO.....                                | 45        |
| 8.3      | VERIFICA DI INFLESSIONE NEL PIANO VERTICALE.....                     | 45        |
| 8.4      | VERIFICA DEL COMFORT DEI PASSEGGERI.....                             | 46        |
| 8.5      | ROTAZIONE AGLI APPOGGI.....  | 46        |
| 8.6      | SGHEMBO.....   | 46        |
| <b>9</b> | <b>VERIFICA DELLO SBALZO TRASVERSALE.....</b>                        | <b>48</b> |
| 9.1      | SOLLECITAZIONI ELEMENTARI.....                                       | 49        |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO  |
|----------|---------|----------|-------------|------|---------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 4 di 64 |

|               |   |           |
|---------------|---|-----------|
| <b>9.2</b>    | <b>COEFFICIENTI DI COMBINAZIONE .....</b>             | <b>49</b> |
| <b>9.3</b>    | <b>SOLLECITAZIONI DI CALCOLO .....</b>                | <b>50</b> |
| <b>9.4</b>    | <b>VERIFICA A PRESSOFLESSIONE RETTA .....</b>         | <b>51</b> |
| <b>9.5</b>    | <b>VERIFICA A TAGLIO .....</b>                        | <b>52</b> |
| <b>9.6</b>    | <b>VERIFICA A FESSURAZIONE .....</b>                  | <b>53</b> |
| <b>10</b>     | <b>AZIONI SUGLI APPOGGI.....</b>                      | <b>54</b> |
| <b>10.1</b>   | <b>VERIFICHE PER GLI APPARECCHI DI APPOGGIO .....</b> | <b>62</b> |
| <b>10.1.1</b> | <b>CORSA FRGLI APPARECCHI D'APPOGGIO MOBILI .....</b> | <b>63</b> |
| <b>10.1.2</b> | <b>ESCURSIONE DEI GIUNTI.....</b>                     | <b>63</b> |
| <b>10.1.3</b> | <b>AMPIEZZA DEI VARCHI.....</b>                       | <b>63</b> |
| <b>11</b>     | <b>INCIDENZE .....</b>                                | <b>64</b> |

## 1 PREMESSA

Il ponte ferroviario VI01 si sviluppa tra le progressive 38+640,97 e 38+657,01 nell'ambito del progetto di raddoppio ed è costituito da tre impalcato a travi in acciaio incorporate nel cls, di luci, in asse appoggi, di 16m.

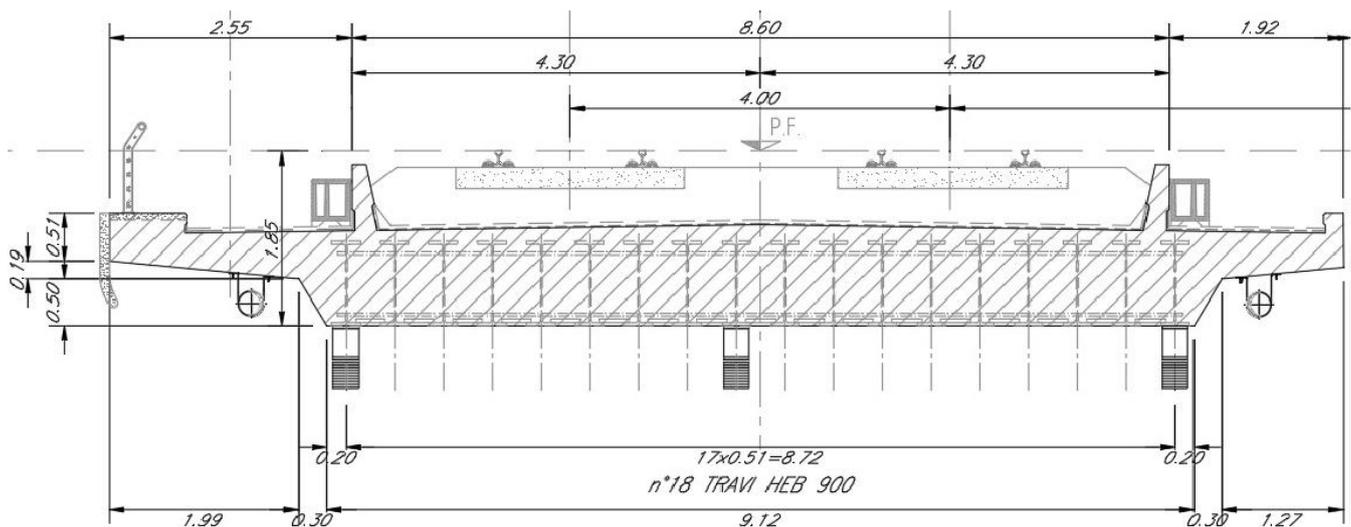
Si adottano queste particolari tipologie di impalcato al fine di minimizzare lo spessore tra piano ferro e sottotrave in modo da non ridurre il franco della strada esistente sottostante.

La piattaforma di progetto ha una larghezza totale di 36,46m ed ospita 3 sedi ferroviarie di 8,20m, 8,20m e 4,20m (con 5 binari in totale), sei marciapiedi per manutenzione di ingombri varie e due cordoli laterali per l'alloggiamento dei parapetti di 0,80 m ciascuno.

Per le campate centrale e quella ovest, che sono da 16,0 m si utilizzano n. 18 profili HEB 900, posti ad interasse di 51,0 cm, con una distanza p.f. - sottotrave pari a 1,853 m.

Per la campata est da 16,0 m si utilizzano n. 11 profili HEB 900.

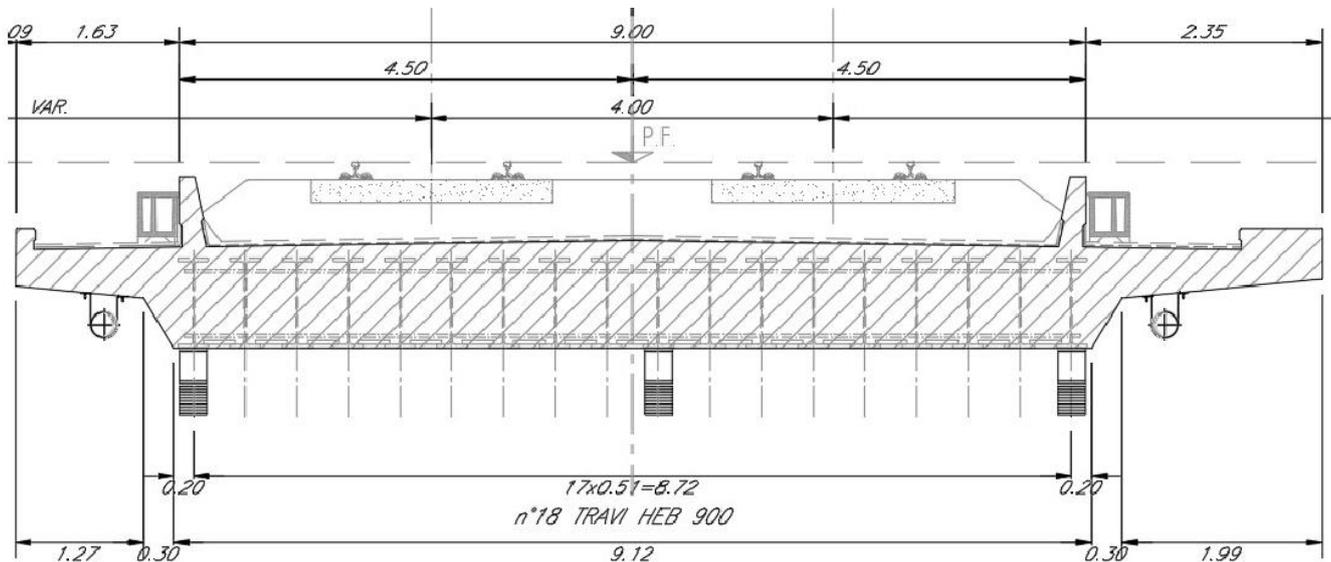
Nella presente relazione si prende in considerazione l'impalcato centrale a due binari, caratterizzato da una maggiore larghezza della vasca porta-ballast e quindi da carichi permanenti maggiori rispetto all'impalcato adiacente.



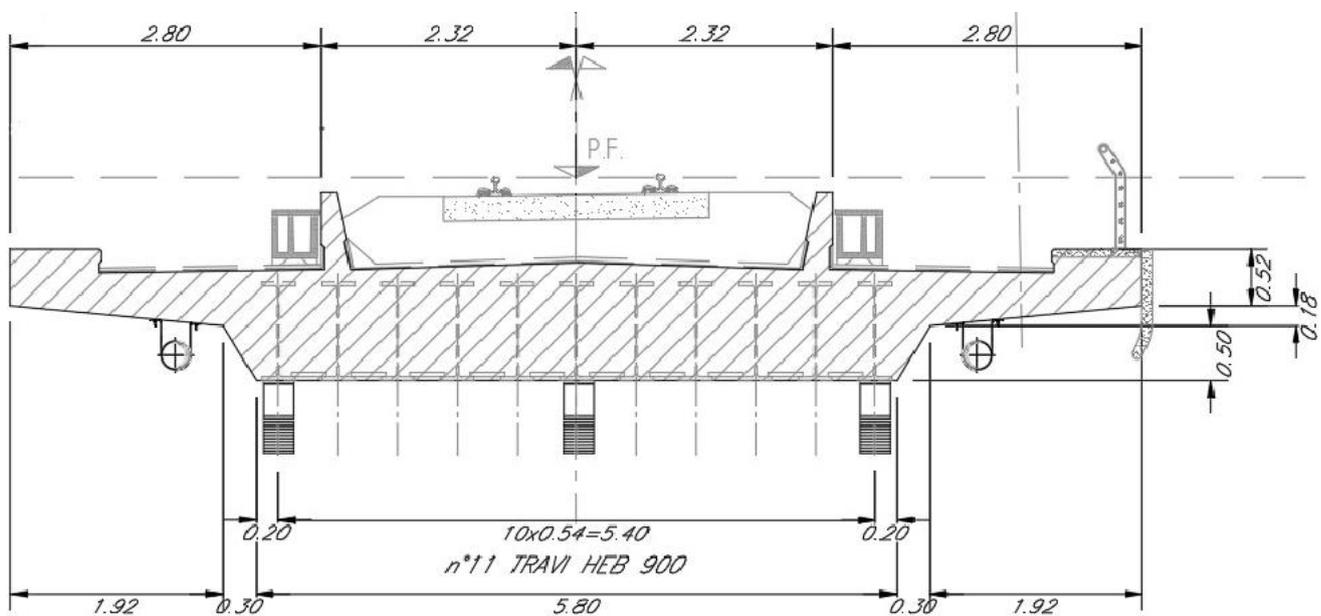
**Figura 1 – Viadotto VI01 – Impalcato 1 ad ovest**

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**  
Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO  |
|----------|---------|----------|-------------|------|---------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 6 di 64 |



**Figura 2 – Viadotto VI01 – Impalcato 2 ad ovest**



**Figura 3 – Viadotto VI01 – Impalcato 3 ad est**

Nel rispetto del MdP (par. 2.5.1.4.4.2), visto che in progetto non sono previste barriere antirumore in corrispondenza dell'impalcato, le opere dello stesso saranno dimensionate considerando un'altezza convenzionale delle B.A. pari a 4.00m, misurati dall'estradosso della soletta.

|   |  |                  |                |                          |           |                   |
|---|--|------------------|----------------|--------------------------|-----------|-------------------|
|                | <b>PROGETTO DEFINITIVO</b><br><b>RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURE</b><br><b>RADDOPPIO CESANO – VIGNA DI VALLE</b><br><b>STAZIONE DI ANGUILLARA SABAZIA</b> |                  |                |                          |           |                   |
| <b>VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650</b><br>Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario | COMMESSA<br>NR1J   | LOTTO<br>01 D 29 | CODIFICA<br>CL | DOCUMENTO<br>VI01 07 001 | REV.<br>B | FOGLIO<br>7 di 64 |

## 2 **NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

### 2.1 **NORMATIVE**

Le principali Normative nazionali ed internazionali vigenti alla data di redazione del presente documento e prese a riferimento sono le seguenti:

- Rif. [1] Ministero delle Infrastrutture, DM 17 gennaio 2018, «Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni» [NTC18];
- Rif. [2] Circolare 21 gennaio 2019, n. 7/C.S.LL.PP. “Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.”;
- Rif. [3] RFI DTC SI PS MA IFS 001 B “Manuale di progettazione delle opere civili – Parte II – Sezione 2 – Ponti e strutture” del 22/12/2017;
- Rif. [4] RFI DTC SI CS MA IFS 001 B “Manuale di progettazione delle opere civili – Parte II – Sezione 3 – Corpo stradale” del 22/12/2017;
- Rif. [5] Eurocodice 1 – Azioni sulle strutture, Parte 1-4: Azioni in generale – Azioni del vento (UNI EN 1991-1-4)
- Rif. [6] Regolamento (UE) N.1299/2014 della Commissione del 18 Novembre 2014 relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema “infrastruttura” del sistema ferroviario dell’Unione europea.

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**  
 Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO  |
|----------|---------|----------|-------------|------|---------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 8 di 64 |

## 2.2 ELABORATI DI RIFERIMENTO

Vengono presi a riferimento tutti gli elaborati grafici progettuali di pertinenza.

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Relazione tecnica descrittiva   | N | R | 1 | J | 0 | 1 | D | 2 | 9 | R | O | V | I | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | A |
| Planimetria di progetto   | N | R | 1 | J | 0 | 1 | D | 2 | 9 | P | 8 | V | I | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | A |
| Relazione di calcolo impalcato  | N | R | 1 | J | 0 | 1 | D | 2 | 9 | C | L | V | I | 0 | 1 | 0 | 7 | 0 | 0 | 1 | A |
| Relazione di calcolo spalle   | N | R | 1 | J | 0 | 1 | D | 2 | 9 | C | L | V | I | 0 | 1 | 0 | 4 | 0 | 0 | 1 | A |
| Relazione di calcolo opere provvisionali                                  | N | R | 1 | J | 0 | 1 | D | 2 | 9 | C | L | V | I | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 0 | 1 | A |
| Fasi costruttive  | N | R | 1 | J | 0 | 1 | D | 2 | 9 | B | Z | V | I | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | A |
| Scavi, demolizioni e opere provvisionali<br>- Pianta e sezioni Tav. 1/2   | N | R | 1 | J | 0 | 1 | D | 2 | 9 | P | Z | V | I | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | A |
| Scavi, demolizioni e opere provvisionali<br>- Pianta e sezioni Tav. 2/2   | N | R | 1 | J | 0 | 1 | D | 2 | 9 | P | Z | V | I | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | A |
| Pianta fondazioni, pianta impalcato,<br>prospetto e sezione longitudinale | N | R | 1 | J | 0 | 1 | D | 2 | 9 | P | Z | V | I | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | A |
| Carpenteria impalcato Tav. 1/2  | N | R | 1 | J | 0 | 1 | D | 2 | 9 | B | Z | V | I | 0 | 1 | 0 | 7 | 0 | 0 | 1 | A |
| Carpenteria impalcato Tav. 2/2  | N | R | 1 | J | 0 | 1 | D | 2 | 9 | B | Z | V | I | 0 | 1 | 0 | 7 | 0 | 0 | 2 | A |
| Carpenteria Spalla A  | N | R | 1 | J | 0 | 1 | D | 2 | 9 | B | Z | V | I | 0 | 1 | 0 | 4 | 0 | 0 | 1 | A |
| Carpenteria Spalla B  | N | R | 1 | J | 0 | 1 | D | 2 | 9 | B | Z | V | I | 0 | 1 | 0 | 4 | 0 | 0 | 2 | A |
| Carpenteria muri d'ala Tav. 1/2   | N | R | 1 | J | 0 | 1 | D | 2 | 9 | B | Z | V | I | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | A |
| Carpenteria muri d'ala Tav. 2/2   | N | R | 1 | J | 0 | 1 | D | 2 | 9 | B | Z | V | I | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | A |
| Apparecchi d'appoggio e giunti  | N | R | 1 | J | 0 | 1 | D | 2 | 9 | B | Z | V | I | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | A |
| Particolari costruttivi   | N | R | 1 | J | 0 | 1 | D | 2 | 9 | B | Z | V | I | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | A |

### 3 MATERIALI

Si riportano di seguito i materiali previsti per la realizzazione delle strutture, suddivisi per elemento costruttivo.

#### 3.1 ACCIAIO PER PROFILI LAMINATI

|       |         |     |   |
|-------|---------|-----|---|
| tipo  | S355J2  |     |   |
| fyk = | 355     | MPa | tensione caratteristica di snervamento  |
| ftk = | 510     | MPa | tensione caratteristica di rottura      |
| E =   | 210.000 | MPa | Modulo elastico di progetto             |
| v =   | 0,3     |     | Coefficiente di Poisson                 |
| G =   | 80769   | MPa | Modulo elastico Tangenziale di progetto |
| γM0 = | 1,05    | -   | coefficiente parziale di sicurezza SLU  |
| fyd = | 338,1   | MPa | tensione di snervamento di progetto     |

#### 3.2 ACCIAIO PER TIRANTI

|       |         |     |   |
|-------|---------|-----|---|
| tipo  | S235    |     |   |
| fyk = | 235     | MPa | tensione caratteristica di snervamento  |
| ftk = | 360     | MPa | tensione caratteristica di rottura      |
| E =   | 210.000 | MPa | Modulo elastico di progetto             |
| v =   | 0,3     |     | Coefficiente di Poisson                 |
| G =   | 80769   | MPa | Modulo elastico Tangenziale di progetto |
| γM0 = | 1,05    | -   | coefficiente parziale di sicurezza SLU  |
| fyd = | 223,8   | MPa | tensione di snervamento di progetto     |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 10 di 64 |

### 3.3 ACCIAIO IN BARRE PER GETTI

tipo B450C

|                      |         |     |  |
|----------------------|---------|-----|--|
| $f_{yk} \geq$        | 450     | MPa | tensione caratteristica di snervamento |
| $f_{tk} \geq$        | 540     | MPa | tensione caratteristica di rottura     |
| $(f_t/f_y)_{k \geq}$ | 1,15    |     |  |
| $(f_t/f_y)_{k <}$    | 1,35    |     |  |
| E                    | 210.000 | MPa | Modulo elastico                        |
| $\gamma_s =$         | 1,15    | -   | coefficiente parziale di sicurezza SLU |
| $f_{yd} =$           | 391,30  | MPa | tensione di snervamento di progetto    |

### 3.4 CALCESTRUZZO

Classe C30/37

|  |       |     |   |
|--|-------|-----|---|
| $R_{ck} =$                                 | 37.00 | MPa | Resistenza caratteristica cubica  |
| $f_{ck} = 0,83 R_{ck} =$                   | 30.71 | MPa | Resistenza caratteristica cilindrica                                      |
| $f_{cm} = f_{ck} + 8 =$                    | 38.71 | MPa | Valore medio resistenza cilindrica  |
| $\alpha_{cc} =$                            | 0.85  | -   | Coeff. rid. per carichi di lunga durata                                   |
| $\gamma_M =$                               | 1.50  | -   | Coefficiente parziale di sicurezza SLU                                    |
| $f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_M =$ | 17.40 | MPa | Resistenza di progetto  |
| $f_{ctm} = 0,3 f_{ck} (2/3) =$             | 2.94  | MPa | Resistenza media a trazione semplice                                      |
| $f_{ctm} = 1,2 f_{ctm} =$                  | 3.53  | MPa | Resistenza media a trazione per flessione                                 |
| $f_{ctk} = 0,7 f_{ctm} =$                  | 2.06  | MPa | Valore caratteristico resistenza a trazione (frattile 5%)                 |
| $\sigma_c = 0,60 f_{ck} =$                 | 18.43 | MPa | Tensione in esercizio in comb. rara (rif. §4.1.2.2.5.1 [1])               |
| $\sigma_c = 0,45 f_{ck} =$                 | 13.82 | MPa | Tensione in esercizio in comb. quasi perm. (rif. §4.1.2.2.5.1 [1])        |
| $E_{cm} = 22000(f_{cm}/10)^{(0,3)} =$      | 33019 | MPa | Modulo elastico di progetto   |
| $m =$                                      | 0.20  |     | Coefficiente di Poisson   |
| $G_c = E_{cm} / (2 (1 + m)) =$             | 13758 | MPa | Modulo elastico tangenziale di progetto                                   |
| Condizioni ambientali =                    |       |     | Ciclicamente asciutto e bagnato.  |
| Classe di esposizione =                    | XC4   |     |   |
| $c =$                                      | 4.50  | cm  | Copri ferro minimo ( $V_R = 100 \text{anni} \times 2 = 200 \text{anni}$ ) |
| $w =$                                      | 0.20  | mm  | Apertura massima fessure in esercizio in comb. freq (rif. §2.2.2 [5])     |

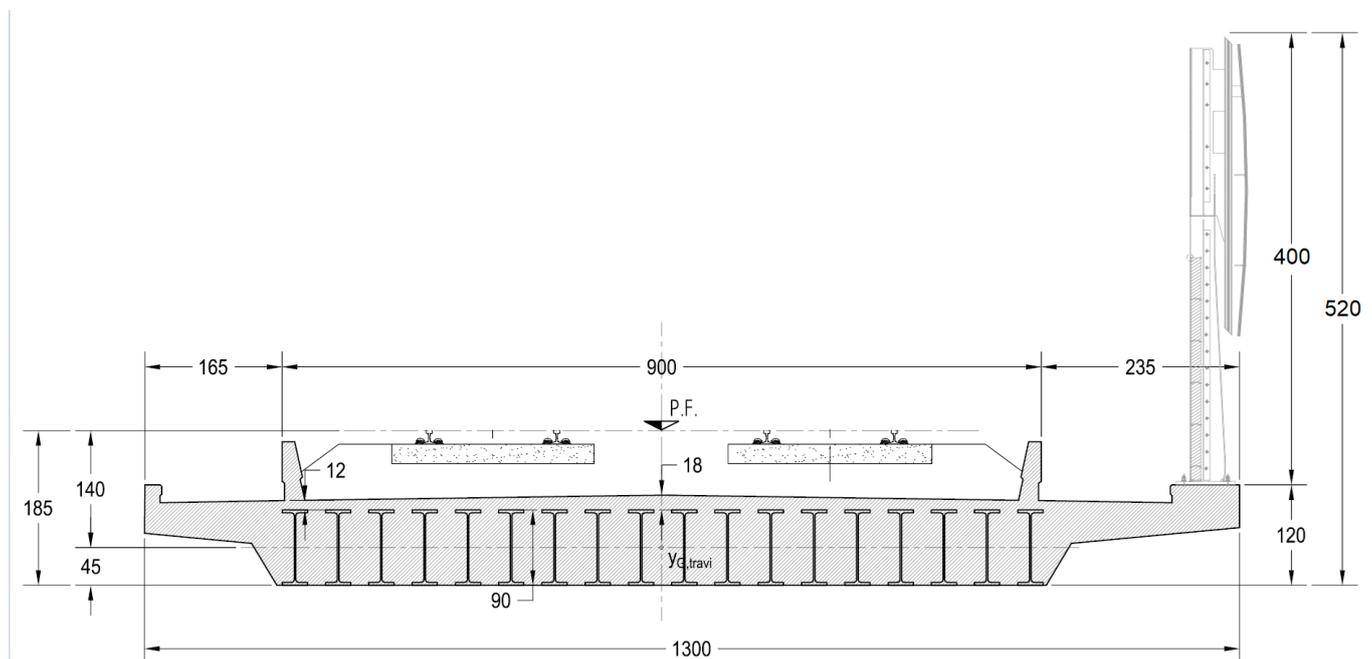
## 4 GEOMETRIA IMPALCATO

Si riporta di seguito una sintesi delle caratteristiche del tracciato, dei profili metallici e dell'impalcato.

### 4.1 CARATTERISTICHE TRACCIATO

|     |          |      |                     |
|-----|----------|------|---------------------|
| V = | 160      | km/h | Velocità            |
| R = | infinito | m    | raggio di curvatura |
| s = | 0.00     | m    | Sopraelevazione     |

### 4.2 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE IMPALCATO



**Figura 4 – Impalcato doppio binario – geometria [cm]**

#### Profili

|      |         |                 |                    |
|------|---------|-----------------|--------------------|
| tipo | HEB900  |                 |                    |
| A =  | 371.30  | cm <sup>2</sup> | area               |
| J =  | 494 100 | cm <sup>4</sup> | momento d'inerzia  |
| W =  | 10 980  | cm <sup>3</sup> | modulo di res. el. |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 12 di 64 |

|      |      |                 |                         |
|------|------|-----------------|-------------------------|
| h    | 900  | mm              | altezza sezione         |
| yg = | 450  | mm              | quota baricentro        |
| S =  | 6312 | cm <sup>3</sup> | momento statico per H/2 |
| tw = | 18.5 | mm              | spessore anima          |
| b =  | 300  | mm              | larghezza ali           |
| tf = | 35   | mm              | spessore ali            |
| p =  | 2.91 | kN/m            | peso al metro           |

**Impalcato**

|                |       |                |   |
|----------------|-------|----------------|---|
| L tot          | 16.80 | m              | Luce totale impalcato   |
| Lc =           | 16.00 | m              | luce impalcato (asse appoggi)   |
| Lf =           | 16.50 | m              | lunghezza travi   |
| Acls =         | 11.82 | m <sup>2</sup> | area lorda cls impalcato  |
| ntravi =       | 18    | -              | numero totale travi   |
| Brip. =        | 4.00  | m              | larghezza di ripartizione   |
| ntravi,Brip. = | 8     |                | numero travi nella zona di ripartizione   |
| i =            | 0,51  | m              | interasse travi   |
| A'cls =        | 11.17 | m <sup>2</sup> | area netta cls impalcato  |
| hsol_min =     | 0.12  | m              | altezza soletta superiore (valore min)  |
| hsol_max =     | 0.18  | m              | altezza soletta superiore (valore max)  |
| hsol =         | 0.15  | m              | altezza soletta superiore (valore medio)  |
| Htot =         | 1.05  | m              | altezza totale impalcato  |
| hp.f.i =       | 1.85  | m              | quota p.f. rispetto a intradosso impalcato  |
| zp.f. =        | 0.80  | m              | quota p.f. rispetto a estradosso impalcato  |
| hp.f. =        | 1.40  | m              | quota p.f. rispetto a baricentro travi  |
| hserp =        | 1.40  | m              | quota rotaia più alta rispetto a baricentro travi   |
| hb.a. =        | 4.00  | m              | altezza barriere antirumore (rispetto estradosso soletta)   |
| happ =         | 0.25  | m              | altezza apparecchi di appoggio  |
| H =            | 1.30  | m              | altezza del piano di regolamento del ballast rispetto al centro di rotazione degli apparecchi di appoggio |

## 5 ANALISI DEI CARICHI

Il dimensionamento dell'impalcato a travi incorporate è condotto con i criteri di seguito descritti in accordo alla specifica RFI DTC SI PS MA IFS 001 B "Manuale di progettazione delle opere civili – Parte II – Sezione 2 – Ponti e strutture" per la progettazione e l'esecuzione dei ponti ferroviari e di altre opere minori sotto binario.

### 5.1 PESO PROPRIO E SOVRACCARICHI PERMANENTI

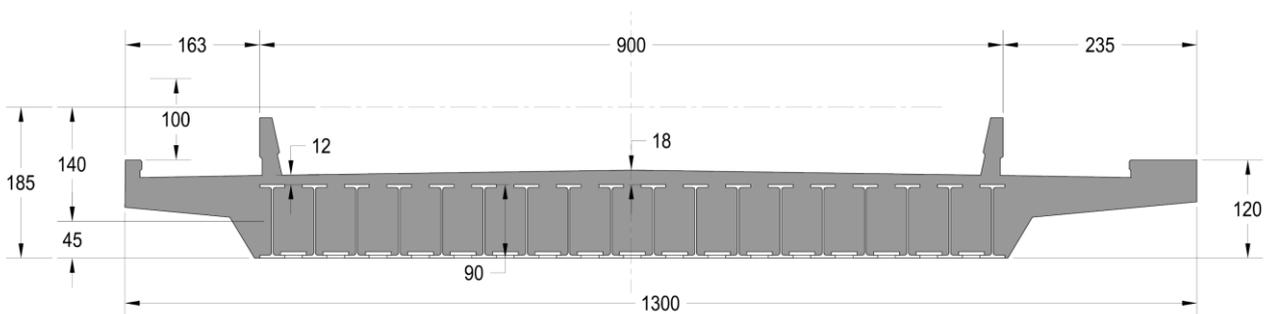
Per le azioni permanenti si considerano i pesi propri della struttura, valutati sulla base delle caratteristiche geometriche degli elementi costituenti l'impalcato e dei pesi specifici dei materiali utilizzati, ed i sovraccarichi permanenti portati.

#### Peso proprio - Travi metalliche principali (G1)

| Htot | L     | Ala sup |      | Anima |      | Ala inf |      | A1tr               | n_travi | g_acc                | P           |
|------|-------|---------|------|-------|------|---------|------|--------------------|---------|----------------------|-------------|
|      |       | Bsup    | tsup | Hw    | tw   | Binf    | tinf |                    |         |                      |             |
| [mm] | [mm]  | [mm]    | [mm] | [mm]  | [mm] | [mm]    | [mm] | [mm <sup>2</sup> ] |         | [kN/m <sup>3</sup> ] | [kN/m]      |
| 900  | 16500 | 300     | 35   | 830   | 18.5 | 300     | 35   | 37130              | 18      | 78.5                 | <b>52.5</b> |

#### Peso proprio – Soletta in c.a. (G1)

Con riferimento all'area campita riportata nella seguente immagine:



|                 |              |                   |
|-----------------|--------------|-------------------|
| A soletta netta | 10.8         | m <sup>2</sup>    |
| g_cls           | 25.00        | kN/m <sup>3</sup> |
| P               | <b>270.0</b> | kN/m              |

#### Peso proprio – Predalle per cassatura inferiore tra travi adiacenti (G1)

|             |            |                   |
|-------------|------------|-------------------|
| A predalle  | 0.005      | m <sup>q</sup>    |
| num piatti  | 17         |                   |
| g_cls       | 25         | kN/m <sup>3</sup> |
| peso totale | <b>2.2</b> | kN/m              |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 14 di 64 |

**Peso proprio – Tiranti tra le travi (G1)**

|                    |            |                   |
|--------------------|------------|-------------------|
| d ferro            | 0.03       | m                 |
| Area ferro         | 0.0007     | m <sup>2</sup>    |
| interasse long     | 1.2        | m                 |
| numero tiranti tot | 27         |                   |
| L trasv            | 9.03       | m                 |
| g_acc              | 78.5       | kN/m <sup>3</sup> |
| peso totale        | <b>0.8</b> | kN/m              |

**tot G1                      325.5            kN/m**

**Sovraccarichi permanenti (G2)**

|  | sp   | b   | h   | A              | gamma             | peso m/q | peso m/l | numero | P     |
|--|------|-----|-----|----------------|-------------------|----------|----------|--------|-------|
|  | m    | m   | m   | m <sup>2</sup> | kN/m <sup>3</sup> |          | kN/m     | -      | kN/m  |
| ballast+impermeabilizzazione+armamento | 0.8  | 8.6 | -   | 6.88           | 18                | -        | -        | -      | 123.8 |
| massetto                               | 0.05 | 12  | -   | 0.6            | 25                | -        | -        | -      | 15.0  |
| canalette                              | -    | -   | -   | -              | -                 | -        | 2.5      | 2      | 5.0   |
| velette                                | -    | -   | -   | -              | -                 | -        | 1.5      | 1      | 1.5   |
| barriere a.r.                          | -    | -   | 4.0 | -              | -                 | 4        | 16.0     | 1      | 16.0  |

**tot G2                      161.3            kN/m**

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 15 di 64 |

## 5.2 CARICHI VARIABILI

Per i sovraccarichi mobili si considerano gli effetti prodotti dai modelli di carico rappresentativi del traffico normale (LM71) e pesante (SW/2). Tali effetti sono amplificati per il coefficiente di adattamento  $\alpha$  e per il coefficiente dinamico  $\phi_3$ ; per il solo modello di carico LM71 si considera inoltre un'eccentricità e di carico rispetto l'asse del binario pari a  $143.5/18 = 8$  cm.

Sono inoltre portate in conto le azioni di frenatura ed avviamento, di serpeggio, di vento sul treno e l'azione aerodinamica del treno sulle barriere.

### 5.2.1 COEFFICIENTE DINAMICO

Il coefficiente dinamico adottato è quello previsto per le linee con un livello normale dello standard manutentivo che risulta pari a:

Coefficiente dinamico (Caso 5.1 della tabella 5.2.II del DM2008)

$$L_\phi = 16 \text{ m}$$

$$\phi_3 = 0.73 + 2.16/(L^\phi^{0,5} - 0,2) = 1.298 \quad 1,00 \leq \phi_3 \leq 2 \quad (\text{ridotto standard manutentivo})$$

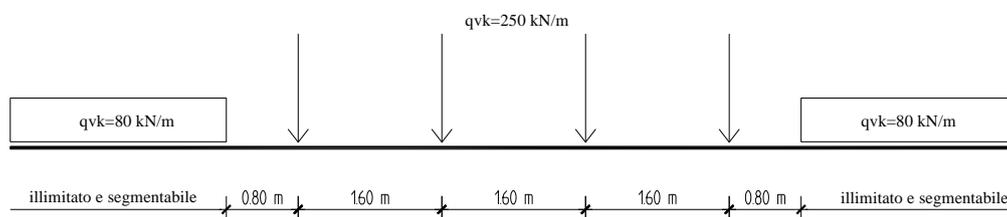
### 5.2.2 TRENO LM71

Questo treno di carico schematizza gli effetti statici prodotti dal traffico ferroviario normale e, come mostrato nella sottostante figura, risulta costituito da quattro assi da 250 kN disposti ad interasse di 1.6m e da un carico distribuito di 80 kN/m in entrambe le direzioni a partire da 0.80m dagli assi d'estremità e per una lunghezza illimitata.

$$q_{vk} = 80 \text{ kN/m}$$

$$Q_{vk} = 250 \text{ kN}$$

$$\alpha = 1.1 \text{ (coefficiente di adattamento)}$$



Per massimizzare gli effetti in termini di sollecitazione flessionale e taglio si considerano due diverse configurazioni di carico a cui corrispondono i seguenti carichi equivalenti  $p_2$  di tipo uniformemente distribuito e comprensivi del coefficiente di adattamento  $\alpha$  e di amplificazione dinamica  $\psi$ .

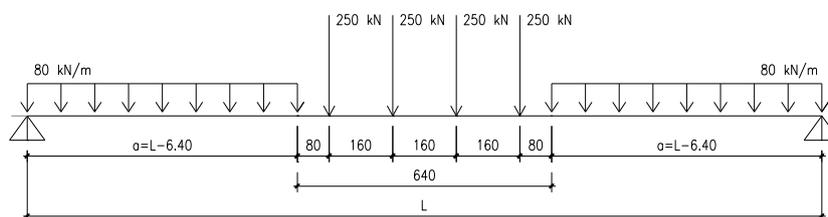
**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**  
Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 16 di 64 |

Dall'allegato 3 del manuale RFI DTC SI PS MA IFS 001 B "Manuale di progettazione delle opere civili – Parte II – Sezione 2 – Ponti e strutture", con  $L=17.0\text{m}$  per ponti di categoria A si ottengono i seguenti valori dei carichi equivalenti da impiegare nelle analisi:

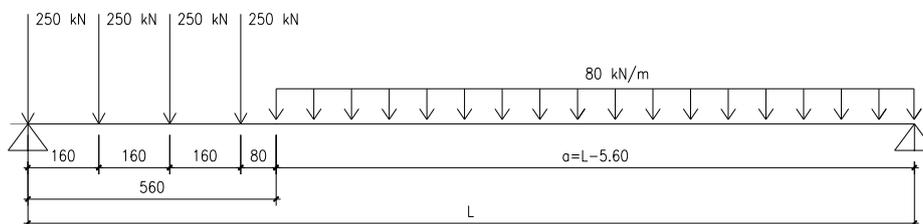
- Configurazione 1:** max momento flettente in mezzeria

$p_{2,eq.flett.} = 185.3 \text{ kN/m}$  (129.81 kN/m non comprensivo di  $\alpha$  e  $\psi$ )



- Configurazione 2:** max taglio in appoggio

$p_{2,eq.tagl.} = 199.4 \text{ kN/m}$  (139.63 kN/m non comprensivo di  $\alpha$  e  $\psi$ )



Si ottengono i seguenti valori:

$$M_{\max,L/2} = 129.8 \text{ kN/m} \times 1.1 \times 1.298 \times (16\text{m})^2 / 8 = 5930.5 \text{ kNm}$$

$$V_{\max,appoggio} = 139.6 \text{ kN/m} \times 1.1 \times 1.298 \times 16\text{m} / 2 = 1594.6 \text{ kNm}$$

$$Q_{\text{tot}} = 80 \text{ kN/m} \times (16.8 \text{ m} - 6.4 \text{ m}) + 250 \text{ kN} \times 4 = 1832 \text{ kN} \quad (\text{per massa sismica long.})$$

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 17 di 64 |

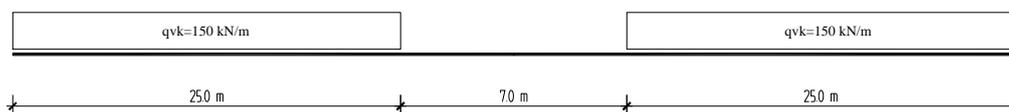
### 5.2.3 TRENO SW/2

Tale carico schematizza gli effetti prodotti dal traffico ferroviario pesante come riportato nella sottostante figura.

Dall'allegato 3 del manuale RFI DTC SI PS MA IFS 001 B "Manuale di progettazione delle opere civili – Parte II – Sezione 2 – Ponti e strutture", con  $L=17.0m$  per ponti di categoria A si ottengono i seguenti valori dei carichi equivalenti da impiegare nelle analisi:

$$q_{vk} = 153 \text{ kN/m}$$

$$\alpha = 1.0 \text{ (coefficiente di adattamento)}$$



Si ottengono, quindi, i seguenti valori:

$$M_{\max,L/2} = 153 \text{ kN/m} \times 1.0 \times 1.298 \times (16m)^2 / 8 = 6355 \text{ kNm}$$

$$V_{\max,appoggio} = 153 \text{ kN/m} \times 1.0 \times 1.298 \times 16m / 2 = 1588.8 \text{ kNm}$$

$$Q_{\text{tot}} = 150 \text{ kN/m} \times 16.8 \text{ m} = 2520 \text{ kN} \quad (\text{per massa sismica long.})$$

### 5.2.4 FRENATURA ED AVVIAMENTO

Di seguito sono valutate le azioni di frenatura ed avviamento, agenti in direzione longitudinale alla quota di sommità del binario. I valori caratteristici da considerare, comprensivi del coefficiente di adattamento  $\alpha$ , risultano pari a:

#### FRENATURA

|      | alfa | k [kN/m <sup>2</sup> ] | Lf   |
|------|------|------------------------|------|
| LM71 | 1.1  | 20                     | 16.8 |
| SW/2 | 1    | 35                     | 16.8 |

| q [kN]     |
|------------|
| <b>370</b> |
| <b>588</b> |

< 6000 kN

#### AVVIAMENTO

|      | alfa | k [kN/m <sup>2</sup> ] | Lf   |
|------|------|------------------------|------|
| LM71 | 1.1  | 33                     | 16.8 |
| SW/2 | 1    | 33                     | 16.8 |

| q [kN]     |
|------------|
| <b>610</b> |
| <b>554</b> |

< 1000 kN  
< 1000 kN

Quota di applicazione delle azioni rispetto al baricentro delle travi:

$$Z_G = 1.40 \text{ m}$$

Quota di applicazione delle azioni rispetto all'intradosso dell'impalcato:

$$Z_{\text{intr.}} = 1.85 \text{ m}$$

### 5.2.5 SERPEGGIO

L'azione laterale associata al serpeggio è definita al par. 1.4.3.2 delle Istruzioni per la progettazione e l'esecuzione dei ponti ferroviari, che riprende il par. 5.2.2.4.2 del DM 14.1.2018, ed equivale ad una forza concentrata agente orizzontalmente, applicata alla sommità della rotaia più alta, perpendicolarmente all'asse del binario, del valore di 100 kN.

Tale valore deve essere moltiplicato per il coefficiente di adattamento  $\alpha$  e non per il coeff. dinamico.

Il valore delle forze laterali prodotte dal serpeggio comprensive del coeff. di adattamento risultano pari a:

|      | alfa | Q sk [kN] | q [kN]       |
|------|------|-----------|--------------|
| LM71 | 1.1  | 100       | <b>110.0</b> |
| SW/2 | 1    | 100       | <b>100.0</b> |

Quota di applicazione delle azioni rispetto al baricentro delle travi:  $z_G = 1.40$  m

Quota di applicazione delle azioni rispetto all'intradosso dell'impalcato:  $z_{intr.} = 1.85$  m

### 5.2.6 CENTRIFUGA

L'azione centrifuga è definita in funzione del raggio di curvatura R in pianta del tracciato ferroviario nel tratto considerato. Nel viadotto in esame l'andamento planimetrico del tracciato ferroviario è rettilineo, quindi è nulla la azione della forza centrifuga.

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**  
 Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 19 di 64 |

## 5.2.7 VENTO

### AZIONE DEL VENTO PAR. 3.3 NTC18

#### DEFINIZIONE DEI DATI

zona:

3) Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)



Classe di rugosità del terreno:

D) Aree prive di ostacoli (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, zone paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate, mare, laghi,....)

L'assegnazione della classe di rugosità non dipende dalla conformazione orografica e topografica del terreno. Affinchè una costruzione possa dirsi ubicata in classe A o B è necessario che la situazione che contraddistingue la classe permanga intorno alla costruzione per non meno di 1 km e comunque non meno di 20 volte l'altezza della costruzione. Laddove sussistano dubbi sulla scelta della classe di rugosità, a meno di analisi dettagliate, verrà assegnata la classe più sfavorevole.

Nelle fasce entro i 40km dalla costa delle zone 1,2,3,4,5 e 6 la categoria di esposizione è indipendente dall'altitudine del sito.

$a_s$  (altitudine sul livello del mare della costruzione):

250 [m]

Distanza dalla costa

20 [km]

$T_R$  (Tempo di ritorno):

100 [anni]

Categoria di esposizione

II

| ZONE 1,2,3,4,5   |       |       |       |      |      |    |
|--|-------|-------|-------|------|------|----|
|  | costa | 10 km | 30 km | 500m | 750m |    |
| A  | --    | IV    | IV    | V    | V    | V  |
| B  | --    | III   | III   | IV   | IV   | IV |
| C  | --    | *     | III   | III  | IV   | IV |
| D  | I     | II    | II    | II   | III  | ** |
| * Categoria II in zona 1,2,3,4<br>Categoria III in zona 5  |       |       |       |      |      |    |
| ** Categoria III in zona 2,3,4,5<br>Categoria IV in zona 1 |       |       |       |      |      |    |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**  
Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

|          |         |          |             |      |          |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 20 di 64 |

### CALCOLO VELOCITA' DI RIFERIMENTO DEL VENTO §3.3.2.

| Zona | $v_{b,0}$ [m/s] | $a_0$ [m] | $k_s$ | $C_a$ |
|------|-----------------|-----------|-------|-------|
| 3    | 27              | 500       | 0.37  | 1.000 |

$$v_b = v_{b,0} \cdot c_a$$

$c_a = 1$  per  $a_s \leq a_0$

$c_a = 1 + k_s (a_s/a_0 - 1)$  per  $a_0 < a_s \leq 1500$  m

$v_b$  (velocità base di riferimento) **27.00 m/s**

$$v_r = v_b \cdot c_r$$

Cr coefficiente di ritorno **1.04**

$v_r$  (velocità di riferimento) **28.06 m/s**

### PRESSIONE CINETICA DI RIFERIMENTO §3.3.6.

$q_r$  (pressione cinetica di riferimento [N/mq])

$$q_r = 1/2 \cdot \rho \cdot v_r^2 \quad (\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3)$$

Pressione cinetica di riferimento  $q_r$  **492.08 [N/m²]**

### CALCOLO DEI COEFFICIENTI

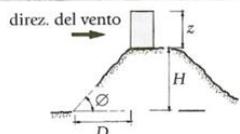
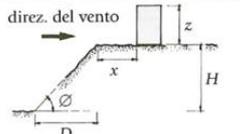
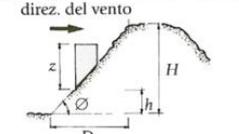
Coefficiente dinamico [§3.3.8]

$c_d$

**1.00**

Coefficiente Topografico (Orografico)

Il coefficiente topografico si assume di norma uguale ad 1, sia per zone pianeggianti, ondulate, collinose e montane. Nel caso di costruzioni che sorgono presso la sommità di colline o pendii isolati si procede nel modo seguente:

| 1  | 2   | 3   |                       |          |                         |  |                     |  |      |                         |                                |                      |      |                         |                                |                     |         |               |                                       |             |          |              |  |              |
|--|---|---|-----------------------|----------|-------------------------|--|---------------------|--|------|-------------------------|--------------------------------|----------------------|------|-------------------------|--------------------------------|---------------------|---------|---------------|---------------------------------------|-------------|----------|--------------|--|--------------|
| Costruzioni ubicate sulla cresta di una collina  | Costruzioni ubicate sul livello superiore   | Costruzioni ubicate su di un pendio   |                       |          |                         |  |                     |  |      |                         |                                |                      |      |                         |                                |                     |         |               |                                       |             |          |              |  |              |
|   |  |  |                       |          |                         |  |                     |  |      |                         |                                |                      |      |                         |                                |                     |         |               |                                       |             |          |              |  |              |
| $c_r = 1 + \beta \cdot \gamma$   | $c_r = 1 + \beta \cdot \gamma \cdot \left(1 - 0,1 \cdot \frac{x}{H}\right) \geq 1$  | $c_r = 1 + \beta \cdot \gamma \cdot \frac{h}{H}$                                    |                       |          |                         |  |                     |  |      |                         |                                |                      |      |                         |                                |                     |         |               |                                       |             |          |              |  |              |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Coefficiente <math>\beta</math></th> <th colspan="3">Coefficiente <math>\gamma</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>per:</td> <td><math>\frac{z}{H} \leq 0,75</math></td> <td><math>0,75 \leq \frac{z}{H} \leq 2</math></td> <td><math>\frac{z}{H} \geq 2</math></td> <td>per:</td> <td><math>\frac{H}{D} \leq 0,10</math></td> <td><math>0,10 &lt; \frac{H}{D} \leq 0,30</math></td> <td><math>\frac{H}{D} &gt; 0,3</math></td> </tr> <tr> <td><math>\beta</math></td> <td><math>\beta = 0,5</math></td> <td><math>\beta = 0,8 - 0,4 \cdot \frac{z}{H}</math></td> <td><math>\beta = 0</math></td> <td><math>\gamma</math></td> <td><math>\gamma = 0</math></td> <td><math>\gamma = 5 \left(\frac{H}{D} - 0,10\right)</math></td> <td><math>\gamma = 1</math></td> </tr> </tbody> </table> |   |   | Coefficiente $\beta$  |          |                         | Coefficiente $\gamma$                        |                     |  | per: | $\frac{z}{H} \leq 0,75$ | $0,75 \leq \frac{z}{H} \leq 2$ | $\frac{z}{H} \geq 2$ | per: | $\frac{H}{D} \leq 0,10$ | $0,10 < \frac{H}{D} \leq 0,30$ | $\frac{H}{D} > 0,3$ | $\beta$ | $\beta = 0,5$ | $\beta = 0,8 - 0,4 \cdot \frac{z}{H}$ | $\beta = 0$ | $\gamma$ | $\gamma = 0$ | $\gamma = 5 \left(\frac{H}{D} - 0,10\right)$ | $\gamma = 1$ |
| Coefficiente $\beta$   |   |   | Coefficiente $\gamma$ |          |                         |  |                     |  |      |                         |                                |                      |      |                         |                                |                     |         |               |                                       |             |          |              |  |              |
| per:   | $\frac{z}{H} \leq 0,75$   | $0,75 \leq \frac{z}{H} \leq 2$  | $\frac{z}{H} \geq 2$  | per:     | $\frac{H}{D} \leq 0,10$ | $0,10 < \frac{H}{D} \leq 0,30$               | $\frac{H}{D} > 0,3$ |  |      |                         |                                |                      |      |                         |                                |                     |         |               |                                       |             |          |              |  |              |
| $\beta$  | $\beta = 0,5$   | $\beta = 0,8 - 0,4 \cdot \frac{z}{H}$   | $\beta = 0$           | $\gamma$ | $\gamma = 0$            | $\gamma = 5 \left(\frac{H}{D} - 0,10\right)$ | $\gamma = 1$        |  |      |                         |                                |                      |      |                         |                                |                     |         |               |                                       |             |          |              |  |              |

Caso selezionato:

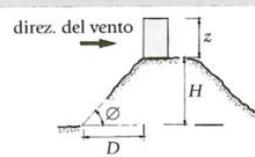
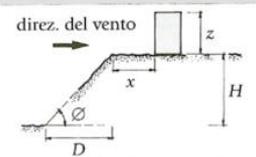
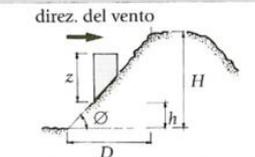
Condizione non isolata

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**  
Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

|          |         |          |             |      |          |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 21 di 64 |

### Coefficiente Topografico (Orografico)

Il coefficiente topografico si assume di norma uguale ad 1, sia per zone pianeggianti, ondulate, collinose e montane. Nel caso di costruzioni che sorgono presso la sommità di colline o pendii isolati si procede nel modo seguente:

| 1   | 2  | 3  |
|---|--|--|
| Costruzioni ubicate sulla cresta di una collina                                   | Costruzioni ubicate sul livello superiore  | Costruzioni ubicate su di un pendio  |
|  |   |  |
| $c_t = 1 + \beta \cdot \gamma$  | $c_t = 1 + \beta \cdot \gamma \cdot \left(1 - 0,1 \cdot \frac{x}{H}\right) \geq 1$ | $c_t = 1 + \beta \cdot \gamma \cdot \frac{h}{H}$                                   |
| <b>Coefficiente <math>\beta</math></b>  |  |  |
| per: $\frac{z}{H} \leq 0,75$  | $0,75 \leq \frac{z}{H} \leq 2$   | $\frac{z}{H} \geq 2$   |
| $\beta = 0,5$   | $\beta = 0,8 - 0,4 \cdot \frac{z}{H}$  | $\beta = 0$  |
| <b>Coefficiente <math>\gamma</math></b>   |  |  |
| per: $\frac{H}{D} \leq 0,10$  | $0,10 < \frac{H}{D} \leq 0,30$   | $\frac{H}{D} > 0,3$  |
| $\gamma = 0$  | $\gamma = 5 \left(\frac{H}{D} - 0,10\right)$                                       | $\gamma = 1$   |

**Caso selezionato:**

Condizione non isolata

Il coefficiente topografico vale:  $c_t$  **1.00**

### Coefficiente di esposizione [§3.3.7]

Il coefficiente di esposizione dipende dall'altezza  $z$  sul suolo del punto considerato, dalla topografia del terreno e dalla categoria di esposizione del sito (e quindi dalla classe di rugosità del terreno) ove sorge la costruzione; per altezze non maggiori di  $z=200m$  valgono le seguenti espressioni

$$c_e(z) = k_r^2 \cdot c_t \cdot \ln(z/z_0) [7 + c_t \cdot \ln(z/z_0)] \quad \text{per } z \geq z_{\min}$$

$$c_e(z) = c_e(z_{\min}) \quad \text{per } z < z_{\min}$$

|       |           |                |
|-------|-----------|----------------|
| $k_r$ | $z_0$ [m] | $z_{\min}$ [m] |
| 0.19  | 0.05      | 4.00           |

|   |                       |             |            |
|---|-----------------------|-------------|------------|
| Coefficiente di esposizione minimo      | $c_{e,\min}$          | <b>1.80</b> | $z < 4.00$ |
| Coefficiente di esposizione alla gronda | $c_{e,\text{gronda}}$ | <b>2.04</b> | $z = 6.00$ |
| Coefficiente di esposizione al colmo    | $c_{e,\text{colmo}}$  | <b>2.04</b> | $z = 6.00$ |

$$c_e(z) = k_r^2 \cdot c_t \cdot \ln(z/z_0) [7 + c_t \cdot \ln(z/z_0)] \quad \text{per } z \geq z_{\min}$$

$$c_e(z) = c_e(z_{\min}) \quad \text{per } z < z_{\min}$$

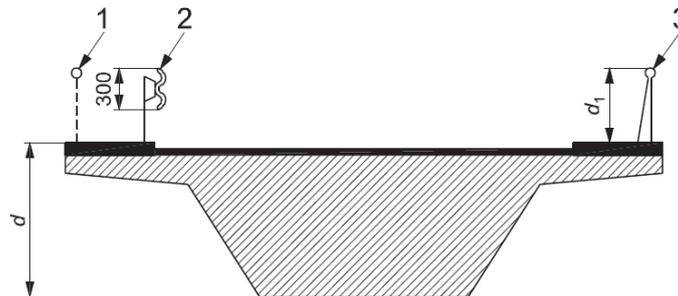
Si adotta un coefficiente di esposizione pari a  $c_e = 2.04$ .

Il coefficiente di forma  $c_{fx,0}$  viene definito secondo le indicazioni riportate in EC1-4:

Legenda

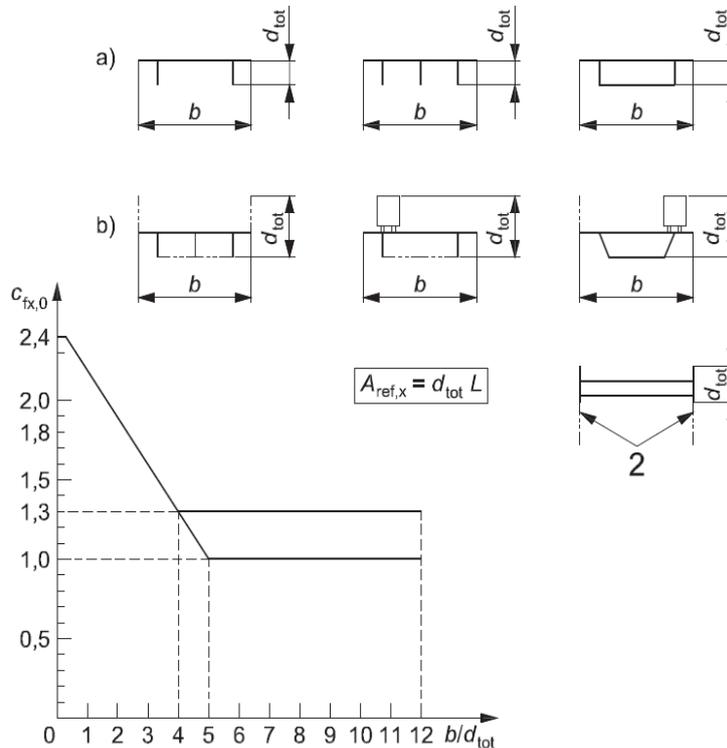
- 1 Parapetti aperti
- 2 Barriere di sicurezza aperte
- 3 Parapetti, barriere antirumore o barriere di sicurezza a parete piena

Dimensioni in millimetri



Altezza  $d_{tot}$  da impiegarsi per il calcolo di  $A_{ref,x}$

| Sistema di ritenuta   | su un lato          | su entrambi i lati  |
|---|---------------------|---------------------|
| Parapetto aperto o barriera di sicurezza aperta                 | $d + 0,3 \text{ m}$ | $d + 0,6 \text{ m}$ |
| Parapetto a parete piena o barriera di sicurezza a parete piena | $d + d_1$           | $d + 2 d_1$         |
| Parapetto aperto e barriera di sicurezza aperta                 | $d + 0,6 \text{ m}$ | $d + 1,2 \text{ m}$ |

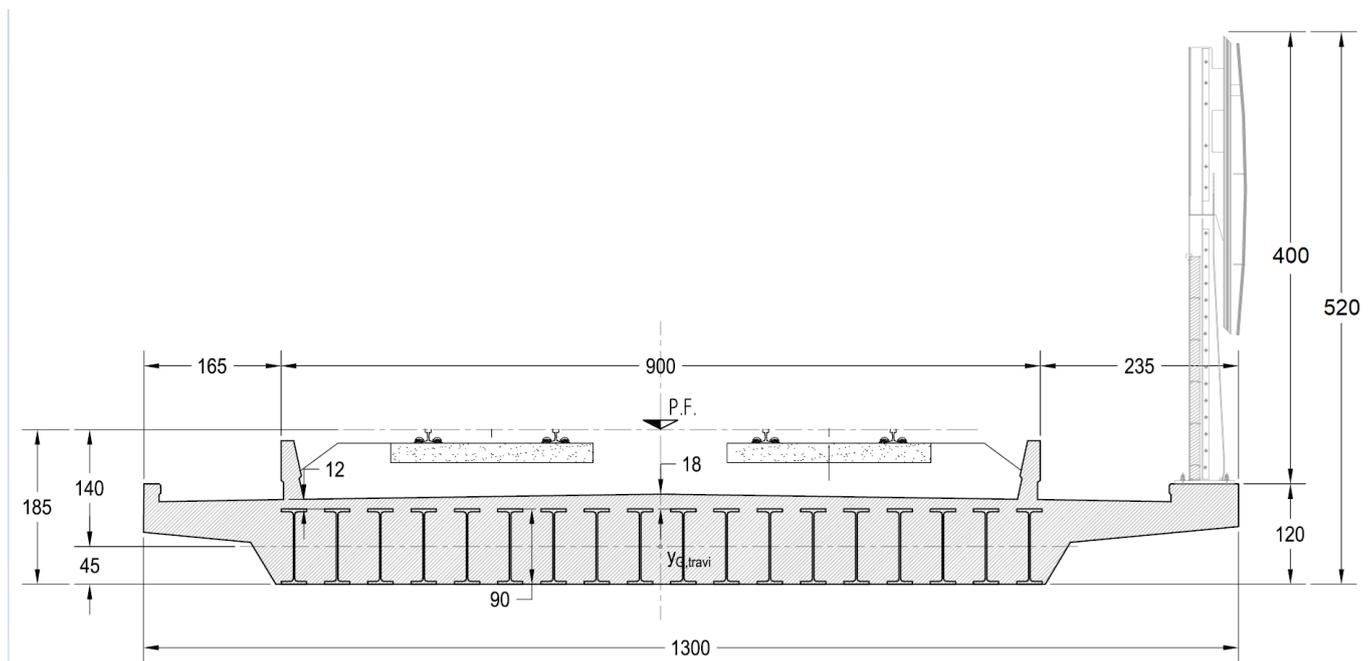


**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**  
Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 23 di 64 |

Si distinguono due casi: presenza di barriera antirumore H4 su uno dei due cordoli di estremità (ipotesi conservativa per eventuali aggiunte future) e presenza di treno sull'impalcato.

### 1. Vento agente su impalcato con barriera antirumore



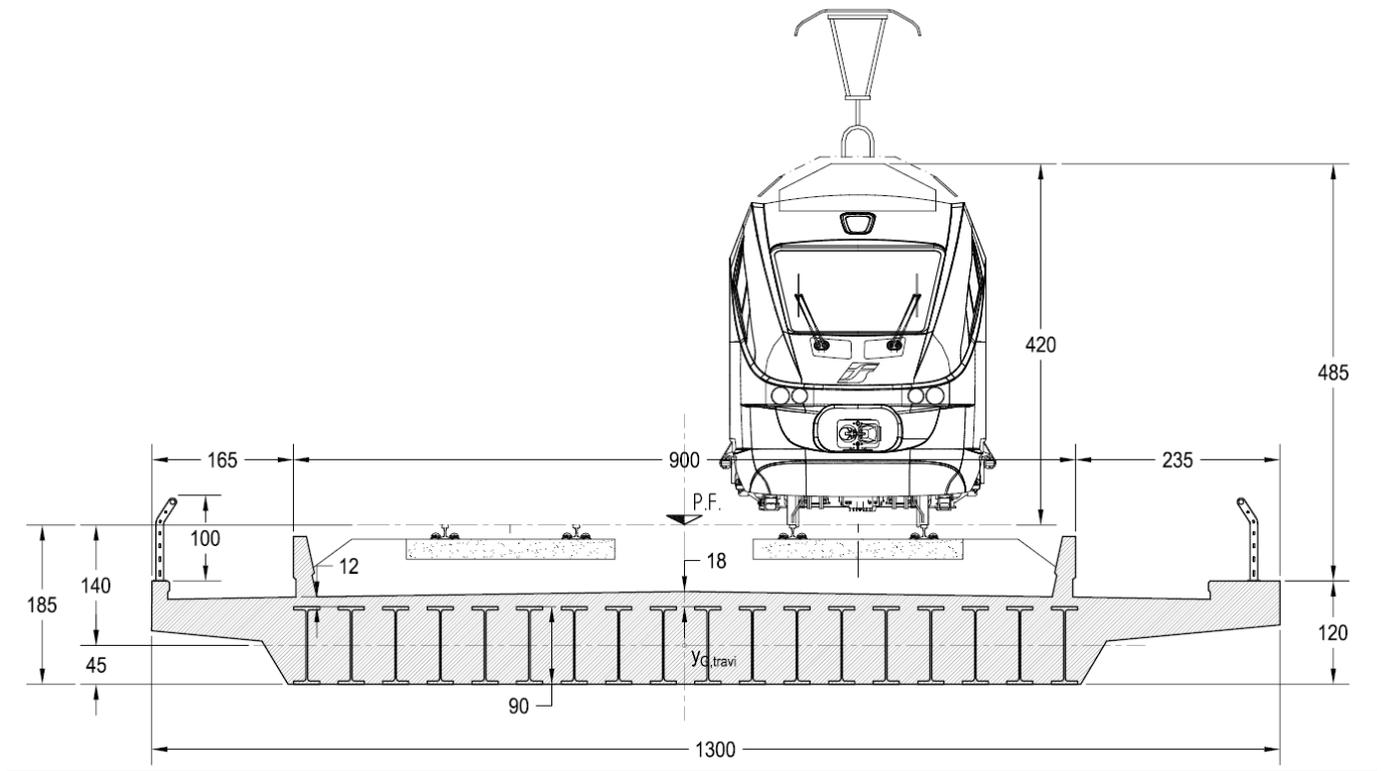
**Figura 5 – Impalcato doppio binario – geometria con b.a. H4 [cm]**

b = 13.00 m (larghezza impalcato)  
H barriera antirumore = 4.0 m  
H max impalcato = 1.20 m  
H direttamente investita = 1.20 m + 4.0 m = 5.20 m  
H barriera bordo ponte = 1.0 m

|                | d [m] | b/d   | cf <sub>x,0</sub> | p <sub>v</sub> [kN/m <sup>2</sup> ] | q <sub>v</sub> [kN/m] | ecc <sub>z</sub> [m] | M <sub>v</sub> [kNm/m] |
|----------------|-------|-------|-------------------|-------------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|
| diretta (b.a.) | 5.20  | 2.03  | 1.9               | 1.91                                | 9.9                   | 2.60                 | 25.8                   |
| indiretta      | 1.00  | 13.70 | 1.9               | 1.91                                | 1.9                   | 1.10                 | 2.1                    |
| tot            |       |       |                   |                                     | 11.8                  |                      | 27.9                   |

**Q vento = 11.8 kN/m x 16.8 m = 199 kN Risultante azione del vento**  
**M vento = 27.9 kN/m x 16.8 m = 468 kNm Momento torcente risultante per azione del vento**

2. Vento agente su impalcato con treno



**Figura 6 – Impalcato doppio binario – geometria con treno [cm]**

|                          |                                 |
|--------------------------|---------------------------------|
| b                        | = 13.00 m (larghezza impalcato) |
| H treno                  | = 4.0 m                         |
| H max impalcato          | = 1.85 m                        |
| H direttamente investita | = 1.85 m + 4 m = 5.85 m         |
| H barriera bordo ponte   | = 1.0 m                         |

|                 | d [m] | b/d  | cfx,0 | pv [kN/m <sup>2</sup> ] | qv [kN/m] | ecc_z [m] | Mv [kNm/m] |
|-----------------|-------|------|-------|-------------------------|-----------|-----------|------------|
| diretta (treno) | 5.85  | 2.22 | 1.9   | 1.91                    | 11.2      | 2.40      | 26.8       |
| indiretta       | 1.0   | 1.97 | 1.9   | 1.91                    | 1.9       | 1.10      | 2.10       |
| tot             |       |      |       |                         | 13.1      |           | 28.9       |

**Q vento = 13.1 kN/m x 16.8 m**

**= 219 kN**

**Risultante azione del vento**

**M vento = 28.9 kN/m x 16.8 m**

**= 485 kNm**

**Momento torcente risultante per azione del vento**

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 25 di 64 |

### 5.2.8 EFFETTI AERODINAMICI ASSOCIATI AL PASSAGGIO DEI CONVOGLI FERROVIARI

Gli effetti aerodinamici associati al passaggio dei treni sono analoghi a quelli del vento (carichi equivalenti statici sulle barriere anti-rumore). L'intensità della pressione da considerare viene determinata secondo quanto indicato nel punto 1.4.6. delle Istruzioni, che riportano la figura 5.2.8 del DM 14 gennaio 2018. Tali azioni saranno utilizzate per il progetto delle barriere e delle relative strutture di sostegno.

Nel caso in esame con la distanza media delle barriere dai binari pari a circa 3.80 m, e una velocità di progetto della linea pari a **160 km/h** si ottiene:

$$q_{1k} = \pm 0.22 \text{ kN/m}^2$$

### 5.2.9 CARICO SUI MARCIAPIEDI

Il carico variabile sui marciapiedi è schematizzato come un carico uniformemente ripartito del valore:

$$p_4 = 10.0 \text{ kN/m}^2$$

Per questo tipo di carico, che non è considerato contemporaneo al transito dei convogli ferroviari, non si applica l'incremento dinamico.

### 5.2.10 AZIONE SISMICA

Le azioni sismiche di progetto, relative agli stati limite considerati, sono definite a partire dalla pericolosità sismica di base del sito di costruzione. Quest'ultima è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa  $a_g$  in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido (cat. A) e di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente  $S_e(T)$  con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza  $P_{VR}$  nel periodo di riferimento  $V_R$

Le forme spettrali sono definite dalla normativa a partire dai seguenti parametri:

$a_g$  accelerazione orizzontale massima al sito (cat. A)

$F_0$  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

Per l'opera in progetto i parametri di riferimento della pericolosità sismica massimi ( $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_c^*$ ) sono di seguito riportati.

|                  |          |      |
|------------------|----------|------|
| Longitudine      | 12.21605 |      |
| Latitudine       | 42.07355 |      |
| $V_N$            | 100      | anni |
| Classe d'uso     | IV       | -    |
| $C_u$            | 2        | -    |
| $V_R$            | 200      | anni |
| Cat.Sottosuolo   | B        | -    |
| Cat. Topografica | T1       | -    |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**  
Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 26 di 64 |

I parametri che definiscono l'azione sismica, calcolati mediante il documento excel *Spettri-NTC.ver.1.0.3.xls* fornito dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, vengono di seguito riportati:

### FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO

Ricerca per coordinate

LONGITUDINE: 12.21605  
LATITUDINE: 42.07355

Ricerca per comune

REGIONE:   
PROVINCIA:   
COMUNE:

**Elaborazioni grafiche**

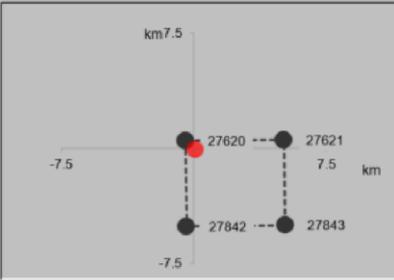
Grafici spettri di risposta

Variabilità dei parametri

**Elaborazioni numeriche**

Tabella parametri

Nodi del reticolo intorno al sito



Reticolo di riferimento



Controllo sul reticolo

- Sito esterno al reticolo
- Interpolazione su 3 nodi
- Interpolazione corretta

Interpolazione: superficie rigata

INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

| SLATO LIMITE | $T_R$<br>[anni] | $a_g$<br>[g] | $F_o$<br>[-] | $T_c^*$<br>[s] |
|--------------|-----------------|--------------|--------------|----------------|
| SLO          | 120             | 0.047        | 2.704        | 0.290          |
| SLD          | 201             | 0.054        | 2.769        | 0.309          |
| SLV          | 1898            | 0.086        | 3.032        | 0.396          |
| SLC          | 2475            | 0.090        | 3.057        | 0.412          |

## FASE 2. SCELTA DELLA STRATEGIA DI PROGETTAZIONE

Vita nominale della costruzione (in anni) -  $V_N$   info

Coefficiente d'uso della costruzione -  $c_U$   info

### Valori di progetto

Periodo di riferimento per la costruzione (in anni) -  $V_R$   info

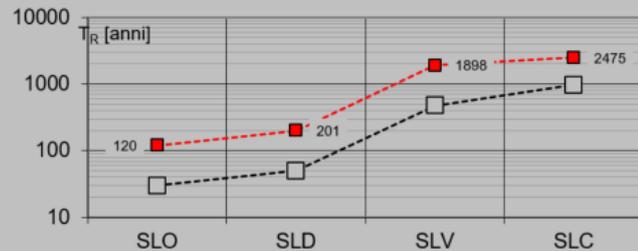
Periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (in anni) -  $T_R$  info

| Stati limite di esercizio - SLE  | Stati limite ultimi - SLU         |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| SLO - $P_{VR} = 81\%$            | SLV - $P_{VR} = 10\%$             |
| SLD - $P_{VR} = 63\%$            | SLC - $P_{VR} = 5\%$              |
| <input type="text" value="120"/> | <input type="text" value="1898"/> |
| <input type="text" value="201"/> | <input type="text" value="2475"/> |

### Elaborazioni

- Grafici parametri azione
- Grafici spettri di risposta
- Tabella parametri azione

### Strategia di progettazione



### LEGENDA GRAFICO

- Strategia per costruzioni ordinarie
- ... Strategia scelta

INTRO

FASE 1

**FASE 2**

FASE 3

### Parametri indipendenti

| STATO LIMITE | SLD     |
|--------------|---------|
| $a_d$        | 0.054 g |
| $F_{0.5}$    | 2.769   |
| $T_C$        | 0.309 s |
| $S_S$        | 1.200   |
| $C_C$        | 1.391   |
| $S_T$        | 1.000   |
| $q$          | 1.000   |

### Parametri indipendenti

| STATO LIMITE | SLV     |
|--------------|---------|
| $a_d$        | 0.086 g |
| $F_{0.5}$    | 3.032   |
| $T_C$        | 0.396 s |
| $S_S$        | 1.200   |
| $C_C$        | 1.324   |
| $S_T$        | 1.000   |
| $q$          | 1.000   |

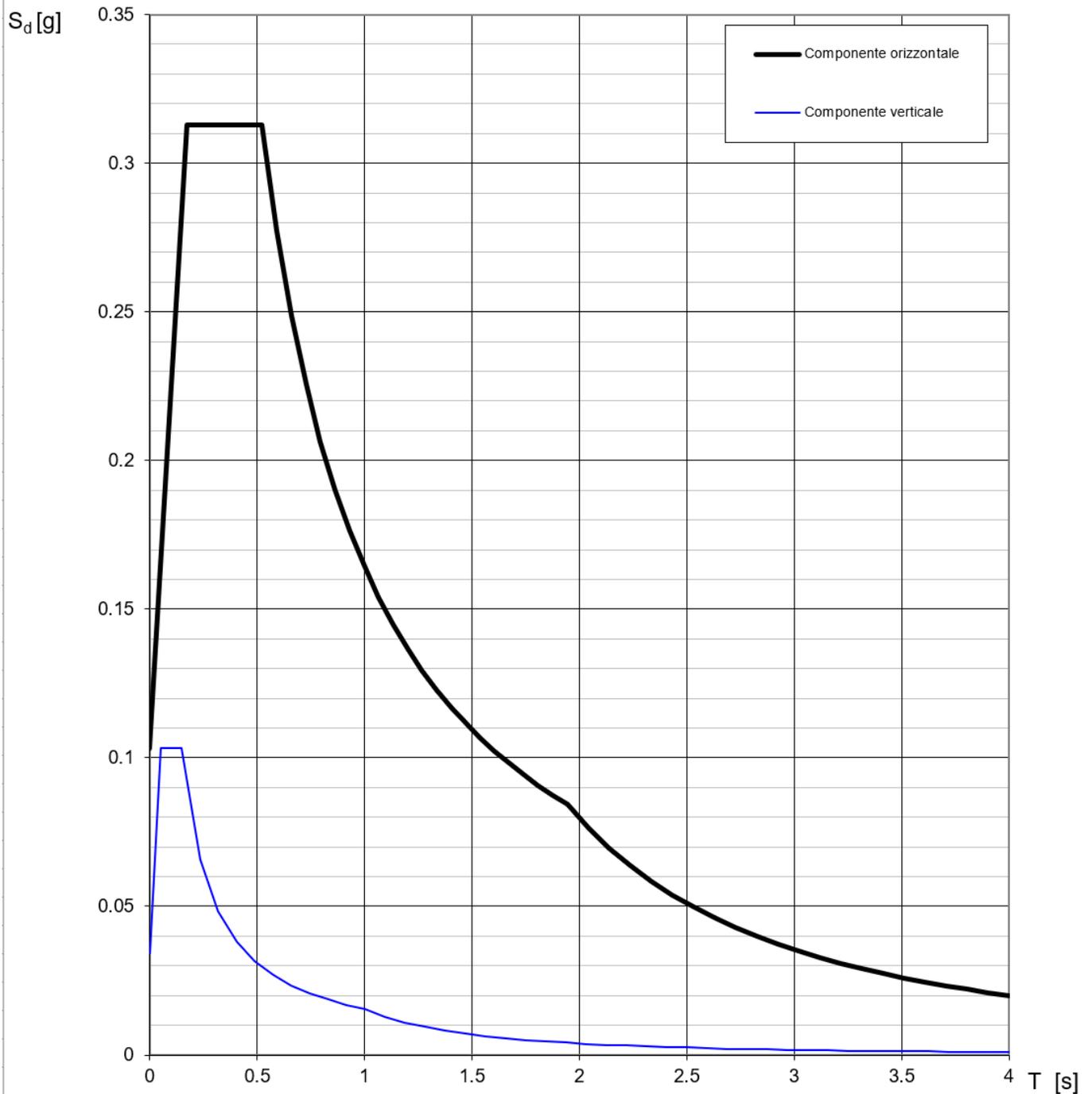
### Parametri dipendenti

|        |         |
|--------|---------|
| $S$    | 1.200   |
| $\eta$ | 1.000   |
| $T_B$  | 0.143 s |
| $T_C$  | 0.430 s |
| $T_D$  | 1.814 s |

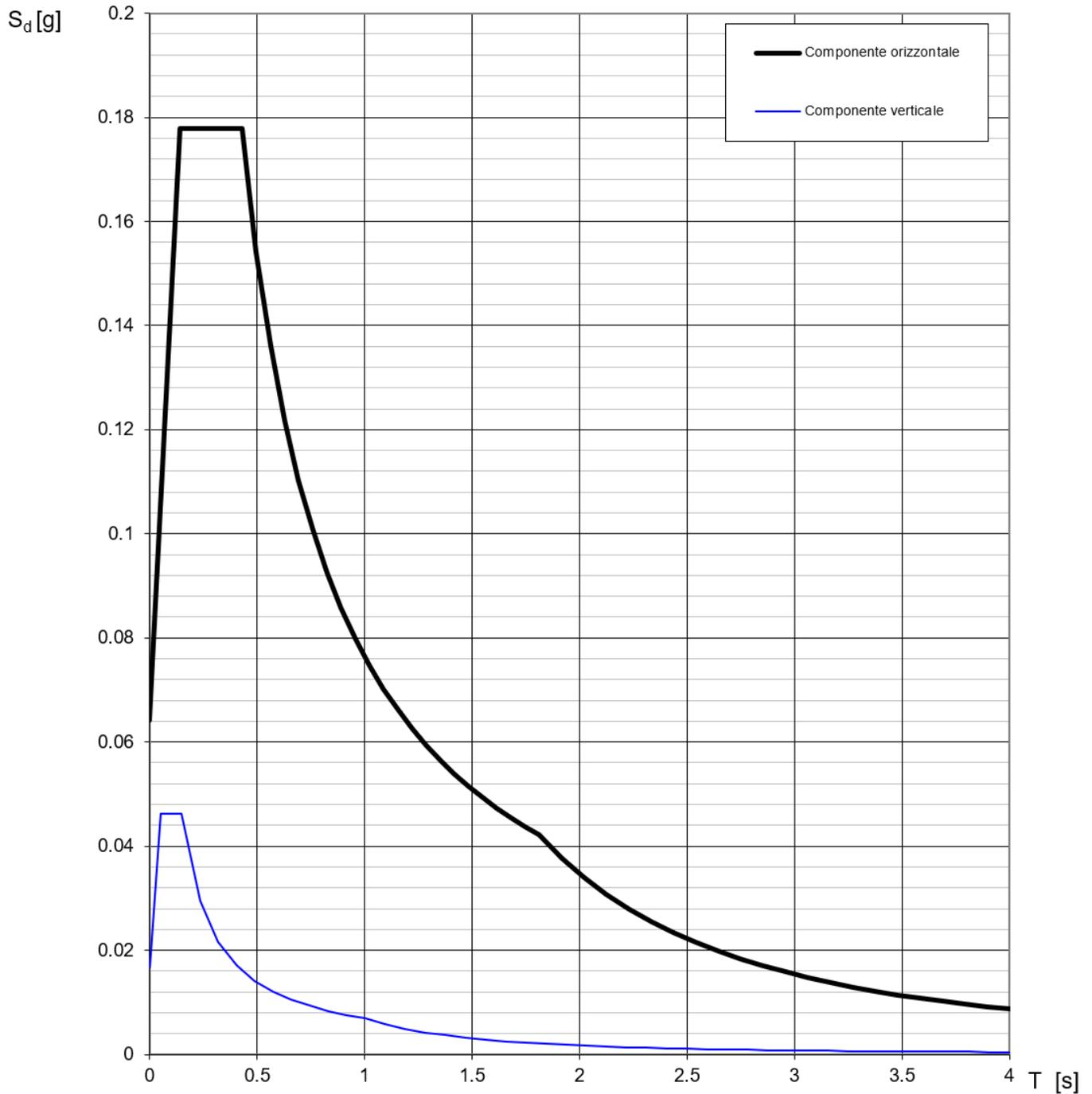
### Parametri dipendenti

|        |         |
|--------|---------|
| $S$    | 1.200   |
| $\eta$ | 1.000   |
| $T_B$  | 0.175 s |
| $T_C$  | 0.524 s |
| $T_D$  | 1.944 s |

**Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato limite: SLV**



**Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato limite: SLD**



**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 30 di 64 |

L'azione sismica risulta non essere dimensionante per le verifiche dell'impalcato; pertanto verrà trattata per definire l'entità delle azioni trasmesse sulle sottostrutture/appoggi.

Per la valutazione dell' azione sismica si utilizza il metodo dell'analisi pseudostatica in cui il sisma è rappresentato da una forza statica equivalente pari al prodotto delle forze di gravità per un opportuno coefficiente sismico k.

Le forze sono pertanto:

Forza sismica orizzontale  $F_h = k_h W$

Forza sismica verticale  $F_v = k_v W$

I valori dei coefficienti sismici orizzontali  $k_h$  e verticale  $k_v$ , relativi allo stato limite considerato, sono posti pari all'ordinata dello spettro di progetto massima (plateaux).

Azione sismica orizzontale SLV:

$$S_{e,max} = 0.313 \text{ g}$$

Azione sismica verticale SLV:

$$S_{e,max} = 0.103 \text{ g}$$

I valori complessivi delle masse associate ai carichi sismici (permanenti + 0.2 carico ferroviario) sono riportati nella sottostante tabella. I valori delle masse vengono impiegati per la valutazione delle sollecitazioni sui dispositivi di appoggio. Per tale ragione, è stata effettuata separatamente la valutazione delle masse che determinano rispettivamente azioni in direzione trasversale/verticale e longitudinale.

**Masse sismiche**

Direz verticale e trasversale

|  | W [kN] | $\psi_{02}$ | m [kN]      |
|--|--------|-------------|-------------|
| peso proprio = $p_{1,pp} \times L_f/2$                           | 2734   | 1           | 2734        |
| permanenti = $p_{1,perm} \times L_f/2$                           | 1355   | 1           | 1355        |
| LM71 = $V_{max} \text{ appoggio} \times \alpha$ ( $\alpha=1.1$ ) | 1754   | 0.2         | 351         |
| SW/2 = $V_{max} \text{ appoggio} \times \alpha$ ( $\alpha=1.0$ ) | 1589   | 0.2         | 318         |
| massa totale   |        |             | <b>4758</b> |

Direz longitudinale

|   | W [kN] | $\psi_{02}$ | m [kN]      |
|---|--------|-------------|-------------|
| peso proprio = $p_{1,pp} \times L_f$            | 5468   | 1           | 5468        |
| permanenti = $p_{1,perm} \times L_f$            | 2711   | 1           | 2711        |
| LM71 = $Q_{tot} \times \alpha$ ( $\alpha=1.1$ ) | 2015   | 0.2         | 403         |
| SW/2 = $Q_{tot} \times \alpha$ ( $\alpha=1.0$ ) | 2520   | 0.2         | 504         |
| massa totale                                    |        |             | <b>9085</b> |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 31 di 64 |

### 5.2.11 RESISTENZE PARASSITE NEI VINCOLI

Si considerano le resistenze parassite nei vincoli in condizioni di spostamento relativo incipiente prodotto dalle variazioni di temperatura.

In ciascun apparecchio di appoggio (fisso/mobile) la reazione parassita è pari al prodotto tra la reazione verticale associata ai carichi verticali, permanenti e mobili, per il coefficiente di attrito  $f$ .

$$R_{\text{Long}} = f \times (V_G + V_Q) \quad \text{con } f = 0.04 \quad \text{dove:}$$

- $V_G$  è la reazione verticale massima associata ai carichi permanenti;
- $V_Q$  è la reazione verticale massima associata ai carichi mobili dinamizzati;

L'azione in esame è stata considerata ai soli fini del calcolo delle azioni sugli apparecchi di appoggio e sulle spalle.

### 5.2.12 DERAGLIAMENTO

Il deragliamento è un'azione derivante dall'esercizio ferroviario che deve essere considerata quale azione eccezionale, secondo quanto indicato al par. 1.5 delle *Istruzioni per la progettazione e l'esecuzione dei ponti ferroviari*.

- Caso 1

Si devono considerare due carichi verticali lineari  $q_{A1d} = 60$  kN/m ciascuno, posizionati longitudinalmente su una lunghezza di 6,40 m, ad una distanza trasversale pari allo scartamento  $S$ . Il carico più eccentrico tra i due deve essere posto ad una distanza massima di  $1,5 S$  dall'asse dei binari.

- Caso 2

Si deve considerare un unico carico lineare  $q_{A2d} = 80 \times 1.4$  kN/m esteso per 20 m e disposto con una eccentricità massima, lato esterno, di  $1,5 S$  rispetto all'asse del binario.

Nel caso in esame la forza del deragliamento non è stata considerata ai fini del dimensionamento in quanto, data la geometria in esame, non può pregiudicare la stabilità globale dell'opera.

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 32 di 64 |

## 6 SOLLECITAZIONI

Le azioni verticali prodotte dai carichi permanenti e variabili e quelle prodotte dalla frenatura/avviamento sono ugualmente ripartite sulle travi dell'impalcato all'interno della larghezza di ripartizione di 4.00m. Le azioni orizzontali, invece, riportate al baricentro delle travi, producono delle coppie torcenti lungo l'asse dell'impalcato che hanno come effetto quello di caricare maggiormente le travi più esterne alla fascia considerata.

### 6.1 SOLLECITAZIONI

#### 6.1.1 MOMENTO FLETTENTE E TAGLIO

##### Peso proprio

|      | q [kN/m] | l [m] | n_tr | n_tr_4m |      |     |
|------|----------|-------|------|---------|------|-----|
| M1,1 | 325.5    | 16.00 | 18   | 8       | 4629 | kNm |
| V1,1 | 325.5    | 16.00 | 18   | 8       | 1157 | kN  |
| R1,1 | 325.5    | 16.00 | 18   | 8       | 1157 | kN  |

##### Sovraccarichi permanenti

|      | q [kN/m] | l [m] | num travi tot | num travi in 4 metri |      |     |
|------|----------|-------|---------------|----------------------|------|-----|
| M1,2 | 161.3    | 16.00 | 18            | 8                    | 2295 | kNm |
| V1,2 | 161.3    | 16.00 | 18            | 8                    | 574  | kN  |
| R1,2 | 161.3    | 16.00 | 18            | 8                    | 574  | kN  |

##### Variabili ferroviari

| <u>LM71</u>  | $\psi$ | $\alpha q$ [kN/m] | l [m] | num travi tot | num travi in 4 metri |      |     |
|--------------|--------|-------------------|-------|---------------|----------------------|------|-----|
| M2 (conf. 1) | 1.298  | 142.8             | 16.00 | 8             | 8                    | 5932 | kNm |
| V2 (conf. 2) | 1.298  | 153.6             | 16.00 | 8             | 8                    | 1595 | kN  |
| R2 (conf. 2) | 1.298  | 153.6             | 16.00 | 8             | 8                    | 1595 | kN  |

| <u>SW/2</u> | $\psi$ | $\alpha q$ [kN/m] | l [m] | num travi tot | num travi in 4 metri |      |     |
|-------------|--------|-------------------|-------|---------------|----------------------|------|-----|
| M2          | 1.298  | 153.0             | 16.00 | 8             | 8                    | 6357 | kNm |
| V2          | 1.298  | 153.0             | 16.00 | 8             | 8                    | 1589 | kN  |
| R2          | 1.298  | 153.0             | 16.00 | 8             | 8                    | 1589 | kN  |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**  
Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 33 di 64 |

### Frenatura

| <u>LM71</u> | Q [kN/m] | z [m] | l [m] |     |     |
|-------------|----------|-------|-------|-----|-----|
| R4,max      | 370      | 2.00  | 16.00 | 46  | kN  |
| M4,app      | 369.6    | 1.40  |       | 517 | kNm |
| M4,mezz     |          |       |       | 259 | kNm |
| <br>        |          |       |       |     |     |
| <u>SW/2</u> | Q [kN/m] | z [m] | l [m] |     |     |
| R4,max      | 588      | 2.00  | 16.00 | 74  | kN  |
| M4,app      | 588      | 1.40  |       | 823 | kNm |
| M4,mezz     |          |       |       | 412 | kNm |

### Avviamento

| <u>LM71</u> | Q [kN/m] | z [m] | l [m] |     |     |
|-------------|----------|-------|-------|-----|-----|
| R4,max      | 609.84   | 2.00  | 16.00 | 76  | kN  |
| M4,app      | 609.84   | 1.40  |       | 854 | kNm |
| M4,mezz     |          |       |       | 427 | kNm |
| <br>        |          |       |       |     |     |
| <u>SW/2</u> | Q [kN/m] | z [m] | l [m] |     |     |
| R4,max      | 554.4    | 2.00  | 16.00 | 69  | kN  |
| M4,app      | 554.4    | 1.40  |       | 776 | kNm |
| M4,mezz     |          |       |       | 388 | kNm |

## 6.1.2 COPPIE TORCENTI A METRO LINEARE DI IMPALCATO

### Centrifuga

| <u>LM71</u>   | q [kN/m] | z [m] |     |       |
|---------------|----------|-------|-----|-------|
| mt5,flettenti | 0.0      | 3.304 | 0.1 | kNm/m |
| mt5,taglianti | 0.0      | 3.304 | 0.1 | kNm/m |
| <br>          |          |       |     |       |
| <u>SW/2</u>   | q [kN/m] | z [m] |     |       |
| mt5,flettenti | 0.0      | 3.304 | 0.0 | kNm/m |
| mt5,taglianti | 0.0      | 3.304 | 0.0 | kNm/m |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**  
Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 34 di 64 |

### Eccentricità del carico LM71

|               | q [kN/m] | z [m] |      |       |
|---------------|----------|-------|------|-------|
| mt6,flettenti | 142.8    | 0.08  | 11.4 | kNm/m |
| mt6,taglianti | 153.6    | 0.08  | 12.3 | kNm/m |

### Vento

vento su barriera a.r. (senza traffico)

|                 | Fw [kN] | Li [m] | zFw [m] |      |       |
|-----------------|---------|--------|---------|------|-------|
| mt8=Fw/Li x zFw | 199     | 16.8   | 2.60    | 30.7 | kNm/m |

vento su treno

|                 | Fw [kN] | Li [m] | zFw [m] |      |       |
|-----------------|---------|--------|---------|------|-------|
| mt8=Fw/Li x zFw | 219     | 16.8   | 2.40    | 31.4 | kNm/m |

### Serpeggio (azione laterale)

| <u>LM71</u> | qs [kN/m] | zs [m] |       |       |
|-------------|-----------|--------|-------|-------|
| mt9=qsxzs   | 110       | 1.40   | 154.0 | kNm/m |

| <u>SW/2</u> | qs [kN/m] | zs [m] |       |       |
|-------------|-----------|--------|-------|-------|
| mt9=qsxzs   | 100       | 1.40   | 140.0 | kNm/m |

## 6.2 SOLLECITAZIONI SULLA TRAVE DI BORDO DELLA FASCIA

### 6.2.1 AZIONI VERTICALI

#### Peso proprio

|                        |      | num travi in 4 metri |     |     |                     |  |
|------------------------|------|----------------------|-----|-----|---------------------|--|
| $M'_{1,1} = M_{1,1/n}$ | 4629 | 8                    | 579 | kNm | Momento mezzeria    |  |
| $V'_{1,1} = V_{1,1/n}$ | 1157 | 8                    | 145 | kN  | Taglio all'appoggio |  |
| $R'_{1,1} = R_{1,1/n}$ | 1157 | 8                    | 145 | kN  | Reazione vincolare  |  |

#### Sovraccarichi permanenti

|                      |      | num travi in 4 metri |     |     |                     |  |
|----------------------|------|----------------------|-----|-----|---------------------|--|
| $M'_{1,2} = M_{1/n}$ | 2295 | 8                    | 287 | kNm | Momento mezzeria    |  |
| $V'_{1,2} = V_{1/n}$ | 574  | 8                    | 72  | kN  | Taglio all'appoggio |  |
| $R'_{1,2} = R_{1/n}$ | 574  | 8                    | 72  | kN  | Reazione vincolare  |  |

#### Variabili ferroviari

| <u>LM71</u>        |      | num travi in 4 metri |     |     |                               |  |
|--------------------|------|----------------------|-----|-----|-------------------------------|--|
| $M'_{2} = M_{2/n}$ | 5932 | 8                    | 742 | kNm | Momento mezzeria (conf. 1)    |  |
| $V'_{2} = V_{2/n}$ | 1595 | 8                    | 199 | kN  | Taglio all'appoggio (conf. 2) |  |
| $R'_{2} = R_{2/n}$ | 1595 | 8                    | 199 | kN  | Reazione vincolare (conf. 2)  |  |

| <u>SW/2</u>        |      | num travi in 4 metri |     |     |                     |  |
|--------------------|------|----------------------|-----|-----|---------------------|--|
| $M'_{2} = M_{2/n}$ | 6357 | 8                    | 795 | kNm | Momento mezzeria    |  |
| $V'_{2} = V_{2/n}$ | 1589 | 8                    | 199 | kN  | Taglio all'appoggio |  |
| $R'_{2} = R_{2/n}$ | 1589 | 8                    | 199 | kN  | Reazione vincolare  |  |

#### Frenatura

| <u>LM71</u>             |     | num travi in 4 metri |    |     |                     |  |
|-------------------------|-----|----------------------|----|-----|---------------------|--|
| $M'_{4} = M_{4,mezz/n}$ | 259 | 8                    | 32 | kN  | Momento mezzeria    |  |
| $V'_{4} = R_{4/n}$      | 46  | 8                    | 6  | kNm | Taglio all'appoggio |  |
| $N'_{4} = Q_{l/n}$      | 370 | 8                    | 46 | kN  | Sforzo normale      |  |

| <u>SW/2</u>             |     | num travi in 4 metri |    |    |                  |  |
|-------------------------|-----|----------------------|----|----|------------------|--|
| $M'_{4} = M_{4,mezz/n}$ | 412 | 8                    | 51 | kN | Momento mezzeria |  |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 36 di 64 |

|              |     |   |    |     |                     |
|--------------|-----|---|----|-----|---------------------|
| $V'4 = R4/n$ | 74  | 8 | 9  | kNm | Taglio all'appoggio |
| $N'4 = Ql/n$ | 588 | 8 | 74 | kN  | Sforzo normale      |

**Avviamento**

LM71

num travi in 4 metri

|                   |     |   |    |     |                     |
|-------------------|-----|---|----|-----|---------------------|
| $M'4 = M4,mezz/n$ | 427 | 8 | 53 | kN  | Momento mezzeria    |
| $V'4 = R4/n$      | 76  | 8 | 10 | kNm | Taglio all'appoggio |
| $N'4 = Ql/n$      | 610 | 8 | 76 | kN  | Sforzo normale      |

SW/2

num travi in 4 metri

|                   |     |   |    |     |                     |
|-------------------|-----|---|----|-----|---------------------|
| $M'4 = M4,mezz/n$ | 388 | 8 | 49 | kN  | Momento mezzeria    |
| $V'4 = R4/n$      | 69  | 8 | 9  | kNm | Taglio all'appoggio |
| $N'4 = Ql/n$      | 554 | 8 | 69 | kN  | Sforzo normale      |

**6.2.2 AZIONI ORIZZONTALI**

Di seguito viene valutato l'incremento di carico verticale  $\Delta p$  prodotto sulla trave di bordo dalle coppie torcenti  $m_i$ , considerando la flessione su una striscia unitaria trasversale di impalcato avente sezione  $b \cdot h$  e momento d'inerzia  $J'$ .

|                                  |       |        |                           |
|----------------------------------|-------|--------|---------------------------|
| $n =$                            | 18    | -      | numero travi              |
| $i =$                            | 0.51  | m      | interasse travi           |
| $d$                              | 2.244 | m      | braccio trave di bordo    |
| $B_{rip.} =$                     | 4     | m      | larghezza di ripartizione |
| $h$                              | 0.9   | m      | altezza travi             |
| $J = h \times B_{rip.}^3 / 12 =$ | 4.80  | $m^4$  | inerzia                   |
| $\alpha = d \times i / J =$      | 0.238 | $1/mq$ |                           |

$$\Delta p = \alpha \times mt$$

**Eccentricità del carico LM71**

|  | $\alpha$ | mt6 [kNm/m] |      |       |
|--|----------|-------------|------|-------|
| $\Delta p_6, flettenti = \alpha \times mt_6$ | 0.238    | 11.4        | 2.72 | kNm/m |
| $\Delta p_6, taglienti = \alpha \times mt_6$ | 0.238    | 12.3        | 2.93 | kNm/m |

$\Delta p_6$  [kNm/m]       $L_c$  [m]

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 37 di 64 |

|                                  |      |       |    |     |                     |
|----------------------------------|------|-------|----|-----|---------------------|
| $M6 = \Delta p6 \times Lc^2 / 8$ | 2.72 | 16.00 | 87 | kNm | momento in mezzeria |
| $V6 = \Delta p6 \times Lc / 2$   | 2.93 | 16.00 | 23 | kNm | taglio all'appoggio |

**Vento**

vento su barriera a.r. (senza traffico)

|                                  |                     |             |      |       |                     |
|----------------------------------|---------------------|-------------|------|-------|---------------------|
|                                  | $\alpha$            | mt8 [kNm/m] |      |       |                     |
| $\Delta p8 = \alpha \times mt8$  | 0.238               | 30.7        | 7.33 | kNm/m |                     |
|                                  | $\Delta p8$ [kNm/m] | Lc [m]      |      |       |                     |
| $M8 = \Delta p8 \times Lc^2 / 8$ | 7.33                | 16.00       | 235  | kNm   | momento in mezzeria |
| $V8 = \Delta p8 \times Lc / 2$   | 7.33                | 16.00       | 59   | kNm   | taglio all'appoggio |

vento su treno

|                                  |                     |             |      |       |                     |
|----------------------------------|---------------------|-------------|------|-------|---------------------|
|                                  | $\alpha$            | mt8 [kNm/m] |      |       |                     |
| $\Delta p8 = \alpha \times mt8$  | 0.238               | 31.4        | 7.47 | kNm/m |                     |
|                                  | $\Delta p8$ [kNm/m] | Lc [m]      |      |       |                     |
| $M8 = \Delta p8 \times Lc^2 / 8$ | 7.47                | 16.00       | 239  | kNm   | momento in mezzeria |
| $V8 = \Delta p8 \times Lc / 2$   | 7.47                | 16.00       | 60   | kNm   | taglio all'appoggio |

**Serpeggio (azione laterale)**

LM71

|                                 |                     |             |       |       |                     |
|---------------------------------|---------------------|-------------|-------|-------|---------------------|
|                                 | $\alpha$            | mt9 [kNm/m] |       |       |                     |
| $\Delta p9 = \alpha \times mt9$ | 0.238               | 154.0       | 36.72 | kNm/m |                     |
|                                 | $\Delta p9$ [kNm/m] | Lc [m]      |       |       |                     |
| $M9 = \Delta p9 \times Lc / 4$  | 36.72               | 16.00       | 147   | kNm   | momento in mezzeria |
| $V9 = \Delta p9$                | 36.72               |             | 37    | kNm   | taglio all'appoggio |

SW/2

|                                 |                     |             |       |       |                     |
|---------------------------------|---------------------|-------------|-------|-------|---------------------|
|                                 | $\alpha$            | mt9 [kNm/m] |       |       |                     |
| $\Delta p9 = \alpha \times mt9$ | 0.238               | 140.0       | 33.38 | kNm/m |                     |
|                                 | $\Delta p9$ [kNm/m] | Lc [m]      |       |       |                     |
| $M9 = \Delta p9 \times Lc / 4$  | 33.38               | 16.00       | 134   | kNm   | momento in mezzeria |
| $V9 = \Delta p9$                | 33.38               |             | 33    | kNm   | taglio all'appoggio |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 38 di 64 |

### 6.2.3 RIEPILOGO DELLE SOLLECITAZIONI ELEMENTARI SULLA TRAVE DI BORDO

Le sollecitazioni di pressoflessione e taglio agenti nella trave maggiormente sollecitata sono riportate nella sottostante tabella, suddivise per condizioni elementari di carico e relative ai modelli di carico ferroviario LM/71 e SW/2. Sono inoltre riportate le sollecitazioni di calcolo, ottenute considerando i coefficienti di combinazione previsti dalla normativa, inclusi quelli per la definizione dei gruppi di carico da traffico.

#### Caso di carico 1 - LM71

|                               | Sollecitazioni caratteristiche |               |      |
|-------------------------------|--------------------------------|---------------|------|
|                               | M<br>mezzeria                  | V<br>appoggio | N    |
| Azione                        | [kNm]                          | [kN]          | [kN] |
| Peso proprio                  | 579                            | 145           | 0    |
| Sovraccarichi permanenti      | 287                            | 72            | 0    |
| LM71 dinamizzato              | 742                            | 199           | 0    |
| Eccentricità del carico LM71  | 87                             | 23            | 0    |
| Effetto della sopraelevazione | 0                              | 0             | 0    |
| Frenatura/Avviamento          | 32                             | 6             | 46   |
| Centrifuga                    | 1                              | 0             | 0    |
| Serpeggio                     | 147                            | 37            | 0    |
| Vento (su treno)              | 235                            | 59            | 0    |

#### Caso di carico 2 - SW/2

|                               | Sollecitazioni caratteristiche |               |      |
|-------------------------------|--------------------------------|---------------|------|
|                               | M<br>mezzeria                  | V<br>appoggio | N    |
| Azione                        | [kNm]                          | [kN]          | [kN] |
| Peso proprio                  | 579                            | 145           | 0    |
| Sovraccarichi permanenti      | 287                            | 72            | 0    |
| SW/2 dinamizzato              | 795                            | 199           | 0    |
| Eccentricità del carico SW/2  | 0                              | 0             | 0    |
| Effetto della sopraelevazione | 0                              | 0             | 0    |
| Frenatura/Avviamento          | 51                             | 9             | 74   |
| Centrifuga                    | 0                              | 0             | 0    |
| Serpeggio                     | 134                            | 33            | 0    |
| Vento (su treno)              | 235                            | 59            | 0    |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**  
Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 39 di 64 |

**Caso di carico 3 - scarico**

| Azione                        | Sollecitazioni caratteristiche |                       |           |
|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------|
|                               | M<br>mezzeria<br>[kNm]         | V<br>appoggio<br>[kN] | N<br>[kN] |
| Peso proprio                  | 579                            | 145                   | 0         |
| Sovraccarichi permanenti      | 287                            | 72                    | 0         |
| Treno dinamizzato             | 0                              | 0                     | 0         |
| Eccentricità del carico       | 0                              | 0                     | 0         |
| Effetto della sopraelevazione | 0                              | 0                     | 0         |
| Frenatura/Avviamento          | 0                              | 0                     | 0         |
| Centrifuga                    | 0                              | 0                     | 0         |
| Serpeggio                     | 0                              | 0                     | 0         |
| Vento                         | 235                            | 59                    | 0         |

## 6.2.4 RIEPILOGO DELLE SOLLECITAZIONI DI PROGETTO SULLA TRAVE DI BORDO

### Caso di carico 1 - LM71

| Azione                        | Coefficienti combinazione |         |        |       | Sollecitazioni SLU  |               |           |
|-------------------------------|---------------------------|---------|--------|-------|---------------------|---------------|-----------|
|                               | gamma                     | gam gr1 | psi 01 | coeff | M mezzeria<br>[kNm] | V app<br>[kN] | N<br>[kN] |
| Peso proprio                  | 1.35                      | -       | -      | 1.35  | 781                 | 195           | 0         |
| Sovraccarichi permanenti      | 1.5                       | -       | -      | 1.5   | 430                 | 108           | 0         |
| LM71 dinamizzato              | 1.45                      | 1       | -      | 1.45  | 1075                | 289           | 0         |
| Eccentricità del carico LM71  | 1.45                      | 1       | -      | 1.45  | 126                 | 34            | 0         |
| Effetto della sopraelevazione | 1.45                      | 1       | -      | 1.45  | 0                   | 0             | 0         |
| Frenatura/Avviamento          | 1.45                      | 0.5     | -      | 0.725 | 23                  | 4             | 33        |
| Centrifuga                    | 1.45                      | 1       | -      | 1.45  | 1                   | 0             | 0         |
| Serpeggio                     | 1.45                      | 1       | -      | 1.45  | 213                 | 53            | 0         |
| Vento (su treno)              | 1.5                       | -       | 0.6    | 0.9   | 211                 | 53            | 0         |
| <b>Σ</b>                      |                           |         |        |       | <b>2861</b>         | <b>736</b>    | <b>33</b> |

### Caso di carico 2 - SW/2

| Azione                        | Coefficienti combinazione |         |        |       | Sollecitazioni SLU  |               |           |
|-------------------------------|---------------------------|---------|--------|-------|---------------------|---------------|-----------|
|                               | gamma                     | gam gr1 | psi 01 | coeff | M mezzeria<br>[kNm] | V app<br>[kN] | N<br>[kN] |
| Peso proprio                  | 1.35                      | -       | -      | 1.35  | 781                 | 195           | 0         |
| Sovraccarichi permanenti      | 1.5                       | -       | -      | 1.5   | 430                 | 108           | 0         |
| SW/2 dinamizzato              | 1.45                      | 1       | -      | 1.45  | 1152                | 288           | 0         |
| Eccentricità del carico SW/2  | 1.45                      | 1       | -      | 1.45  | 0                   | 0             | 0         |
| Effetto della sopraelevazione | 1.45                      | 1       | -      | 1.45  | 0                   | 0             | 0         |
| Frenatura/Avviamento          | 1.45                      | 0.5     | -      | 0.725 | 37                  | 7             | 53        |
| Centrifuga                    | 1.45                      | 1       | -      | 1.45  | 0                   | 0             | 0         |
| Serpeggio                     | 1.45                      | 1       | -      | 1.45  | 194                 | 48            | 0         |
| Vento (su treno)              | 1.5                       | -       | 0.6    | 0.9   | 211                 | 53            | 0         |
| <b>Σ</b>                      |                           |         |        |       | <b>2806</b>         | <b>699</b>    | <b>53</b> |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**  
Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 41 di 64 |

**Caso di carico 3 - scarico**

| Azione                               | Coefficienti combinazione |         |        |       | Sollecitazioni SLU  |               |           |
|--------------------------------------|---------------------------|---------|--------|-------|---------------------|---------------|-----------|
|                                      | gamma                     | gam gr1 | psi 01 | coeff | M mezzeria<br>[kNm] | V app<br>[kN] | N<br>[kN] |
| <b>Peso proprio</b>                  | 1.35                      | -       | -      | 1.35  | 781                 | 195           | 0         |
| <b>Sovraccarichi permanenti</b>      | 1.5                       | -       | -      | 1.5   | 430                 | 108           | 0         |
| <b>Treno dinamizzato</b>             | 1.45                      | 1       | -      | 1.45  | 0                   | 0             | 0         |
| <b>Eccentricità del carico</b>       | 1.45                      | 1       | -      | 1.45  | 0                   | 0             | 0         |
| <b>Effetto della sopraelevazione</b> | 1.45                      | 1       | -      | 1.45  | 0                   | 0             | 0         |
| <b>Frenatura/Avviamento</b>          | 1.45                      | 0.5     | -      | 0.725 | 0                   | 0             | 0         |
| <b>Centrifuga</b>                    | 1.45                      | 1       | -      | 1.45  | 0                   | 0             | 0         |
| <b>Serpeggio</b>                     | 1.45                      | 1       | -      | 1.45  | 0                   | 0             | 0         |
| <b>Vento</b>                         | 1.5                       | -       | 0.6    | 0.9   | 211                 | 53            | 0         |
| <b>Σ</b>                             |                           |         |        |       | <b>1422</b>         | <b>356</b>    | <b>0</b>  |

## 7 VERIFICHE DI RESISTENZA

Le verifiche sono condotte agli stati limite ultimi, facendo riferimento alla combinazione fondamentale si seguito riportata:

$$\gamma_{G1} G_1 + \gamma_{G2} G_2 + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \gamma_{Q2} \psi_{02} Q_{k2}$$

in cui

$G_1$  sono i carichi permanenti

$G_2$  sono i carichi permanenti non strutturali

$Q_{k1}$  è il valore caratteristico delle azioni legate al transito dei treni. Tra i gruppi di azioni si assume per le verifiche il *gruppo 1* dove i coefficienti di simultaneità delle azioni valgono

1 per i carichi verticali

0.5 per frenatura ed avviamento

1 per forza centrifuga

1 per azione laterale (serpeggio)

$Q_{k2}$  è l'azione del vento

Il calcestruzzo è considerato non collaborante e pertanto la resistenza è affidata alle sole  $n$  travi in acciaio comprese all'interno della zona di ripartizione del carico pari a 4.0 m.

### 7.1 SOLLECITAZIONI DI VERIFICA SULLA TRAVE DI BORDO

Le massime sollecitazioni impiegate nelle seguenti verifiche sono:

|                |      |     |                         |
|----------------|------|-----|-------------------------|
| Max M mezzeria | 2861 | kNm | Caso di carico 1 - LM71 |
| Max N mezzeria | 53   | kN  | Caso di carico 2 - SW/2 |
| Max V appoggio | 736  | kN  | Caso di carico 1 - LM71 |

## 7.2 VERIFICHE DEL PROFILO HEB900

### PROFILO

|    |          |                 |
|----|----------|-----------------|
| A  | 37130    | mm <sup>2</sup> |
| W  | 1.10E+07 | mm <sup>3</sup> |
| S  | 6.31E+06 | mm <sup>3</sup> |
| J  | 4.94E+09 | mm <sup>4</sup> |
| tw | 18.5     | mm              |

### MATERIALE

|     |       |     |
|-----|-------|-----|
| fyk | 355   | MPa |
| γM0 | 1.05  |     |
| fyd | 338.1 | MPa |

### TENSIONI

|                                     |     |     |
|-------------------------------------|-----|-----|
| $\sigma = N/A + M/W =$              | 262 | MPa |
| $\tau = V \times S/(J \times tw) =$ | 51  | MPa |

### FS

|                             |      |    |
|-----------------------------|------|----|
| $\sigma / fyd =$            | 0.78 | OK |
| $\tau / (fyd * \sqrt{3}) =$ | 0.26 | OK |

## 8 VERIFICHE DI DEFORMABILITA'

Le verifiche di deformabilità sono condotte agli stati limite di servizio considerando la combinazione rara delle azioni e prendendo in esame le seguenti grandezze:

- inflessione nel piano verticale dell'impalcato (rotazione agli appoggi)
- deformazioni torsionali dell'impalcato (fenomeno dello sghembo)
- stato limite per il comfort passeggeri (freccia sotto il treno di carico LM71 dinamizzato)

Le verifiche sono condotte con il treno di carico LM71 incrementato con il corrispondente coefficiente dinamico  $\phi_3$ . Per l'inflessione si tiene in conto anche una variazione lineare di temperatura di 10° lungo l'altezza dell'impalcato.

Il calcestruzzo è considerato interamente reagente ai fini della determinazione dell'inerzia flessionale dell'impalcato e della ripartizione trasversale dei carichi mobili con coefficiente di omogeneizzazione pari a  $n = 6$ . Nelle verifiche si fa riferimento alla larghezza totale della soletta  $b = 9.12$  m.

Le caratteristiche della sezione reagente omogeneizzata in cls sono riportate nei seguenti paragrafi.

### 8.1 VALUTAZIONE RIGIDEZZA DELL'IMPALCATO

|                       |          |                 |  |
|-----------------------|----------|-----------------|--|
| Brip. =               | 9.12     | m               | larghezza di ripartizione                      |
| Htravi =              | 0.9      | m               | altezza travi acciaio                          |
| sp. soletta superiore | 0.15     | m               | spessore medio soletta sopra le ali superiori  |
| Htot =                | 1.05     | m               | altezza totale impalcato                       |
| Htot,cls =            | 1.08     | m               | altezza totale cls                             |
| ntravi,B,rip. =       | 18       | -               | numero travi nella zona di ripartizione        |
| yG,travi =            | 0.45     | m               | quota baricentro travi                         |
| yG,cls =              | 0.6      | m               | quota baricentro cls                           |
| n                     | 6        | -               | coeff. di omogeneizzazione                     |
| Atrave =              | 37130    | mm <sup>2</sup> | Area trave                                     |
| Atravi =              | 668340   | mm <sup>2</sup> | Area travi nella zona di ripartizione          |
| Acls,lorda =          | 9.576    | m <sup>2</sup>  | Area lorda cls                                 |
| Acls,netta =          | 8.908    | m <sup>2</sup>  | Area netta cls                                 |
| Jtrave =              | 4.94E+09 | mm <sup>4</sup> | momento d'inerzia trave                        |
| Jtravi =              | 8.89E+10 | mm <sup>4</sup> | momento d'inerzia travi (rispetto a yG,travi)  |
| Jcls =                | 0.880    | m <sup>4</sup>  | momento d'inerzia cls (rispetto a yG,cls)      |
| A_hom_cls =           | 12.92    | m <sup>2</sup>  | area soletta + travi omogeneizzate a cls       |
| yG_hom_cls =          | 0.553    | m               | quota baricentro soletta + travi omogeneizzate |
| J'soletta =           | 1.476    | m <sup>4</sup>  | inerzia soletta + travi omogeneizzate a cls    |
| Ecm =                 | 33643    | MPa             | Modulo elastico di progetto                    |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 45 di 64 |

## 8.2 FREQUENZA PROPRIA DELL'IMPALCATO

Per controllare l'affidabilità del coefficiente di incremento dinamico  $\phi_3$  assunto nei calcoli si vuole accertare che la frequenza propria  $n_0$  dell'impalcato sia contenuta all'interno del fuso in fig. 1.4.2-2 della *Specificazione per la progettazione e l'esecuzione dei ponti ferroviari*.

|  |       |      |   |
|--|-------|------|---|
| $p_{1,pp}$                                       | 325.5 | kN/m | peso proprio (intero impalcato)         |
| $p_{1,perm}$                                     | 161.3 | kN/m | carichi permanenti (intero impalcato)   |
| $p_1$  | 486.8 | kN/m | totale pp+perm. (intero impalcato)      |
| $n_{travi,B,rip.} =$                             | 18    | -    | numero travi nella zona di ripartizione |
| $n_{travi} =$                                    | 18    | -    | numero totale travi                     |
| $p'_1$   | 486.8 | kN/m | totale pp+perm. (su Brip.)              |
| $L_c =$  | 16.00 | m    | luce impalcato (asse appoggi)           |
| $\delta_0 = 5/384 \times p'_1 \times L^4 / EJ =$ | 8.37  | mm   | freccia massima per $p'_1,perm$         |
| $n_0 = 17.75 / \sqrt{\delta_0} =$                | 6.14  | Hz   | stima prima frequenza flessionale       |
| $n_{0, inf} = 23.58 \times L_c^{-0.592} =$       | 4.57  | Hz   | frequenza limite inferiore per $L=L_c$  |
| $n_{0, sup} = 94.76 \times L_c^{-0.748} =$       | 11.91 | Hz   | frequenza limite superiore per $L=L_c$  |
| test   | OK    |      | $n_{0, inf} < n_0 < n_{0, sup}$         |

## 8.3 VERIFICA DI INFLESSIONE NEL PIANO VERTICALE

Di seguito si riporta la valutazione della freccia massima per effetto dei carichi LM71 e SW/2 dinamizzati.

|   |       |      |                                    |
|---|-------|------|------------------------------------|
| $p_{2,eq.flett} =$                        | 295.8 | kN/m | eq. Flettente LM71+SW/2 (2 binari) |
| $\phi_3 =$                                | 1.298 | -    | coeff. dinamico                    |
| $p'_{2,eq.flett} =$                       | 384.1 | kN/m | $\phi_3 \times p_{2,eq.flett}$     |
| $\delta_{LM71+SW/2} (2 \text{ binari}) =$ | 5.08  | mm   | freccia in mezzeria                |
| $\delta_{LIM} =$                          | 26.7  | mm   | freccia limite (L/600)             |
| $\delta < \delta_{LIM}$                   | OK    | -    | verifica soddisfatta               |
| $\delta / \delta_{LIM} =$                 | 0.19  | -    |                                    |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 46 di 64 |

## 8.4 VERIFICA DEL COMFORT DEI PASSEGGERI

Di seguito si riporta la valutazione della freccia massima per effetto del carico LM71 dinamizzato.

|   |            |                                |
|---|------------|--------------------------------|
| $p_{2,eq.flett} =$                        | 142.8 kN/m | eq. Flettente LM71 (1 binario) |
| $\phi_3 =$                                | 1.298 -    | coeff. dinamico                |
| $p'_{2,eq.flett} =$                       | 185.4 kN/m | $\phi_3 \times p_{2,eq.flett}$ |
| $\delta_{LM71} (1 \text{ binario}) =$     | 2.45 mm    | freccia in mezzeria            |
| $\delta_{LIM \text{ comfort}} =$          | 16.0 mm    | freccia limite (L/1000)        |
| $\delta < \delta_{LIM \text{ comfort}}$   | OK -       | verifica soddisfatta           |
| $\delta / \delta_{LIM \text{ comfort}} =$ | 0.15 -     |                                |

## 8.5 ROTAZIONE AGLI APPOGGI

Di seguito si riporta la valutazione della rotazione massima degli appoggi.

|                                   |        |     |   |
|-----------------------------------|--------|-----|---|
| $\theta_{LM71} = 16/5 * \delta/L$ | 0.0010 | rad | rotazione per LM71 dinamizzato  |
| H =                               | 1050   | mm  | altezza del piano di regolamento del ballast rispetto al centro di rotazione degli apparecchi di appoggio |
| $\theta_{LIM} =$                  | 0.0076 | rad | rotazione limite (8/H rad, con H in [mm])   |
| $\theta < \theta_{LIM}$           | OK     | -   | verifica soddisfatta  |
| $\theta / \theta_{LIM} =$         | 0.133  | -   |   |

## 8.6 SGHEMBO

La verifica si effettua ipotizzando la presenza di un profilo metallico in corrispondenza di ciascuna rotaia e calcolando la differenza di abbassamento tra i due profili in corrispondenza della sezione posta a 3.00m dall'appoggio considerando una distribuzione trasversale degli abbassamenti di tipo lineare.

L'incremento e decremento  $\Delta p$  del carico prodotti sulle due travi considerate da tali effetti si valuta ipotizzando la flessione su una striscia unitaria trasversale di impalcato avente sezione  $b \times h$  e momento d'inerzia  $J$ .

### Valutazione effetto delle Azioni orizzontali

|                               |       |                |                           |
|-------------------------------|-------|----------------|---------------------------|
| $i =$                         | 0.51  | m              | interasse travi           |
| $d = 1.5/2 =$                 | 0.75  | m              | braccio trave di bordo    |
| Brip. =                       | 4     | m              | larghezza di ripartizione |
| h                             | 0.9   | m              | altezza travi             |
| $J = h \times Brip.^3 / 12 =$ | 4.80  | m <sup>4</sup> | inerzia                   |
| $\alpha = d \times i / J =$   | 0.080 | 1/mq           |                           |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 47 di 64 |

$$\Delta p = \alpha \times m t$$

**Eccentricità del carico LM71**

$$\Delta p_6 = \alpha \times \varphi_3 \times m t_6 = 0.103 \times 11.4 = 1.2 \text{ kN/m} \quad \text{effetto flettente}$$

**Effetto della sopraelevazione**

$$\Delta p_7 = \alpha \times m t_7 = -0.080 \times 0.0 = 0.0 \text{ kN/m} \quad \text{effetto flettente}$$

**Vento su treno**

$$\Delta p_8 = \alpha \times m t_8 = 0.080 \times 31.4 = 2.5 \text{ kN/m} \quad \text{eff. flett. e tagli.}$$

**Serpeggio**

$$\Delta p_9 = \alpha / L \times m t_9 = 0.005 \times 154.0 = 0.8 \text{ kN/m} \quad \text{eff. flett. e tagli.}$$

$$\Delta p_{tot} = 4.5 \text{ kN/m}$$

$$\beta = a \times b / L^2 (1 + a \times b / L^2) = 0.176 \quad - \quad \text{coeff. per la valutazione dell'abbassamento della trave di bordo}$$

$$a = 3.00 \text{ m} \quad \text{distanza punto di controllo dall'appoggio}$$

$$b = 13.00 \text{ m} \quad \text{distanza punto di controllo dall'appoggio opposto}$$

$$L = 16.00 \text{ m} \quad \text{luce impalcato (asse appoggi)}$$

$$J = J_{\text{soletta}} / n_{\text{travi, B, rip.}} = 0.082 \text{ m}^4 \quad \text{inerzia della trave di bordo (incluso cls)}$$

$$\delta_0 = 1/24 \times \Delta p \times L^4 / EJ \times \beta = 0.77 \text{ mm} \quad \text{freccia massima per } \Delta p_{tot}$$

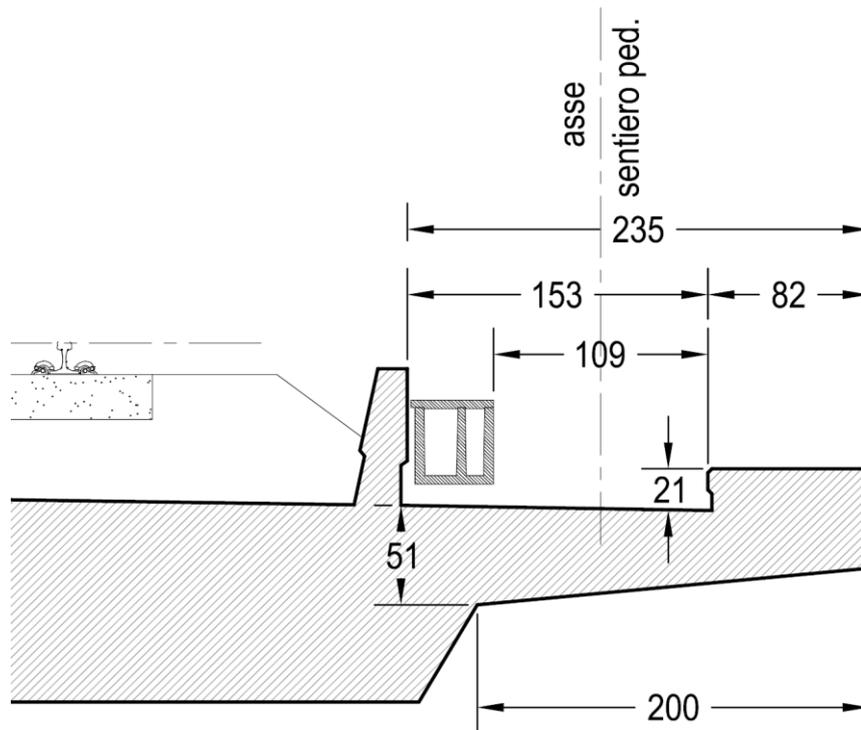
$$t = 2 \times \delta_0 = 1.55 \text{ mm} \quad \text{sghembo massimo}$$

$$t_{lim} = 3.0 \text{ mm} \quad \text{valore limite secondo 1.8.3.2.2.2}$$

$$t / t_{lim} = 0.52 \quad \text{verifica soddisfatta}$$

## 9 VERIFICA DELLO SBALZO TRASVERSALE

Di seguito è riportata la valutazione delle sollecitazioni e le verifiche relative allo sbalzo laterale dell'impalcato, effettuate sulla base dell'analisi dei carichi precedentemente effettuata e relativamente alle combinazioni di carico di seguito specificate.



**Figura 7 – Sbalzo laterale**

### Geometria

|             |      |   |  |
|-------------|------|---|--|
| L =         | 2.00 | m | luce dello sbalzo                      |
| s =         | 0.50 | m | spessore soletta (sezione di incastro) |
| b marciap = | 1.09 | m | larghezza marciapiedi                  |
| b cordolo = | 0.82 | m | larghezza cordolo di estremità         |
| h cordolo = | 0.21 | m | altezza cordolo di estremità           |

## 9.1 SOLLECITAZIONI ELEMENTARI

### Analisi dei carichi

| <u>Peso proprio e permanenti</u> | Volume            | peso spec            | QV      | e   | M        | $\gamma$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
|----------------------------------|-------------------|----------------------|---------|-----|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                  | [m <sup>3</sup> ] | [kN/m <sup>3</sup> ] | [kN/ml] | [m] | [kNm/ml] | -        | -        | -        | -        |
| Peso proprio                     | 1.000             | 25                   | 25      | 1   | 25.0     | 1.35     | -        | -        | -        |
| Cordolo                          | 0.172             | 25                   | 4.305   | 1.5 | 6.5      | 1.35     | -        | -        | -        |
| Canaletta                        | -                 | -                    | -       | -   | -        | 1.5      | -        | -        | -        |
| Veletta (h=1m)                   | -                 | -                    | 1.5     | 2   | 3.0      | 1.5      | -        | -        | -        |
| Barriera a.r. (H=5.4m)           | -                 | -                    | 21.6    | 1.5 | 32.4     | 1.5      | -        | -        | -        |

| <u>Variabili</u>   | q                    | L    | QV      | e     | M        | $\gamma$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
|--------------------|----------------------|------|---------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                    | [kN/m <sup>2</sup> ] | [m]  | [kN/ml] | [m]   | [kNm/ml] | -        | -        | -        | -        |
| Carico marciapiedi | 10.0                 | 1.09 | 10.9    | 0.545 | 5.9      | 1.5      | 0.8      | 0.8      | 0        |

|                 | q                    | h   | QH      | e    | M        | $\gamma$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
|-----------------|----------------------|-----|---------|------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                 | [kN/m <sup>2</sup> ] | [m] | [kN/ml] | [m]  | [kNm/ml] | -        | -        | -        | -        |
| Vento           | 1.91                 | 5.4 | 10.30   | 3.16 | 32.5     | 1.5      | 0.6      | 0.5      | 0        |
| Sovrappressione | 0.22                 | 5.4 | 1.19    | 3.16 | 3.8      | 1.5      | 0.8      | 0.5      | 0        |

## 9.2 COEFFICIENTI DI COMBINAZIONE

|                    | SLU    |        | RARA   |        | FREQUENTE |        | Q. PERMANENTE |        |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|-----------|--------|---------------|--------|
|                    | comb 1 | comb 2 | comb 3 | comb 4 | comb 5    | comb 6 | comb 7        | comb 8 |
| Peso proprio       | 1.35   | 1.35   | 1      | 1      | 1         | 1      | 1             | 1      |
| Cordolo            | 1.35   | 1.35   | 1      | 1      | 1         | 1      | 1             | 1      |
| Canaletta          | 1.5    | 1.5    | 1      | 1      | 1         | 1      | 1             | 1      |
| Veletta            | 1.5    | 1.5    | 1      | 1      | 1         | 1      | 1             | 1      |
| Barriera a.r.      | 1.5    | 1.5    | 1      | 1      | 1         | 1      | 1             | 1      |
| Carico marciapiedi | 1.5    | 1.2    | 1      | 0.8    | 0.8       | 0      | 0             | 0      |
| Vento              | 0.9    | 1.5    | 0.6    | 1      | 0         | 0.5    | 0             | 0      |
| Sovrappressione    | 1.2    | 1.5    | 0.8    | 1      | 0         | 0.5    | 0             | 0      |

### 9.3 SOLLECITAZIONI DI CALCOLO

| Sollecitazioni combinate | SLU    |        | RARA   |        | FREQUENTE |        | Q. PERMANENTE |        |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|-----------|--------|---------------|--------|
|                          | comb 1 | comb 2 | comb 3 | comb 4 | comb 5    | comb 6 | comb 7        | comb 8 |
| QH [kN/ml]               | 11     | 17     | 7      | 11     | 0         | 6      | 0             | 0      |
| M [kNm/ml]               | -138   | -157   | -95    | -108   | -72       | -85    | -67           | -67    |
| QV [kN/ml]               | 91     | 87     | 63     | 61     | 61        | 52     | 52            | 52     |

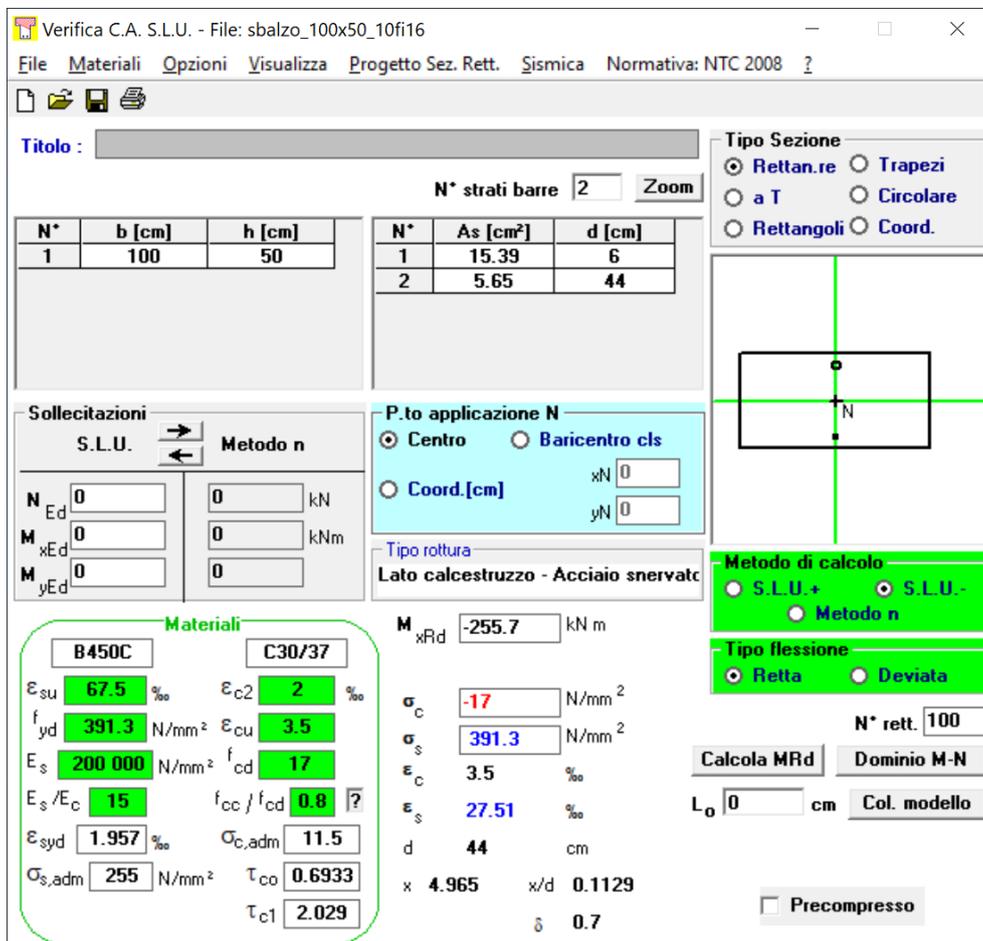
## 9.4 VERIFICA A PRESSOFLESSIONE RETTA

La sezione è soggetta a momento flettente negativo.

Si dispongono le seguenti barre di armatura:

ø14/10 superiori

ø12/20 inferiori



**Titolo :** \_\_\_\_\_

N° strati barre  Zoom

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1  | 100    | 50     | 1  | 15.39    | 6      |
|    |        |        | 2  | 5.65     | 44     |

**Sollecitazioni**  
S.L.U.  Metodo n

N<sub>Ed</sub>   kN  
M<sub>xEd</sub>   kNm  
M<sub>yEd</sub>

**P.to applicazione N**  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
yN

**Materiali**  
B450C C30/37  
ε<sub>su</sub> 67.5 ‰ ε<sub>c2</sub> 2 ‰  
f<sub>yd</sub> 391.3 N/mm² ε<sub>cu</sub> 3.5 ‰  
E<sub>s</sub> 200 000 N/mm² f<sub>cd</sub> 17 ‰  
E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0.8 ?  
ε<sub>syd</sub> 1.957 ‰ σ<sub>c,adm</sub> 11.5  
σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0.6933  
τ<sub>c1</sub> 2.029

M<sub>xRd</sub> -255.7 kNm  
σ<sub>c</sub> -17 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 391.3 N/mm²  
ε<sub>c</sub> 3.5 ‰  
ε<sub>s</sub> 27.51 ‰  
d 44 cm  
x 4.965 x/d 0.1129  
δ 0.7

**Tipo Sezione**  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.

**Metodo di calcolo**  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

**Tipo flessione**  
 Retta  Deviata

N° rett. 100  
Calcola MRd Dominio M-N  
L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello  
 Precompresso

$$M_{Rd} = -255 \text{ kNm/m}$$

$$M_{Ed} = -157 \text{ kN} < M_{Rd}$$

La verifica è soddisfatta.

## 9.5 VERIFICA A TAGLIO

| <i>Verifica a taglio per sezioni rettangolari non armate a taglio (D.M. 17/01/2018)</i> |                     |                 |                   |
|---|---------------------|-----------------|-------------------|
| classe cls  | $R_{ck}$            | 37              | N/mm <sup>2</sup> |
| resist. Caratteristica cilindrica   | $f_{ck}$            | 31              | N/mm <sup>2</sup> |
|   | $f_{cd}$            | 17              |                   |
| coeff. parziale   | $\gamma_c$          | 1.5             |                   |
| larghezza membratura resistene a V  | $b_w$               | 1000            | mm                |
| altezza membratura resistene a V  | $H$                 | 500             | mm                |
| altezza utile   | $d$                 | 450             | mm                |
| area della sezione  | $A_{TOT}$           | 450000          | mm <sup>2</sup>   |
| diámetro ferro longitudinale  | $\phi_l$            | 14              | mm                |
| area armatura   | $A_{sl}$            | 153.9           | mm <sup>2</sup>   |
|   | strato              | 1               |                   |
|   | passo               | 100             | mm                |
|   | $n_f/\text{strato}$ | 10              |                   |
| area armatura totale  | $A_{f\ tot}$        | 1539            | mm <sup>2</sup>   |
| percentuale di armatura   | $\rho_l$            | 0.0034          |                   |
| sforzo assiale dovuto ai carichi o precompressione                                      | $N$                 | 0               | N                 |
| ok  | $\sigma_{cp}$       | 0.00            | N/mm <sup>2</sup> |
|   | $k$                 | 1.67            |                   |
|   | $v_{min}$           | 0.42            |                   |
| taglio resistente   | $V_{Rd1}$           | 197             | kN                |
|   | $V_{Rd2}$           | 188             | kN                |
| taglio sollecitante   | $V_{Ed}$            | 91              | kN                |
| fattore di sicurezza per GR (par. 7.9.5.2.2)  | $\gamma_{Rd}$       | 1               |                   |
|   | $V_{Rd}$            | 197             | kN                |
|   | $V_{Ed}$            | <               | $V_{Rd}$          |
|   |                     | <b>verifica</b> |                   |

La verifica è soddisfatta, non risulta necessaria armatura trasversale resistente a taglio.

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**  
Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 53 di 64 |

## 9.6 VERIFICA A FESSURAZIONE

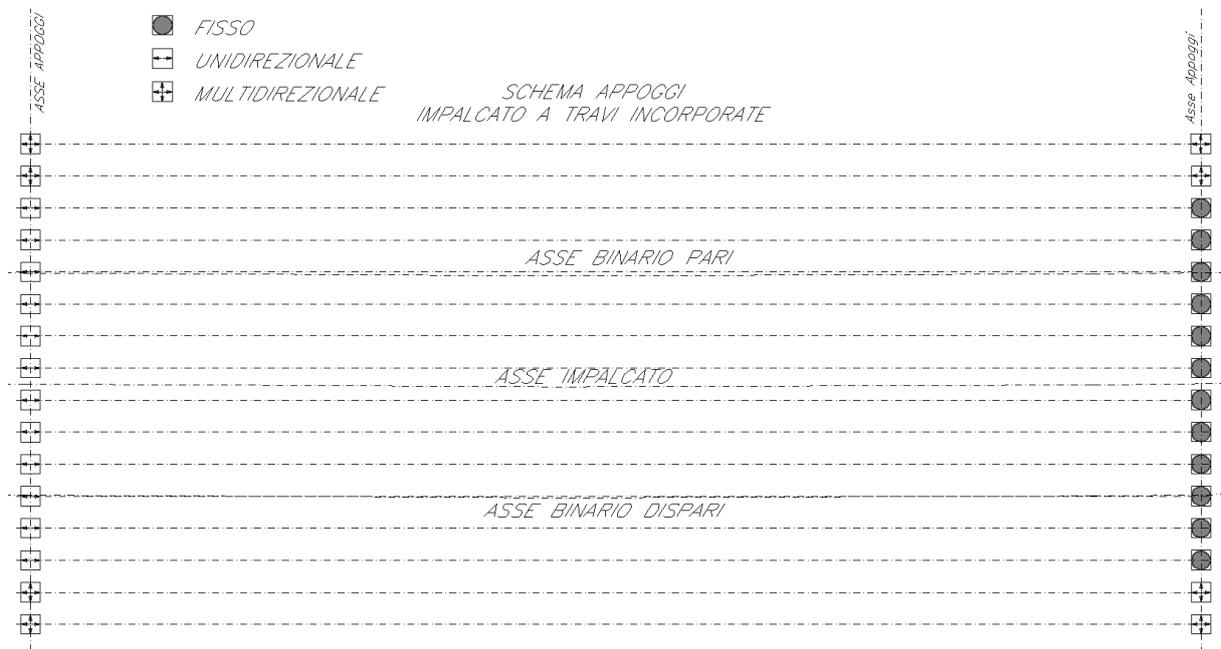
### VERIFICA ALLO STATO LIMITE DI FORMAZIONE DELLE FESSURE

|                                  |            |               |  |                          |               |   |                          |               |    |
|----------------------------------|------------|---------------|--|--------------------------|---------------|---|--------------------------|---------------|----|
| <b>H</b>                         | <b>50</b>  | <b>cm</b>     | Armatura tesa nell'area di cls efficace: |                          |               | Armatura compressa:   |                          |               |    |
| <b>b</b>                         | <b>100</b> | <b>cm</b>     | $A_s$                                    | 15.39                    | $\text{cm}^2$ | $A_s'$  | 5.65                     | $\text{cm}^2$ |    |
| $R_{ck}$                         | <b>37</b>  | MPa           | $y_{G A_s} (*)$                          | 6.00                     | cm            | (*) da lembo teso   | $y_{G A_s'} (*)$         | 44.00         | cm |
| $f_{ctm}$                        | 3.00       | MPa           | <b>x (cm) (*)</b>                        | <b>n<sub>ferri</sub></b> | <b>Φ (mm)</b> | <b>x (cm) (*)</b>   | <b>n<sub>ferri</sub></b> | <b>Φ (mm)</b> |    |
| $f_{cfm}$                        | 3.60       | MPa           | <b>6</b>                                 | <b>10</b>                | <b>14</b>     | <b>44</b>   | <b>5</b>                 | <b>12</b>     |    |
| $f_{ctk}$                        | 2.52       | MPa           |  |                          |               |   |                          |               |    |
| <b>N</b>                         | <b>0</b>   | <b>kN</b>     |  |                          |               |   |                          |               |    |
| <b>M</b>                         | <b>108</b> | <b>kN m</b>   |  |                          |               |   |                          |               |    |
| <b>Sezione interam. reagente</b> |            |               |  |                          |               |   |                          |               |    |
| $y_G$                            | 24.48      | $\text{cm}^3$ | Altezza area di cls efficace:            |                          |               | $h_{A \text{ cls eff}}$                                     | 15.00 cm                 |               |    |
| $A_{ideale}$                     | 5316       | $\text{cm}^2$ | Tensione CLS teso:                       |                          |               | $\sigma_c = -\frac{N}{A_{ideale}} + \frac{M}{W_{ideale}} =$ |                          |               |    |
| $I_{ideale}$                     | 1154195.9  | $\text{cm}^4$ |  |                          |               | <b>2.290 MPa &lt; <math>f_{ctk}</math></b>                  |                          |               |    |
| $W_{ideale}$                     | 47153      | $\text{cm}^3$ |  |                          |               | <b>Non si formano fessure</b>                               |                          |               |    |

## 10 AZIONI SUGLI APPOGGI

Al di sotto delle travi disposte nella fascia centrale dell'impalcato si dispongono appoggi fissi su una pila e unidirezionali longitudinali sull'altra. Sulle rimanenti travi sono previsti appoggi di tipo multidirezionale.

Uno schema in pianta della configurazione degli appoggi si riporta nella sottostante figura.



**Figura 8 – Schema configurazione appoggi**

Di seguito si riportano le azioni elementari, la definizione dei gruppi di carico e la valutazione delle azioni di progetto sulle diverse tipologie di appoggi.

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**  
Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 55 di 64 |

| Carico LM71        |          |              |               |             |              |            | gruppo 1                     |              |               |                | gruppo 3                     |          |              |               |                |       |
|--------------------|----------|--------------|---------------|-------------|--------------|------------|------------------------------|--------------|---------------|----------------|------------------------------|----------|--------------|---------------|----------------|-------|
|                    | Rz<br>kN | R long<br>kN | R trasv<br>kN | e vert<br>m | e orizz<br>m | coeff<br>- | Rz<br>kN                     | R long<br>kN | R trasv<br>kN | M trasv<br>kNm | coeff<br>-                   | Rz<br>kN | R long<br>kN | R trasv<br>kN | M trasv<br>kNm |       |
| <b>LM71 dinam.</b> | 1595     | 0            | 0             | 0           | 2            | 1          | 1595                         | 0            | 0             | 3191           | 1                            | 1595     | 0            | 0             | 3191           |       |
| <b>Frenatura</b>   | 0        | 370          | 0             | 2.00        | 2            | 0.5        | 23                           | 185          | 0             | 46             | 1                            | 0        | 370          | 0             | 0              |       |
| <b>Avviamento</b>  | 0        | 610          | 0             | 2.00        | 2            | 0.5        | 38                           | 305          | 0             | 76             | 1                            | 0        | 610          | 0             | 0              |       |
| <b>Serpeggio</b>   | 0        | 0            | 110           | 2.148       | 0            | 1          | 0                            | 0            | 110           | 236            | 0.5                          | 0        | 0            | 55            | 118            |       |
|                    |          |              |               |             |              |            | gruppo 1                     |              |               |                | gruppo 3                     |          |              |               |                |       |
|                    |          |              |               |             |              |            | Rz<br>kN                     | R long<br>kN | R trasv<br>kN | M trasv<br>kNm |                              | Rz<br>kN | R long<br>kN | R trasv<br>kN | M trasv<br>kNm |       |
|                    |          |              |               |             |              |            | 1634                         | 305          | 110           | 3504           |                              | 1595     | 610          | 55            | 3309           |       |
|                    |          |              |               |             |              |            | 1619                         | 185          | 110           | 3474           |                              | 1595     | 370          | 55            | 3309           |       |
|                    |          |              |               |             |              |            | (M-)gr1, LM71,avviam*        | 1634         | 305           | 110            | -2878                        |          | 1595         | 610           | 55             | -3072 |
|                    |          |              |               |             |              |            | (M-)gr1, LM71,fren*          | 1619         | 185           | 110            | -2908                        |          | 1595         | 370           | 55             | -3072 |
|                    |          |              |               |             |              |            | (* comprensivo di serpeggio) |              |               |                | (* comprensivo di serpeggio) |          |              |               |                |       |
|                    |          |              |               |             |              |            | gruppo 1                     |              |               |                | gruppo 3                     |          |              |               |                |       |
|                    |          |              |               |             |              |            | Rz<br>kN                     | R long<br>kN | R trasv<br>kN | M trasv<br>kNm |                              | Rz<br>kN | R long<br>kN | R trasv<br>kN | M trasv<br>kNm |       |
|                    |          |              |               |             |              |            | 1624                         | 277          | 100           | 3463           |                              | 1589     | 554          | 50            | 3286           |       |
|                    |          |              |               |             |              |            | 1626                         | 294          | 100           | 3467           |                              | 1589     | 588          | 50            | 3286           |       |
|                    |          |              |               |             |              |            | (M-)gr1, SW/2,avviam*        | 1624         | 277           | 100            | -2894                        |          | 1589         | 554           | 50             | -3071 |
|                    |          |              |               |             |              |            | (M-)gr1, SW/2,fren*          | 1626         | 294           | 100            | -2890                        |          | 1589         | 588           | 50             | -3071 |
|                    |          |              |               |             |              |            | (* comprensivo di serpeggio) |              |               |                | (* comprensivo di serpeggio) |          |              |               |                |       |
| <b>Carico SW/2</b> | Rz<br>kN | R long<br>kN | R trasv<br>kN | e vert<br>m | e orizz<br>m | coeff<br>- | Rz<br>kN                     | R long<br>kN | R trasv<br>kN | M trasv<br>kNm | coeff<br>-                   | Rz<br>kN | R long<br>kN | R trasv<br>kN | M trasv<br>kNm |       |
| <b>SW/2 dinam.</b> | 1589     | 0            | 0             | 0           | 2            | 1          | 1589                         | 0            | 0             | 3179           | 1                            | 1589     | 0            | 0             | 3179           |       |
| <b>Frenatura</b>   | 0        | 588          | 0             | 2.00        | 2            | 0.5        | 37                           | 294          | 0             | 74             | 1                            | 0        | 588          | 0             | 0              |       |
| <b>Avviamento</b>  | 0        | 554          | 0             | 2.00        | 2            | 0.5        | 35                           | 277          | 0             | 69             | 1                            | 0        | 554          | 0             | 0              |       |
| <b>Serpeggio</b>   | 0        | 0            | 100           | 2.148       | 0            | 1          | 0                            | 0            | 100           | 215            | 0.5                          | 0        | 0            | 50            | 107            |       |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**  
Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 56 di 64 |

| <b>Azioni statiche e sismiche</b>                                |       |      |  |                |
|--|-------|------|--|----------------|
| Massa sismica trasversale convogli                               |       |      |  | 3343 kN        |
| <b>Massa sismica trasversale totale</b>                          |       |      |  | <b>4758 kN</b> |
| Massa sismica longitudinale convogli                             |       |      |  | 4535 kN        |
| <b>Massa sismica longitudinale totale</b>                        |       |      |  | <b>9085 kN</b> |
| Accelerazione sismica orizzontale                                |       |      |  | 0.313 g        |
| Accelerazione sismica verticale                                  |       |      |  | 0.103 g        |
| Rz   |       |      |  | 490 kN         |
| R long   |       |      |  | 2844 kN        |
| R trasv  |       |      |  | 1489 kN        |
| e vert, LM71-SW/2  |       |      |  | 3.3 m          |
| <i>(quota applicazione centrifuga rispetto baricentro travi)</i> |       |      |  |                |
| coeff. attrito appoggi   |       |      |  | 0.04           |
|  | masse | G1   |  | 2734 kN        |
|  |       | G2   |  | 1355 kN        |
|  |       | LM71 |  | 1634 kN        |
|  |       | SW/2 |  | 1626 kN        |
|  |       |      |  | 7349 kN        |

| carico  | Rz   | R long | R trasv | e   | M trasv |
|---|------|--------|---------|-----|---------|
|   | [kN] | [kN]   | [kN]    | [m] | [kNm]   |
| <b>peso proprio</b>                             | 2734 | 0      | 0       | 0.0 | 0       |
| <b>perman non strutturali (incluso ballast)</b> | 1355 | 0      | 0       | 0.0 | 0       |
| <b>vento</b>                                    | 0    | 0      | 59      | 2.9 | 167     |
| <b>resistenza passiva vincoli</b>               | 0    | 294    | 0       | 0.0 | 0       |
| <b>sismica long (Ex+0.3*Ey+0.3*Ez)</b>          | 147  | 2844   | 447     | 0.7 | 313     |
| <b>sismica trasv (0.3*Ex+Ey+0.3*Ez)</b>         | 147  | 853    | 1489    | 0.7 | 1042    |
| <b>sismica vert (0.3*Ex+0.3*Ey+Ez)</b>          | 490  | 853    | 447     | 0.7 | 313     |



| COEFFICIENTI COMBINAZIONI              | SLV    |        |         |         |         |         |
|--|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
|  | comb 8 | comb 9 | comb 10 | comb 11 | comb 12 | comb 13 |
| Peso Proprio                           | 1      | 1      | 1       | 1       | 1       | 1       |
| Perm non strutturali (incluso ballast) | 1      | 1      | 1       | 1       | 1       | 1       |
| Vento                                  | 0      | 0      | 0       | 0       | 0       | 0       |
| Resistenza passiva vincoli             | 1      | 1      | 1       | 1       | 1       | 1       |
| Sismica Longitudinale                  | 1      | 1      | 0       | 0       | 0       | 0       |
| Sismica Trasversale                    | 0      | 0      | 1       | 1       | 0       | 0       |
| Sismica Verticale                      | 0      | 0      | 0       | 0       | 1       | 1       |
| gr1 LM71,avviamento                    | 0      | 0      | 0.2     | 0       | 0.2     | 0       |
| gr1 LM71,frenatura                     | 0      | 0      | 0       | 0       | 0       | 0       |
| gr3 LM71,avviamento                    | 0.2    | 0.2    | 0       | 0       | 0       | 0       |
| gr3 LM71,frenatura                     | 0      | 0      | 0       | 0       | 0       | 0       |
| gr1 SW/2,avviamento                    | 0      | 0      | 0       | 0.2     | 0       | 0.2     |
| gr1 SW/2,frenatura                     | 0      | 0      | 0       | 0       | 0       | 0       |
| gr3 SW/2,avviamento                    | 0      | 0      | 0       | 0       | 0       | 0       |
| gr3 SW/2,frenatura                     | 0      | 0      | 0       | 0       | 0       | 0       |
| (M-) gr1 LM71,avviamento               | 0      | 0      | 0       | 0       | 0       | 0       |
| (M-) gr1 LM71,frenatura                | 0      | 0      | 0.2     | 0       | 0.2     | 0       |
| (M-) gr3 LM71,avviamento               | 0      | 0      | 0       | 0       | 0       | 0       |
| (M-) gr3 LM71,frenatura                | 0.2    | 0      | 0       | 0       | 0       | 0       |
| (M-) gr1 SW/2,avviamento               | 0      | 0      | 0       | 0       | 0       | 0       |
| (M-) gr1 SW/2,frenatura                | 0      | 0      | 0       | 0.2     | 0       | 0.2     |
| (M-) gr3 SW/2,avviamento               | 0      | 0      | 0       | 0       | 0       | 0       |
| (M-) gr3 SW/2,frenatura                | 0      | 0.2    | 0       | 0       | 0       | 0       |

|               | SLU    |        |        |        |        |        |        |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|               | comb 1 | comb 2 | comb 3 | comb 4 | comb 5 | comb 6 | comb 7 |
| Rz [kN]       | 9496   | 9505   | 9485   | 10439  | 10450  | 10425  | 10341  |
| R long [kN]   | 1009   | 1136   | 977    | 1151   | 1309   | 1111   | 2178   |
| R trasv [kN]  | 344    | 332    | 332    | 372    | 358    | 358    | 205    |
| M trasv [kNm] | 943    | 963    | 923    | 1015   | 1041   | 991    | 496    |

|               | SLV    |        |         |         |         |         |  |
|---------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--|
|               | comb 8 | comb 9 | comb 10 | comb 11 | comb 12 | comb 13 |  |
| Rz [kN]       | 4874   | 4873   | 4887    | 4886    | 5230    | 5229    |  |
| R long [kN]   | 3334   | 3377   | 1245    | 1261    | 1245    | 1261    |  |
| R trasv [kN]  | 469    | 468    | 1533    | 1529    | 491     | 487     |  |
| M trasv [kNm] | 360    | 360    | 1162    | 1157    | 432     | 427     |  |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**  
Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 59 di 64 |

| <b>FILA FISSA</b>               |              |      |               |              |
|---------------------------------|--------------|------|---------------|--------------|
| numero appoggi fissi            | 14           |      |               |              |
| numero appoggi unidirezionali   | 0            |      |               |              |
| numero appoggi multidirezionali | 4            |      |               |              |
| num totale appoggi fila         | 18           |      |               |              |
| numero appoggi fissi trasv      | 14           |      |               |              |
| appoggio                        | e trasv      | tipo | e^2           | e app fisso  |
| 1                               | 4.335        | M    | 18.79         | 0            |
| 2                               | 3.825        | M    | 14.63         | 0            |
| 3                               | 3.315        | F    | 10.99         | 3.315        |
| 4                               | 2.805        | F    | 7.87          | 2.805        |
| 5                               | 2.295        | F    | 5.27          | 2.295        |
| 6                               | 1.785        | F    | 3.19          | 1.785        |
| 7                               | 1.275        | F    | 1.63          | 1.275        |
| 8                               | 0.765        | F    | 0.59          | 0.765        |
| 9                               | 0.255        | F    | 0.07          | 0.255        |
| 10                              | -0.255       | F    | 0.07          | -0.255       |
| 11                              | -0.765       | F    | 0.59          | -0.765       |
| 12                              | -1.275       | F    | 1.63          | -1.275       |
| 13                              | -1.785       | F    | 3.19          | -1.785       |
| 14                              | -2.295       | F    | 5.27          | -2.295       |
| 15                              | -2.805       | F    | 7.87          | -2.805       |
| 16                              | -3.315       | F    | 10.99         | -3.315       |
| 17                              | -3.825       | M    | 14.63         | 0            |
| 18                              | -4.335       | M    | 18.79         | 0            |
|                                 |              |      |               |              |
|                                 |              |      |               |              |
|                                 | <b>4.335</b> |      | <b>126.02</b> | <b>3.315</b> |
|                                 |              |      |               |              |
| <b>INTERASSE APPOGGI</b>        | <b>0.51</b>  | m    |               |              |

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**  
Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 60 di 64 |

| <b>FILA MOBILE</b>              |             |      |                |             |
|---------------------------------|-------------|------|----------------|-------------|
| numero appoggi fissi            | 0           |      |                |             |
| numero appoggi unidirezionali   | 14          |      |                |             |
| numero appoggi multidirezionali | 4           |      |                |             |
| num totale appoggi fila         | 18          |      |                |             |
| numero appoggi fissi trasv      | 14          |      |                |             |
| appoggio                        | e trasv     | tipo | e <sup>2</sup> | e app fisso |
| 1                               | 4.08        | M    | 16.65          | 0           |
| 2                               | 3.57        | M    | 12.74          | 0           |
| 3                               | 3.06        | U    | 9.36           | 3.06        |
| 4                               | 2.55        | U    | 6.50           | 2.55        |
| 5                               | 2.04        | U    | 4.16           | 2.04        |
| 6                               | 1.53        | U    | 2.34           | 1.53        |
| 7                               | 1.02        | U    | 1.04           | 1.02        |
| 8                               | 0.51        | U    | 0.26           | 0.51        |
| 9                               | 0           | U    | 0.00           | 0           |
| 10                              | 0           | U    | 0.00           | 0           |
| 11                              | -0.51       | U    | 0.26           | -0.51       |
| 12                              | -1.02       | U    | 1.04           | -1.02       |
| 13                              | -1.53       | U    | 2.34           | -1.53       |
| 14                              | -2.04       | U    | 4.16           | -2.04       |
| 15                              | -2.55       | U    | 6.50           | -2.55       |
| 16                              | -3.06       | U    | 9.36           | -3.06       |
| 17                              | -3.57       | M    | 12.74          | 0           |
| 18                              | -4.08       | M    | 16.65          | 0           |
|                                 |             |      |                |             |
|                                 |             |      |                |             |
|                                 | <b>4.08</b> |      | <b>106.12</b>  | <b>3.06</b> |

A seguire si riportano i valori delle sollecitazioni combinati e i valori adottati per la resistenza dei dispositivi di appoggio.

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**  
Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

|          |         |          |             |      |          |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 61 di 64 |

| APPOGGI FISSI | SLU    |        |         |         |         |         |        |
|---------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|
|               | comb 1 | comb 2 | comb 3  | comb 4  | comb 5  | comb 6  | comb 7 |
| Rz [kN]       | 552    | 553    | 551     | 607     | 608     | 605     | 588    |
| R long [kN]   | 72     | 81     | 70      | 82      | 94      | 79      | 156    |
| R trasv [kN]  | 25     | 24     | 24      | 27      | 26      | 26      | 15     |
|               | SLV    |        |         |         |         |         |        |
|               | comb 8 | comb 9 | comb 10 | comb 11 | comb 12 | comb 13 |        |
| Rz [kN]       | 280    | 280    | 302     | 302     | 302     | 302     | 302    |
| R long [kN]   | 238    | 241    | 89      | 90      | 89      | 90      | 90     |
| R trasv [kN]  | 33     | 33     | 110     | 109     | 35      | 35      |        |

$R_z = R_z / \text{num appoggi fila} + M_z / e \text{ app unid} / \text{num app unid della fila}$

**Rz max= 625 kN      Rlong max = 250 kN      Rtrasv max = 125 kN (valori approssimati per eccesso)**

| APPOGGI UNIDIREZ | SLU    |        |         |         |         |         |        |
|------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|
|                  | comb 1 | comb 2 | comb 3  | comb 4  | comb 5  | comb 6  | comb 7 |
| Rz [kN]          | 552    | 553    | 551     | 607     | 608     | 605     | 588    |
| R long [kN]      | 0      | 0      | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      |
| R trasv [kN]     | 25     | 24     | 24      | 27      | 26      | 26      | 15     |
|                  | SLV    |        |         |         |         |         |        |
|                  | comb 8 | comb 9 | comb 10 | comb 11 | comb 12 | comb 13 |        |
| Rz [kN]          | 280    | 280    | 302     | 302     | 302     | 302     | 302    |
| R long [kN]      | 0      | 0      | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      |
| R trasv [kN]     | 33     | 33     | 110     | 109     | 35      | 35      |        |

$R_z = R_z / \text{num appoggi fila} + M_z / e \text{ app unid} / \text{num app multid della fila}$

**Rz max= 625 kN      Rtrasv max = 150 kN (valori approssimati per eccesso)**

| APPOGGI MOBILI | SLU    |        |         |         |         |         |        |
|----------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|
|                | comb 1 | comb 2 | comb 3  | comb 4  | comb 5  | comb 6  | comb 7 |
| Rz [kN]        | 560    | 561    | 559     | 615     | 616     | 613     | 592    |
| R long [kN]    | 0      | 0      | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      |
| R trasv [kN]   | 0      | 0      | 0       | 0       | 0       | 0       | 0      |
|                | SLV    |        |         |         |         |         |        |
|                | comb 8 | comb 9 | comb 10 | comb 11 | comb 12 | comb 13 |        |
| Rz [kN]        | 283    | 283    | 311     | 311     | 305     | 305     |        |
| R long [kN]    | 0      | 0      | 0       | 0       | 0       | 0       |        |
| R trasv [kN]   | 0      | 0      | 0       | 0       | 0       | 0       |        |

**Rz max= 625 kN      (valori approssimati per eccesso)**

## 10.1 VERIFICHE PER GLI APPARECCHI DI APPOGGIO

Come riportato nel MdP sez II, al paragrafo 2.5.2.1.5, per ponti e viadotti costituiti da una serie di travi semplicemente appoggiate di uguale luce l'entità dell'escursione totale dei giunti e degli apparecchi d'appoggio può essere valutata nella seguente maniera:

$$E_L = k_1 \cdot (E_1 + E_2 + E_3) = k_1 \cdot (2 \cdot D_t + 4 \cdot d_{Ed} \cdot k_2 + 2 \cdot d_{eg}) \quad \text{in direzione longitudinale}$$

E1 = spostamento dovuto alla variazione termica uniforme;

E2 = spostamento dovuto alla risposta della struttura all'azione sismica;

E3 = spostamento dovuto all'azione sismica fra le fondazioni di strutture non collegate;

k1= 0,45 coefficiente che tiene conto della non contemporaneità dei valori massimi corrispondenti a ciascun evento singolo;

k2= 0,55 coefficiente legato alla probabilità di moto in controfase di due pile adiacenti;

dEd = è lo spostamento relativo totale tra le parti, pari allo spostamento dE prodotto dall'azione sismica di progetto, calcolato come indicato nel paragrafo 7.3.3.3 del DM 17.01.2018;

deg = è lo spostamento relativo tra le parti dovuto agli spostamenti relativi del terreno, da valutare secondo il paragrafo 3.2.3.3 del DM 17.01.2018 che di seguito si riporta.

Per il calcolo dello spostamento dovuto alla variazione termica uniforme di 15°C (si incrementa la variazione termica del 50%).

$$D_t = 0.0043 \text{ m}$$

L'impalcato poggia su due spalle, per cui:

$$d_{Ed} = 0$$

Di seguito si esplicitano i calcoli per la determinazione dello spostamento dovuto all'azione sismica fra le fondazioni delle spalle.

$$deg = 0.025 \cdot a_g \cdot S \cdot T_C \cdot T_D = 0.025 \cdot 0.086 \cdot 1.2 \cdot 0.43 \cdot 1.814 = 0.002$$

Da cui si ottiene:

$$E_L = k_1 \cdot (E_1 + E_2 + E_3) = k_1 \cdot (2 \cdot D_t + 4 \cdot d_{Ed} \cdot k_2 + 2 \cdot deg) = 0.45 \cdot (2 \cdot 0.0043 + 4 \cdot 0 \cdot 0.55 + 2 \cdot 0.002) = 0.0057 \text{ m}$$

$$= 5.7 \text{ mm}$$

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 63 di 64 |

Per garantire un valore minimo di escursione, in funzione della sismicità del sito, il valore EL dovrà essere assunto non minore di:

$$E_L \geq 3,30 \cdot \frac{L}{1000} + 0,10 \quad \text{e} \quad E_L \geq 0,15m \quad \text{per le zone classificate sismiche con } a_g(\text{SLV}) \geq 0,25 \text{ g}$$

$$E_L \geq 2,30 \cdot \frac{L}{1000} + 0,073 \quad \text{e} \quad E_L \geq 0,10m \quad \text{per le zone classificate sismiche con } a_g(\text{SLV}) < 0,25 \text{ g}$$

L = lunghezza del ponte (m).

$$E_L \geq 2.3 \cdot 16 / 1000 + 0.0073 = 0.110m$$

#### 10.1.1 CORSA FRGLI APPARECCHI D'APPOGGIO MOBILI

La corsa degli apparecchi d'appoggio mobili deve essere non inferiore a  $\pm(EL/2 + EL/8)$  con un minimo di  $\pm(EL/2 + 15 \text{ mm})$ :

$$\pm EL/2 + EL/8 = \pm 68.6 \text{ mm}$$

$$\pm EL/2 + 15 \text{ mm} = \pm 69.9 \text{ mm}$$

#### 10.1.2 ESCURSIONE DEI GIUNTI

Il giunto fra le testate di due travi adiacenti dovrà consentire una escursione totale pari a:

$$\pm (EL/2 + 10 \text{ mm}) = \pm 64.9 \text{ mm}$$

#### 10.1.3 AMPIEZZA DEI VARCHI

Il varco da prevedere fra le testate degli impalcato adiacenti, a temperatura media ambiente, dovrà essere non inferiore a:

$$V \geq \pm EL/2 + V_o = \pm 74.9 \text{ mm}$$

Dove  $V_o = 20 \text{ mm}$

**VI01 - Ponte ferroviario al km 38+650**

Relazione di calcolo impalcato - Doppio binario

| COMMESSA | LOTTO   | CODIFICA | DOCUMENTO   | REV. | FOGLIO   |
|----------|---------|----------|-------------|------|----------|
| NR1J     | 01 D 29 | CL       | VI01 07 001 | B    | 64 di 64 |

## 11 INCIDENZE

### Impalcato

|                                  |                              |   |
|----------------------------------|------------------------------|---|
| Spessore medio                   | 1.0 m                        |   |
| Armatura longitudinale superiore | 1 $\varnothing$ 20mm / 20cm  | (2.466 kg/m x 100cm/20cm = 12.3 kg/m <sup>2</sup> )                     |
| Armatura longitudinale inferiore | 1 $\varnothing$ 20mm / 20cm  | (2.466 kg/m x 100cm/20cm = 12.3 kg/m <sup>2</sup> )                     |
| Armatura trasversale superiore   | 1 $\varnothing$ 20mm / 20cm  | (2.466 kg/m x 100cm/20cm = 12.3 kg/m <sup>2</sup> )                     |
| Armatura trasversale inferiore   | 1 $\varnothing$ 24mm / 20cm  | (3.551 kg/m x 100cm/20cm = 17.8 kg/m <sup>2</sup> )                     |
| Staffe tra HE (i = 0.51m)        | 1 $\varnothing$ 12/40 L=2.2m | (0.888 kg/m * 2.2 m x 100cm/40cm * 100cm/51cm = 9.6 kg/m <sup>2</sup> ) |

Considerando il 15% in più per la di sovrapposizioni, si ottiene la seguente incidenza:

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| Incidenza media (kg/m <sup>2</sup> ) | $1.15 \times (12.3+12.3+12.3+17.8+9.6) \text{ kg/m}^2 = 73.9 \text{ kg/m}^2$            |
| Incidenza media (kg/m <sup>3</sup> ) | $73.9 \text{ kg/m}^2 / 1 \text{ m} = 73.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow 75 \text{ kg/m}^3$ |

### Sbalzi laterali

|                                  |                             |  |
|----------------------------------|-----------------------------|--|
| Spessore medio                   | 0.45 m                      |  |
| Armatura longitudinale superiore | 1 $\varnothing$ 12mm / 20cm | (0.888 kg/m x 100cm/20cm = 4.4 kg/m <sup>2</sup> )   |
| Armatura longitudinale inferiore | 1 $\varnothing$ 12mm / 20cm | (0.888 kg/m x 100cm/20cm = 4.4 kg/m <sup>2</sup> )   |
| Armatura trasversale superiore   | 1 $\varnothing$ 14mm / 10cm | (1.208 kg/m x 100cm/10cm = 12.08 kg/m <sup>2</sup> ) |
| Armatura trasversale inferiore   | 1 $\varnothing$ 12mm / 20cm | (0.888 kg/m x 100cm/20cm = 4.4 kg/m <sup>2</sup> )   |

Considerando il 15% in più per la presenza di staffe e sovrapposizioni, si ottiene la seguente incidenza:

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| Incidenza media (kg/m <sup>2</sup> ) | $1.15 \times (4.4+4.4+12.08+4.4) \text{ kg/m}^2 = 29.1 \text{ kg/m}^2$                     |
| Incidenza media (kg/m <sup>3</sup> ) | $29.1 \text{ kg/m}^2 / 0.45 \text{ m} = 64.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow 65 \text{ kg/m}^3$ |