

# PROVINCIA DI BOLOGNA

*Settore Lavori Pubblici*

|   |  |  |            |
|---|--|--|------------|
| STRADA  | <b>S.P. 569 "DI VIGNOLA"</b>   | <b>Servizio<br/>Progettazione<br/>e Costruzioni<br/>Stradali</b>   |            |
| LAVORO  | <b>COMPLETAMENTO DELLA VARIANTE GENERALE ALLA<br/>S.P. 569 E VARIANTE ALLA S.P. 27 E ALLA S.P. 78 NEI<br/>COMUNI DI CREPELLANO E BAZZANO</b>   | DATA AGOSTO 2013   |            |
| ELABORATO   | RELAZIONI E CALCOLI STRUTTURE<br>OPERE D'ARTE MINORI<br>VARIANTE S.P. 27 "VALLE DEL SAMOGGIA"<br>I TRATTO - (DAL KM 7+100 ALLA ROTATORIA SULL'ATTUALE S.P. 569)<br>SOTTOPASSO RIO CASSOLA E PASSAGGIO AGRICOLO pk. 0+132<br>RELAZIONE DI CALCOLO | N.<br><b>B.3.1.2</b>   | SCALA<br>- |
| PROGETTAZIONE GENERALE  | PROGETTISTA  | RIFERIMENTO :  |            |
| Geom. Emanuele Tracchi<br>Dott. Ing. Chiara Ferrari<br>P.i.e. Stefano Romagnoli<br>Geom. Federico Vannucchi | Dott. Ing. Marco Ferrarini   | <b>PROGETTO ESECUTIVO</b>  |            |
| IL DIRIGENTE DEL SERVIZIO<br>RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO<br>Dott. Ing. Pietro Luminasi              |  | PROGETTAZIONE STRUTTURALE<br><br>Dott. Ing. Gianfranco Marchi<br>Dott. Ing. Stefano Pedriell<br>Sez. A, Anno Iscr. 1974<br>N° 342<br>LAUREA SPECIALISTICA<br>Sezione A<br>revisione<br>N° 342<br>per le progettazioni Prot. 2007/M2/31<br>Settore Lavori Pubblici, Industriale, Edilizia |            |
|   |  | 2  | 21/01/2014 |
|   |  | 0  | 29/08/2013 |
|   |  | emissione  |            |
|   |  | REVISIONE  | DATA       |
|   |  |  | MODIFICA   |

QUESTO DISEGNO E LA RELATIVA INVENZIONE SONO DI PROPRIETA' DELL'AMMINISTRAZIONE  
NON NE E' CONSENTITO L'UTILIZZO SE NON SU ESPlicita AUTORIZZAZIONE  
OGNI DIRITTO A TALE RIGUARDO E' ESPRESSAMENTE RISERVATO ED ESCLUSIVO



**PROGETTO DI COMPLETAMENTO DELLA VARIANTE  
GENERALE ALLA S.P. 569 DA VIA LUNGA IN COMUNE DI  
CREPELLANO ALLA S.P. 78 IN COMUNE DI BAZZANO E  
REALIZZAZIONE DI VARIANTI STRADALI ALLA S.P. 27  
"VALLE DEL SAMOGGIA" E S.P. 78 "CASTELFRANCO-  
MONTEVEGLIO"**

**B) RELAZIONI E CALCOLI STRUTTURE**

**3. Opere d'arte minori**

**Variante S.P.n° 27 "Valle del Samoggia" – I Tratto – (dal  
km 7+100 alla rotatoria sull'attuale S.P. 569) Sottopasso  
rio Cassola e passaggio agricolo (pk 0+132)  
(OPERA G17)**

**RELAZIONE DI CALCOLO**

|        |                |
|--------|----------------|
| Codice | S13114-B.3.1.2 |
|--------|----------------|

| Rev. | Data       | Redatto  | Controllato  |
|------|------------|----------|--------------|
| 0    | 29.08.2013 | S. Bondi | S. Pedrielli |
| 1    | 16.12.2013 | S. Bondi | S. Pedrielli |
| 2    | 21.01.2014 | S. Bondi | S. Pedrielli |

| Approvato |
|-----------|
| G. Marchi |
| G. Marchi |
| G. Marchi |



CERT-16254-2005-AQ-  
BOL-SINCERT  
Mod 2 Rev.2 10/01/2012

Sede Principale:  
Viale Baccarini, 29  
48018 FAENZA (RA)  
Tel. 0546 663423/56  
Fax 0546 663428

C.F./P.IVA/Registro Imprese RA  
02058800398

Sede di Bologna:  
Via Zacconi, 16  
40127 BOLOGNA (BO)  
Tel. 051 245663  
Fax 051 242251

CAPITALE SOCIALE  
€ 105 000,00 i.v.

Sede di Santarcangelo:  
Via Andrea Costa, 115  
47822 SANTARCANGELO DI ROMAGNA (RN)  
Tel. 0541 1832933  
Fax 0541 1832936

Web: [www.enser.it](http://www.enser.it)  
E-Mail: [enser@enser.it](mailto:enser@enser.it)  
P.E.C.: [ensersrl-ra@legalmail.it](mailto:ensersrl-ra@legalmail.it)



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

## INDICE

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1.</b>  | <b>ILLUSTRAZIONE SINTETICA DEGLI ELEMENTI ESSENZIALI DEL PROGETTO STRUTTURALE .....</b>       | <b>9</b>  |
| 1.1        | PREMESSA E SCOPO DEL DOCUMENTO .....  | 9         |
| 1.2        | RIFERIMENTI NORMATIVI.....  | 9         |
| 1.3        | MATERIALI UTILIZZATI .....  | 10        |
| 1.3.1      | Calcestruzzo per strutture prefabbricate .....  | 10        |
| 1.3.2      | Calcestruzzo per opere in elevazione.....   | 10        |
| 1.3.3      | Calcestruzzo per impalcati .....  | 11        |
| 1.3.4      | Calcestruzzo per pali di fondazione .....   | 11        |
| 1.3.5      | Acciaio per barre di armatura .....   | 12        |
| 1.3.6      | Acciaio armonico per trefoli.....   | 12        |
| <b>2.</b>  | <b>DESCRIZIONE DEL MANUFATTO .....</b>  | <b>13</b> |
| 2.1        | STRATIGRAFIA .....  | 15        |
| <b>3.</b>  | <b>CRITERI DI CALCOLO .....</b>   | <b>16</b> |
| 3.1        | CALCOLO DELLE SPINTE SUI PARAMENTI VERTICALI.....   | 16        |
| 3.2        | SPINTE ATTIVE IN CONDIZIONI STATICHE .....  | 17        |
| 3.2.1      | Spinte a riposo in condizioni statiche.....   | 17        |
| 3.2.2      | Spinte attive in condizioni sismiche.....   | 18        |
| 3.2.2.1    | Rilevato asciutto.....  | 18        |
| 3.2.2.2    | Rilevato saturo a grana fine (dinamicamente impervio: $k < 5 \cdot 10^{-4}$ m/s) .....        | 19        |
| 3.2.2.3    | Rilevato saturo a grana grossa (dinamicamente permeabile: $k \geq 5 \cdot 10^{-4}$ m/s) ..... | 19        |
| 3.2.2.4    | Rilevato parzialmente immerso .....   | 19        |
| 3.2.2.5    | Punto di applicazione delle spinte attive sismiche .....                                      | 20        |
| 3.2.2.6    | Schema di carico per portali.....   | 21        |
| 3.2.3      | Sovraspinte sismiche su muri non in grado di spostarsi .....                                  | 22        |
| 3.3        | CRITERI DI MODELLAZIONE DEL TERRENO .....   | 22        |
| 3.4        | CRITERI E DEFINIZIONE DELL'AZIONE SISMICA .....   | 24        |
| 3.4.1      | Metodi di analisi .....   | 26        |
| <b>3.5</b> | <b>FENOMENI DI FATICA .....</b>   | <b>27</b> |
| 3.6        | CRITERI DI CALCOLO DEI PALI DI FONDAZIONE.....  | 28        |
| 3.6.1      | Capacità portante del palo singolo soggetto a carichi assiali .....                           | 28        |
| 3.6.1.1    | Terreni a comportamento prevalentemente coesivo .....   | 29        |
| 3.6.1.2    | Terreni a comportamento prevalentemente incoerente.....                                       | 30        |
| 3.6.2      | Capacità portante dei pali in gruppo soggetti a carichi assiali .....                         | 32        |
| 3.6.2.1    | Terreni coesivi .....   | 32        |
| 3.6.2.2    | Terreni incoerenti .....  | 34        |
| 3.6.3      | Curve di capacità portante .....  | 35        |
| <b>4.</b>  | <b>AZIONI .....</b>   | <b>37</b> |
| 4.1        | CARICHI PERMANENTI STRUTTURALI $G_1$ .....  | 37        |
| 4.2        | CARICHI PERMANENTI PORTATI $G_2$ .....  | 37        |
| 4.3        | SPINTA DELLE TERRE SU SPALLE E MURI D'ALA $G3\_T$ .....                                       | 37        |
| 4.4        | SPINTA DELLE TERRE DOVUTA AL SOVRACCARICO DA TRAFFICO $G3\_Q$ .....                           | 37        |
| 4.5        | AZIONI VARIABILI DA TRAFFICO $Q_T$ .....  | 38        |
| 4.6        | AZIONE LONGITUDINALE DI FRENAMENTO $Q_3$ .....  | 39        |
| <b>4.7</b> | <b>AZIONE SULLE BARRIERE DI SICUREZZA: URTO DEL VEICOLO IN SVIO <math>Q_8</math> .....</b>    | <b>39</b> |

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 4.8       | SPINTA SISMICA DELLE TERRE E .....  | 40        |
| 4.9       | INERZIA DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI E NON STRUTTURALI IN CONDIZIONE SISMICA .....        | 40        |
| 4.10      | <b>DEFORMAZIONI IMPRESSE</b> .....  | 40        |
| 4.10.1    | <i>Distorsioni e presollecitazioni di progetto</i> .....                                | 40        |
| 4.10.2    | <i>Effetti reologici: ritiro e viscosità; variazioni termiche</i> .....                 | 40        |
| 4.10.3    | <i>Cedimenti vincolari</i> .....  | 40        |
| <b>5.</b> | <b>COMBINAZIONI DI CARICO</b> .....   | <b>41</b> |
| 5.1       | COMBINAZIONI PER LA VERIFICA ALLO SLU .....   | 41        |
| 5.2       | COMBINAZIONI PER LA VERIFICA ALLO SLE .....   | 42        |
| 5.3       | COMBINAZIONI PER LA CONDIZIONE SISMICA .....  | 43        |
| <b>6.</b> | <b>CRITERI DI CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI</b> .....                                    | <b>44</b> |
| <b>7.</b> | <b>CRITERI PER LE VERIFICHE A FESSURAZIONE E TENSIONALI</b> .....                       | <b>45</b> |
| <b>8.</b> | <b>MODELLO DI CALCOLO</b> .....   | <b>47</b> |
| 8.1       | AZIONI APPLICATE AL MODELLO DI CALCOLO .....  | 48        |
| 8.1.1     | <i>Carichi permanenti strutturali <math>g_2</math></i> .....                            | 48        |
| 8.1.2     | <i>Carichi permanenti portati <math>g_2</math></i> .....                                | 48        |
| 8.1.3     | <i>Spinta delle terre su spalle e muri d'ala <math>g_3_t</math></i> .....               | 48        |
| 8.1.4     | <i>Spinta delle terre dovuta al sovraccarico <math>g_3_q</math></i> .....               | 49        |
| 8.1.5     | <i>Azioni variabili da traffico <math>q_t</math></i> .....                              | 50        |
| 8.1.6     | <i>Azione longitudinale di frenamento <math>q_3</math></i> .....                        | 52        |
| 8.1.7     | <i>Spinta sismica delle terre E</i> .....   | 52        |
| 8.1.8     | <i>Inerzia degli elementi strutturali e non strutturali in condizione sismica</i> ..... | 53        |
| 8.1.8.1   | <b>Componente verticale</b> .....   | 54        |
| 8.1.8.2   | <b>Eccentricità accidentale</b> .....   | 55        |
| 8.2       | COMBINAZIONI DI CARICO .....  | 57        |
| 8.2.1     | <i>Casi di Carico</i> .....   | 57        |
| 8.2.2     | <i>Combinazioni SLU (STR)</i> .....   | 58        |
| 8.2.3     | <i>Combinazioni SLE</i> .....   | 61        |
| 8.2.4     | <i>Combinazioni SLV</i> .....   | 62        |
| 8.2.5     | <i>Combinazioni SLU (GEO)</i> .....   | 63        |
| 8.3       | <b>DEFORMAZIONI</b> .....   | 64        |
| 8.4       | SOLLECITAZIONI .....  | 64        |
| 8.4.1     | <i>Fase I</i> .....   | 64        |
| 8.4.3.1   | <i>Impalcato e spalle</i> .....   | 65        |
| 8.4.3.2   | <i>Pali</i> .....   | 73        |
| <b>9.</b> | <b>VERIFICHE</b> .....  | <b>76</b> |
| 9.1       | TRAVI PREFABBRICATE E IMPALCATO .....   | 76        |
| 9.1.1     | <i>Geometria della trave in C.A:P. e della trave omogeneizzata</i> .....                | 76        |
| 9.1.2     | <i>Calcolo delle perdite di precompressione</i> .....                                   | 77        |
| 9.1.3     | <i>Riepilogo armatura impalcato (getto in opera e travi prefabbricate)</i> .....        | 77        |
| 9.1.4     | <i>Verifica a momento flettente (SLU e SLV)</i> .....                                   | 78        |
| 9.1.4.1   | <i>Sezione di appoggio</i> .....  | 78        |
| 9.1.4.2   | <i>Sezione di appoggio (armatura trasversale)</i> .....                                 | 79        |
| 9.1.4.3   | <i>Sezione di prima precompressione</i> .....   | 80        |
| 9.1.4.4   | <i>Sezione di mezzeria</i> .....  | 81        |
| 9.1.4.5   | <i>Sezione di mezzeria (armatura trasversale)</i> .....                                 | 82        |
| 9.1.5     | <i>Verifica a taglio (SLU)</i> .....  | 83        |
| 9.1.5.1   | <i>Fase I</i> .....   | 83        |
| 9.1.5.2   | <i>Fase finale</i> .....  | 84        |

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| 9.1.6     | Verifica delle tensioni nel conglomerato cementizio all'atto del tiro (SLE) ..... | 87  |
| 9.1.7     | Tensioni nella trave in C.A.P. in fase I .....                                    | 88  |
| 9.1.8     | Tensioni in combinazione rara .....   | 89  |
| 9.1.9     | Tensioni in combinazione quasi permanente.....                                    | 91  |
| 9.1.10    | Verifiche allo stato limite di fessurazione .....                                 | 92  |
| 9.1.11    | Verifiche allo stato limite di deformazione .....                                 | 94  |
| 9.2       | SPALLE E MURI D'ALA .....   | 94  |
| 9.2.1     | Riepilogo armatura .....  | 94  |
| 9.2.2     | Verifica a momento flettente (SLU e SLV) .....                                    | 95  |
| 9.2.2.1   | Spalle - Armatura verticale .....   | 95  |
| 9.2.2.2   | Spalle - Armatura orizzontale.....  | 97  |
| 9.2.2.3   | Muri d'ala - Armatura verticale.....  | 99  |
| 9.2.2.4   | Muri d'ala - Armatura orizzontale.....  | 101 |
| 9.2.3     | Verifica a taglio (SLU e SLV) .....   | 103 |
| 9.2.3.1   | Spalle - Armatura verticale .....   | 103 |
| 9.2.3.2   | Spalle - Armatura orizzontale.....  | 105 |
| 9.2.3.3   | Muri d'ala - Armatura verticale.....  | 107 |
| 9.2.3.4   | Muri d'ala - Armatura orizzontale.....  | 109 |
| 9.2.4     | Verifica delle tensioni massime in esercizio (SLE).....                           | 111 |
| 9.2.5     | Verifiche allo stato limite di fessurazione (SLE).....                            | 111 |
| 9.3       | PALI .....  | 112 |
| 9.3.1     | Verifiche a presso-flessione (SLU e SLV).....                                     | 115 |
| 9.3.2     | Verifiche a taglio (SLU e SLV).....   | 115 |
| 9.3.3     | Verifiche di capacità portante .....  | 116 |
| 9.3.3.1   | Singolo palo.....   | 116 |
| 9.3.3.2   | Pali in gruppo.....   | 118 |
| 9.3.3.3   | Valutazione dei cedimenti .....   | 119 |
| 9.3.3.3.1 | Palo singolo .....  | 119 |
| 9.3.3.3.2 | Pali in gruppo.....   | 121 |
| 9.4       | CORDOLO IMPALCATO .....   | 121 |
| 9.4.1     | Azioni, combinazioni e sollecitazioni di progetto .....                           | 122 |
| 9.4.1.1   | Urto.....   | 122 |
| 9.4.2     | Verifiche.....  | 123 |
| 9.4.2.1   | Verifica a tensoflessione .....   | 124 |
| 9.4.3     | Verifica a taglio .....   | 125 |

## INDICE DELLE TABELLE

|   |    |
|---|----|
| TABELLA 1.1: ELENCO ELABORATI GRAFICI .....   | 9  |
| TABELLA 1.2: CARATTERISTICHE CONGLOMERATO CEMENTIZIO PER STRUTTURE PREFABBRICATE. ....                    | 10 |
| TABELLA 1.3: CARATTERISTICHE CONGLOMERATO CEMENTIZIO PER OPERE IN ELEVAZIONE GETTATE IN OPERA. ....       | 10 |
| TABELLA 1.4: CARATTERISTICHE CONGLOMERATO CEMENTIZIO PER IMPALCATI GETTATI IN OPERA. ....                 | 11 |
| TABELLA 1.5: CARATTERISTICHE CONGLOMERATO CEMENTIZIO PER PALI DI FONDAZIONE. ....                         | 11 |
| TABELLA 1.6: CARATTERISTICHE ACCIAIO PER ARMATURA. ....   | 12 |
| TABELLA 1.7: CARATTERISTICHE ACCIAIO ARMONICO PER TREFOLI. ....   | 12 |
| TABELLA 2.1: PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI. ....  | 15 |
| TABELLA 3.1: VALORI DEL COEFFICIENTE D'USO $C_u$ . ....   | 25 |
| TABELLA 3.2: PARAMETRI SPETTRALI DEL SITO PER IL SOTTOPASSO SUL RIO CASSOLA. ....                         | 26 |
| TABELLA 3.3: VALORI INDICATIVI DELL'ADESIONE $Q_a = A C_0$ PER PALI IN TERRENI COESIVI (AGI – 1984) ..... | 30 |
| TABELLA 3.4: COEFFICIENTE $N_c$ PER LA DETERMINAZIONE DELLA PORTANZA DEL GRUPPO (AGI, 1984) .....         | 34 |



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

|  |     |
|--|-----|
| TABELLA 3.5: STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DEL TERRENO VALUTATI IN CORRISPONDENZA DEL SOTTOPASSO RIO CASSOLA. ....         | 36  |
| TABELLA 5.1: COEFFICIENTI PARZIALI PER I PARAMETRI DEL TERRENO (TABELLA 6.2. II NTC 2008). ....                                  | 41  |
| TABELLA 5.2: COEFFICIENTI PARZIALI $\gamma_R$ PER LA RESISTENZA DEL SISTEMA. ....  | 41  |
| TABELLA 8.1: CASI DI CARICO. ....  | 57  |
| TABELLA 8.2: COMBINAZIONI SLU. ....  | 58  |
| TABELLA 8.3: COMBINAZIONI SLE. ....  | 61  |
| TABELLA 8.4: COMBINAZIONI SLV. ....  | 62  |
| TABELLA 8.5: COMBINAZIONI SLU PER LE VERIFICHE GEOTECNICHE. ....   | 63  |
| TABELLA 8.6: SOLLECITAZIONI MASSIME DI TAGLIO E MOMENTO SULL'IMPALCATO PER LE COMBINAZIONI SLU E SLV. ....                       | 72  |
| TABELLA 8.7: SINTESI DELLE SOLLECITAZIONI IN TESTA AI PALI. ....   | 75  |
| TABELLA 9.1: RIEPILOGO ARMATURA IMPALCATO (GETTO DI COMPLETAMENTO). ....   | 77  |
| TABELLA 9.2: RIEPILOGO ARMATURA LENTA NELLE TRAVI PREFABBRICATE. ....  | 78  |
| TABELLA 9.3: RIEPILOGO ARMATURA DI PRECOMPRESSIONE NELLE TRAVI PREFABBRICATE. ....   | 78  |
| TABELLA 9.4: RIEPILOGO ARMATURA TRASVERSALE IMPALCATO (GETTO DI COMPLETAMENTO) IN MEZZERIA. ....                                 | 79  |
| TABELLA 9.5: RIEPILOGO ARMATURA TRASVERSALE IMPALCATO (GETTO DI COMPLETAMENTO) IN MEZZERIA. ....                                 | 82  |
| TABELLA 9.6: VERIFICA A TAGLIO – SEZIONE DI APPOGGIO – FASE I. ....  | 84  |
| TABELLA 9.7: VERIFICA A TAGLIO – SEZIONE DI APPOGGIO. ....   | 85  |
| TABELLA 9.8: VERIFICA A TAGLIO TRASVERSALE – SEZIONE DI APPOGGIO. ....   | 86  |
| TABELLA 9.9: TENSIONI NORMALI NELLE FIBRE DELLA SEZIONE DI MEZZERIA IN FASE I. ....  | 88  |
| TABELLA 9.10: TENSIONI NORMALI NELLE FIBRE DELLA SEZIONE DI MEZZERIA IN FASE I, CONSIDERANDO LE PERDITE DI PRECOMPRESSIONE. .... | 88  |
| TABELLA 9.11: TENSIONI IN MEZZERIA IN COMBINAZIONE RARA (FASE I + FASE II). ....   | 89  |
| TABELLA 9.12: TENSIONI IN MEZZERIA IN COMBINAZIONE QUASI PERMANENTE (FASE I + FASE II). ....                                     | 91  |
| TABELLA 9.13: TENSIONI IN MEZZERIA ALL'INTRADOSO IN COMBINAZIONE FREQUENTE (FASE I + FASE II). ....                              | 92  |
| TABELLA 9.14: RIEPILOGO ARMATURA SPALLE E MURI D'ALA. ....   | 94  |
| TABELLA 9.15: RIEPILOGO VERIFICHE TENSIONALI (COMBINAZIONE RARA). ....   | 111 |
| TABELLA 9.16: RIEPILOGO VERIFICHE TENSIONALI (COMBINAZIONE QUASI PERMANENTE). ....   | 111 |
| TABELLA 9.17: RIEPILOGO VERIFICHE A FESSURAZIONE (COMBINAZIONE FREQUENTE) ....   | 112 |
| TABELLA 9.18: RIEPILOGO DELLE SOLLECITAZIONI IN TESTA AI PALI. ....  | 112 |
| TABELLA 9.19: SOLLECITAZIONI SULLA SEZIONE DI VERIFICA PER LA COMBINAZIONE ECCEZIONALE. ....                                     | 123 |

## INDICE DELLE FIGURE

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 2.1: PLANIMETRIA GENERALE. ....   | 13 |
| FIGURA 2.2: SEZIONE LONGITUDINALE. ....  | 14 |
| FIGURA 2.3: SEZIONE TRASVERSALE. ....  | 14 |
| FIGURA 3.1: TERRAPIENO PARZIALMENTE IMMERSO. ....  | 20 |
| FIGURA 3.2: SCHEMA PER L'APPLICAZIONE DELLA SPINTA SISMICA SUI PORTALI. ....   | 21 |
| FIGURA 3.3: ALTEZZE DI RIFERIMENTO PER IL CALCOLO DELL'AZIONE SISMICA. ....  | 22 |
| FIGURA 3.4: ANDAMENTO DELLA RIGIDEZZA DELLE MOLLE DEL TERRENO CON LA PROFONDITÀ. ....  | 23 |
| FIGURA 3.5: PARAMETRI PER IL CALCOLO DI $K_{A,E}$ . ....   | 24 |
| FIGURA 3.6: COEFFICIENTI $NQ^*$ CORRISPONDENTI ALL'INSORGERE DELLE DEFORMAZIONI PLASTICHE DELLA PUNTA (BEREZANTZEV, 1963 – AGI) 31 |    |
| FIGURA 3.7: SCHEMA DI ROTTURA DEL TERRENO PER EFFETTO DELLA PALIFICATA QUALE BLOCCO IN TERRENI COESIVI (TERZAGHI & PECK, 1967) .33 |    |
| FIGURA 3.8: CURVE DI CAPACITÀ PORTANTE PER PALI $\Phi 800$ IN CORRISPONDENZA DEL SOTTOPASSO RIO CASSOLA. ....                      | 36 |

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 4.1: SCHEMA DI CARICO 1.....   | 38 |
| FIGURA 8.1: MODELLO 3D AGLI ELEMENTI FINITI DELLA STRUTTURA.....  | 47 |
| FIGURA 8.2: CARICHI PERMANENTI PORTATI. ....  | 48 |
| FIGURA 8.3: SPINTA DELLE TERRE SU SPALLE E MURI D'ALA E SOVRACCARICO SUL MURO DI FONDAZIONE. ....                 | 49 |
| FIGURA 8.4: SPINTA DELLE TERRE DOVUTA AL SOVRACCARICO STRADALE. ....  | 50 |
| FIGURA 8.5: DIFFUSIONE IMPRONTE CARICHI TANDEM. ....  | 50 |
| FIGURA 8.6: DIMENSIONI DELLE AREE DI CARICO CONSIDERATE NEI CALCOLI. ....   | 51 |
| FIGURA 8.7: CARICHI VARIABILI DA TRAFFICO. ....   | 51 |
| FIGURA 8.8: FRENAMENTO. ....  | 52 |
| FIGURA 8.9: SPINTA SISMICA DELLE TERRE.....   | 52 |
| FIGURA 8.10: FORZE DI INERZIA SUGLI ELEMENTI STRUTTURALI. ....  | 54 |
| FIGURA 8.11: FORZE DI INERZIA DEL TERRENO IMBARCATO.....  | 54 |
| FIGURA 8.12: CALCOLO DEL TAGLIO MASSIMO IN TESTA AI PALI PRODOTTO DALL'ECCENTRICITÀ ACCIDENTALE. ....             | 56 |
| FIGURA 8.13: DEFORMATA PER LA COMBINAZIONE RARA36 (SPOSTAMENTI VERTICALI IN MM).....                              | 64 |
| FIGURA 8.14: MOMENTO M11 (SLU). ....  | 65 |
| FIGURA 8.15: MOMENTO M22 (SLU). ....  | 66 |
| FIGURA 8.16: TAGLIO V13 (SLU). ....   | 66 |
| FIGURA 8.17: TAGLIO V23 (SLU). ....   | 67 |
| FIGURA 8.18: SFORZO ASSIALE F11 (SLU). ....   | 67 |
| FIGURA 8.19: SFORZO ASSIALE F22 (SLU). ....   | 68 |
| FIGURA 8.20: MOMENTO M11 (SLE RARA). ....   | 68 |
| FIGURA 8.21: MOMENTO M22 (SLE RARA). ....   | 69 |
| FIGURA 8.22: SFORZO ASSIALE F11 (SLE RARA). ....  | 69 |
| FIGURA 8.23: SFORZO ASSIALE F22 (SLE RARA). ....  | 70 |
| FIGURA 8.24: MOMENTO M11 (SLV). ....  | 70 |
| FIGURA 8.25: MOMENTO M22 (SLV). ....  | 71 |
| FIGURA 8.26: TAGLIO V13 (SLV). ....   | 71 |
| FIGURA 8.27: TAGLIO V23 (SLV). ....   | 72 |
| FIGURA 8.28: INVILUPPO SLU (STR) DELLE SOLLECITAZIONI SUL PALO MAGGIORMENTE SOLLECITATO A MOMENTO FLETTENTE ..... | 74 |
| FIGURA 8.29: INVILUPPO SLV DELLE SOLLECITAZIONI SUL PALO MAGGIORMENTE SOLLECITATO A MOMENTO FLETTENTE.....        | 74 |
| FIGURA 8.30: INVILUPPO SLU DELLE SOLLECITAZIONI SUL PALO MAGGIORMENTE SOLLECITATO A MOMENTO FLETTENTE .....       | 75 |
| FIGURA 9.1: SEZIONE DI MEZZERIA TRAVE IN C.A.P. ....  | 76 |
| FIGURA 9.2: TRAVE IN C.A.P. E GETTO DI COMPLETAMENTO, SEZIONE OMOGENEIZZATA .....                                 | 77 |
| FIGURA 9.3: MOMENTO RESISTENTE SEZIONE DI APPOGGIO.....   | 79 |
| FIGURA 9.4: MOMENTO RESISTENTE NEGATIVO ARMATURA TRASVERSALE .....  | 80 |
| FIGURA 9.5: MOMENTO RESISTENTE SEZIONE DI PRIMA PRECOMPRESSIONE.....  | 81 |
| FIGURA 9.6: MOMENTO RESISTENTE SEZIONE DI MEZZERIA.....   | 82 |
| FIGURA 9.7: MOMENTO RESISTENTE POSITIVO ARMATURA TRASVERSALE. ....  | 83 |
| FIGURA 9.8: TENSIONI ALL'ATTO DEL RILASCIO DEI CAVI NELLA TRAVE IN C.A.P. ....                                    | 87 |
| FIGURA 9.9: FASE I - TENSIONI IN MEZZERIA A PERDITE AVVENUTE. ....  | 89 |
| FIGURA 9.10: SOLLECITAZIONI IN COMBINAZIONE RARA, SEZIONE DI MEZZERIA. ....                                       | 90 |
| FIGURA 9.11: TENSIONI IN COMBINAZIONE RARA, SEZIONE AGLI INCASTRI. ....   | 90 |
| FIGURA 9.12: SOLLECITAZIONI IN COMBINAZIONE QUASI PERMANENTE, SEZIONE DI MEZZERIA.....                            | 91 |
| FIGURA 9.13: TENSIONI IN COMBINAZIONE QUASI PERMANENTE, SEZIONE AGLI INCASTRI. ....                               | 92 |



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 9.14: SOLLECITAZIONI IN COMBINAZIONE FREQUENTE, SEZIONE DI MEZZERIA. ....                                       | 93  |
| FIGURA 9.15: TENSIONI IN COMBINAZIONE FREQUENTE, SEZIONE AGLI INCASTRI. ....   | 93  |
| FIGURA 9.16: INVILUPPI MOMENTI VERTICALI POSITIVI (INFLESSIONE LATO ESTERNO) SLU E SLV SULLE SPALLE.....               | 95  |
| FIGURA 9.17: INVILUPPI MOMENTI VERTICALI NEGATIVI (INFLESSIONE LATO ESTERNO) SLU E SLV SULLE SPALLE (1/3) .....        | 96  |
| FIGURA 9.18: INVILUPPI MOMENTI VERTICALI NEGATIVI (INFLESSIONE LATO ESTERNO) SLU E SLV SULLE SPALLE (2/3) .....        | 96  |
| FIGURA 9.19: INVILUPPI MOMENTI VERTICALI NEGATIVI (INFLESSIONE LATO ESTERNO) SLU E SLV SULLE SPALLE (3/3) .....        | 97  |
| FIGURA 9.20: INVILUPPI MOMENTI ORIZZONTALI POSITIVI (INFLESSIONE LATO ESTERNO) SLU E SLV SULLE SPALLE. ....            | 97  |
| FIGURA 9.21: INVILUPPI MOMENTI ORIZZONTALI NEGATIVI (INFLESSIONE LATO ESTERNO) SLU E SLV SULLE SPALLE (1/2) .....      | 98  |
| FIGURA 9.22: INVILUPPI MOMENTI ORIZZONTALI NEGATIVI (INFLESSIONE LATO ESTERNO) SLU E SLV SULLE SPALLE (2/2) .....      | 98  |
| FIGURA 9.23: INVILUPPI MOMENTI VERTICALI POSITIVI (INFLESSIONE LATO ESTERNO) SLU E SLV SUI MURI D'ALA .....            | 99  |
| FIGURA 9.24: INVILUPPI MOMENTI VERTICALI NEGATIVI (INFLESSIONE LATO ESTERNO) SLU E SLV SUI MURI D'ALA.....             | 100 |
| FIGURA 9.25: INVILUPPI MOMENTI ORIZZONTALI POSITIVI (INFLESSIONE LATO ESTERNO) SLU E SLV SUI MURI D'ALA. ....          | 101 |
| FIGURA 9.26: INVILUPPI MOMENTI ORIZZONTALI NEGATIVI (INFLESSIONE LATO ESTERNO) SLU E SLV SUI MURI D'ALA (1/2) .....    | 102 |
| FIGURA 9.27: INVILUPPI MOMENTI ORIZZONTALI NEGATIVI (INFLESSIONE LATO ESTERNO) SLU E SLV SUI MURI D'ALA (2/2) .....    | 102 |
| FIGURA 9.28: RESISTENZA A TAGLIO – NODO SPALLA-IMPALCATO. ....   | 103 |
| FIGURA 9.29: INVILUPPI SOLLECITAZIONI SLU SULLE SPALLE – TAGLIO SULLE ARMATURE VERTICALI. ....                         | 104 |
| FIGURA 9.30: INVILUPPI SOLLECITAZIONI SLV SULLE SPALLE – TAGLIO SULLE ARMATURE VERTICALI.....                          | 104 |
| FIGURA 9.31: RESISTENZA A TAGLIO – NODO SPALLA-IMPALCATO. ....   | 105 |
| FIGURA 9.32: INVILUPPI SOLLECITAZIONI SLU SULLE SPALLE – TAGLIO SULLE ARMATURE ORIZZONTALI. ....                       | 106 |
| FIGURA 9.33: INVILUPPI SOLLECITAZIONI SLV SULLE SPALLE – TAGLIO SULLE ARMATURE ORIZZONTALI. ....                       | 106 |
| FIGURA 9.34: RESISTENZA A TAGLIO SENZA ARMATURA TRASVERSALE – MURI D'ALA. ....   | 107 |
| FIGURA 9.35: INVILUPPI SOLLECITAZIONI SLU SUI MURI D'ALA – TAGLIO SULLE ARMATURE VERTICALI. ....                       | 108 |
| FIGURA 9.36: INVILUPPI SOLLECITAZIONI SLV SUI MURI D'ALA – TAGLIO SULLE ARMATURE VERTICALI. ....                       | 108 |
| FIGURA 9.37: RESISTENZA A TAGLIO SENZA ARMATURA TRASVERSALE – MURI D'ALA. ....   | 109 |
| FIGURA 9.38: INVILUPPI SOLLECITAZIONI SLU SUI MURI D'ALA – TAGLIO SULLE ARMATURE VERTICALI. ....                       | 110 |
| FIGURA 9.39: INVILUPPI SOLLECITAZIONI SLV SUI MURI D'ALA – TAGLIO SULLE ARMATURE VERTICALI. ....                       | 110 |
| FIGURA 9.40: GEOMETRIA DELLA SEZIONE IN TESTA PALO. ....   | 112 |
| FIGURA 9.41: VERIFICHE A PRESSOFLESSIONE PER LE SEZIONI IN TESTA PALO. ....  | 115 |
| FIGURA 9.42: TAGLIO RESISTENTE PER LA SEZIONE CIRCOLARE IN TESTA AL PALO. ....   | 116 |
| FIGURA 9.43: CAPACITÀ PORTANTE DEL SINGOLO PALO PER IL SOTTOPASSO RIO CASSOLA.....                                     | 117 |
| FIGURA 9.44: CURVE DI CAPACITÀ PORTANTE DEL SINGOLO PALO PER IL SOTTOPASSO RIO CASSOLA.....                            | 118 |
| FIGURA 9.45: MODELLO NUMERICO DEI PALI DI FONDAZIONE DEL PONTE AGRICOLO SUL RIO CASSOLA. ....                          | 120 |
| FIGURA 9.46: CEDIMENTI IN TESTA AI PALI – PONTE AGRICOLO SUL RIO CASSOLA. ....   | 120 |
| FIGURA 9.47: SEZIONE X-X.....  | 122 |
| FIGURA 9.48: SCHEMA DI DIFFUSIONE E SOVRAPPOSIZIONE DELLE SOLLECITAZIONI. ....   | 123 |
| FIGURA 9.49: DOMINIO M-N DELLA SEZIONE E COPPIA ( $M_s$ ; $N_s$ ) <sub>D</sub> , PER LA COMBINAZIONE ECCEZIONALE. .... | 124 |
| FIGURA 9.50: DATI DELLA VERIFICA A TENSOFFLESSIONE PER LA COMBINAZIONE ECCEZIONALE.....                                | 124 |
| FIGURA 9.51: VERIFICA A TAGLIO PER LA COMBINAZIONE ECCEZIONALE. ....   | 125 |

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

# 1. ILLUSTRAZIONE SINTETICA DEGLI ELEMENTI ESSENZIALI DEL PROGETTO STRUTTURALE

## 1.1 Premessa e scopo del documento

Il presente documento viene redatto nell'ambito dell'attività di progettazione esecutiva di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via Lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio".

In particolare, l'incarico prevede la progettazione strutturale e geotecnica di n.5 WBS, articolata ciascuna in una o due opere minori, tutte situate in comune di Crespellano, di seguito elencate:

- Ponte agricolo su rio Cassola.
- Due ponticelli rotatoria s.p. 27 su rio Cassola.
- Due ponticelli sul rio Crespellano.
- Sottopasso agricolo.
- Ponte sul rio Martignone.

Inoltre è prevista anche la valutazione della stabilità dei rilevati stradali.

Nella presente relazione verranno esplicitati i dimensionamenti e le verifiche del manufatto denominato **"Sottopasso Rio Cassola e passaggio agricolo"** a servizio della Variante s.p. 27 "Valle del Samoggia", caratterizzato da una struttura a portale (campata unica) la cui mezzzeria è alla progr. 0+132. Gli elaborati grafici di riferimento sono elencati nella seguente Tabella 1.1

Nel seguito sono evidenziati in giallo i paragrafi che contengono le integrazioni inserite nella rev.1 del 16.12.2013 e con bordatura a margine le ulteriori aggiunte inserite nella rev. 2 del 21.01.2014, al fine di recepire le osservazioni Prot. 26307/12/317 del SERVIZIO TECNICO BACINO RENO - STRUTTURA TECNICA COMPETENTE IN MATERIA SISMICA

Tabella 1.1: Elenco elaborati grafici.

| Variante alla S.P. n°27 "Valle del Samoggia" - I T ratto      |   |    |   |   |  |
|---|---|----|---|---|--|
| Sottopasso Rio Cassola e passaggio agricolo - progr. km 0+132 |   |    |   |   |  |
| G   | . | 17 | . | 1 | Planimetrie, tracciamenti, prospetti e sezioni   |
| G   | . | 17 | . | 2 | Casseratura impalcato, spalle e muri di risvolto |
| G   | . | 17 | . | 3 | Armatura pali di fondazione                      |
| G   | . | 17 | . | 4 | Armatura spalle e muri di risvolto tav. 1/2      |
| G   | . | 17 | . | 5 | Armatura spalle e muri di risvolto tav. 2/2      |
| G   | . | 17 | . | 6 | Armatura getti in opera impalcato                |
| G   | . | 17 | . | 7 | Casseratura e armatura travi prefabbricate       |

## 1.2 Riferimenti normativi

- Decreto Min. Infrastrutture e Trasporti 14 Gennaio 2008 "Norme tecniche per le costruzioni" (nel seguito NTC 2008);
- Circolare n° 617 del 2 Febbraio 2009 "Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008" (nel seguito CM 2009);

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

- AGI 1984 "Raccomandazioni sui pali di fondazione";
- Eurocodice 8: UNI EN 1998-5:2005 (nel seguito EC8).

## 1.3 Materiali utilizzati

Si elencano nel seguito i materiali utilizzati per le opere.

### 1.3.1 Calcestruzzo per strutture prefabbricate

Tabella 1.2: Caratteristiche conglomerato cementizio per strutture prefabbricate.

| Conglomerato cementizio per strutture prefabbricate in CAP                      |                |
|---|----------------|
| Classe di resistenza  | <b>C 45/55</b> |
| Classe di consistenza   | <b>S5</b>      |
| Classe di esposizione   | <b>XC4</b>     |
| Diametro massimo aggregato  | 20 mm          |
| Rapporto acqua/cemento  | 0,5            |
| Copriferro netto armature da precompressione                                    | 40 mm          |
| Copriferro netto armature ordinarie   | 30 mm          |
| Resistenza caratteristica cilindrica a compressione $f_{ck}$                    | 45 MPa         |
| Resistenza caratteristica cilindrica a compressione all'atto del tiro $f_{ckj}$ | 35 MPa         |
| Resistenza a compressione di calcolo $f_{cd}=0.85 f_{ck} / 1,5$                 | 25,5 MPa       |
| Valore medio della resistenza a trazione semplice $f_{ctm}= 0.30 f_{ck}^{2/3}$  | 3,8 MPa        |
| Valore medio della resistenza a trazione per flessione $f_{ctm}= 1.2 f_{ctm}$   | 4,5 MPa        |
| Modulo elastico $E_{cm}= 22 \cdot 1000(f_{cm}/10)^{0.3}$                        | 36283,2 MPa    |

### 1.3.2 Calcestruzzo per opere in elevazione

Tabella 1.3: Caratteristiche conglomerato cementizio per opere in elevazione gettate in opera.

| Conglomerato cementizio per strutture in elevazione (compresi paraghiaia, baggioli, velette e ritegni sismici) |                |
|--|----------------|
| Classe di resistenza   | <b>C 32/40</b> |
| Classe di consistenza  | <b>S4</b>      |
| Classe di esposizione  | <b>XC4</b>     |
| Diametro massimo aggregato   | 32 mm          |
| Rapporto acqua/cemento   | 0,50           |
| Copriferro netto   | 40 mm          |
| Resistenza caratteristica cilindrica a compressione $f_{ck}$   | 32 MPa         |
| Resistenza a compressione di calcolo $f_{cd}=0.85 f_{ck} / 1,5$  | 18,13 MPa      |
| Valore medio della resistenza a trazione semplice $f_{ctm}= 0.30 f_{ck}^{2/3}$                                 | 3,02 MPa       |
| Valore medio della resistenza a trazione per flessione $f_{ctm}= 1.2 f_{ctm}$                                  | 3,62 MPa       |
| Modulo elastico $E_{cm}= 22 \cdot 1000(f_{cm}/10)^{0.3}$   | 33345,7 MPa    |

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

### 1.3.3 Calcestruzzo per impalcati

Tabella 1.4: Caratteristiche conglomerato cementizio per impalcati gettati in opera.

| Conglomerato cementizio per impalcati (compresi marciapiedi)                    |                |
|---|----------------|
| Classe di resistenza  | <b>C 32/40</b> |
| Classe di consistenza   | <b>S4-S5</b>   |
| Classe di esposizione   | <b>XF4</b>     |
| Diametro massimo aggregato  | 20 mm          |
| Rapporto acqua/cemento  | 0,45           |
| Copriferro netto  | 45 mm          |
| Resistenza caratteristica cilindrica a compressione $f_{ck}$                    | 32 MPa         |
| Resistenza a compressione di calcolo $f_{cd} = 0.85 f_{ck} / 1,5$               | 18,13 MPa      |
| Valore medio della resistenza a trazione semplice $f_{ctm} = 0.30 f_{ck}^{2/3}$ | 3,02 MPa       |
| Valore medio della resistenza a trazione per flessione $f_{ctm} = 1.2 f_{ctm}$  | 3,62 MPa       |
| Modulo elastico $E_{cm} = 22 \cdot 1000(f_{cm}/10)^{0.3}$                       | 33345,7 MPa    |

### 1.3.4 Calcestruzzo per pali di fondazione

Tabella 1.5: Caratteristiche conglomerato cementizio per pali di fondazione.

| Conglomerato cementizio per pali di fondazione                                  |                |
|---|----------------|
| Classe di resistenza  | <b>C 28/35</b> |
| Classe di consistenza   | <b>S4-S5</b>   |
| Classe di esposizione   | <b>XA1</b>     |
| Diametro massimo aggregato  | 32 mm          |
| Rapporto acqua/cemento  | 0,60           |
| Copriferro netto  | 75 mm          |
| Resistenza caratteristica cilindrica a compressione $f_{ck}$                    | 28 MPa         |
| Resistenza a compressione di calcolo $f_{cd} = 0.85 f_{ck} / 1,5$               | 15,87 MPa      |
| Valore medio della resistenza a trazione semplice $f_{ctm} = 0.30 f_{ck}^{2/3}$ | 2,76 MPa       |
| Valore medio della resistenza a trazione per flessione $f_{ctm} = 1.2 f_{ctm}$  | 3,5 MPa        |
| Modulo elastico $E_{cm} = 22 \cdot 1000(f_{cm}/10)^{0.3}$                       | 32836,6 MPa    |

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

### 1.3.5 Acciaio per barre di armatura

Tabella 1.6: Caratteristiche acciaio per armatura.

| Acciaio per opere in c.a.                            |              |
|--|--------------|
| Tipo   | <b>B450C</b> |
| Tensione caratteristica di snervamento $f_{yk, nom}$ | 450 MPa      |
| Tensione di snervamento di calcolo $f_{yd}$          | 391,3 MPa    |
| Modulo di elasticità $E_s$                           | 200000 MPa   |
| Deformazione ultima a rottura $\epsilon_{su}$        | 67,5 ‰       |

### 1.3.6 Acciaio armonico per trefoli

Tabella 1.7: Caratteristiche acciaio armonico per trefoli.

| Acciaio armonico per trefoli   |            |
|--|------------|
| Tensione caratteristica di rottura $f_{ptk}$                                 | 1860 MPa   |
| Tensione caratteristica relativa a una deformazione dello 0,1% $f_{p(0,1)k}$ | 1670 MPa   |
| Modulo di elasticità $E_s$   | 200000 MPa |
| Deformazione ultima a rottura $\epsilon_{su}$                                | 67,5 ‰     |

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

## 2. DESCRIZIONE DEL MANUFATTO

Il manufatto in esame è costituito da una struttura a portale su pali.

L'impalcato è obliquo, con una luce in asse strada pari a 13,5 m, ed una larghezza di 12,25 m. È costituito da travi precomprese a T di altezza complessiva 0,5 m e da una soletta di completamento di 0,2 m.

Le spalle, che andranno a formare un elemento monolitico con l'impalcato, hanno altezza (comprensiva dello spessore dell'impalcato) variabile tra 7,0 m e 7,7 m e spessore di 1,4 m e sono completate da muri d'ala dello spessore di 1,2 m.

La struttura presenta fondazione su pali trivellati in numero di quattordici per spalla, di diametro 0,8 m.

Nelle figure seguenti sono riportate la planimetria generale e le sezioni longitudinale e trasversale dell'opera.

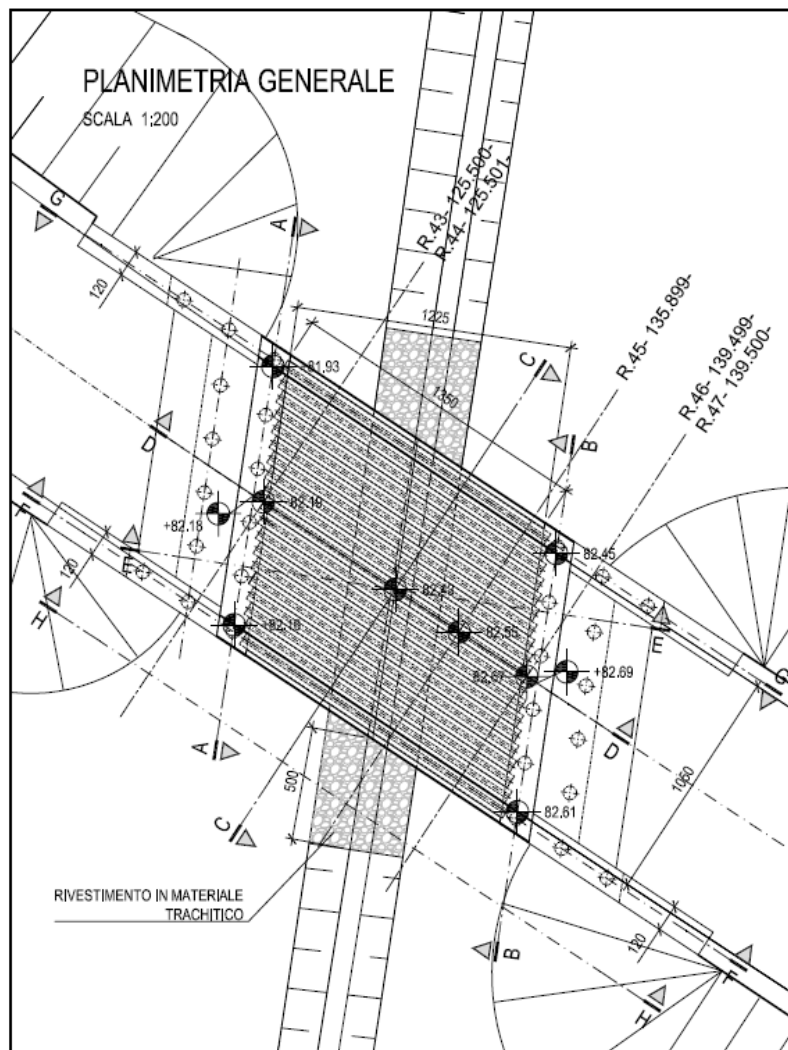


Figura 2.1: Planimetria generale.



|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Montevoglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

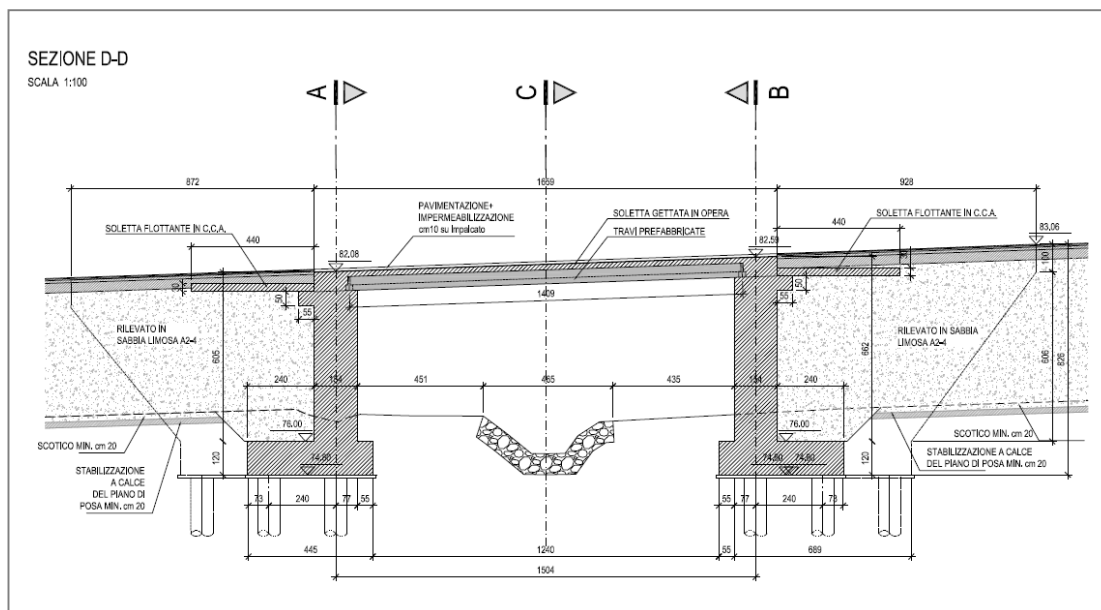


Figura 2.2: Sezione longitudinale.

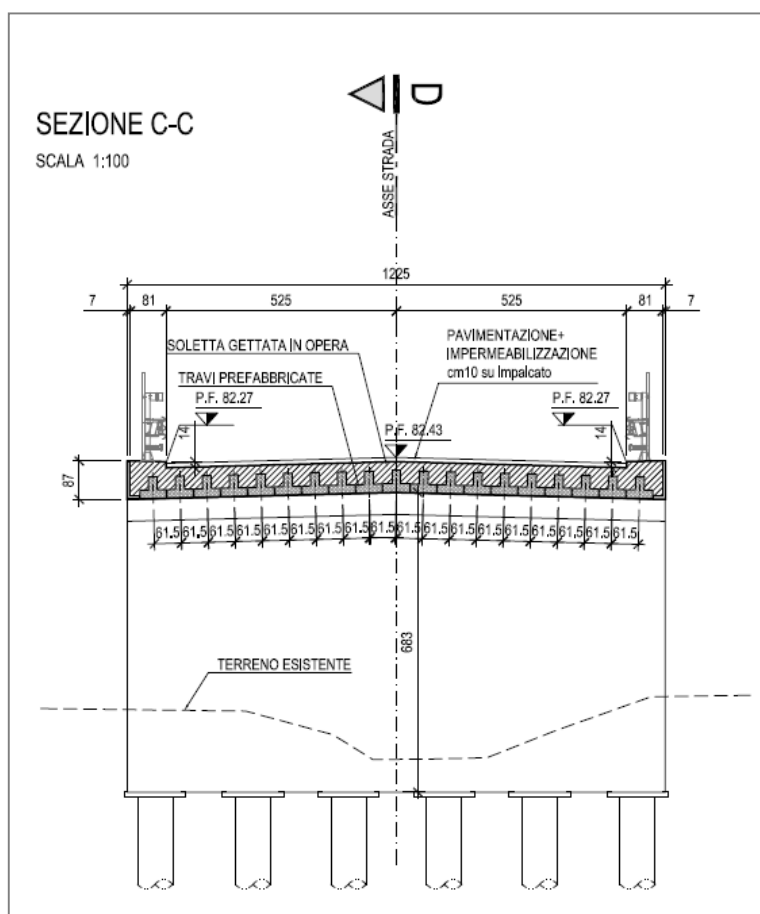


Figura 2.3: Sezione trasversale.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

## 2.1 Stratigrafia

Con riferimento alla Relazione Geotecnica si riporta la stratigrafia individuata per l'opera in esame:

- Unità AL1: da piano campagna a 5m di profondità: limi e limi argillosi consistenti.
- Unità AL2: da 5m a 8m di profondità: limi e limi argillosi molto consistenti.
- Unità GS: da 8m a 14.5m di profondità: ghiaie medio-grossolane in matrice sabbioso-limosa.
- Unità AL1: da 14.5m a 19.5m di profondità: limi e argille in miscele variabili sovraconsolidati, consistenti.
- Unità GS: da 19.5m a 21.5m di profondità: ghiaie medio-grossolane in matrice sabbioso-limosa.
- Unità AL1: da 21.5m a 26m di profondità: limi e argille in miscele variabili sovraconsolidati, consistenti.
- Unità GS: da 26m a 35m di profondità: ghiaie medio-grossolane in matrice sabbioso-limosa.

I valori dei parametri geotecnici caratteristici per le precedenti unità, ottenuti dall'analisi e dall'interpretazione critica delle indagini in sito e di laboratorio, sono riportati nel seguito. I parametri di resistenza si riferiscono alle condizioni di picco.

Tabella 2.1: Parametri geotecnici caratteristici.

| Unità | Peso di volume $\gamma_k$ [kN/m <sup>3</sup> ] | Resistenza non drenata $c_{u,k}$ [kPa] | Angolo di resistenza al taglio efficace $\phi'_k$ [°] | Coesione efficace $c'_k$ [kPa] | Modulo di deformabilità $E'_k$ [MPa] |
|-------|--|--|---|--------------------------------|--------------------------------------|
| AL1   | 19.5   | 150÷200                                | 22÷24   | 5÷10                           | 15÷20                                |
| AL2   | 19.5   | 250÷300                                | 25÷27   | 12÷15                          | 25÷30                                |
| GS    | 21   | -                                      | 44  | -                              | 80÷100                               |

Per quanto attiene al livello della falda, dalla valutazione dei dati di monitoraggio della Rete Arpa regionale si può identificare nell'area del progetto di variante una falda che non supera mai i 4.2m da piano campagna. Per l'opera, stante la possibile interferenza sulla quota di falda del rio, viene cautelativamente fissata una falda di progetto a 1m da piano campagna.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

### 3. CRITERI DI CALCOLO

In ottemperanza con la normativa vigente, i calcoli sono condotti con il metodo semiprobabilistico agli stati limite.

#### 3.1 Calcolo delle spinte sui paramenti verticali

In generale occorre considerare, di volta in volta, le spinte più appropriate a seconda della deformabilità della parete.

Nel caso di muri per i quali si possano accettare significative deformazioni, è possibile assumere, sia in condizioni statiche sia in condizioni sismiche, un regime di spinte attive. Altrimenti è in genere necessario assumere condizioni di spinta a riposo.

In presenza di sisma, è consentito l'approccio pseudo-statico, secondo il quale il complesso muro + terreno mobilitato è pensato soggetto ad un'accelerazione sismica uniforme avente le seguenti componenti:

$$\begin{aligned}\text{Orizzontale} &= k_h \cdot g; \\ \text{Verticale} &= k_v \cdot g = \pm 0.5 k_h \cdot g.\end{aligned}$$

Come nel caso statico, anche in condizioni sismiche è necessario distinguere tra:

- Muri indeformabili;
- Muri deformabili;
- Muri molto deformabili.

Nella prima classe di muri (**muri indeformabili**) possono essere inclusi i manufatti aventi pareti adeguatamente contrastate, quali, ad esempio, gli scatolari. In questo caso è opportuno adottare spinte sismiche secondo la teoria di Wood (1973), come meglio indicato nel §3.2.2.6, assumendo:

$$(\text{SLV}) \quad k_h = a_{\max}/g.$$

Nella categoria dei **muri deformabili** si possono includere le pareti sufficientemente deformabili grazie alla loro snellezza ma tuttavia sostanzialmente vincolate, in qualche modo, ad altre strutture, come ad esempio le pareti di portali e manufatti a "U". In questo caso potranno essere considerate spinte comprese tra valori a riposo e attive, in ragione della deformabilità. Queste ultime (sismiche attive) saranno valutate assumendo:

$$(\text{SLV}) \quad k_h = \beta_m \cdot a_{\max}/g, \text{ con } \beta_m = 1.$$

Nella categoria dei **muri molto deformabili** per i quali possono essere ipotizzati significativi spostamenti relativi tra muro e terreno, si possono includere, ad esempio, i muri di sostegno fondati su fondazioni dirette. In questo caso si assumeranno certamente spinte attive, da valutarsi, introducendo nel caso sismico un coefficiente  $\beta_m$  in accordo con la Tabella 7.11.II di NTC 2008:

$$(\text{SLV}) \quad k_h = \beta_m \cdot a_{\max}/g \quad (\beta_m \text{ da Tabella 7.11.II}).$$

Seguono ora criteri generali di valutazione delle spinte, applicabili a geometrie ordinarie.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

Le formule sono relative a terreni puramente granulari, applicabili ai manufatti in esame in quanto si ipotizza che a tergo dei paramenti siano presenti terreni di riempimento con le seguenti caratteristiche:

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$\varphi' = 30^\circ$$

## 3.2 Spinte attive in condizioni statiche

Ad una generica profondità  $z$ , nel caso di terreno puramente granulare, lo sforzo orizzontale totale  $\sigma_A(z)$  sulla parete è dato da:

$$\sigma_A(z) = K_A[\sigma_V(z) - u(z)] + u(z)$$

In cui:

$\sigma_V(z)$  = sforzo verticale totale alla generica profondità, ossia il peso della colonna di terreno e di acqua soprastante la quota  $z$ .

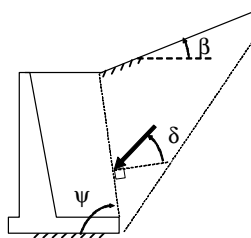
$u(z)$  = pressione dell'acqua alla generica profondità  $z$ .

Il coefficiente di spinta attiva  $K_A$  può, in genere, essere assunto pari a:

$$K_A = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$$

È possibile, tuttavia, mettere in conto l'angolo d'attrito  $\delta$  tra terra e muro, assumendo quindi che la spinta sia inclinata, rispetto alla normale alla superficie di contatto tra muro e terreno, di un angolo  $\delta$ .

In questo caso il coefficiente di spinta attiva può essere valutato con le note formule derivate dalla teoria di Coulomb e sviluppate da Muller-Breslau.



### CONDIZIONI DI SPINTA ATTIVA

Teoria di Coulomb

$$K_A = \frac{\sin^2(\psi + \varphi)}{\sin^2 \psi \sin(\psi - \delta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\psi + \delta) \sin(\psi - \beta)}{\sin(\psi - \delta) \sin(\psi + \beta)}} \right]^2}$$

Operando nell'ambito del metodo agli stati limite, nelle formule precedenti, va introdotto l'angolo d'attrito di calcolo, cioè  $\tan \varphi_d = \tan(\varphi_k) / \gamma_\varphi$  se si opera nell'ambito di una combinazione GEO (ad esempio A2+M2+R2).

### 3.2.1 Spinte a riposo in condizioni statiche

Ad una generica profondità  $z$ , nel caso di terreno puramente granulare, lo sforzo orizzontale totale  $\sigma_0(z)$  sulla parete è dato da:

$$\sigma_0(z) = K_0[\sigma_V(z) - u(z)] + u(z)$$

In cui, nel caso di piano campagna orizzontale, il coefficiente di spinta a riposo  $K_0$  se non diversamente definito, può essere assunto pari a:

$$K_0 = (1 - \sin \varphi) \sqrt{OCR}$$

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

Con  $OCR = GSC =$  grado di sovraconsolidazione.

### 3.2.2 Spinte attive in condizioni sismiche

Nell'ambito dell'approccio pseudo-statico, il complesso "muro-terreno mobilitato" è pensato soggetto ad un'accelerazione sismica uniforme avente le seguenti componenti:

$$\text{Orizzontale} = k_h \cdot g ;$$

$$\text{Verticale} = k_v \cdot g = \pm 0.5 k_h \cdot g .$$

La spinta totale attiva su un paramento di altezza pari ad  $H$  è data da (Allegato E EC8):

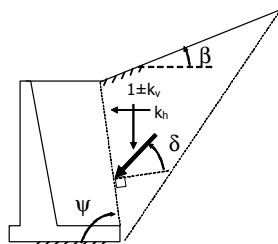
$$E_d = \frac{1}{2} \gamma^* (1 \pm k_v) K_{A,E} H^2 + E_{ws} + E_{wd}$$

Il primo termine è la spinta attiva dovuta allo scheletro solido, il secondo termine  $E_{ws}$  è la risultante delle pressioni idrostatiche ed il terzo  $E_{wd}$  è la risultante delle sovrappressioni interstiziali.

I coefficienti di spinta attiva sono dati dalle seguenti espressioni (Mononobe & Okabe, nel seguito M-O):

#### CONDIZIONI DI SPINTA ATTIVA

##### Teoria di Mononobe - Okabe



$$\beta \leq \varphi - \vartheta$$

$$K_{A,E} = \frac{\sin^2(\psi + \varphi - \vartheta)}{\cos \vartheta \sin^2 \psi \sin(\psi - \delta - \vartheta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\psi + \delta) \sin(\psi - \beta - \vartheta)}{\sin(\psi - \delta - \vartheta) \sin(\psi + \beta)}} \right]^2}$$

$$\beta > \varphi - \vartheta$$

$$K_{A,E} = \frac{\sin^2(\psi + \varphi - \vartheta)}{\cos \vartheta \sin^2 \psi \sin(\psi - \delta - \vartheta)}$$

Operando nell'ambito del metodo agli stati limite, nelle formule precedenti, va introdotto l'angolo d'attrito di calcolo, cioè  $\tan \varphi_d = \tan(\varphi_k) / \gamma_\varphi$  se si opera nell'ambito di una combinazione GEO (ad esempio A2+M2+R2).

A seconda della definizione del peso specifico  $\gamma^*$  del cuneo e dell'angolo  $\vartheta$  definito come l'angolo, rispetto alla verticale, fra le azioni esterne orizzontali e quelle verticali agenti sul cuneo di spinta di volume  $V$ , l'espressione generale può essere utilizzata per tre diverse condizioni nelle quali può trovarsi il rilevato.

#### 3.2.2.1 Rilevato asciutto

Non c'è alcuna azione dovuta all'acqua: corrisponde alla configurazione originale ipotizzata da M-O. Come peso specifico  $\gamma^*$  si deve assumere il peso secco  $\gamma_d$ ; la forza orizzontale  $F_h$  è pari alla massa del terreno moltiplicata per l'accelerazione orizzontale mentre la forza verticale  $F_v$  è il peso del cuneo incrementato o decrementato dall'accelerazione sismica verticale; quindi:

$$\gamma^* = \gamma_d$$

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

$$\tan \vartheta = \frac{k_h}{1 \pm k_v}$$

$$E_{ws} = E_{wd} = 0$$

### 3.2.2.2 Rilevato saturo a grana fine (dinamicamente impervio: $k < 5 \cdot 10^{-4}$ m/s)

In sostanza si assume che l'acqua, imprigionata negli interstizi, si muova insieme con il terreno: l'accelerazione sismica agirà quindi sulla massa complessiva (terreno + acqua) del cuneo, pari a  $V \cdot \gamma_{sat}$ . Si ammette che le pressioni interstiziali non subiscano variazioni ai fini del calcolo delle azioni sulla parete. In questo caso l'equilibrio limite del cuneo è fatto al netto della risultante delle azioni idrostatiche e quindi, nelle formule generali, si assumerà:

$$\gamma^* = \gamma'$$

$$\tan \vartheta = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma'} \frac{k_h}{1 \pm k_v}$$

Alla spinta efficace dovrà essere aggiunta la spinta idrostatica dell'acqua, mentre, per ipotesi, la componente idrodinamica non può svilupparsi. Quindi:

$$E_{ws} = \frac{1}{2} \gamma_w H^2$$

$$E_{wd} = 0$$

### 3.2.2.3 Rilevato saturo a grana grossa (dinamicamente permeabile: $k \geq 5 \cdot 10^{-4}$ m/s)

Si ammette che l'acqua negli interstizi possa muoversi liberamente, indipendentemente dalle deformazioni subite dal terreno: l'accelerazione sismica agirà quindi sulla massa della sola parte solida del cuneo, pari a  $V \cdot \gamma_d$ . L'equilibrio limite del cuneo è fatto al netto della risultante delle pressioni interstiziali e quindi, nelle formule generali, si assumerà:

$$\gamma^* = \gamma'$$

$$\tan \vartheta = \frac{\gamma_d}{\gamma'} \frac{k_h}{1 \pm k_v}$$

In questo caso dovranno essere aggiunte sia la spinta idrostatica sia la sovraspinta idrodinamica della stessa acqua di falda.

$$E_{ws} = \frac{1}{2} \gamma_w H^2$$

$$E_{wd} = \frac{7}{12} k_h \gamma_w H'^2$$

con  $H'$  = altezza della freatica dal piede del muro.

### 3.2.2.4 Rilevato parzialmente immerso

Ebeling e Morrison (1992) indicano il modo per utilizzare, anche in questo caso, le equazioni di M-O: sostanzialmente questo caso può essere assimilato a quello di un terrapieno completamente immerso omogeneo, avente un peso specifico equivalente.



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

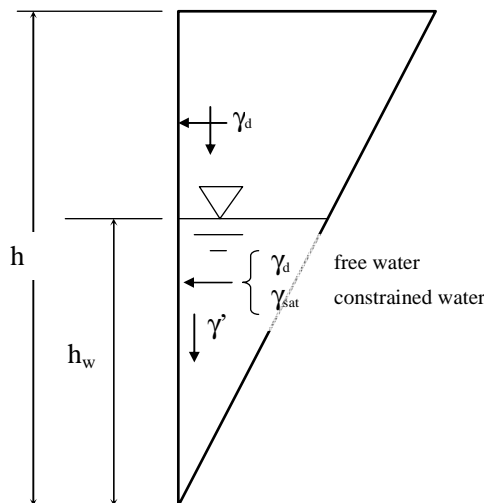


Figura 3.1: Terrapieno parzialmente immerso.

Per calcolare la risultante delle spinte, si potrà operare come segue. Si definiscono i pesi specifici medi da associare rispettivamente alla componente efficace verticale ed alla componente laterale.

$$\gamma_V^* = \left(\frac{h_w}{h}\right)^2 \gamma' + \left[1 - \left(\frac{h_w}{h}\right)^2\right] \gamma_d$$

$$\gamma_H^* = \begin{cases} \gamma_d & \text{terreno dinamicamente permeabile} \\ \left(\frac{h_w}{h}\right)^2 \gamma_{sat} + \left[1 - \left(\frac{h_w}{h}\right)^2\right] \gamma_d & \text{terreno dinamicamente impervio} \end{cases}$$

Definendo:

$$\tan \vartheta = \frac{\gamma_H^*}{\gamma_V^*} \frac{k_h}{1 - k_v}$$

si applicherà poi  $E_d$  calcolando i coefficienti di spinta tramite la formula di M-O e ponendo  $\gamma^* = \gamma_V^*$ .

### 3.2.2.5 Punto di applicazione delle spinte attive sismiche

Considerato che la spinta attiva complessiva è in generale composta da tre termini, occorre calcolare il punto di applicazione di ognuno di essi:

1. **Componente associata allo scheletro solido**, è possibile operare come segue:

- si calcola la spinta attiva in condizioni statiche ( $S_{A,S}$ );
- si calcola la quota parte efficace di spinta sismica  $E_d$  dovuta alla terra:

$$S_{A,E} = \frac{1}{2} \gamma^* (1 \pm k_v) K_{A,E} H^2$$

Nel caso di terreno eterogeneo, la spinta attiva è calcolata considerando la variabilità di  $K_{A,sismico}$ . Nel caso di terreno omogeneo ma parzialmente in falda, si suggerisce di adottare l'approccio sopra indicato, piuttosto che introdurre diversi valori dei coefficienti di spinta.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

c) si calcola l'incremento di spinta dovuto alla terra in caso di sisma (componente efficace):

$$\Delta S_A = S_{A,E} - S_{A,S}$$

d) Nel caso di muri che possano ruotare alla base, si può considerare che tale incremento abbia una risultante nello stesso punto della risultante delle spinte statiche

e) Negli altri casi si può assumere che tale azione si distribuisca uniformemente sulla parete, il che equivale ad applicare un carico uniformemente distribuito pari a:

$$q = \Delta S_A / H$$

2. **Componente idrostatica ( $E_{ws}$ ):** è applicata come nel caso statico.
3. **Componente idrodinamica ( $E_{wd}$ ):** se esiste, è applicata considerando la seguente distribuzione di pressioni:

$$q_{wd}(z) = \pm \frac{7}{8} k_h \gamma_w \sqrt{H'z}$$

con  $z$  quota del generico punto rispetto la base della parete.

### 3.2.2.6 Schema di carico per portali

Per l'applicazione delle spinte del terreno sui paramenti verticali delle strutture a portale è stato utilizzato lo schema riportato nella figura seguente:

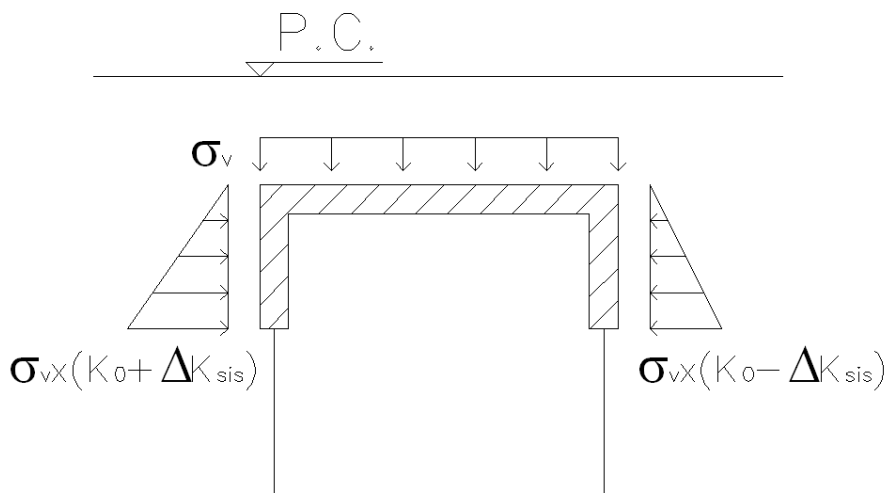


Figura 3.2: Schema per l'applicazione della spinta sismica sui portali.

Nella figura il termine  $\Delta K_{sis}$  ha il seguente significato:

$$\Delta K_{sis} = K_{A,E} - K_0$$

In sostanza al paramento 'sopravento' viene attribuita la spinta calcolata con il coefficiente di M-O ( $K_{A,E} = K_0 + \Delta K_{sis}$ ) mentre a quello 'sottovento' viene attribuita una spinta calcolata con il coefficiente a riposo ridotto ( $K_0 - \Delta K_{sis}$ ) per tenere conto della tendenza dello stesso a spostarsi nella direzione in cui è applicato il sisma.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

### 3.2.3 Sovraspinte sismiche su muri non in grado di spostarsi

In questo caso l'utilizzo delle equazioni di M-O non è raccomandato. Le spinte delle terre, sono calcolate in regime di spinta a riposo che comporta il calcolo delle spinte sismiche in tali condizioni; l'incremento dinamico di spinta del terreno può essere quindi calcolato attraverso la nota formulazione di Wood (1973) come:

$$\Delta P_d = S \cdot a_g / g \cdot \gamma \cdot h_{tot}^2 = a_{max} / g \cdot \gamma \cdot h_{tot}^2$$

con  $h_{tot}$  altezza del muro.

Questa spinta è applicata come una distribuzione uniforme lungo l'altezza  $h_{tot}$ .

Il punto di applicazione della spinta che interessa lo scatolare è posto  $h_{scat}/2$ , con  $h_{tot}$  altezza dalla fondazione dello scatolare al piano stradale e  $h_{scat}$  l'altezza dello scatolare.

Essendo  $\Delta P_d$  la risultante globale, ed il diagramma di spinta di tipo rettangolare, è immediato ricavare la quota parte della spinta che agisce sul piedritto dello scatolare.

L'azione sismica è rappresentata da un insieme di forze statiche orizzontali e verticali, date dal prodotto delle forze di gravità per i coefficienti sismici in precedenza definiti, di cui la componente verticale è considerata agente verso l'alto o verso il basso, in modo da produrre gli effetti più sfavorevoli.

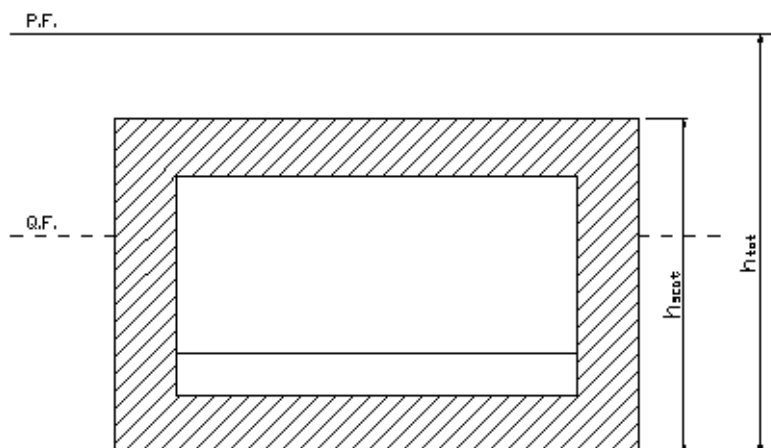


Figura 3.3: Altezze di riferimento per il calcolo dell'azione sismica.

### 3.3 Criteri di modellazione del terreno

Per quanto attiene la modellazione del terreno si è proceduto secondo quanto segue.

La rigidità delle molle orizzontali  $k_x$  (terreni coesivi) e di quella verticale  $k_z$  sono state determinate secondo le formule seguenti:

$$k_x = \frac{100 \cdot c_u}{\phi} \cdot z \cdot \Delta y$$

$$k_z = \frac{Q_{u, Lat}}{10 \text{ mm}}$$

Con:

- $c_u$ : Coesione non drenata;

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

- $\phi$ : Diametro del palo;
- $z$ : Profondità dal piano campagna;
- $\Delta y$ : Interasse tra le molle;
- $Q_{u,Lat}$ : Portata ultima laterale del palo.

Nella modellazione si è assunto il piano campagna coincidente con la quota di testa dei pali.

Si riporta il grafico dell'andamento della rigidezza delle molle orizzontali  $k_h$  con la profondità:

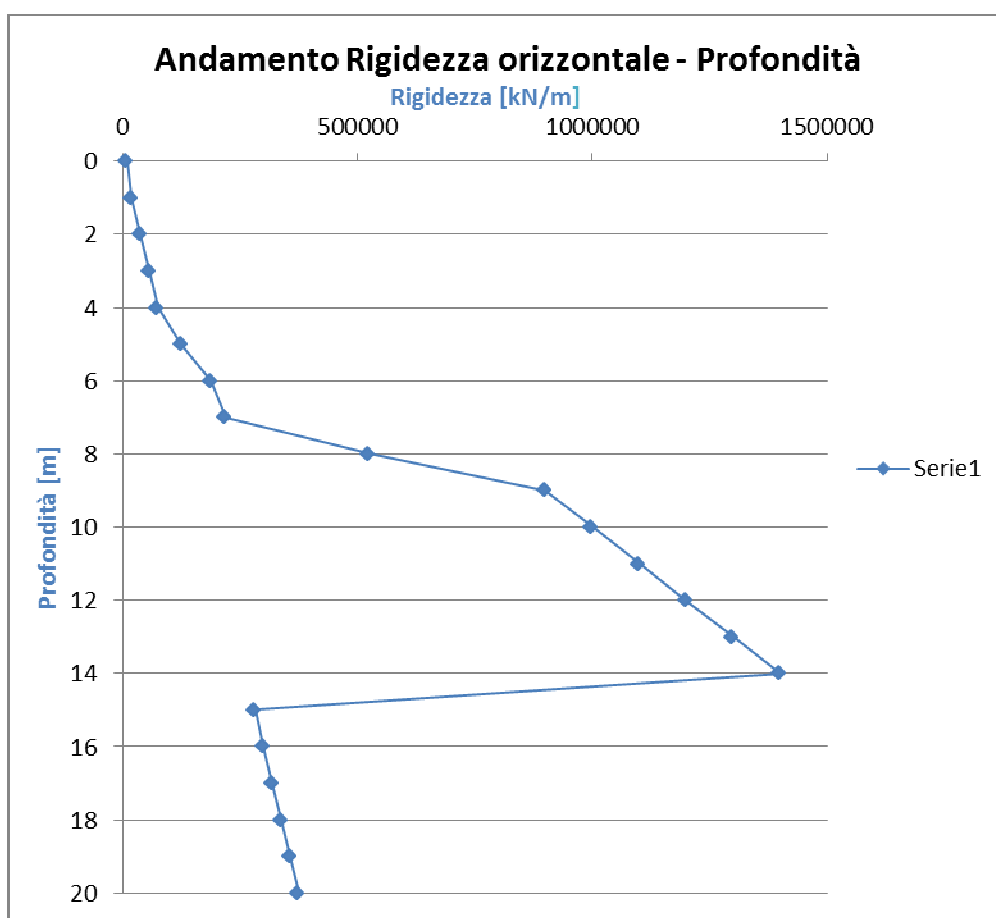


Figura 3.4: Andamento della rigidezza delle molle del terreno con la profondità.

La rigidezza verticale è stata valutata assumendo un carico limite laterale  $Q_{u,Lat}$  per il palo di 3000 kN, perciò risulta:

$$k_z = \frac{3000 \text{ kN}}{0,01 \text{ m}} = 300000 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Al fine del calcolo delle spinte a tergo delle spalle è stata ipotizzata la presenza di un terreno di riempimento incoerente, avente i seguenti parametri geotecnici:

- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ , peso dell'unità di volume del terreno
- $\varphi' = 30^\circ$ , angolo di attrito in condizioni drenate.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

Il coefficiente di spinta a riposo vale:

$$K_0 = 1 - \sin(\varphi') = 0,50$$

Il coefficiente di spinta di Mononobe-Okabe vale  $K_{A,E} = 0,55$  ed è stato determinato tramite l'ausilio di un foglio di calcolo di cui se ne riporta uno stralcio nella figura seguente:

| INPUT DATA  |       |                      |
|---|-------|----------------------|
| Case:   | 1     | (-)                  |
| 1 "Water table level under the supporting structure"            |       |                      |
| 2 "Impermeable soil in seismic condition under the water table" |       |                      |
| 3 "High seismic permeability soil under the water table"        |       |                      |
| $\phi$ = shear resistance angle of soil                         | 30,0  | (<45°)               |
| $\psi$ = batter of soil wall side with horizontal               | 90,0  | (°)                  |
| $\beta$ = slope of soil surface with horizontal                 | 0,0   | (°)                  |
| $\delta$ = friction angle wall-soil                             | 20,0  | (°)                  |
| $\gamma$ = natural soil unit weight                             | 20,0  | (kN/m <sup>3</sup> ) |
| $\gamma_d$ = dry soil unit weight                               | 20,0  | (kN/m <sup>3</sup> ) |
| $\gamma_w$ = water unit weight                                  | 10,0  | (kN/m <sup>3</sup> ) |
| $k_h$ = horizontal seismic coefficient                          | 0,285 | (-)                  |
| $k_v$ = vertical seismic coefficient                            | 0,000 | (-)                  |
| OUTPUT  |       |                      |
| Seismic conditions (Mononobe-Okabe)                             |       |                      |
|   | $k_a$ | 0,55                 |

Figura 3.5: Parametri per il calcolo di  $K_{A,E}$ .

### 3.4 Criteri e definizione dell'azione sismica

L'effetto dell'azione sismica di progetto sull'opera nel suo complesso, includendo il volume significativo di terreno, la struttura di fondazione, gli elementi strutturali e non strutturali, nonché gli impianti, deve rispettare gli stati limite ultimi e di esercizio definiti dalla norma i cui requisiti di sicurezza sono indicati nella norma stessa.

Il rispetto degli stati limite si considera conseguito quando:

Nei confronti degli stati limite di esercizio siano rispettate le verifiche relative al solo Stato Limite di Danno (SLD);

Nei confronti degli stati limite di ultimi siano rispettate le indicazioni progettuali e costruttive riportate al § 7 di NTC 2008 e siano soddisfatte le verifiche relative al solo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV).

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

Per Stato Limite di Danno (SLD) s'intende che l'opera, nel suo complesso, a seguito del terremoto, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non provocare rischi agli utenti e non compromette significativamente la capacità di resistenza e di rigidezza nei confronti delle azioni verticali e orizzontali. Lo stato limite di esercizio comporta la verifica delle tensioni di lavoro, in conformità al § 4.1.2.2.5 (NTC 2008).

Per Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) si intende che l'opera a seguito del terremoto subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali e impiantistici e significativi danni di componenti strutturali, cui si associa una perdita significativa di rigidezza nei confronti delle azioni orizzontali (creazione di cerniere plastiche secondo il criterio della gerarchia delle resistenze), mantenendo ancora un margine di sicurezza (resistenza e rigidezza) nei confronti delle azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali.

Gli stati limite, sia di esercizio che ultimi, sono individuati riferendosi alle prestazioni che l'opera da realizzarsi deve assolvere durante un evento sismico; per la funzione che l'opera deve espletare nella sua vita utile, è significativo calcolare lo Stato Limite di Danno (SLD) per l'esercizio e lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV) per lo stato limite ultimo.

Le azioni sismiche sono valutate in relazione al periodo di riferimento della struttura, che si ricava moltiplicandone la vita nominale  $V_N$  per il coefficiente d'uso  $C_U$ .

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

Il valore del coefficiente d'uso  $C_U$  è definito, al variare della classe d'uso, come mostrato nella tabella seguente:

Tabella 3.1: Valori del coefficiente d'uso  $C_U$ .

| CLASSE D'USO       | I   | II  | III | IV  |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|
| COEFFICIENTE $C_U$ | 0,7 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |

Nel presente elaborato le opere analizzate sono caratterizzate da una vita nominale  $V_N$  di 50 anni (Ponti) ed una classe d'uso IV (Costruzioni con funzioni strategiche importanti), perciò il periodo di riferimento risulta  $V_R=100$  anni.

I valori di probabilità di superamento del periodo di riferimento  $P_{VR}$ , cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente, sono:

$$P_{VR}(SLD) = 63\%$$

$$P_{VR}(SLV) = 10\%$$

Il **periodo di ritorno** dell'azione sismica  $T_R$  espresso in anni vale:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})} = \begin{cases} 101 \text{ anni (SLD)} \\ 949 \text{ anni (SLV)} \end{cases}$$

Noto il valore del periodo di ritorno suddetto, tramite le tabelle riportate nell'Allegato B di NTC 2008 o tramite la mappatura messa a disposizione in rete dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), è possibile definire i valori di  $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_c^*$ , dove:

$a_g$  → accelerazione orizzontale massima su sito di riferimento rigido orizzontale;

$F_0$  → 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.



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

Il calcolo delle spinte sui manufatti viene eseguito con il metodo pseudo-statico (§ 7.11.6 NTC 2008). In queste condizioni l'azione sismica è rappresentata da una forza statica equivalente pari al prodotto delle forze di gravità per un opportuno coefficiente sismico:

$$\text{Orizzontale} = k_h \cdot g = \left( \beta_m \cdot \frac{a_{max}}{g} \right) \cdot g;$$

$$\text{Verticale} = k_v \cdot g = \pm 0.5 k_h \cdot g = \pm 0.5 \left( \beta_m \cdot \frac{a_{max}}{g} \right) \cdot g.$$

Dove:

$$a_{max} = a_g \cdot S = a_g \cdot S_s \cdot S_T$$

In cui:

$S_s$ : coefficiente di amplificazione stratigrafica, funzione della categoria di sottosuolo;

$S_T$ : coefficiente di amplificazione topografica, funzione della categoria di topografica del sito.

In riferimento alla Relazione Sismica, si riportano i parametri spettrali per l'opera in esame per quanto attiene gli stati Limite di Salvaguardia della Vita e di Danno:

Tabella 3.2: Parametri spettrali del sito per il sottopasso sul rio Cassola.

| Stato Limite | $a_g$ [g] | $F_0$ [-] | $T_c^*$ [s] |
|--------------|-----------|-----------|-------------|
| SLD          | 0.087     | 2.475     | 0.281       |
| SLV          | 0.203     | 2.403     | 0.317       |

Categoria del suolo di fondazione: **C**;

Categoria topografica: **T1** → Coefficiente di amplificazione topografica  **$S_T=1$** .

Per categoria di sottosuolo C il coefficiente di amplificazione stratigrafica  $S_s$  vale:

$$1,00 \leq S_s = 1,70 - 0,6 \times F_0 \times \frac{a_g}{g} \leq 1,50$$

- SLD:  $S_s=1,6$
- SLV:  $S_s=1,4$

Il fattore S vale pertanto ( $S_T=1$ ):

- SLD:  $S=1,6$
- SLV:  $S=1,4$

Il valore del parametro sismico  $k_h$  (SLV) risulta quindi:

$$k_h = \beta_m \cdot \frac{a_g}{g} \cdot S = 1 \cdot 0,203 \cdot 1,4 = 0,284$$

### 3.4.1 Metodi di analisi

Il metodo di analisi scelto per lo studio degli effetti del sisma è la **analisi lineare statica**, come indicato al §1.9.2 della relazione illustrativa B.3.1.

L'analisi lineare statica consiste sostanzialmente in una analisi lineare dinamica semplificata in cui:

1) non si effettua l'analisi dinamica della costruzione per determinare i modi di vibrare "naturali" della costruzione e si ipotizza un modo di vibrare principale della costruzione caratterizzato da un periodo  $T_1$  calcolato in maniera approssimata. A questo modo di vibrare si associa un'aliquota di massa partecipante pari a 1,0 in tutti gli altri casi;

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

2) si calcolano gli effetti dell'azione sismica, rappresentata dallo spettro di risposta di progetto, per il solo modo di vibrare principale considerato;

3) non si effettua alcuna combinazione degli effetti in quanto non si considerano modi di vibrare secondari.

Per il manufatto in esame è possibile applicare l'analisi statica lineare in quanto sono soddisfatti i punti b) e c) del §7.9.4.1 della normativa, che vengono riportati qui di seguito.

*"I requisiti necessari per applicare l'analisi statica lineare possono ritenersi soddisfatti nei casi seguenti:*

- a) per entrambe le direzioni longitudinale e trasversale, in ponti a travate semplicemente appoggiate e purché la massa efficace di ciascuna pila non sia superiore ad 1/5 della massa di impalcato da essa portata;*
- b) nella direzione longitudinale, per ponti rettilinei a travata continua e purché la massa efficace complessiva delle pile facenti parte del sistema resistente al sisma non sia superiore ad 1/5 della massa dell'impalcato;*
- c) nella direzione trasversale, per ponti che soddisfino la condizione b) e siano simmetrici rispetto alla mezzzeria longitudinale, o abbiano un'eccentricità non superiore al 5% della lunghezza del ponte. L'eccentricità è la distanza tra baricentro delle masse e centro delle rigidzze delle pile facenti parte del sistema resistente al sisma della direzione trasversale"*

Il punto b) è automaticamente verificato per ponti a campata unica, privi di pile, quale quello in esame, in quanto, essendo le pile assenti, la loro massa è nulla, e pertanto certamente non superiore ad 1/5 della massa dell'impalcato. Infatti, in accordo con la terminologia tecnica comunemente adottata, alla quale certamente intende riferirsi la Normativa - vedere anche la figura inserita nel §7.9.3 -, l'elemento strutturale che sostiene l'estremità del ponte e separa la luce libera dal terreno retrostante è da considerarsi "spalla", indipendentemente dalla sua forma e dal tipo di fondazioni.

Per quanto attiene al calcolo delle inerzie sugli elementi strutturali, allo Stato Limite Ultimo (SLV) si procede considerando la struttura come 'fuori terra'. A favore di sicurezza si adotta l'accelerazione di plateau dello spettro elastico ( $a_g \cdot S \cdot F_0 = a_{\max} \cdot F_0$ ), ridotta con fattore di struttura  $q$  pari a 1,5, secondo quanto previsto nella Tabella 7.9.I di NTC 2008 per il caso generale di spalle rigidamente connesse con l'impalcato. Per queste ipotesi in base alla formula [7.9.7] della normativa NTC2008 il fattore di sovrarresistenza vale 1.

$$\gamma_{Rd} = 0,7 + 0,2q = 0,7 + 0,2 \times 1,5 = 1 \geq 1$$

### 3.5 Fenomeni di fatica

Come precisato al §5.1.4.3 della normativa vigente (NTC 2008), le verifiche allo stato limite di fatica vanno eseguite per strutture, elementi strutturali e dettagli sensibili a fenomeni di fatica. Notoriamente le strutture in conglomerato cementizio armato di modeste dimensioni non sono sensibili a tali fenomeni. Per questi motivi gli effetti della fatica non verranno considerati nella presente trattazione.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

## 3.6 Criteri di calcolo dei pali di fondazione

### 3.6.1 Capacità portante del palo singolo soggetto a carichi assiali

Nel seguito si riportano i criteri di calcolo adottati per la stima della capacità portante del singolo palo di fondazione soggetto a carichi assiali di compressione e di trazione.

Il calcolo viene condotto secondo i seguenti approcci con riferimento al DM 14/01/2008 § 6.4.3 e §7.11.5.3:

- Approccio 1: combinazioni A1+M1+R1, A2+M1+R2 e A2+M1+R3 (sismica);
  - Approccio 2: combinazione A1+M1+R3;
- e con riferimento alla seguente bibliografia:
- AGI – Raccomandazioni sui pali di fondazione (1984);
  - Poulus, Davis – Analisi e progettazione di fondazioni su pali.

La resistenza di progetto a compressione dei pali soggetti a carichi assiali è pari a:

$$R_{c,d} = \left( \frac{R_{cs,k}}{\gamma_s} + \frac{R_{cb,k}}{\gamma_b} \right) - W_p' \cdot \gamma_{G1}$$

con:

$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,cal})_{media}}{\xi_3}, \frac{(R_{c,cal})_{min}}{\xi_4} \right\};$$

$W_p'$ : peso efficace del palo;

$\gamma_{G1}$ : coefficiente parziale per i carichi permanenti strutturali;

$\gamma_s$ : coefficiente parziale per la resistenza laterale in compressione;

$\gamma_b$ : coefficiente parziale per la resistenza di base;

$\xi_3, \xi_4$ : coefficienti che dipendono dal numero di verticali di indagine disponibili per l'opera in esame.

La resistenza di progetto a trazione dei pali soggetti a carichi assiali è pari a:

$$R_{t,d} = \frac{R_{ts,k}}{\gamma_{st}} + W_p' \cdot \gamma_{G1}$$

con:

$$R_{ts,k} = \min \left\{ \frac{(R_{t,cal})_{media}}{\xi_3}, \frac{(R_{t,cal})_{min}}{\xi_4} \right\};$$

$W_p'$ : peso efficace del palo;

$\gamma_{G1}$ : coefficiente parziale per i carichi permanenti strutturali;

$\gamma_{st}$ : coefficiente parziale per la resistenza laterale in trazione;

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

$\xi_3, \xi_4$ : coefficienti che dipendono dal numero di verticali di indagine disponibili per l'opera in esame.

I coefficienti parziali per le azioni, per i parametri geotecnici e per le resistenze caratteristiche sono riportati nelle tabelle seguenti, tratte dal DM 14/01/2008.

**Tabella 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni.**

| CARICHI                                   | EFFETTO     | Coefficiente Parziale<br>$\gamma_F$ (o $\gamma_F$ ) | EQU | (A1)<br>STR | (A2)<br>GEO |
|---|-------------|---|-----|-------------|-------------|
| Permanenti                                | Favorevole  | $\gamma_{G1}$                                       | 0,9 | 1,0         | 1,0         |
|   | Sfavorevole |   | 1,1 | 1,3         | 1,0         |
| Permanenti non strutturali <sup>(1)</sup> | Favorevole  | $\gamma_{G2}$                                       | 0,0 | 0,0         | 0,0         |
|   | Sfavorevole |   | 1,5 | 1,5         | 1,3         |
| Variabili                                 | Favorevole  | $\gamma_{Gi}$                                       | 0,0 | 0,0         | 0,0         |
|   | Sfavorevole |   | 1,5 | 1,5         | 1,3         |

(1) Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. i carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti, si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

**Tabella 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno**

| PARAMETRO                                    | GRANDEZZA ALLA QUALE<br>APPLICARE IL<br>COEFFICIENTE PARZIALE | COEFFICIENTE<br>PARZIALE<br>$\gamma_M$ | (M1) | (M2) |
|--|---|--|------|------|
| Tangente dell'angolo di resistenza al taglio | $\tan \phi'_k$  | $\gamma_{\phi'}$                       | 1,0  | 1,25 |
| Coesione efficace                            | $c'_k$  | $\gamma_{c'}$                          | 1,0  | 1,25 |
| Resistenza non drenata                       | $c_{uk}$  | $\gamma_{cu}$                          | 1,0  | 1,4  |
| Peso dell'unità di volume                    | $\gamma$  | $\gamma_\gamma$                        | 1,0  | 1,0  |

**Tabella 6.4.II – Coefficienti parziali  $\gamma_R$  da applicare alle resistenze caratteristiche.**

| Resistenza               | Simbolo       | Pali infissi |      |      | Pali trivellati |      |      | Pali ad elica continua |      |      |
|--------------------------|---------------|--------------|------|------|-----------------|------|------|------------------------|------|------|
|                          | $\gamma_R$    | (R1)         | (R2) | (R3) | (R1)            | (R2) | (R3) | (R1)                   | (R2) | (R3) |
| Base                     | $\gamma_b$    | 1,0          | 1,45 | 1,15 | 1,0             | 1,7  | 1,35 | 1,0                    | 1,6  | 1,3  |
| Laterale in compressione | $\gamma_s$    | 1,0          | 1,45 | 1,15 | 1,0             | 1,45 | 1,15 | 1,0                    | 1,45 | 1,15 |
| Totale <sup>(*)</sup>    | $\gamma_t$    | 1,0          | 1,45 | 1,15 | 1,0             | 1,6  | 1,30 | 1,0                    | 1,55 | 1,25 |
| Laterale in trazione     | $\gamma_{st}$ | 1,0          | 1,6  | 1,25 | 1,0             | 1,6  | 1,25 | 1,0                    | 1,6  | 1,25 |

(\*) da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto.

Nel seguito si riportano le indicazioni in merito alle correlazioni impiegate per la valutazione della resistenza calcolata del singolo palo.

### 3.6.1.1 Terreni a comportamento prevalentemente coesivo

Con riferimento alle Raccomandazioni AGI sui pali di fondazione la resistenza di base e laterale può essere determinata come segue.

Resistenza di base calcolata –  $R_{b,cal}$ :

$$q_b = c_{uk} \cdot N_c + \sigma_v$$

con:

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

- $q_b$  = resistenza calcolata specifica di base;
- $N_c$  = fattore di capacità portante adimensionale (si adotta generalmente  $N_c = 9$ );
- $c_{uk}$  = coesione non drenata caratteristica;
- $\sigma_v$  = tensione verticale totale alla profondità  $z$ .

Pertanto la resistenza di base calcolata è pari a:

$$R_{b,cal} = \frac{1}{4} \pi \phi^2 q_b$$

Resistenza laterale calcolata –  $R_{s,cal}$ :

$$\tau_{lik} = \alpha \cdot c_{uik}$$

con:

- $\tau_{lik}$  = resistenza calcolata specifica laterale dello strato  $i$ -esimo,  $\tau_{lim} = 100$  kPa (AGI);
- $c_{uik}$  = coesione caratteristica non drenata dello strato  $i$ -esimo;
- $\alpha$  = coefficiente empirico, dipendente dal tipo di terreno, dal metodo di installazione del palo e dal materiale costituente il palo (Tabella 3.3).

Pertanto la resistenza laterale calcolata è pari a:

$$R_{s,cal} = \pi \phi \sum_i^n \tau_{lik} h_i$$

| Materiale    |         | $c_u$ (kPa) | $q_a$      | $q_{a,max}$ (kPa) |
|--------------|---------|-------------|------------|-------------------|
| PALI INFISSI | CLS     | $\leq 25$   | $c_u$      | 120               |
|              |         | $25 < 50$   | $0.85 c_u$ |                   |
|              |         | $50 < 75$   | $0.65 c_u$ |                   |
|              |         | $\geq 75$   | $0.50 c_u$ |                   |
| PALI INFISSI | ACCIAIO | $\leq 25$   | $c_u$      | 100               |
|              |         | $25 < 50$   | $0.80 c_u$ |                   |
|              |         | $50 < 75$   | $0.65 c_u$ |                   |
|              |         | $> 75$      | $0.50 c_u$ |                   |
| TRIVELLATI   | CLS     | $\leq 25$   | $0.90 c_u$ | 100               |
|              |         | $25 < 50$   | $0.80 c_u$ |                   |
|              |         | $50 < 75$   | $0.60 c_u$ |                   |
|              |         | $\geq 75$   | $0.40 c_u$ |                   |

Tabella 3.3: valori indicativi dell'adesione  $q_a = \alpha c_u$  per pali in terreni coesivi (AGI – 1984)

### 3.6.1.2 Terreni a comportamento prevalentemente incoerente

Con riferimento alle Raccomandazioni AGI sui pali di fondazione la resistenza di base può essere determinata come segue.

Resistenza di base calcolata –  $R_{b,cal}$ :

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

$$q_b = N_q^* \cdot \sigma'_v$$

dove:

- $N_q^*$  è assunto secondo Berezantzev (Figura 3.6) e corrisponde all'insorgere nel terreno delle prime deformazioni plastiche (cedimento della base del palo pari a  $(0.06 \div 0.1)\Phi$ );
- $\sigma'_v$  rappresenta la tensione verticale efficace alla generica profondità  $z$ .

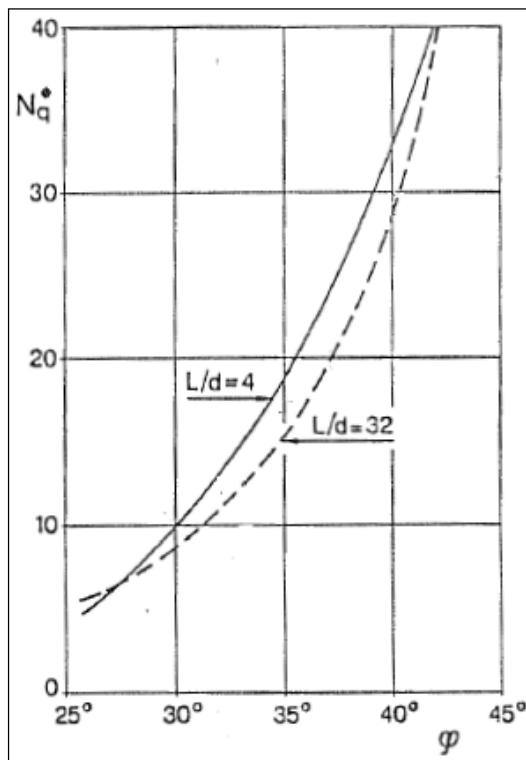


Figura 3.6: coefficienti  $N_q^*$  corrispondenti all'insorgere delle deformazioni plastiche della punta (Berezantzev, 1963 – AGI)

Pertanto la resistenza di base calcolata è pari a:

$$R_{b,cal} = \frac{1}{4} \pi \phi^2 q_b$$

Resistenza laterale calcolata –  $R_{s,cal}$ :

Nei terreni granulari costituiti da sabbie e ghiaie la portata unitaria per attrito laterale ( $\tau_i$ ) è ricavabile dalla seguente espressione (AGI):

$$\tau_{lki} = q_a + \mu \cdot k \cdot \sigma'_v = q_a + \beta \cdot \sigma'_v$$

dove:

- $q_a$  è un termine di adesione indipendente dalla tensione normale, assunto pari a 0 per terreni incoerenti.
- $\mu$  è il coefficiente di attrito tra palo e terreno e, per pali trivellati, è assunto pari alla tangente dell'angolo di resistenza al taglio efficace del terreno.



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

- $k$  è un coefficiente adimensionale che esprime il rapporto fra la tensione normale che agisce alla profondità  $z$  sulla superficie laterale del palo e la tensione verticale alla stessa profondità. Esso viene assunto pari al coefficiente di spinta a riposo, ma limitato nell'intervallo  $0.4 \div 0.7$ , in accordo con le raccomandazioni AGI.
- $\sigma'_v$  rappresenta la tensione verticale efficace alla generica profondità  $z$ .

Anche per i terreni incoerenti si sceglie di limitare la resistenza laterale unitaria a  $\tau_{lim} = 100$  kPa.

Pertanto la resistenza laterale calcolata è pari a:

$$R_{s,cal} = n\phi \sum_i^n \tau_{lki} h_i$$

### 3.6.2 Capacità portante dei pali in gruppo soggetti a carichi assiali

Il carico limite  $Q_{lim,N}$  di un gruppo di  $N$  pali differisce, in generale, dal prodotto del carico limite  $Q_{lim}$  del singolo palo per il numero  $N$  dei pali del gruppo.

Si pone:

$$Q_{lim,N} = N \cdot E_v \cdot Q_{lim}$$

dove il fattore  $E_v$  è detto efficienza della palificata.

Tale carico limite viene confrontato in fase progettuale con l'azione verticale  $P$  totale agente sulla palificata (ipotesi di palificata soggetta a solo carico verticale e quindi distribuzione uniforme del carico  $P$  sui pali).

In realtà, l'eventuale presenza di azioni flessionali in testa palificata determina una non omogeneità degli sforzi assiali agenti sul singolo palo; di conseguenza, il soddisfacimento della verifica di capacità portante del gruppo di pali NON implica il soddisfacimento della verifica di capacità portante del singolo palo.

#### 3.6.2.1 Terreni coesivi

Pali con interasse superiore a 3 diametri

L'efficienza per terreni coesivi è pari a:

- $E_v=1$  per interasse dei pali di 8 diametri;
- $E_v=0.7$  per interasse dei pali di 3 diametri;
- $0.7 < E_v < 1$  per interasse dei pali compreso fra 3 e 8 diametri.

Per un gruppo costituito da  $m$  file di pali con  $n$  pali per ciascuna fila, si potrà adottare la formula empirica di Converse-Labarre:

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

$$E_v = 1 - \frac{2 \cdot \arctg(d / i)}{\pi} \cdot \left(2 - \frac{1}{m} - \frac{1}{n}\right)$$

in cui:

- d = diametro del palo;
- i = minimo interasse dei pali;
- m = numero di file di pali;
- n = numero di pali per singola fila.

#### Pali con interasse inferiore a 3 diametri

La portanza del gruppo viene calcolata in accordo al criterio proposto da Terzaghi & Peck (1967):

$$Q_B = 2 \cdot (B + h) \cdot \sum_1^n \tau_i \cdot L_i + B \cdot h \cdot N_c \cdot c_u$$

dove:

- B, h = dimensioni in pianta della fondazione equivalente (Figura 3.7);
- $\tau_i$  = tensione tangenziale dello strato i-esimo;
- $L_i$  = altezza dello strato i-esimo (Figura 3.7);
- $c_u$  = coesione alla base del blocco;
- $N_c$  = fattore di capacità portante adimensionale desunto dalla Tabella 3.4 sulla base dei rapporti h/B e L/B

Nel caso di gruppo di pali soggetto a sforzi di trazione, la portanza di base non dovrà essere considerata.

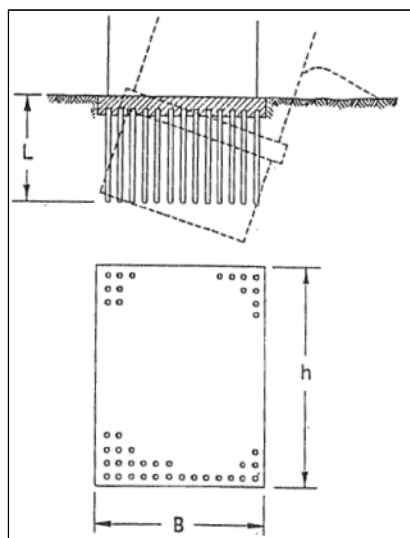


Figura 3.7: schema di rottura del terreno per effetto della palificata quale blocco in terreni coesivi (Terzaghi & Peck, 1967)

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

| L/B  | N <sub>c</sub> |        |
|------|----------------|--------|
|      | h/B=1          | h/B≥10 |
| 0.25 | 6.7            | 5.6    |
| 0.50 | 7.1            | 5.9    |
| 0.75 | 7.4            | 6.2    |
| 1.00 | 7.7            | 6.4    |
| 1.50 | 8.1            | 6.8    |
| 2.00 | 8.4            | 7.0    |
| 2.50 | 8.6            | 7.2    |
| 3.00 | 8.8            | 7.4    |
| ≥4   | 9.0            | 7.5    |

Tabella 3.4: coefficiente N<sub>c</sub> per la determinazione della portanza del gruppo (AGI, 1984)

### 3.6.2.2 Terreni incoerenti

Per i terreni a comportamento prevalentemente incoerente, l'efficienza del gruppo di pali dipende, oltre che dall'interasse dei pali, anche dallo stato di addensamento del materiale.

#### Sabbia sciolta

In genere l'efficienza di un gruppo di pali in sabbie sciolte è superiore all'unità; in sede di progettazione verrà assunta efficienza  $E_v = 1$ .

#### Sabbia densa

Il coefficiente di efficienza varia fra  $E_v = 0.7$  per interasse dei pali da 3 a 6 diametri a  $E_v = 1.0$  per interasse pari a 8 diametri.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

### 3.6.3 Curve di capacità portante

Sulla base dei criteri di cui al §3.6.1 e della caratterizzazione geotecnica, per il sito in esame è stato prodotto un grafico rappresentante l'andamento dei valori di capacità portante in funzione della lunghezza dei pali. Tali curve sono state ottenute con le seguenti ipotesi:

- Pali trivellati da 800 mm di diametro;
- Pali considerati singolarmente, al netto degli effetti di gruppo.

Nel grafico seguente sono rappresentati i seguenti valori di capacità portante:

- $R_dA1,1$  = valore di progetto della capacità portante complessiva (laterale + punta) calcolata secondo l'Approccio 1, Combinazione 1 di cui al §6.4.3.1. del D.M. 14/01/2008.
- $R_dA1,2$  = valore di progetto della capacità portante complessiva (laterale + punta) calcolata secondo l'Approccio 1, Combinazione 2 di cui al §6.4.3.1. del D.M. 14/01/2008.
- $R_dA1,2$  sismico = valore di progetto della capacità portante complessiva (laterale + punta) calcolata secondo l'Approccio 1, Combinazione 2 in condizioni sismiche nelle quali, in accordo con il §7.11.5.3. del D.M. 14/01/2008, si impiega il coefficiente parziale  $R3$  per le resistenze.
- $R_dA2,1$  = valore di progetto della capacità portante complessiva (laterale + punta) calcolata secondo l'Approccio 2 di cui al §6.4.3.1. del D.M. 14/01/2008.
- $Q_{lim}$  = valore caratteristico calcolato della capacità portante complessiva (laterale + punta).
- $Q_s$  = valore caratteristico calcolato della capacità portante laterale.
- $Q_b$  = valore caratteristico calcolato della capacità portante di punta.
- $Q_s/1.5 - \Delta W_p$  = capacità portante laterale con coefficiente di sicurezza 1.5 al netto della differenza tra peso proprio del palo e peso del volume di terreno asportato. Utile valore di riferimento per le sollecitazioni in condizioni di esercizio (combinazione quasi permanente).
- $Q_{amm FS=2.5}$  = valore ammissibile della capacità portante in riferimento al metodo "delle tensioni ammissibili", calcolato a partire dal valore caratteristico mediante coefficiente di sicurezza globale pari ad  $FS = 2.5$ .

Sulla base della stratigrafia indicata in Tabella 3.5, sono state ottenute le curve di capacità portante rappresentate in Figura 3.8.

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

| UNITA' | da<br>[m] | a<br>[m] | $\gamma$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $C_{uk}$<br>[kPa] | $\alpha C_u$<br>[kPa] | $\phi'_k$<br>[°] | k    | $\tan\phi'$ | $k\tan\phi'$ | $N_q^*$ |     |     |
|--------|-----------|----------|----------------------------------|-------------------|-----------------------|------------------|------|-------------|--------------|---------|-----|-----|
| A      | 0,0       | 5,0      | 19,5                             | 150               | 60                    | 22               |      |             |              |         | A = | AL1 |
| B      | 5,0       | 8,0      | 19,5                             | 250               | 100                   | 25               |      |             |              |         | B = | AL2 |
| C      | 8,0       | 14,5     | 21,0                             | 0                 | 0                     | 44               | 0,40 | 0,97        | 0,39         | 40      | C = | GS  |
| D      | 14,5      | 19,5     | 19,5                             | 150               | 60                    | 22               |      |             |              |         | D = | AL1 |
| E      | 19,5      | 21,5     | 21,0                             | 0                 | 0                     | 44               | 0,40 | 0,97        | 0,39         | 40      | E = | GS  |
| F      | 21,5      | 26,0     | 19,5                             | 150               | 60                    | 22               |      |             |              |         | F = | AL1 |
| G      | 26,0      | 35,0     | 21,0                             | 0                 | 0                     | 44               | 0,40 | 0,97        | 0,39         | 40      | G = | GS  |

Tabella 3.5: stratigrafia e parametri geotecnici del terreno valutati in corrispondenza del sottopasso rio Cassola.

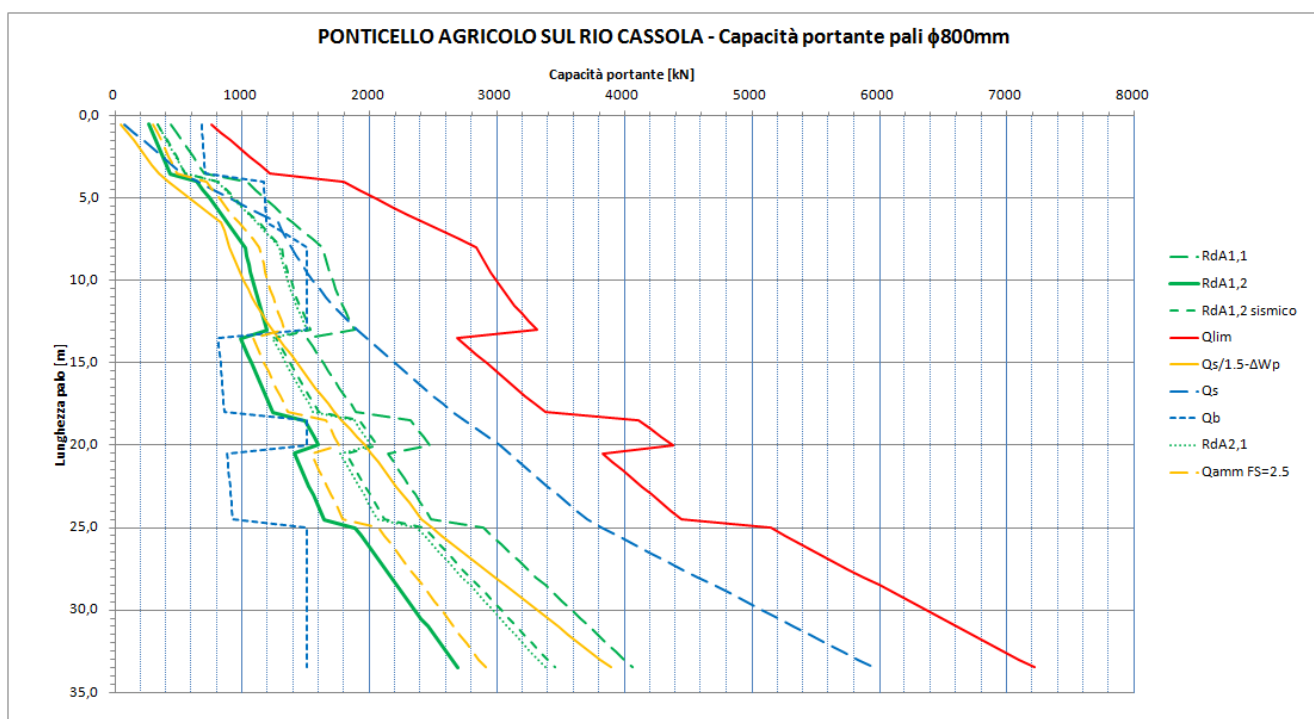


Figura 3.8: curve di capacità portante per pali  $\phi 800$  in corrispondenza del sottopasso rio Cassola.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

## 4. AZIONI

Nel seguito vengono elencati tutte le azioni di cui si è tenuto conto per la valutazione dello stato di sollecitazione dei manufatti analizzati, in accordo con il § 5.1.3 di NTC 2008.

### 4.1 Carichi permanenti strutturali $g_1$

I carichi permanenti strutturali sono stati determinati considerando un peso per unità di volume del calcestruzzo, sia ordinario che precompresso, pari a  $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$ .

### 4.2 Carichi permanenti portati $g_2$

I carichi permanenti portati sono costituiti dai pesi di piattaforma stradale, cordoli e barriere stradali.

- Pavimentazione stradale:

$$g_{2,pavimentazione} = 3 \text{ kN/m}^2$$

azione applicata su tutto l'impalcato ad esclusione della zona occupata dai cordoli.

- Barriere stradali:

$$q_{barriera} = 1,5 \text{ kN/m}$$

- Cordolo:

Il cordolo ha uno spessore medio di 0,14 m e una larghezza di 0,81 m. Considerando anche il peso della veletta il carico del cordolo per metro di lunghezza è pari a

$$q_{cordolo} = 25 \text{ kN/m}^3 \times 0,14 \text{ m} \times 0,81 \text{ m} + 2 \text{ kN/m} = 4,8 \text{ kN/m}$$

### 4.3 Spinta delle terre su spalle e muri d'ala $g_{3\_t}$

Data la notevole rigidità dei manufatti, le spinte agenti sui paramenti verticali sono state calcolate considerando le strutture **poco deformabili**, perciò, secondo quanto affermato al § 3.1, utilizzando le formule relative a condizioni a riposo del terreno.

Per i manufatti in esame si considera a tergo dei paramenti un terreno di riempimento, caratterizzato dai seguenti parametri geotecnici:

- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ , peso dell'unità di volume del terreno
- $\varphi' = 30^\circ$ , angolo di attrito in condizioni drenate.

Il coefficiente di spinta a riposo vale:

$$K_0 = 1 - \tan(\varphi') = 0,50$$

### 4.4 Spinta delle terre dovuta al sovraccarico da traffico $g_{3\_q}$

Per la determinazione della sovraspinta del terreno a tergo dei paramenti dei manufatti si è operato come descritto in seguito.

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

Sul rilevato è stato considerato agente lo schema di carico 1 (cap. 5 delle NTC 2008), in cui, per semplicità, i carichi tandem sono stati sostituiti da carichi uniformemente distribuiti equivalenti, applicati su una superficie rettangolare di lati 3,0 m x 2,2 m.

Il valore della pressione verticale agente in superficie vale quindi:

$$\sigma_{v0} = \frac{2 \times 300 \text{ kN} + 3 \text{ m} \times 2,2 \text{ m} \times 9 \text{ kN/m}^2}{3 \text{ m} \times 2,2 \text{ m}} = 659,4 \text{ kN/6,6 m}^2 \cong 100 \text{ kN/m}^2$$

Alla base dei paramenti è stato calcolato il valore di pressione verticale tenendo conto di un angolo di diffusione del carico nel terreno pari all'angolo di resistenza al taglio dello stesso.

La sovraspinta orizzontale del terreno viene quindi determinata considerando condizioni a riposo del terreno ed ha una distribuzione decrescente con la profondità.

## 4.5 Azioni variabili da traffico qt

Le azioni variabili da traffico agenti sulla sovrastruttura sono state determinate sulla base del § 5.1.3.3 delle NTC 2008.

Lo schema di carico più gravoso risulta lo schema di carico 1. Tale schema è costituito da carichi concentrati di 300 kN su due assi in tandem, applicati su impronte di pneumatico di forma quadrata e lato 0,4 m e da carichi uniformemente distribuiti di 9 kN/m<sup>2</sup>. Nella figura seguente si riporta lo schema di carico descritto:

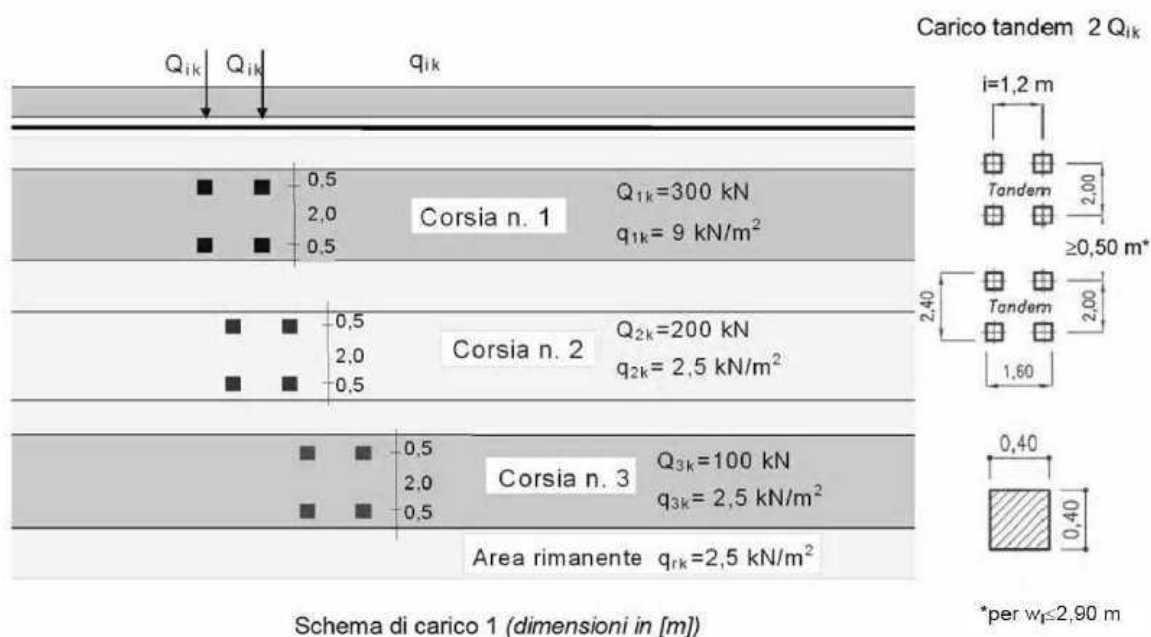


Figura 4.1: Schema di carico 1.

L'applicazione dei carichi tandem è stata effettuata tenendo conto della diffusione degli stessi fino al piano medio dell'impalcato.

La disposizione delle impronte e delle corsie è stata valutata con lo scopo di massimizzare le sollecitazioni interne nelle sezioni di verifica.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

## 4.6 Azione longitudinale di frenamento $q_3$

Secondo quanto riportato nel § 5.1.3.5 di NTC 2008, la forza di frenamento o di accelerazione  $q_3$  è funzione del carico verticale totale agente sulla Corsia Convenzionale n.1 e, per i ponti di 1ª categoria, è data dalla seguente formula:

$$180 \text{ kN} \leq q_3 = 0,6 \cdot (2 \cdot Q_{1k}) + 0,1 \cdot q_{1k} \cdot w_l \cdot L \leq 900 \text{ kN}$$

Dove:

$w_l$ : larghezza della Corsia Convenzionale;

$L$ : lunghezza della zona caricata (lunghezza impalcato).

La forza, applicata a livello della pavimentazione, include gli effetti di interazione ed è stata applicata come un'azione uniformemente distribuita su un'area di lunghezza  $L$  e di larghezza pari alla larghezza delle impronte del mezzo convenzionale dello schema di carico 1 diffuse sul piano medio dell'impalcato (si veda Figura 4.1).

L'azione longitudinale di frenamento è stata determinata con la seguente espressione:

$$q_3 = 0,6 \cdot (2 \cdot 300 \text{ kN}) + 0,1 \cdot 9 \text{ kN/m}^2 \cdot 3 \text{ m} \cdot 13,50 \text{ m} = 396 \text{ kN}$$

## 4.7 Azione sulle barriere di sicurezza: urto del veicolo in svio $q_8$

Secondo quanto riportato nel § 5.1.3.10 di NTC 2008, i sicurvia e gli elementi strutturali ai quali sono collegati devono essere dimensionati in funzione della classe di contenimento richiesta per l'impiego specifico. Se non diversamente specificato, la forza deve essere considerata distribuita su 0,5 m. Nello specifico, la barriera bordo ponte dovrà avere classe di contenimento H3.

Sulla base di un'analisi dell'attuale produzione dei principali fabbricatori di barriere di sicurezza in acciaio, si ipotizza per il montante del guard-rail un profilo HE140A, caratterizzato da un modulo di resistenza

$$W_{pl} = 173,5 \text{ cm}^3$$

Tale assunzione è cautelativa in quanto si tratta del montante flessionalmente più resistente impiegato per barriere di classe H3 bordo ponte, che normalmente impiegano profili ad U di minore inerzia. In un'ottica di capacity design si assume come massima azione orizzontale di urto quella a cui corrisponde il momento plastico della sezione del montante.

I profili metallici dei montanti sono costituiti da un acciaio tipo S275. Per il calcolo del momento plastico si adotta alla tensione media di snervamento dell'acciaio:

$$f_{y,m} = f_{y,k} \cdot 1,15 = 275 \cdot 1,15 = 316,25 \text{ MPa}$$

Il momento plastico è:

$$M_{pl} = W_{pl} \cdot f_{y,m} = 173500 \text{ mm}^3 \cdot 316,25 \text{ N/mm}^2 = 54,9 \text{ kNm}$$

Il punto di applicazione della forza si trova a 60cm dal piano stradale. Si ha quindi:

$$F_h = \frac{M_{pl}}{0,6 \text{ m}} = \frac{54,9 \text{ kNm}}{0,6 \text{ m}} \cong 91,5 \text{ kN}$$



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

## 4.8 Spinta sismica delle terre E

Le spinte sismiche vengono determinate secondo quanto riportato al § 3.2.2 relativamente alle strutture a portale.

## 4.9 Inerzia degli elementi strutturali e non strutturali in condizione sismica

In caso di sisma, oltre alla sovraspinta del terreno, si sviluppa anche una forza inerziale determinata dalla massa degli elementi strutturali e non strutturali.

Tale forza inerziale è valutata come una forza uniformemente distribuita applicata agli elementi strutturali nella direzione del sisma, valutata come il prodotto delle accelerazioni descritte al § 3.4 considerando le masse relative a:

- peso proprio della sovrastruttura e dei carichi permanenti (pavimentazione, barriere, cordoli, eventuale ricoprimento di terreno) per quanto attiene l'impalcato;
- peso proprio del paramento sommato al peso dell'eventuale terreno imbarcato per quanto attiene le pareti e le spalle.

L'accelerazione adimensionalizzata di progetto è data dalla seguente espressione:

$$S_d(T) = a_g \cdot S_S \cdot S_T \cdot \frac{1}{q} \cdot F_0 = 0,203g \cdot 1,4 \cdot 1 \cdot \frac{1}{1,5} \cdot 2,403 = 0,46g$$

## 4.10 Deformazioni impresse

### 4.10.1 Distorsioni e presollecitazioni di progetto

Le presollecitazioni di progetto sulle travi precomprese verranno considerate nelle verifiche.

### 4.10.2 Effetti reologici: ritiro e viscosità; variazioni termiche

Viste le modeste dimensioni del manufatto oggetto di studio gli effetti del ritiro e quelli dovuti a variazioni termiche possono essere trascurati.

Gli effetti della viscosità sul calcestruzzo verranno considerati nelle verifiche assumendo per il calcestruzzo il modulo elastico a lungo termine

### 4.10.3 Cedimenti vincolari

I cedimenti vincolari non risultano significativi per l'opera oggetto di studio e verranno quindi trascurati.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

## 5. COMBINAZIONI DI CARICO

Le combinazioni di carico, utilizzate per condurre le verifiche agli stati limite ultimi e agli stati limite di esercizio, sono state originate in ottemperanza con quanto prescritto dalla vigente normativa.

### 5.1 Combinazioni per la verifica allo SLU

Le verifiche allo stato limite ultimo da considerare sono:

SLU di tipo geotecnico (GEO): collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno;

SLU di tipo strutturale (STR): raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali.

Avendo a che fare con opere fuori terra ed interrato, le verifiche saranno condotte secondo l'approccio progettuale "Approccio 1", utilizzando i coefficienti parziali riportati nella Tabella 5.1.V di NTC 2008 per le azioni.

Combinazione 1 → (A1+M1+R1) ⇒ STR (verifiche degli elementi strutturali);

Combinazione 2 → (A2+M2+R2) ⇒ GEO (carico limite).

Tabella 5.1: Coefficienti parziali per i parametri del terreno (Tabella 6.2.II NTC 2008).

| PARAMETRO                                    | GRANDEZZA ALLA QUALE<br>APPLICARE IL COEFF.<br>PARZIALE | COEFFICIENTE<br>PARZIALE<br>$\gamma_M$ | $M_1$ | $M_2$ |
|--|---|--|-------|-------|
| Tangente dell'angolo di resistenza al taglio | $\tan \varphi'_k$                                       | $\gamma_{\varphi'}$                    | 1.0   | 1.25  |
| Coesione efficace                            | $c'_k$  | $\gamma_{c'}$                          | 1.0   | 1.25  |
| Resistenza non drenata                       | $c_{uk}$  | $\gamma_{cu}$                          | 1.0   | 1.4   |
| Peso dell'unità di volume                    | $\gamma$  | $\gamma_\gamma$                        | 1.0   | 1.0   |

Tabella 5.2: Coefficienti parziali  $\gamma_R$  per la resistenza del sistema.

| VERIFICA                           | COEFF. PARZIALE<br>(R1) | COEFF. PARZIALE<br>(R2) |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Capacità portante della fondazione | $\gamma_R = 1$          | $\gamma_R = 1$          |
| Scorrimento                        | $\gamma_R = 1$          | $\gamma_R = 1$          |
| Resistenza del terreno a valle     | $\gamma_R = 1$          | $\gamma_R = 1$          |

Ai fini delle verifiche degli stati limite ultimi si definiscono le seguenti combinazioni:

$$\text{STR} \quad \Rightarrow \quad \gamma_{G1}G_1 + \gamma_{G2}G_2 + \gamma_P P + \gamma_{Q1}Q_{k1} + \gamma_{0i} \sum_i \psi_{0i} Q_{ki} \quad \Rightarrow \quad \varphi'_d = \varphi'_k$$

$$\text{GEO} \quad \Rightarrow \quad \gamma_{G1}G_1 + \gamma_{G2}G_2 + \gamma_P P + \gamma_{Q1}Q_{k1} + \gamma_{0i} \sum_i \psi_{0i} Q_{ki} \quad \Rightarrow \quad \varphi'_d = \tan^{-1}[\tan(\varphi'_k/\gamma_\varphi)]$$

I valori dei coefficienti parziali delle azioni sono dedotti dalla tabella 5.1.V di NTC 2008.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

**Tabella 5.1.V – Coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni di carico agli SLU**

|   |                           | Coefficiente  | EQU <sup>(1)</sup>          | A1<br>STR                   | A2<br>GEO    |
|---|---------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|--------------|
| Carichi permanenti  | favorevoli<br>sfavorevoli | $\gamma_{G1}$   | 0,90<br>1,10                | 1,00<br>1,35                | 1,00<br>1,00 |
| Carichi permanenti non strutturali <sup>(2)</sup>               | favorevoli<br>sfavorevoli | $\gamma_{G2}$   | 0,00<br>1,50                | 0,00<br>1,50                | 0,00<br>1,30 |
| Carichi variabili da traffico                                   | favorevoli<br>sfavorevoli | $\gamma_Q$  | 0,00<br>1,35                | 0,00<br>1,35                | 0,00<br>1,15 |
| Carichi variabili   | favorevoli<br>sfavorevoli | $\gamma_{Qi}$   | 0,00<br>1,50                | 0,00<br>1,50                | 0,00<br>1,30 |
| Distorsioni e presollecitazioni di progetto                     | favorevoli<br>sfavorevoli | $\gamma_{\epsilon 1}$   | 0,90<br>1,00 <sup>(3)</sup> | 1,00<br>1,00 <sup>(4)</sup> | 1,00<br>1,00 |
| Ritiro e viscosità, Variazioni termiche,<br>Cedimenti vincolari | favorevoli<br>sfavorevoli | $\gamma_{\epsilon 2}, \gamma_{\epsilon 3}, \gamma_{\epsilon 4}$ | 0,00<br>1,20                | 0,00<br>1,20                | 0,00<br>1,00 |

<sup>(1)</sup> Equilibrio che non coinvolga i parametri di deformabilità e resistenza del terreno; altrimenti si applicano i valori di GEO.

<sup>(2)</sup> Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

<sup>(3)</sup> 1,30 per instabilità in strutture con precompressione esterna

<sup>(4)</sup> 1,20 per effetti locali

Il coefficiente  $\gamma_p$  della precompressione vale 1,00, sia in condizioni favorevoli che sfavorevoli.

## 5.2 Combinazioni per la verifica allo SLE

Ai fini delle verifiche degli stati limite di esercizio (fessurazione/ stato tensionale) si definiscono le seguenti combinazioni:

|                  |               |  |               |                           |
|------------------|---------------|--|---------------|---------------------------|
| Frequente        | $\Rightarrow$ | $G_1 + G_2 + P + \psi_{11} Q_{k1} + \sum_i \psi_{2i} Q_{ki}$ | $\Rightarrow$ | $\varphi'_d = \varphi'_k$ |
| Quasi permanente | $\Rightarrow$ | $G_1 + G_2 + P + \psi_{21} Q_{k1} + \sum_i \psi_{2i} Q_{ki}$ | $\Rightarrow$ | $\varphi'_d = \varphi'_k$ |
| Rara             | $\Rightarrow$ | $G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \sum_i \psi_{0i} Q_{ki}$           | $\Rightarrow$ | $\varphi'_d = \varphi'_k$ |

I valori dei coefficienti di combinazione sono dedotti dalla tabella 5.1.VI di NTC 2008.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

**Tabella 5.1.VI - Coefficienti  $\psi$  per le azioni variabili per ponti stradali e pedonali**

| Azioni                              | Gruppo di azioni (Tabella 5.1.IV)     | Coefficiente $\psi_0$ di combinazione | Coefficiente $\psi_1$ (valori frequenti) | Coefficiente $\psi_2$ (valori quasi permanenti) |
|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---|
| Azioni da traffico (Tabella 5.1.IV) | Schema 1 (Carichi tandem)             | 0,75                                  | 0,75                                     | 0,0   |
|                                     | Schemi 1, 5 e 6 (Carichi distribuiti) | 0,40                                  | 0,40                                     | 0,0   |
|                                     | Schemi 3 e 4 (carichi concentrati)    | 0,40                                  | 0,40                                     | 0,0   |
|                                     | Schema 2                              | 0,0                                   | 0,75                                     | 0,0   |
|                                     | 2                                     | 0,0                                   | 0,0                                      | 0,0   |
|                                     | 3                                     | 0,0                                   | 0,0                                      | 0,0   |
|                                     | 4 (folla)                             | ----                                  | 0,75                                     | 0,0   |
|                                     | 5                                     | 0,0                                   | 0,0                                      | 0,0   |
| Vento $q_s$                         | Vento a ponte scarico                 |                                       |  |   |
|                                     | SLU e SLE                             | 0,6                                   | 0,2                                      | 0,0   |
|                                     | Esecuzione                            | 0,8                                   | ----                                     | 0,0   |
| Neve $q_s$                          | Vento a ponte carico                  | 0,6                                   |  |   |
|                                     | SLU e SLE                             | 0,0                                   | 0,0                                      | 0,0   |
| Temperatura                         | esecuzione                            | 0,8                                   | 0,6                                      | 0,5   |
|                                     | $T_k$                                 | 0,6                                   | 0,6                                      | 0,5   |

### 5.3 Combinazioni per la condizione sismica

Per la condizione sismica, le combinazioni per gli stati limite ultimi da prendere in considerazione sono le seguenti (Approccio 1):

$$\begin{array}{llll}
 \text{STR} & \Rightarrow & E + G_1 + G_2 + P + \sum_i \psi_{2i} Q_{ki} & \Rightarrow \varphi'_d = \varphi'_k \\
 \text{GEO} & \Rightarrow & E + G_1 + G_2 + P + \sum_i \psi_{2i} Q_{ki} & \Rightarrow \text{spinte} \quad \varphi'_d = \tan^{-1}[\tan(\varphi'_k/\gamma_\varphi)]
 \end{array}$$

Gli effetti dell'azione sismica saranno valutati tenendo conto delle masse associate ai seguenti carichi gravitazionali:

$$G_1 + G_2 + \sum_i \psi_{2i} Q_{ki}$$

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

## 6. CRITERI DI CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI

L'impiego di elementi in conglomerato cementizio armato prefabbricato nella realizzazione dei manufatti impone un procedimento costruttivo ben definito, il quale influisce direttamente sul comportamento statico dell'opera e quindi sul calcolo delle sollecitazioni. Il calcolo delle sollecitazioni si basa quindi considerando due fasi:

- Fase 1: in tale fase l'impalcato è costituito dalle sole travi prefabbricate semplicemente appoggiate alle pareti. Le travi prefabbricate sono sollecitate dal peso proprio  $g_1$  delle travi prefabbricate e del getto in opera. Lo schema statico delle travi è di semplice appoggio.
- Fase 2: in seguito all'indurimento del getto in opera, agiscono successivamente i carichi permanenti portati  $g_2$ , la spinta del terreno e i carichi variabili.

Tali carichi agiscono su una struttura costituita da un telaio su pali (modellazione del terreno tramite molle elastiche lineari) e vi è continuità di momento fra la copertura e i piedritti costituiti dalle spalle.

La sezione resistente dell'impalcato è costituita dalla trave prefabbricata e dal getto in opera (area omogeneizzata rispetto alla trave prefabbricata).

Le sollecitazioni aggiuntive causate dal *fluage* del calcestruzzo verranno in seguito valutate in base a opportune considerazioni sulle deformazioni a lungo termine dell'impalcato.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

## 7. CRITERI PER LE VERIFICHE A FESSURAZIONE E TENSIONALI

La verifica a fessurazione è stata svolta sia secondo il metodo indiretto tabellare proposto al punto C4.1.2.2.4 della CM 2009.

Tale verifica si effettua confrontando la tensione di trazione agente nelle barre in acciaio, calcolata in ipotesi classica di sezione parzializzata (metodo "n" con  $n = 15$ ) secondo la combinazione di calcolo pertinente (a seconda dell'aggressività dell'ambiente, si veda Tabella 4.1.IV di NTC 2008), con i valori tabellati in funzione del diametro massimo delle barre (Tabella C4.1.II CM 2009) e dell'interasse tra le barre stesse (Tabella C4.1.III CM 2009).

**Tabella 4.1.IV – Criteri di scelta dello stato limite di fessurazione**

| Gruppi di esigenze | Condizioni ambientali | Combinazione di azioni | Armatura           |            |                |            |
|--------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|------------|----------------|------------|
|                    |                       |                        | Sensibile          |            | Poco sensibile |            |
|                    |                       |                        | Stato limite       | $w_d$      | Stato limite   | $w_d$      |
| <b>a</b>           | Ordinarie             | frequente              | ap. fessure        | $\leq w_2$ | ap. fessure    | $\leq w_3$ |
|                    |                       | quasi permanente       | ap. fessure        | $\leq w_1$ | ap. fessure    | $\leq w_2$ |
| <b>b</b>           | Aggressive            | frequente              | ap. fessure        | $\leq w_1$ | ap. fessure    | $\leq w_2$ |
|                    |                       | quasi permanente       | decompressione     | -          | ap. fessure    | $\leq w_1$ |
| <b>c</b>           | Molto aggressive      | frequente              | formazione fessure | -          | ap. fessure    | $\leq w_1$ |
|                    |                       | quasi permanente       | decompressione     | -          | ap. fessure    | $\leq w_1$ |

**Tabella C4.1.II Diametri massimi delle barre per il controllo di fessurazione**

| Tensione nell'acciaio<br>$\sigma_s$ [MPa] | Diametro massimo $\phi$ delle barre (mm) |                |                |
|---|--|----------------|----------------|
|   | $w_3 = 0,4$ mm                           | $w_2 = 0,3$ mm | $w_1 = 0,2$ mm |
| 160                                       | 40                                       | 32             | 25             |
| 200                                       | 32                                       | 25             | 16             |
| 240                                       | 20                                       | 16             | 12             |
| 280                                       | 16                                       | 12             | 8              |
| 320                                       | 12                                       | 10             | 6              |
| 360                                       | 10                                       | 8              | -              |

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br>Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014 |
|---|---|--|

**Tabella C4.1.III Spaziatura massima delle barre per il controllo di fessurazione**

| Tensione nell'acciaio<br>$\sigma_s$ [MPa] | Spaziatura massima s delle barre (mm) |                        |                        |
|---|---------------------------------------|------------------------|------------------------|
|   | $w_3 = 0,4 \text{ mm}$                | $w_2 = 0,3 \text{ mm}$ | $w_1 = 0,2 \text{ mm}$ |
| 160                                       | 300                                   | 300                    | 200                    |
| 200                                       | 300                                   | 250                    | 150                    |
| 240                                       | 250                                   | 200                    | 100                    |
| 280                                       | 200                                   | 150                    | 50                     |
| 320                                       | 150                                   | 100                    | -                      |
| 360                                       | 100                                   | 50                     | -                      |

Per la verifica delle tensioni di esercizio, ai sensi delle vigenti norme, la tensione negli elementi di calcestruzzo non può superare il valore di:

0,60  $f_{ck}$  per la combinazione rara (caratteristica);

0,45  $f_{ck}$  per la combinazione quasi permanente.

La tensione nelle barre di armatura deve essere inoltre inferiore al valore di 0,8  $f_{yk}$  per la combinazione rara (caratteristica).

Per il cemento armato precompresso vi sono delle condizioni aggiuntive da verificare, qui di seguito riassunte:

La tensione massima di compressione nel calcestruzzo all'atto di tesatura dei cavi non deve superare il valore 0,70  $f_{ckj}$  essendo  $f_{ckj}$  la resistenza caratteristica del calcestruzzo all'atto del tiro;

La tensione massima di trazione, all'atto del tiro, relativamente ai cavi pretesi, deve essere inferiore al minimo fra 0,80  $f_{ptk}$  e 0,90  $f_{p(0,1)k}$ , dove  $f_{ptk}$  e  $f_{p(0,1)k}$  sono definiti rispettivamente come tensione caratteristica a rottura dell'acciaio e tensione relativa a una deformazione dello 0,1%;

In combinazione rara la tensione massima di trazione nel trefolo deve essere inferiore a 0,80  $f_{p(0,1)k}$ .



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

## 8. MODELLO DI CALCOLO

L'analisi della struttura è stata svolta con il programma agli elementi finiti SAP 2000 v. 15 della "Computers & Structures Inc.", Berkley – California (USA).

La struttura è stata schematizzata con un modello tridimensionale per tenere in conto l'obliquità dell'opera. Il modello tridimensionale è in grado di cogliere tutti i gradi di libertà significativi dell'opera, così come richiesto dal §7.9.3 delle norme vigenti.

Per la modellazione dell'impalcato, delle spalle, dei muri d'ala e della zattera di fondazione sono stati utilizzati elementi bidimensionali (*shell*), mentre per i pali si è fatto uso di elementi monodimensionali (*frame*).

Gli elementi *shell* dell'impalcato hanno spessore di 0,7 m e sono caratterizzati da un modulo elastico equivalente pari alla media pesata del modulo del calcestruzzo delle travi precomprese e del modulo del calcestruzzo della soletta gettata in opera.

La spalla è costituita da elementi *shell* di spessore 1,4 m.

La sezione delle *frame* che costituiscono i pali è circolare con diametro 0,8 m. I pali sono stati discretizzati con elementi di lunghezza 1 m ed ai diversi *joint* sono state assegnate molle elastiche lineari le cui rigidezze orizzontali (in entrambe le direzioni principali) e verticali sono quelle riportate al § 3.3.

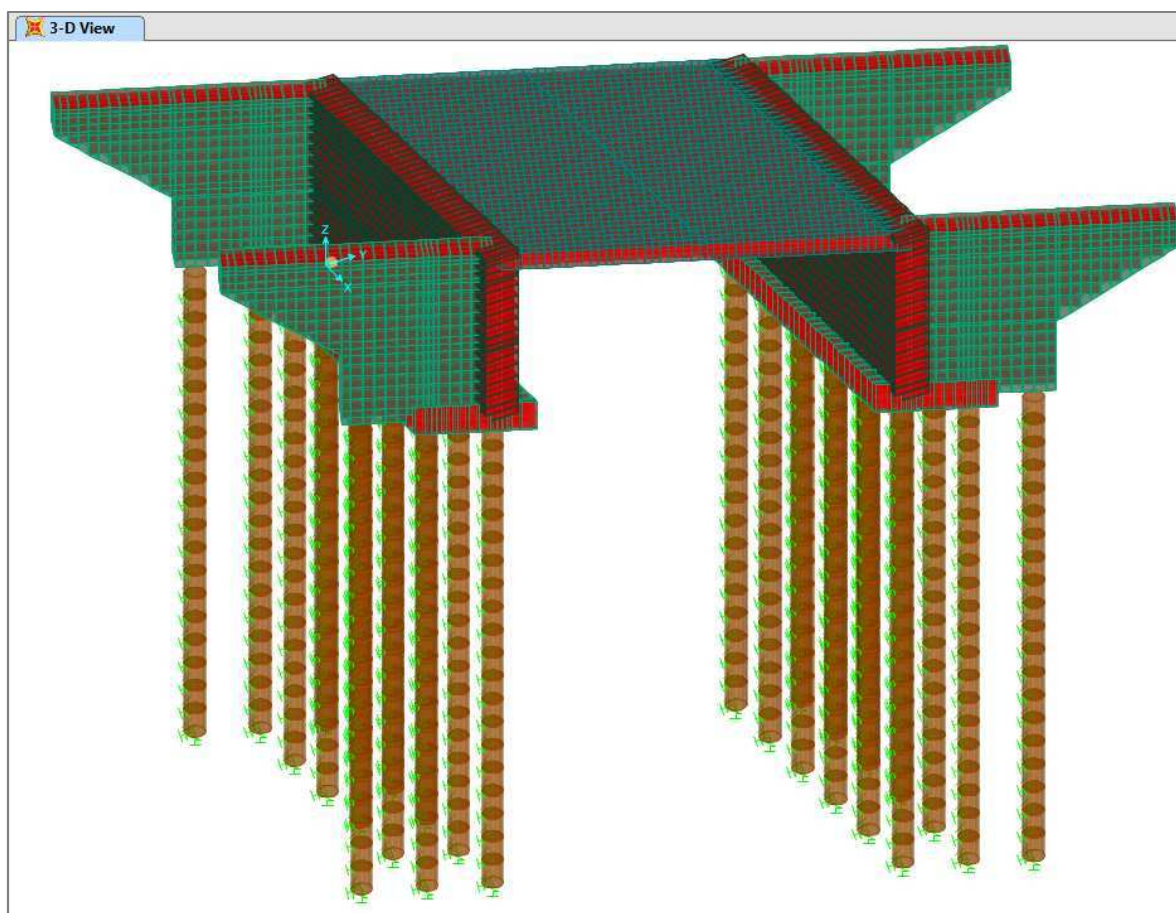


Figura 8.1: Modello 3D agli elementi finiti della struttura.



|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

## 8.1 Azioni applicate al modello di calcolo

Nel seguito si riportano le figure rappresentative delle azioni applicate al modello strutturale.

Si intendono come unità di misura per le forze i kN e per gli spostamenti i m.

### 8.1.1 Carichi permanenti strutturali $g_2$

I carichi permanenti strutturali sono calcolati dal programma di calcolo considerando un peso per unità di volume del calcestruzzo, sia ordinario che precompresso, pari a  $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$ .

### 8.1.2 Carichi permanenti portati $g_2$

Pavimentazione stradale:

$$g_{2,pavimentazione} = 3 \text{ kN/m}^2$$

azione applicata su tutto l'impalcato ad esclusione della zona occupata dai cordoli.

Barriere stradali:

$$q_{barriera} = 1,5 \text{ kN/m}$$

azione applicata in asse ai cordoli per una larghezza di 0,25 m, pari alla minima dimensione degli elementi *shell*.

$$g_{2,barriera} = \frac{1,5 \text{ kN/m}}{0,25 \text{ m}} = 6 \text{ kN/m}^2$$

Cordolo:

Il carico del cordolo è stato distribuito uniformemente su una larghezza pari a 0,75 m

$$g_{2,cordolo} = \frac{4,8 \text{ kN/m}}{0,75 \text{ m}} = 6,4 \text{ kN/m}^2$$

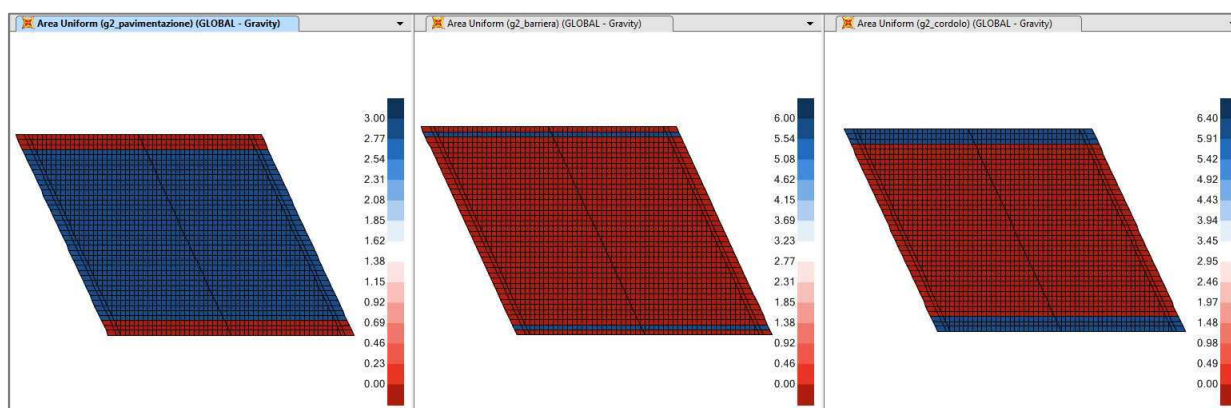


Figura 8.2: Carichi permanenti portati.

### 8.1.3 Spinta delle terre su spalle e muri d'ala $g_{3\_t}$

In corrispondenza della base di spalle e muri d'ala il valore della spinta del terreno è pari a:

$$g_{3,max} = \sigma_{vf} \cdot K_0 = 20 \text{ kN/m}^3 \times 6,5\text{m} \times 0,5 = 65 \text{ kN/m}^2$$

A questo occorre sommare la spinta prodotta dal sovraccarico della pavimentazione

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

$$g_{3,tot} = 65 \text{ kN/m}^2 + K_0 \times 3 \text{ kN/m}^2 = 66,5 \text{ kN/m}^2$$

Inoltre sulla zattera di fondazione agisce un carico prodotto dal peso del terreno e della pavimentazione pari a

$$g_{3,v} = \sigma_{vf} = 20 \text{ kN/m}^3 \times 6,5 \text{ m} + 3 \text{ kN/m}^2 = 133 \text{ kN/m}^2$$

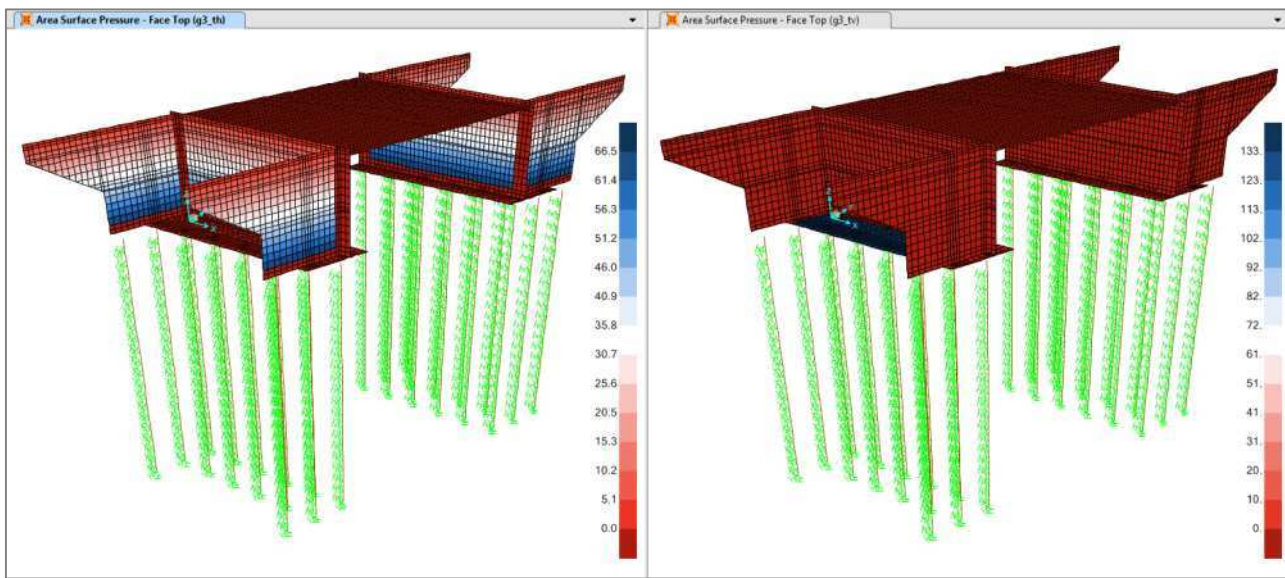


Figura 8.3: Spinta delle terre su spalle e muri d'ala e sovraccarico sul muro di fondazione.

#### 8.1.4 Spinta delle terre dovuta al sovraccarico g3\_q

Il valore della spinta in superficie è pari a:

$$g_{3,q0} = \sigma_{v0} \cdot K_0 = 100 \cdot 0,5 = 50 \text{ kN/m}^2$$

Il valore della spinta alla base della spalla è stato calcolato in corrispondenza del muro d'ala, ovvero considerando la diffusione in un'unica direzione. In via cautelativa tale valore è stato applicato su tutta la spalla e i muri d'ala. Nel modello l'altezza di questi muri è stata assunta pari a 7,7 m (valore massimo). Risulta quindi:

$$g_{3,qb} = \sigma_{vf} \cdot K_0 = \left\{ \frac{659,4 \text{ kN}}{[(3 \text{ m} + (7,7 \text{ m} - 1,2 \text{ m}) \times \tan 30^\circ) \times (2,2 \text{ m} + (7,7 \text{ m} - 1,2 \text{ m}) \times \tan 30^\circ)]} \right\} \cdot 0,5 = 8,2 \text{ kN/m}^2$$

Il sovraccarico da traffico è stato considerato presente o sulla spalla destra, o sulla spalla sinistra o su entrambe.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

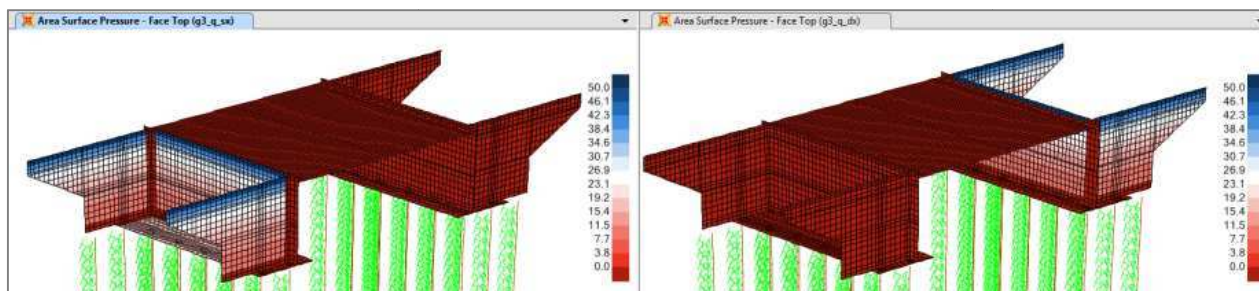


Figura 8.4: Spinta delle terre dovuta al sovraccarico stradale.

### 8.1.5 Azioni variabili da traffico $q_t$

I carichi tandem sono stati considerati applicati sul piano medio del getto in opera tenendo conto di una diffusione a 45°, le dimensioni delle impronte sono riportate in figura.

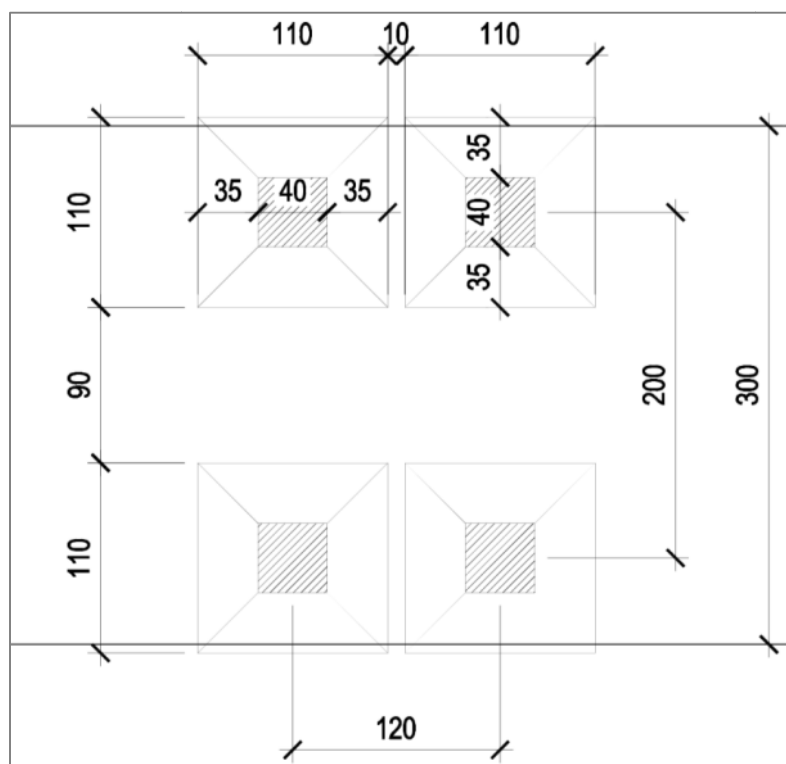


Figura 8.5: Diffusione impronte carichi tandem.

I carichi sono stati applicati in via approssimativa su aree di carico delle dimensioni mostrate in figura:

|  |  |   |
|--|--|---|
|  <b>ENSER</b><br>SOCIETA' DI INGEGNERIA | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|  | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

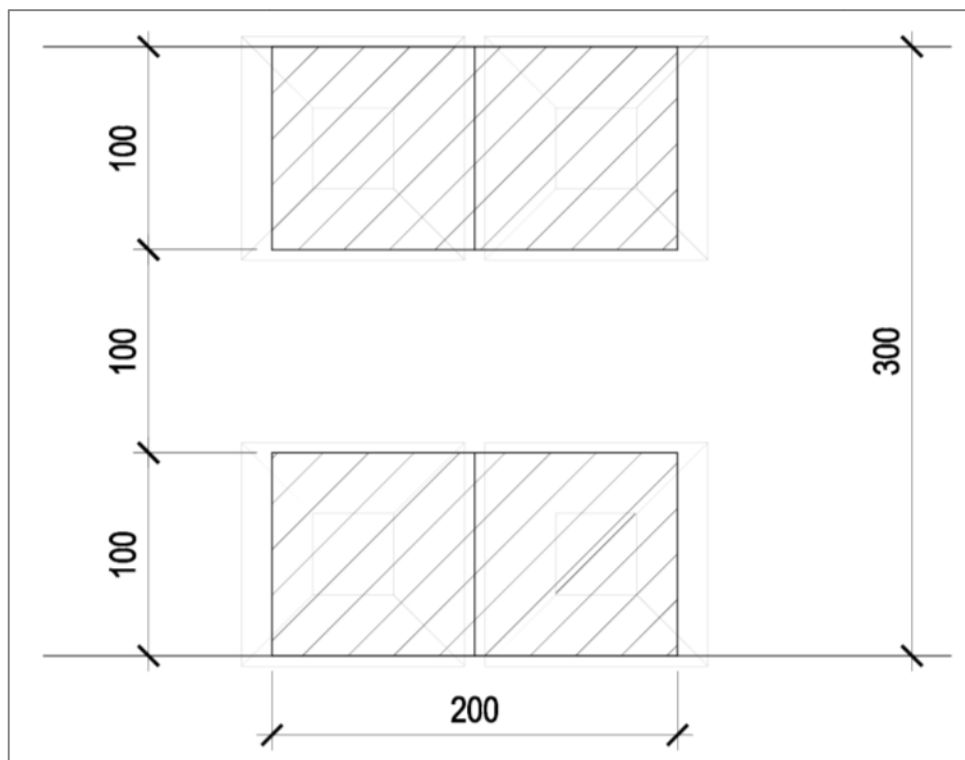


Figura 8.6: Dimensioni delle aree di carico considerate nei calcoli.

Nella figura seguente vengono riportate le disposizioni dei carichi stradali considerate nei calcoli:

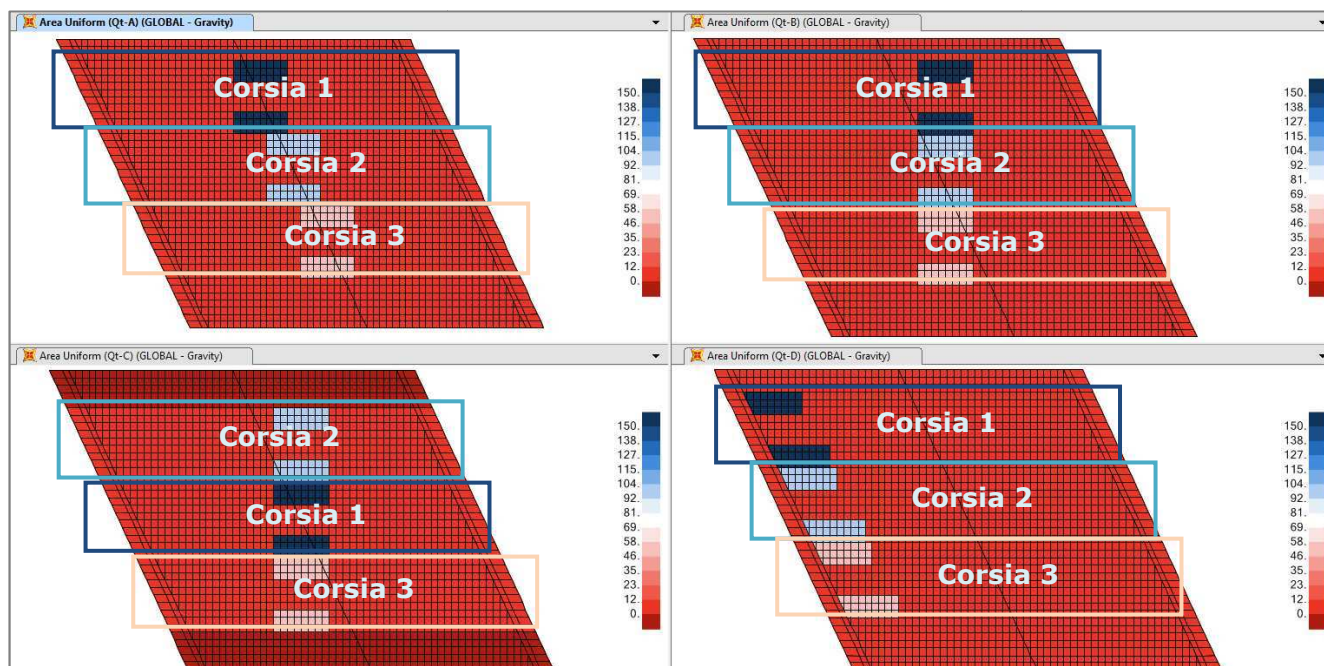


Figura 8.7: Carichi variabili da traffico.



|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

### 8.1.6 Azione longitudinale di frenamento q3

Il carico è stato applicato al modello agli elementi finiti come un'azione orizzontale uniformemente distribuita su due strisce corrispondenti alle impronte del carico tandem.

$$q_3 = \frac{400 \text{ kN}}{2 \times 1 \text{ m} \times 12,5 \text{ m}} = 16 \text{ kN/m}^2$$

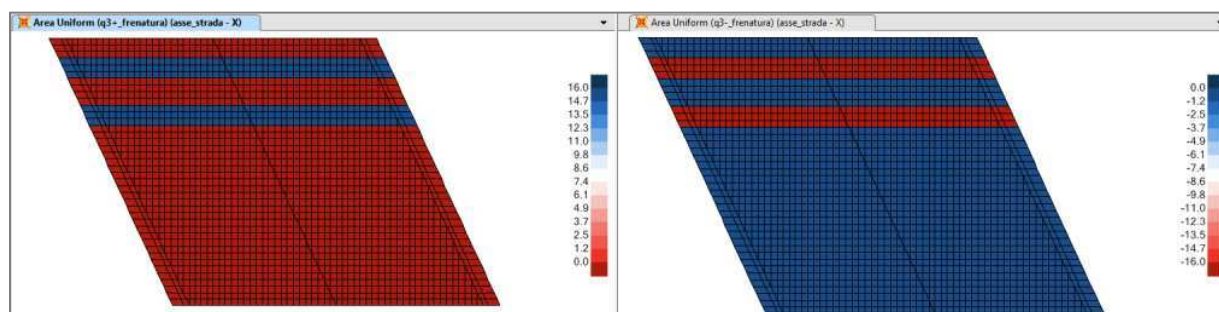


Figura 8.8: Frenamento.

### 8.1.7 Spinta sismica delle terre E

Il valore in corrispondenza della base della spalla di tale spinta è stato calcolato con riferimento al coefficiente di spinta di M-O.

Per la spalla 'sopravento':

$$E_{M-O, \text{soprav.}} = \sigma_{vf} \cdot K_{M-O} = (20 \text{ kN/m}^3 \times 6,5 \text{ m} + 3 \text{ kN/m}^2) \times 0,55 = 73,15 \text{ kN/m}^3$$

Per la spalla 'sottovento':

$$E_{M-O, \text{sottov.}} = \sigma_{vf} \cdot [K_0 - (K_{M-O} - K_0)] = (20 \text{ kN/m}^3 \times 6,5 \text{ m} + 3 \text{ kN/m}^2) \times 0,45 = 59,85 \text{ kN/m}^3$$

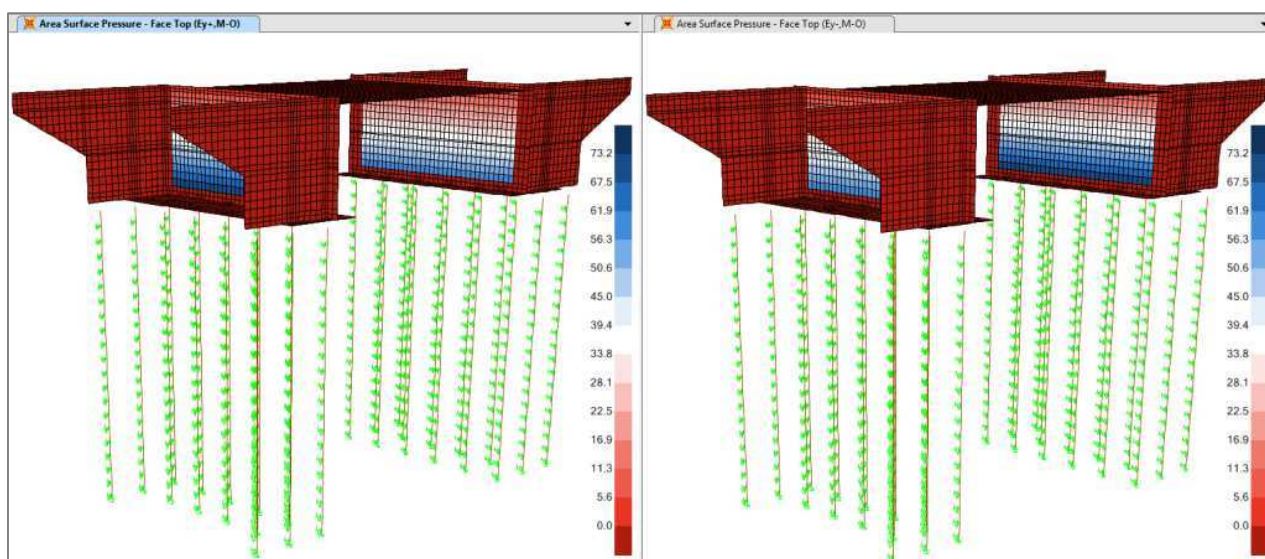


Figura 8.9: Spinta sismica delle terre.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

### 8.1.8 Inerzia degli elementi strutturali e non strutturali in condizione sismica

- Impalcato:

$$\text{Peso: } W_{\text{impalcato}} = 25 \text{ kN/m}^3 \times 0,7 \text{ m} \times 184,3 \text{ m}^2 + 3 \text{ kN/m}^2 \times 184,3 \text{ m}^2 = 3778 \text{ kN}$$

$$\text{Forza d'inerzia concentrata: } F_{i,\text{impalcato}} = 0,46g \cdot \frac{3778 \text{ kN}}{g} = 1738 \text{ kN}$$

$$\text{Forza d'inerzia distribuita sulla superficie dell'impalcato: } f_{\text{impalcato}} = \frac{1738 \text{ kN}}{184,3 \text{ m}^2} = 9,43 \text{ kN/m}^2$$

- Spalla:

$$\text{Peso: } W_{\text{spalla}} = 25 \text{ kN/m}^3 \times 1,4 \text{ m} \times 13,5 \text{ m} \times \left( \frac{6,6 \text{ m} + 7 \text{ m}}{2} - 1,2 \text{ m} \right) = 2646 \text{ kN}$$

$$\text{Forza d'inerzia concentrata: } F_{i,\text{spalla}} = 0,46g \cdot \frac{2646 \text{ kN}}{g} = 1217 \text{ kN}$$

$$\text{Forza d'inerzia distribuita sulla superficie della spalla: } f_{\text{spalla}} = \frac{1217 \text{ kN}}{95,85 \text{ m}^2} = 12,7 \text{ kN/m}^2$$

- Zattera (struttura che si muove con il terreno):

$$\text{Peso: } W_{\text{zattera}} = 25 \text{ kN/m}^3 \times 1,2 \text{ m} \times 4,49 \text{ m} \times 12,25 \text{ m} = 1650 \text{ kN}$$

$$\text{Forza d'inerzia concentrata: } F_{i,\text{zattera}} = 0,29g \cdot \frac{1650 \text{ kN}}{g} = 479 \text{ kN}$$

$$\text{Forza d'inerzia distribuita sulla superficie della zattera: } f_{\text{zattera}} = \frac{479 \text{ kN}}{55 \text{ m}^2} = 8,7 \text{ kN/m}^2$$

- Terreno imbarcato sulla zattera:

$$\text{Peso: } W_{\text{terreno}} = 20 \text{ kN/m}^3 \times 2,4 \text{ m} \times 9,85 \text{ m} \times 5,8 \text{ m} = 2742 \text{ kN}$$

$$\text{Forza d'inerzia concentrata: } F_{i,\text{terreno}} = 0,29g \cdot \frac{2742 \text{ kN}}{g} = 795 \text{ kN}$$

$$\text{Forza d'inerzia distribuita sulla superficie della spalla: } f_{\text{terreno}} = \frac{795 \text{ kN}}{95,85 \text{ m}^2} = 8,3 \text{ kN/m}^2$$

- Muri d'ala:

$$\text{Peso: } W_{\text{ala}} = 25 \text{ kN/m}^3 \times 1,2 \text{ m} \times 43,93 \text{ m}^2 = 1318 \text{ kN}$$

$$\text{Forza d'inerzia concentrata: } F_{i,\text{ala}} = 0,46g \cdot \frac{1318 \text{ kN}}{g} = 606 \text{ kN}$$

$$\text{Forza d'inerzia distribuita sulla superficie di muri d'ala: } f_{\text{ala}} = \frac{606 \text{ kN}}{51,18 \text{ m}^2} = 11,8 \text{ kN/m}^2$$

|   |   |  |
|---|---|--|
|  <b>ENSER</b><br>SOCIETÀ DI INGEGNERIA | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

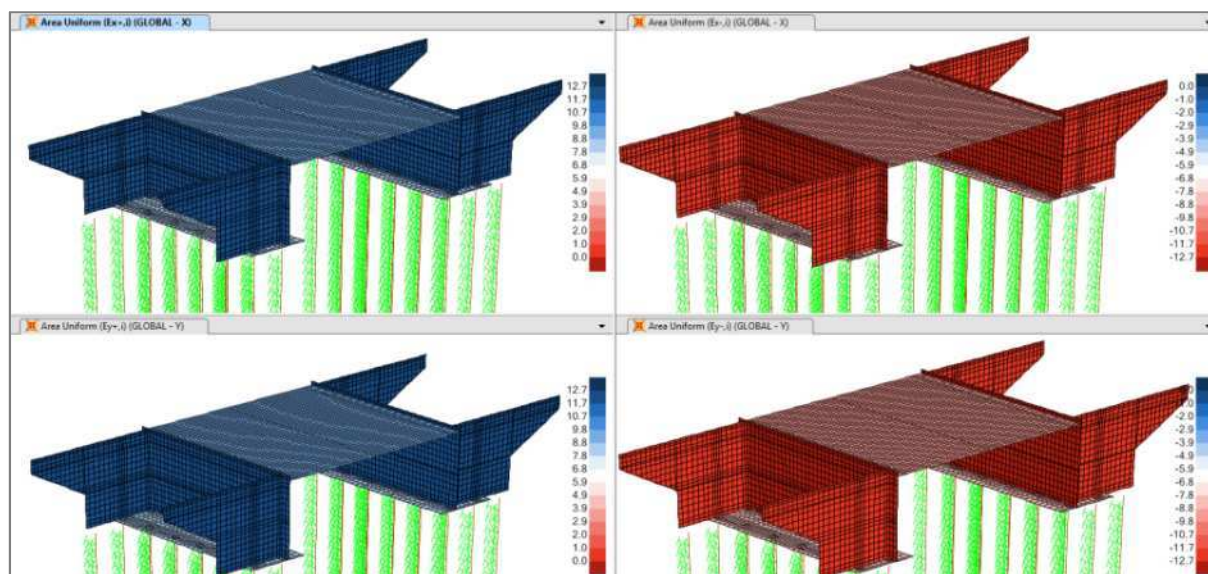


Figura 8.10: Forze di inerzia sugli elementi strutturali.

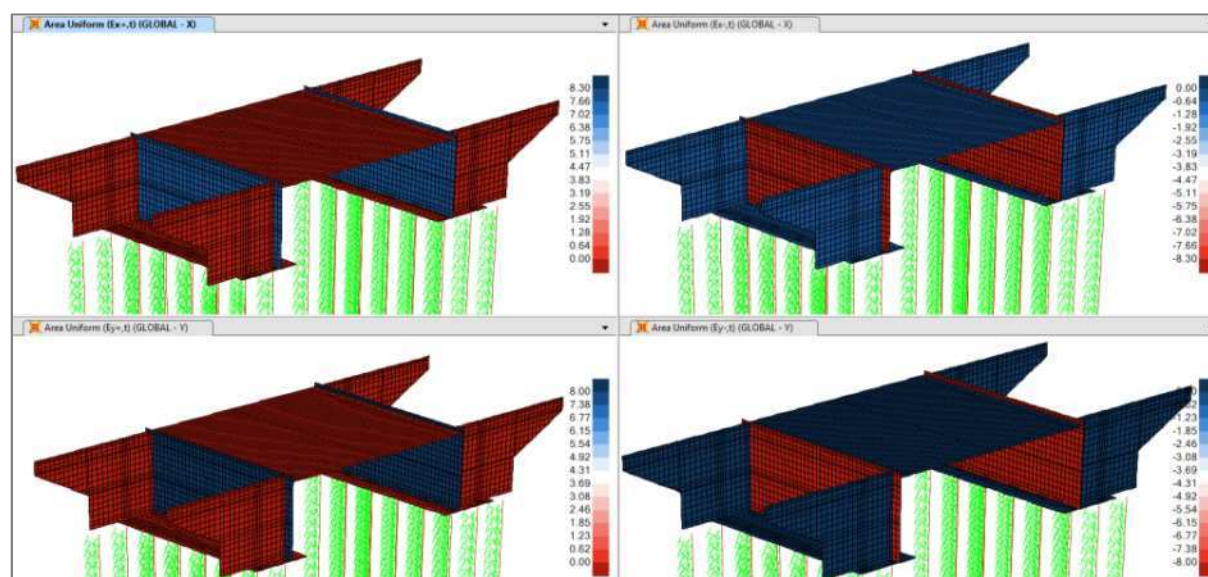


Figura 8.11: Forze di inerzia del terreno imbarcato.

### 8.1.8.1 Componente verticale

L'accelerazione di progetto in direzione verticale (considerando un fattore di struttura unitario in accordo al §7.3.1 del DM 14/01/2008) è data dalla seguente espressione:

$$S_d(T) = a_g \cdot S_S \cdot S_T \cdot \frac{1}{q} \cdot 1,35 F_0 \left( \frac{a_g}{g} \right)^{0,5} = 0,203g \cdot 1,4 \cdot 1 \cdot 1,35 \cdot 2,403 \cdot 0,203^{0,5} = 0,42g$$

Considerando che in base a quanto riportato ai §§ 2.5.3 e 5.1.13.12 della normativa in vigore per la combinazione sismica il coefficiente di combinazione  $\psi_2$  per i carichi mobili vale zero, le sollecitazioni indotte dal sisma verticale con l'analisi statica lineare sono meno gravose di quelle indotte dai carichi statici, come mostrano i seguenti calcoli:

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

- Azione sull'impalcato in presenza di sisma verticale diretto verso il basso

$$q_{\text{impalcato}} = 25 \text{ kN/m}^3 \times 0,7 \text{ m} \times (1 + 0,42) + 3 \text{ kN/m}^2 \times (1 + 0,42) = 29,1 \text{ kN/m}^2$$

- Azione sull'impalcato in presenza di carichi statici (in assenza di carichi tandem)

$$q_{\text{impalcato}} = 25 \text{ kN/m}^3 \times 0,7 \text{ m} \times 1,35 + 3 \text{ kN/m}^2 \times 1,35 + 2,5 \text{ kN/m}^2 \times 1,35 = 31,1 \text{ kN/m}^2$$

In termini di risultante, considerando quindi anche la presenza dei carichi tandem si ha

- Risultante sull'impalcato in presenza di sisma verticale diretto verso il basso

$$R_{\text{impalcato}} = 29,1 \text{ kN/m}^2 \times 184,3 \text{ m}^2 = 5363 \text{ kN}$$

- Risultante sull'impalcato in presenza di carichi statici (considerando anche i carichi tandem)

$$R_{\text{impalcato}} = 31,1 \text{ kN/m}^2 \times 184,3 \text{ m}^2 + 2 \times 300 \text{ kN} + 2 \times 200 \text{ kN} + 2 \times 100 \text{ kN} + (9 \text{ kN/m}^2 - 2,5 \text{ kN/m}^2) \cdot 3 \text{ m} \cdot 12,5 \text{ m} = 7166 \text{ kN} \text{ (+34\% rispetto al sisma verticale)}$$

Pertanto, onde non appesantire la trattazione con un eccessivo numero di combinazioni di carico, il sisma verticale non verrà inserito tra le combinazioni considerate.

#### 8.1.8.2 Eccentricità accidentale

In base al §7.9.3 della normativa NTC 2008, l'eccentricità accidentale viene assunta pari a 0,03 volte la dimensione dell'impalcato misurata perpendicolarmente all'azione sismica.

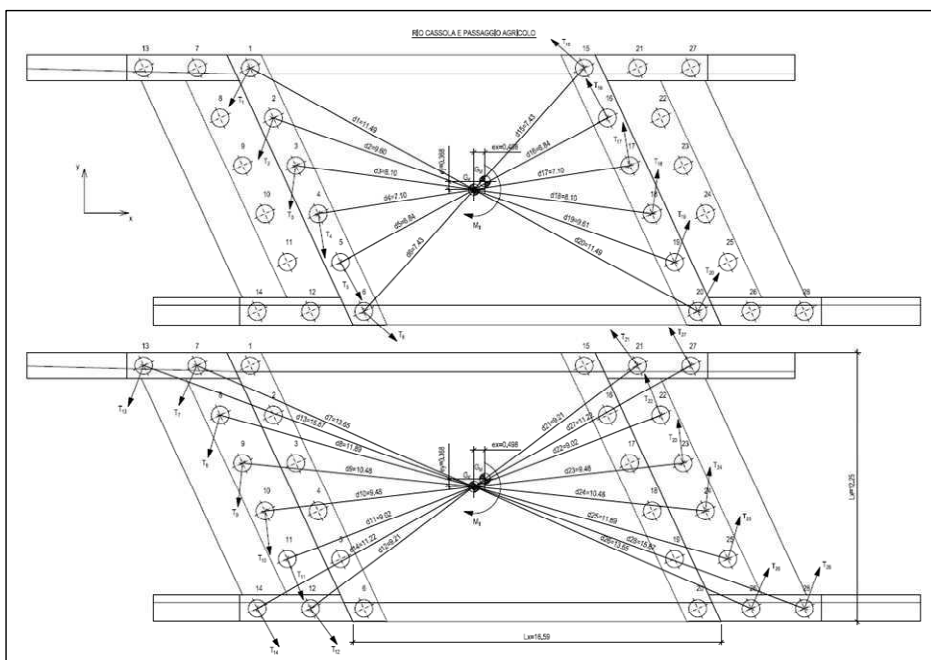
Gli effetti dell'eccentricità accidentale verranno tenuti in conto per quanto riguarda il taglio in testa ai pali.

Il calcolo del massimo taglio in testa ai pali prodotto dall'eccentricità accidentale è riportato nella figura seguente



|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

## RIO CASSOLA E SOTTOPASSO AGRICOLO



| DIMENSIONI |           |
|------------|-----------|
| $L_x$ [m]  | $L_y$ [m] |
| 16.59      | 12.25     |

| ECCENTRICITÀ ACCIDENTALI   |                            |
|----------------------------|----------------------------|
| $e_x = 0,03 \cdot L_x$ [m] | $e_y = 0,03 \cdot L_y$ [m] |
| 0.498                      | 0.368                      |

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| $W_{\text{impalcato+pav.}}$ | 3778 |
| $W_{\text{spalla}}$ [kN]    | 2646 |
| $W_{\text{zattera}}$ [kN]   | 1650 |
| $W_{\text{terreno}}$ [kN]   | 2742 |
| $W_{\text{ala}}$ [kN]       | 1318 |
| $S_d$ [g]                   | 0.46 |

| MOMENTO TORCENTE [kN*m]  |      |
|--|------|
| $M_x = (W_{\text{impalcato+pav.}} + 2 \cdot W_{\text{spalla}} + 2 \cdot W_{\text{zattera}} + 2 \cdot W_{\text{terreno}} + 2 \cdot W_{\text{ala}}) / g \cdot S_d \cdot (e_x + 0,3 \cdot e_y)$ | 5730 |
| $M_y = (W_{\text{impalcato+pav.}} + 2 \cdot W_{\text{spalla}} + 2 \cdot W_{\text{zattera}} + 2 \cdot W_{\text{terreno}} + 2 \cdot W_{\text{ala}}) / g \cdot S_d \cdot (e_y + 0,3 \cdot e_x)$ | 4871 |

|           |       |
|-----------|-------|
| $d1=d20$  | 11.49 |
| $d2=d19$  | 9.60  |
| $d3=d18$  | 8.10  |
| $d4=d17$  | 7.10  |
| $d5=d16$  | 6.84  |
| $d6=d15$  | 7.43  |
| $d7=d26$  | 13.65 |
| $d8=d25$  | 11.89 |
| $d9=d24$  | 10.48 |
| $d10=d23$ | 9.48  |
| $d11=d22$ | 9.02  |
| $d12=d21$ | 9.21  |
| $d13=d28$ | 15.87 |
| $d14=d27$ | 11.22 |

| $T_{ji} = M_i \cdot (k_{ji} \cdot d_{ji}) / (\sum k_{ri} \cdot k_r^2)$ [kN] |       |
|---|-------|
| $T1=T20$  | 21.75 |
| $T2=T19$  | 18.17 |
| $T3=T18$  | 15.33 |
| $T4=T17$  | 13.44 |
| $T5=T16$  | 12.95 |
| $T6=T15$  | 14.06 |
| $T7=T26$  | 25.84 |
| $T8=T25$  | 22.51 |
| $T9=T24$  | 19.84 |
| $T10=T23$   | 17.95 |
| $T11=T22$   | 17.07 |
| $T12=T21$   | 17.43 |
| $T13=T28$   | 30.04 |
| $T14=T27$   | 21.24 |

Taglio massimo in testa ai pali per effetti torsionali da eccentricità accidentale:

30 kN

Figura 8.12: Calcolo del taglio massimo in testa ai pali prodotto dall'eccentricità accidentale.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

## 8.2 Combinazioni di carico

### 8.2.1 Casi di Carico

Nella tabella seguente si riportano i Casi di Carico (*Load Cases*) inseriti nel programma SAP 2000 per l'esecuzione dell'analisi della struttura:

Tabella 8.1: Casi di Carico.

| LoadCase     | Load patterns associati                        | Descrizione   |
|--------------|--|---|
| <b>G1</b>    | g1_DEAD  | Peso proprio degli elementi strutturali   |
| <b>G2</b>    | g2_barriera<br>g2_cordolo<br>g2_pavimentazione | Carichi permanenti portati  |
| <b>G3</b>    | g3_th<br>g3_tv                                 | Spinta delle terre e carico del terreno sulla zattera                                   |
| <b>G3-tv</b> | g3-tv  | Carico del terreno sulla zattera  |
| <b>Q_sx</b>  | g3_q_sx  | Spinta del terreno dovuta alla presenza del sovraccarico stradale sulla spalla sinistra |
| <b>Q_dx</b>  | g3_q_dx  | Spinta del terreno dovuta alla presenza del sovraccarico stradale sulla spalla destra   |
| <b>Q3+</b>   | q3+_frenatura                                  | Azione longitudinale di accelerazione   |
| <b>Q3-</b>   | q3-_frenatura                                  | Azione longitudinale di frenamento  |
| <b>Q-A</b>   | Qt-A   | Schema di carico 1, configurazione A  |
| <b>Q-B</b>   | Qt-B   | Schema di carico 1, configurazione B  |
| <b>Q-C</b>   | Qt-C   | Schema di carico 1, configurazione C  |
| <b>Q-D</b>   | Qt-D   | Schema di carico 1, configurazione D  |
| <b>Q-E</b>   | Qt-E   | Schema di carico 1, configurazione E  |
| <b>Ex+</b>   | Ex+,i<br>Ex+,t                                 | Sisma agente in direzione +X  |
| <b>Ex-</b>   | Ex-,i<br>Ex-,t                                 | Sisma agente in direzione -X  |
| <b>Ey+</b>   | Ey+,i<br>Ey+,t<br>Ey+,M-O                      | Sisma agente in direzione +Y  |
| <b>Ey-</b>   | Ey-,i<br>Ey-,t<br>Ey-,M-O                      | Sisma agente in direzione -Y  |

Il carico della folla non è significativo, e sul ponte non agiscono forze centrifughe, perciò le combinazioni riportate nella tabella 5.1.IV della normativa NTC2008 si riducono alle sole 1 e 2a, cioè:

- schema di carico 1 con valore caratteristico;
- schema di carico 1 con valore frequente ( $\psi = 0.75$ ), associato alla frenatura con valore caratteristico.

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

## 8.2.2 Combinazioni SLU (STR)

Nella seguente tabella vengono riportate le 203 combinazioni SLU considerate:

Tabella 8.2: Combinazioni SLU.

| Nome Combo | Azioni considerate e coefficienti parziali                              |
|------------|---|
| SLU001     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q-A  |
| SLU002     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q-B  |
| SLU003     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q-C  |
| SLU004     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q-D  |
| SLU005     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q-E  |
| SLU006     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>sx</sub> +1.35 Q-A                       |
| SLU007     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>sx</sub> +1.35 Q-B                       |
| SLU008     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>sx</sub> +1.35 Q-C                       |
| SLU009     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>sx</sub> +1.35 Q-D                       |
| SLU010     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>sx</sub> +1.35 Q-E                       |
| SLU011     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>dx</sub> +1.35 Q-A                       |
| SLU012     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>dx</sub> +1.35 Q-B                       |
| SLU013     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>dx</sub> +1.35 Q-C                       |
| SLU014     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>dx</sub> +1.35 Q-D                       |
| SLU015     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>dx</sub> +1.35 Q-E                       |
| SLU016     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>sx</sub> +Q <sub>dx</sub> +1.35 Q-A      |
| SLU017     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>sx</sub> +Q <sub>dx</sub> +1.35 Q-B      |
| SLU018     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>sx</sub> +Q <sub>dx</sub> +1.35 Q-C      |
| SLU019     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>sx</sub> +Q <sub>dx</sub> +1.35 Q-D      |
| SLU020     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>sx</sub> +Q <sub>dx</sub> +1.35 Q-E      |
| SLU021     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>sx</sub> +1.35 (Q3+)                     |
| SLU022     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>sx</sub> +1.35 (Q3+)+Q-A                 |
| SLU023     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>sx</sub> +1.35 (Q3+)+Q-B                 |
| SLU024     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>sx</sub> +1.35 (Q3+)+Q-C                 |
| SLU025     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>sx</sub> +1.35 (Q3+)+Q-D                 |
| SLU026     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>sx</sub> +1.35 (Q3+)+Q-E                 |
| SLU027     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>dx</sub> +1.35 (Q3-)                     |
| SLU028     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>dx</sub> +1.35 (Q3-)+Q-A                 |
| SLU029     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>dx</sub> +1.35 (Q3-)+Q-B                 |
| SLU030     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>dx</sub> +1.35 (Q3-)+Q-C                 |
| SLU031     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>dx</sub> +1.35 (Q3-)+Q-D                 |
| SLU032     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+Q <sub>dx</sub> +1.35 (Q3-)+Q-E                 |
| SLU033     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q <sub>sx</sub>                            |
| SLU034     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q <sub>sx</sub> +Q-A                       |
| SLU035     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q <sub>sx</sub> +Q-B                       |
| SLU036     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q <sub>sx</sub> +Q-C                       |
| SLU037     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q <sub>sx</sub> +Q-D                       |
| SLU038     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q <sub>sx</sub> +Q-E                       |
| SLU039     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q <sub>dx</sub>                            |
| SLU040     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q <sub>dx</sub> +Q-A                       |
| SLU041     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q <sub>dx</sub> +Q-B                       |
| SLU042     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q <sub>dx</sub> +Q-C                       |
| SLU043     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q <sub>dx</sub> +Q-D                       |
| SLU044     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q <sub>dx</sub> +Q-E                       |
| SLU045     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q <sub>sx</sub> +1.35 Q <sub>dx</sub>      |
| SLU046     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q <sub>sx</sub> +1.35 Q <sub>dx</sub> +Q-A |
| SLU047     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q <sub>sx</sub> +1.35 Q <sub>dx</sub> +Q-B |
| SLU048     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q <sub>sx</sub> +1.35 Q <sub>dx</sub> +Q-C |
| SLU049     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q <sub>sx</sub> +1.35 Q <sub>dx</sub> +Q-D |
| SLU050     | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3+1.35 Q <sub>sx</sub> +1.35 Q <sub>dx</sub> +Q-E |
| SLU051     | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q-A   |
| SLU052     | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q-B   |
| SLU053     | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q-C   |

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

|        |  |
|--------|--|
| SLU054 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q-D                |
| SLU055 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q-E                |
| SLU056 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_sx+1.35 Q-A           |
| SLU057 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_sx+1.35 Q-B           |
| SLU058 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_sx+1.35 Q-C           |
| SLU059 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_sx+1.35 Q-D           |
| SLU060 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_sx+1.35 Q-E           |
| SLU061 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_dx+1.35 Q-A           |
| SLU062 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_dx+1.35 Q-B           |
| SLU063 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_dx+1.35 Q-C           |
| SLU064 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_dx+1.35 Q-D           |
| SLU065 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_dx+1.35 Q-E           |
| SLU066 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_sx+Q_dx+1.35 Q-A      |
| SLU067 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_sx+Q_dx+1.35 Q-B      |
| SLU068 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_sx+Q_dx+1.35 Q-C      |
| SLU069 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_sx+Q_dx+1.35 Q-D      |
| SLU070 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_sx+Q_dx+1.35 Q-E      |
| SLU071 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_sx+1.35 (Q3+)         |
| SLU072 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_sx+1.35 (Q3+)+Q-A     |
| SLU073 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_sx+1.35 (Q3+)+Q-B     |
| SLU074 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_sx+1.35 (Q3+)+Q-C     |
| SLU075 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_sx+1.35 (Q3+)+Q-D     |
| SLU076 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_sx+1.35 (Q3+)+Q-E     |
| SLU077 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_dx+1.35 (Q3-)         |
| SLU078 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_dx+1.35 (Q3-)+Q-A     |
| SLU079 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_dx+1.35 (Q3-)+Q-B     |
| SLU080 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_dx+1.35 (Q3-)+Q-C     |
| SLU081 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_dx+1.35 (Q3-)+Q-D     |
| SLU082 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+Q_dx+1.35 (Q3-)+Q-E     |
| SLU083 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q_sx               |
| SLU084 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q_sx+Q-A           |
| SLU085 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q_sx+Q-B           |
| SLU086 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q_sx+Q-C           |
| SLU087 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q_sx+Q-D           |
| SLU088 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q_sx+Q-E           |
| SLU089 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q_dx               |
| SLU090 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q_dx+Q-A           |
| SLU091 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q_dx+Q-B           |
| SLU092 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q_dx+Q-C           |
| SLU093 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q_dx+Q-D           |
| SLU094 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q_dx+Q-E           |
| SLU095 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q_sx+1.35 Q_dx     |
| SLU096 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q_sx+1.35 Q_dx+Q-A |
| SLU097 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q_sx+1.35 Q_dx+Q-B |
| SLU098 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q_sx+1.35 Q_dx+Q-C |
| SLU099 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q_sx+1.35 Q_dx+Q-D |
| SLU100 | 1.35 G1+1.35 G2+G3+1.35 Q_sx+1.35 Q_dx+Q-E |
| SLU101 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q-A                     |
| SLU102 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q-B                     |
| SLU103 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q-C                     |
| SLU104 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q-D                     |
| SLU105 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q-E                     |
| SLU106 | G1+G2+1.35 G3+Q_sx+1.35 Q-A                |
| SLU107 | G1+G2+1.35 G3+Q_sx+1.35 Q-B                |
| SLU108 | G1+G2+1.35 G3+Q_sx+1.35 Q-C                |
| SLU109 | G1+G2+1.35 G3+Q_sx+1.35 Q-D                |
| SLU110 | G1+G2+1.35 G3+Q_sx+1.35 Q-E                |
| SLU111 | G1+G2+1.35 G3+Q_dx+1.35 Q-A                |

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

|        |                                       |
|--------|---------------------------------------|
| SLU112 | G1+G2+1.35 G3+Q_dx+1.35 Q-B           |
| SLU113 | G1+G2+1.35 G3+Q_dx+1.35 Q-C           |
| SLU114 | G1+G2+1.35 G3+Q_dx+1.35 Q-D           |
| SLU115 | G1+G2+1.35 G3+Q_dx+1.35 Q-E           |
| SLU116 | G1+G2+1.35 G3+Q_sx+Q_dx+1.35 Q-A      |
| SLU117 | G1+G2+1.35 G3+Q_sx+Q_dx+1.35 Q-B      |
| SLU118 | G1+G2+1.35 G3+Q_sx+Q_dx+1.35 Q-C      |
| SLU119 | G1+G2+1.35 G3+Q_sx+Q_dx+1.35 Q-D      |
| SLU120 | G1+G2+1.35 G3+Q_sx+Q_dx+1.35 Q-E      |
| SLU121 | G1+G2+1.35 G3+Q_sx+1.35 (Q3+)         |
| SLU122 | G1+G2+1.35 G3+Q_sx+1.35 (Q3+)+Q-A     |
| SLU123 | G1+G2+1.35 G3+Q_sx+1.35 (Q3+)+Q-B     |
| SLU124 | G1+G2+1.35 G3+Q_sx+1.35 (Q3+)+Q-C     |
| SLU125 | G1+G2+1.35 G3+Q_sx+1.35 (Q3+)+Q-D     |
| SLU126 | G1+G2+1.35 G3+Q_sx+1.35 (Q3+)+Q-E     |
| SLU127 | G1+G2+1.35 G3+Q_dx+1.35 (Q3-)         |
| SLU128 | G1+G2+1.35 G3+Q_dx+1.35 (Q3-)+Q-A     |
| SLU129 | G1+G2+1.35 G3+Q_dx+1.35 (Q3-)+Q-B     |
| SLU130 | G1+G2+1.35 G3+Q_dx+1.35 (Q3-)+Q-C     |
| SLU131 | G1+G2+1.35 G3+Q_dx+1.35 (Q3-)+Q-D     |
| SLU132 | G1+G2+1.35 G3+Q_dx+1.35 (Q3-)+Q-E     |
| SLU133 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q_sx               |
| SLU134 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q_sx+Q-A           |
| SLU135 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q_sx+Q-B           |
| SLU136 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q_sx+Q-C           |
| SLU137 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q_sx+Q-D           |
| SLU138 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q_sx+Q-E           |
| SLU139 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q_dx               |
| SLU140 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q_dx+Q-A           |
| SLU141 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q_dx+Q-B           |
| SLU142 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q_dx+Q-C           |
| SLU143 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q_dx+Q-D           |
| SLU144 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q_dx+Q-E           |
| SLU145 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q_sx+1.35 Q_dx     |
| SLU146 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q_sx+1.35 Q_dx+Q-A |
| SLU147 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q_sx+1.35 Q_dx+Q-B |
| SLU148 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q_sx+1.35 Q_dx+Q-C |
| SLU149 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q_sx+1.35 Q_dx+Q-D |
| SLU150 | G1+G2+1.35 G3+1.35 Q_sx+1.35 Q_dx+Q-E |
| SLU151 | G1+G2+G3+1.35 Q-A                     |
| SLU152 | G1+G2+G3+1.35 Q-B                     |
| SLU153 | G1+G2+G3+1.35 Q-C                     |
| SLU154 | G1+G2+G3+1.35 Q-D                     |
| SLU155 | G1+G2+G3+1.35 Q-E                     |
| SLU156 | G1+G2+G3+Q_sx+1.35 Q-A                |
| SLU157 | G1+G2+G3+Q_sx+1.35 Q-B                |
| SLU158 | G1+G2+G3+Q_sx+1.35 Q-C                |
| SLU159 | G1+G2+G3+Q_sx+1.35 Q-D                |
| SLU160 | G1+G2+G3+Q_sx+1.35 Q-E                |
| SLU161 | G1+G2+G3+Q_dx+1.35 Q-A                |
| SLU162 | G1+G2+G3+Q_dx+1.35 Q-B                |
| SLU163 | G1+G2+G3+Q_dx+1.35 Q-C                |
| SLU164 | G1+G2+G3+Q_dx+1.35 Q-D                |
| SLU165 | G1+G2+G3+Q_dx+1.35 Q-E                |
| SLU166 | G1+G2+G3+Q_sx+Q_dx+1.35 Q-A           |
| SLU167 | G1+G2+G3+Q_sx+Q_dx+1.35 Q-B           |
| SLU168 | G1+G2+G3+Q_sx+Q_dx+1.35 Q-C           |
| SLU169 | G1+G2+G3+Q_sx+Q_dx+1.35 Q-D           |

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

|        |                                  |
|--------|----------------------------------|
| SLU170 | G1+G2+G3+Q_sx+Q_dx+1.35 Q-E      |
| SLU171 | G1+G2+G3+Q_sx+1.35 (Q3+)         |
| SLU172 | G1+G2+G3+Q_sx+1.35 (Q3+)+Q-A     |
| SLU173 | G1+G2+G3+Q_sx+1.35 (Q3+)+Q-B     |
| SLU174 | G1+G2+G3+Q_sx+1.35 (Q3+)+Q-C     |
| SLU175 | G1+G2+G3+Q_sx+1.35 (Q3+)+Q-D     |
| SLU176 | G1+G2+G3+Q_sx+1.35 (Q3+)+Q-E     |
| SLU177 | G1+G2+G3+Q_dx+1.35 (Q3-)         |
| SLU178 | G1+G2+G3+Q_dx+1.35 (Q3-)+Q-A     |
| SLU179 | G1+G2+G3+Q_dx+1.35 (Q3-)+Q-B     |
| SLU180 | G1+G2+G3+Q_dx+1.35 (Q3-)+Q-C     |
| SLU181 | G1+G2+G3+Q_dx+1.35 (Q3-)+Q-D     |
| SLU182 | G1+G2+G3+Q_dx+1.35 (Q3-)+Q-E     |
| SLU183 | G1+G2+G3+1.35 Q_sx               |
| SLU184 | G1+G2+G3+1.35 Q_sx+Q-A           |
| SLU185 | G1+G2+G3+1.35 Q_sx+Q-B           |
| SLU186 | G1+G2+G3+1.35 Q_sx+Q-C           |
| SLU187 | G1+G2+G3+1.35 Q_sx+Q-D           |
| SLU188 | G1+G2+G3+1.35 Q_sx+Q-E           |
| SLU189 | G1+G2+G3+1.35 Q_dx               |
| SLU190 | G1+G2+G3+1.35 Q_dx+Q-A           |
| SLU191 | G1+G2+G3+1.35 Q_dx+Q-B           |
| SLU192 | G1+G2+G3+1.35 Q_dx+Q-C           |
| SLU193 | G1+G2+G3+1.35 Q_dx+Q-D           |
| SLU194 | G1+G2+G3+1.35 Q_dx+Q-E           |
| SLU195 | G1+G2+G3+1.35 Q_sx+1.35 Q_dx     |
| SLU196 | G1+G2+G3+1.35 Q_sx+1.35 Q_dx+Q-A |
| SLU197 | G1+G2+G3+1.35 Q_sx+1.35 Q_dx+Q-B |
| SLU198 | G1+G2+G3+1.35 Q_sx+1.35 Q_dx+Q-C |
| SLU199 | G1+G2+G3+1.35 Q_sx+1.35 Q_dx+Q-D |
| SLU200 | G1+G2+G3+1.35 Q_sx+1.35 Q_dx+Q-E |
| SLU201 | 1.35 G1+1.35 G2+1.35 G3          |
| SLU202 | 1.35 G1+1.35 G2+G3               |
| SLU203 | G1+G2+1.35 G3                    |

### 8.2.3 Combinazioni SLE

Nella seguente tabella vengono riportate le 59 combinazioni SLE considerate:

Tabella 8.3: Combinazioni SLE.

| Nome Combo | Azioni considerate e coefficienti parziali |
|------------|--|
| QP01       | G1+G2+G3                                   |
| RARA01     | G1+G2+G3+Q_sx                              |
| RARA02     | G1+G2+G3+Q_sx+0.75 Q-A                     |
| RARA03     | G1+G2+G3+Q_sx+0.75 Q-B                     |
| RARA04     | G1+G2+G3+Q_sx+0.75 Q-C                     |
| RARA05     | G1+G2+G3+Q_sx+0.75 Q-D                     |
| RARA06     | G1+G2+G3+Q_sx+0.75 Q-E                     |
| RARA07     | G1+G2+G3+Q_dx                              |
| RARA08     | G1+G2+G3+Q_dx+0.75 Q-A                     |
| RARA09     | G1+G2+G3+Q_dx+0.75 Q-B                     |
| RARA10     | G1+G2+G3+Q_dx+0.75 Q-C                     |
| RARA11     | G1+G2+G3+Q_dx+0.75 Q-D                     |
| RARA12     | G1+G2+G3+Q_dx+0.75 Q-E                     |
| RARA13     | G1+G2+G3+Q_sx+Q_dx                         |
| RARA14     | G1+G2+G3+Q_sx+Q_dx+0.75 Q-A                |
| RARA15     | G1+G2+G3+Q_sx+Q_dx+0.75 Q-B                |
| RARA16     | G1+G2+G3+Q_sx+Q_dx+0.75 Q-C                |
| RARA17     | G1+G2+G3+Q_sx+Q_dx+0.75 Q-D                |

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

|        |  |
|--------|--|
| RARA18 | $G1+G2+G3+Q_{sx}+Q_{dx}+0.75 Q-E$      |
| RARA19 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{sx}+(Q3+)$           |
| RARA20 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{sx}+(Q3+)+0.75 Q-A$  |
| RARA21 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{sx}+(Q3+)+0.75 Q-B$  |
| RARA22 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{sx}+(Q3+)+0.75 Q-C$  |
| RARA23 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{sx}+(Q3+)+0.75 Q-D$  |
| RARA24 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{sx}+(Q3+)+0.75 Q-E$  |
| RARA25 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{dx}+(Q3-)$           |
| RARA26 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{dx}+(Q3-)+0.75 Q-A$  |
| RARA27 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{dx}+(Q3-)+0.75 Q-B$  |
| RARA28 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{dx}+(Q3-)+0.75 Q-C$  |
| RARA29 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{dx}+(Q3-)+0.75 Q-D$  |
| RARA30 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{dx}+(Q3-)+0.75 Q-E$  |
| RARA31 | $G1+G2+G3+Q-A$                         |
| RARA32 | $G1+G2+G3+Q-B$                         |
| RARA33 | $G1+G2+G3+Q-C$                         |
| RARA34 | $G1+G2+G3+Q-D$                         |
| RARA35 | $G1+G2+G3+Q-E$                         |
| RARA36 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{sx}+Q-A$             |
| RARA37 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{sx}+Q-B$             |
| RARA38 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{sx}+Q-C$             |
| RARA39 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{sx}+Q-D$             |
| RARA40 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{sx}+Q-E$             |
| RARA41 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{dx}+Q-A$             |
| RARA42 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{dx}+Q-B$             |
| RARA43 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{dx}+Q-C$             |
| RARA44 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{dx}+Q-D$             |
| RARA45 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{dx}+Q-E$             |
| RARA46 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{sx}+0.75 Q_{dx}+Q-A$ |
| RARA47 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{sx}+0.75 Q_{dx}+Q-B$ |
| RARA48 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{sx}+0.75 Q_{dx}+Q-C$ |
| RARA49 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{sx}+0.75 Q_{dx}+Q-D$ |
| RARA50 | $G1+G2+G3+0.75 Q_{sx}+0.75 Q_{dx}+Q-E$ |
| FR01   | $G1+G2+G3+0.75 Q_{sx}$                 |
| FR02   | $G1+G2+G3+0.75 Q_{dx}$                 |
| FR03   | $G1+G2+G3+0.75 Q_{sx}+0.75 Q_{dx}$     |
| FR04   | $G1+G2+G3+0.75 Q-A$                    |
| FR05   | $G1+G2+G3+0.75 Q-B$                    |
| FR06   | $G1+G2+G3+0.75 Q-C$                    |
| FR07   | $G1+G2+G3+0.75 Q-D$                    |
| FR08   | $G1+G2+G3+0.75 Q-E$                    |

## 8.2.4 Combinazioni SLV

Nella seguente tabella vengono riportate le 12 combinazioni SLV considerate:

Tabella 8.4: Combinazioni SLV.

| Nome Combo | Azioni considerate e coefficienti parziali |
|------------|--|
| SLV01      | $G1+G2+G3+Ex$                              |
| SLV02      | $G1+G2+G3+Ex+0.3 Ey$                       |
| SLV03      | $G1+G2+G3+Ex-0.3 Ey$                       |
| SLV04      | $G1+G2+G3+Ex$                              |
| SLV05      | $G1+G2+G3+Ex+0.3 Ey$                       |
| SLV06      | $G1+G2+G3+Ex-0.3 Ey$                       |
| SLV07      | $G1+G2+G3+Ex$                              |
| SLV08      | $G1+G2+G3+Ex+0.3 Ey$                       |
| SLV09      | $G1+G2+G3+Ex-0.3 Ey$                       |



|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

|       |                      |
|-------|----------------------|
| SLV10 | G1+G2+G3tv-Ey        |
| SLV11 | G1+G2+G3tv+0.3 Ex-Ey |
| SLV12 | G1+G2+G3tv-0.3 Ex-Ey |

## 8.2.5 Combinazioni SLU (GEO)

Nella seguente tabella vengono riportate le 24 combinazioni SLU considerate:

Tabella 8.5: Combinazioni SLU per le verifiche geotecniche.

| Nome Combo | Azioni considerate e coefficienti parziali                    |
|------------|---|
| GEO01      | G1+G2+G3  |
| GEO02      | G1+G2+G3+1.15 Q-A   |
| GEO03      | G1+G2+G3+1.15 Q-B   |
| GEO04      | G1+G2+G3+1.15 Q-C   |
| GEO05      | G1+G2+G3+1.15 Q-D   |
| GEO06      | G1+G2+G3+1.15 Q-E   |
| GEO07      | G1+G2+G3+1.15 Q <sub>sx</sub> +1.15 (Q3+)                     |
| GEO08      | G1+G2+G3+1.15 Q <sub>sx</sub> +1.15 (Q3+)+1.15 Q-A            |
| GEO09      | G1+G2+G3+1.15 Q <sub>sx</sub> +1.15 (Q3+)+1.15 Q-B            |
| GEO10      | G1+G2+G3+1.15 Q <sub>sx</sub> +1.15 (Q3+)+1.15 Q-C            |
| GEO11      | G1+G2+G3+1.15 Q <sub>sx</sub> +1.15 (Q3+)+1.15 Q-D            |
| GEO12      | G1+G2+G3+1.15 Q <sub>sx</sub> +1.15 (Q3+)+1.15 Q-E            |
| GEO13      | G1+G2+G3+1.15 Q <sub>dx</sub> +1.15 (Q3-)                     |
| GEO14      | G1+G2+G3+1.15 Q <sub>dx</sub> +1.15 (Q3-)+1.15 Q-A            |
| GEO15      | G1+G2+G3+1.15 Q <sub>dx</sub> +1.15 (Q3-)+1.15 Q-B            |
| GEO16      | G1+G2+G3+1.15 Q <sub>dx</sub> +1.15 (Q3-)+1.15 Q-C            |
| GEO17      | G1+G2+G3+1.15 Q <sub>dx</sub> +1.15 (Q3-)+1.15 Q-D            |
| GEO18      | G1+G2+G3+1.15 Q <sub>dx</sub> +1.15 (Q3-)+1.15 Q-E            |
| GEO19      | G1+G2+G3+1.15 Q <sub>sx</sub> +1.15 Q <sub>dx</sub>           |
| GEO20      | G1+G2+G3+1.15 Q <sub>sx</sub> +1.15 Q <sub>dx</sub> +1.15 Q-A |
| GEO21      | G1+G2+G3+1.15 Q <sub>sx</sub> +1.15 Q <sub>dx</sub> +1.15 Q-B |
| GEO22      | G1+G2+G3+1.15 Q <sub>sx</sub> +1.15 Q <sub>dx</sub> +1.15 Q-C |
| GEO23      | G1+G2+G3+1.15 Q <sub>sx</sub> +1.15 Q <sub>dx</sub> +1.15 Q-D |
| GEO24      | G1+G2+G3+1.15 Q <sub>sx</sub> +1.15 Q <sub>dx</sub> +1.15 Q-E |



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

## 8.3 Deformazioni

Nella seguente Figura 8.13 sono rappresentate le deformazioni relative alla combinazione RA-RA36, per la quale si ha la massima freccia in mezzzeria.

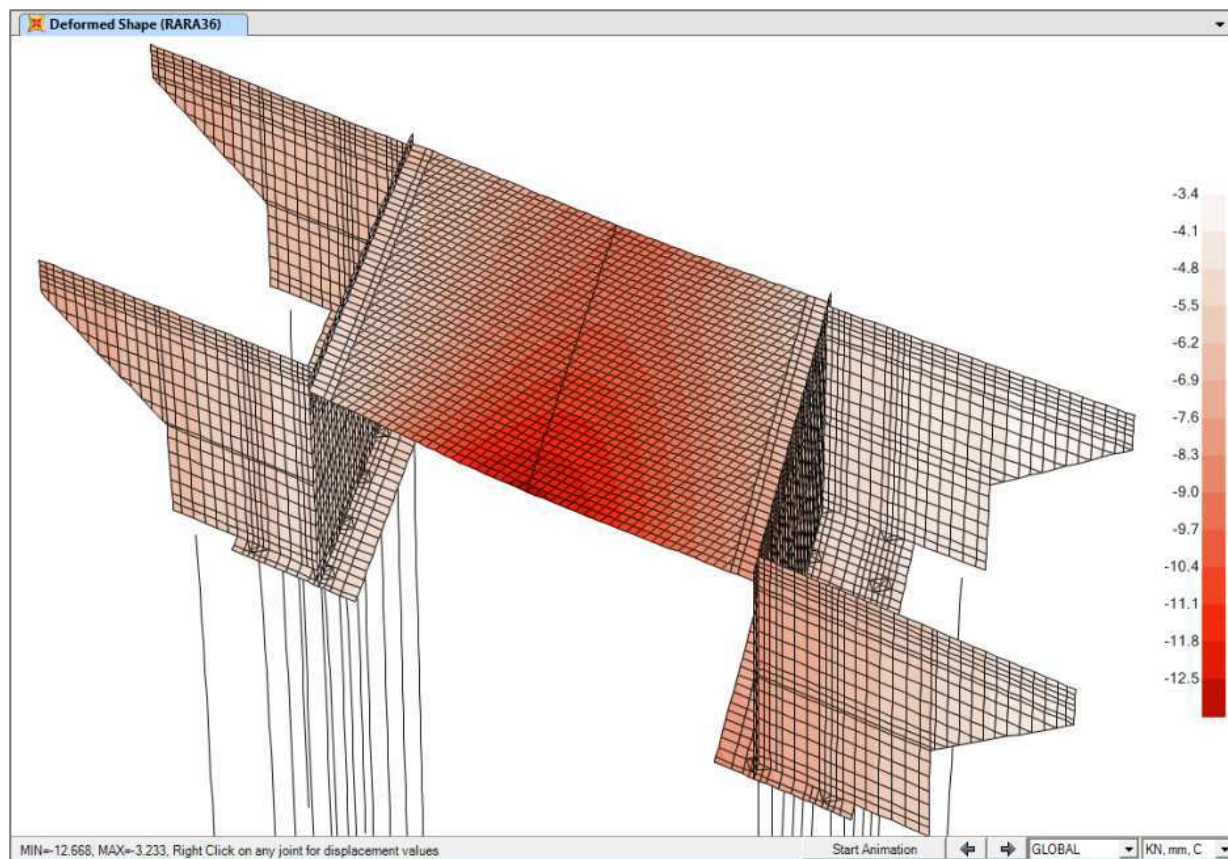


Figura 8.13: Deformata per la combinazione RARA36 (spostamenti verticali in mm).

## 8.4 Sollecitazioni

### 8.4.1 Fase I

In prima fase le azioni agenti sono relative al peso proprio degli elementi strutturali, ovvero le travi in C.A.P. e il getto costituente la soletta.

Le sollecitazioni sull'impalcato vengono determinate considerando uno schema di trave semplicemente appoggiata.

Per ciascuna trave il carico sarà pari a

$$q_l = 25 \text{ kN/m}^3 \times 0,7 \text{ m} \times 0,615 \text{ m} = 10,76 \text{ kN/m}$$

Il momento in mezzzeria sarà dato da

$$M = \frac{q_l l^2}{8} = \frac{10,76 \text{ kN/m} \times (13,5 \text{ m})^2}{8} = 245 \text{ kNm}$$

Il taglio agli appoggi sarà dato da

$$V = \frac{q_l l}{2} = \frac{10,76 \text{ kN/m} \times 13,5 \text{ m}}{2} = 72,6 \text{ kN}$$

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

## 8.4.2 Fase II

Le sollecitazioni in fase II sono state ricavate dal modello agli elementi finiti considerando nullo il peso degli elementi strutturali. I valori delle sollecitazioni utilizzati nelle verifiche sono riportati al paragrafo 9.1.8 e seguenti.

## 8.4.3 Lungo termine

Nel seguito si riportano le sollecitazioni significative per le combinazioni SLU, SLE e SLV relative alle condizioni a lungo termine, ovvero considerando che il comportamento viscoso del calcestruzzo (*fluage*) abbia annullato l'influenza della storia di carico della struttura. Questo significa che tutte le azioni agenti sull'opera (compresi i pesi propri) vengono applicate nella configurazione finale dello schema statico.

Nel seguito si intendono come unità di misura per le forze i kN e per i momenti i kNm.

### 8.4.3.1 Impalcato e spalle

#### 8.4.3.1.1 Sollecitazioni SLU (STR)

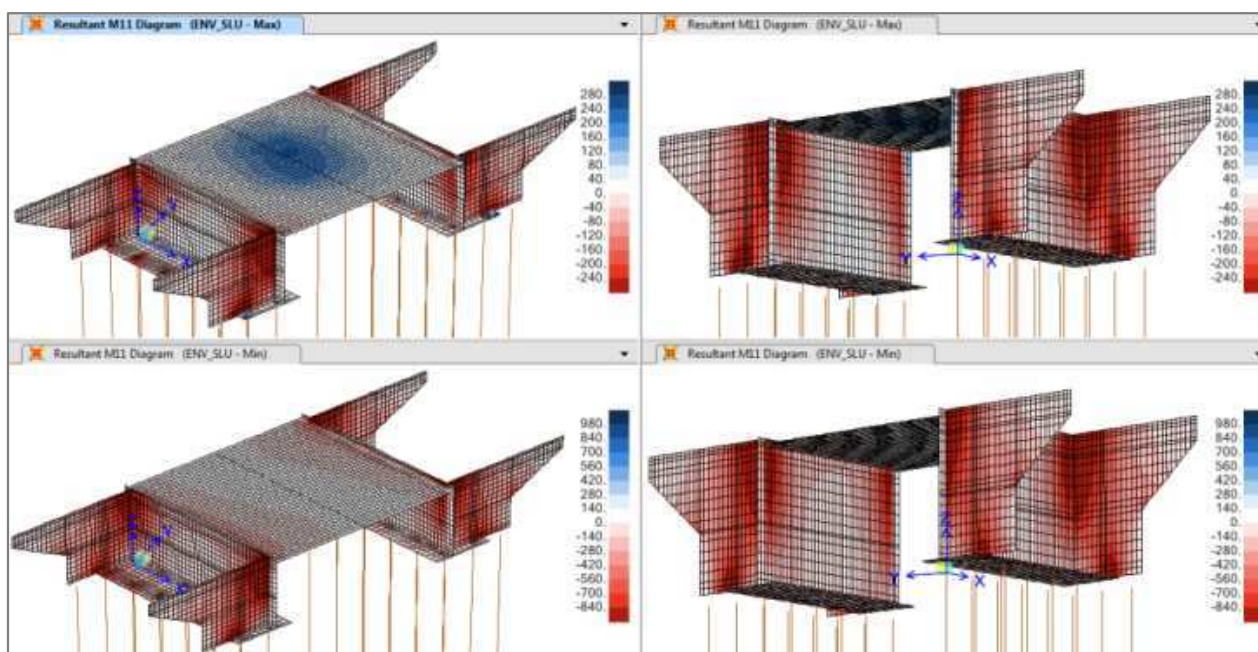


Figura 8.14: Momento M11 (SLU).

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <p><b>Committente:</b></p> <p> <b>Provincia di Bologna</b><br/> <b>Settore Lavori Pubblici.</b><br/> <b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b></p> <p><b>Lavoro:</b><br/> Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio"</p> | <p><b>Documento:</b><br/> Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2</p> <p><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br/> <b>Data:</b> 21.01.2014</p> |
|---|--|---|

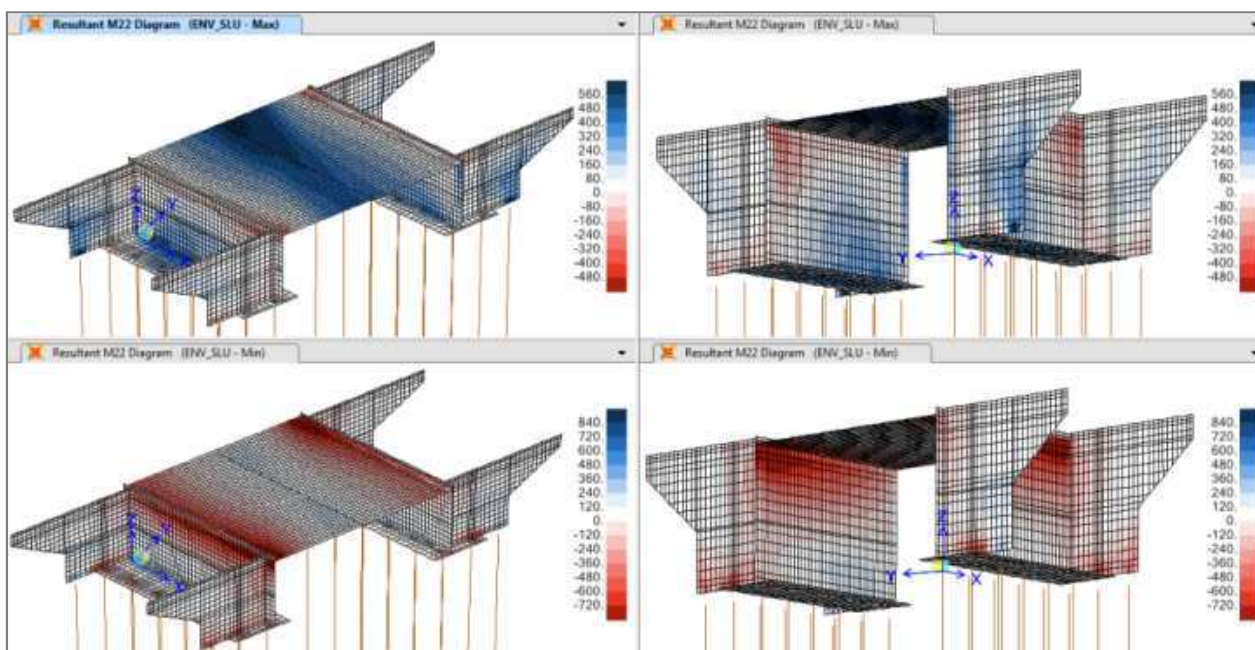


Figura 8.15: Momento M22 (SLU).

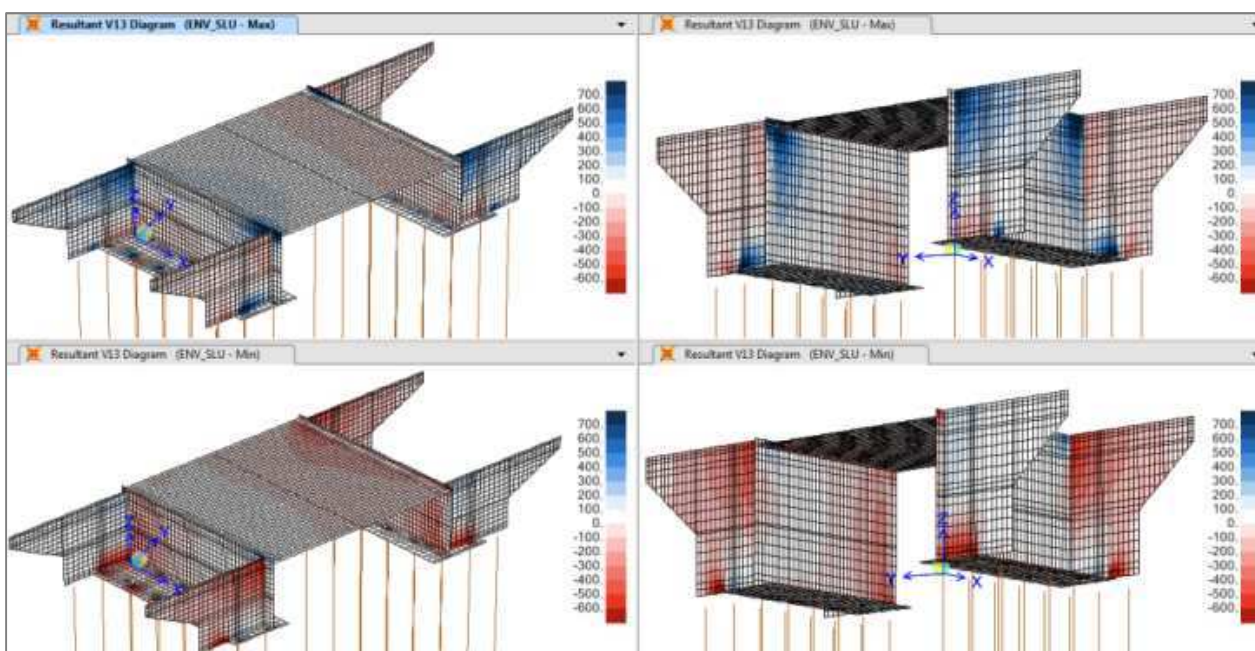


Figura 8.16: Taglio V13 (SLU).



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <p><b>Committente:</b></p> <p><b>Provincia di Bologna</b><br/> <b>Settore Lavori Pubblici.</b><br/> <b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b></p> <p><b>Lavoro:</b><br/>         Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio"</p> | <p><b>Documento:</b><br/>         Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2</p> <p><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br/> <b>Data:</b> 21.01.2014</p> |
|---|--|---|

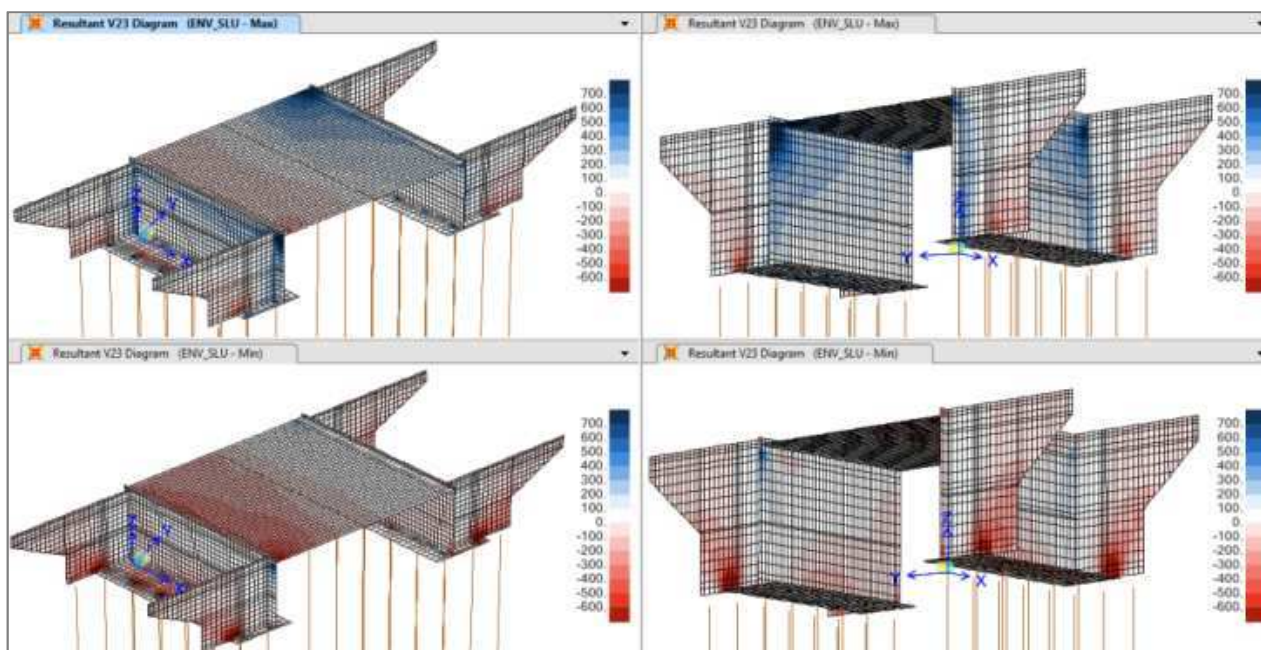


Figura 8.17: Taglio V23 (SLU).

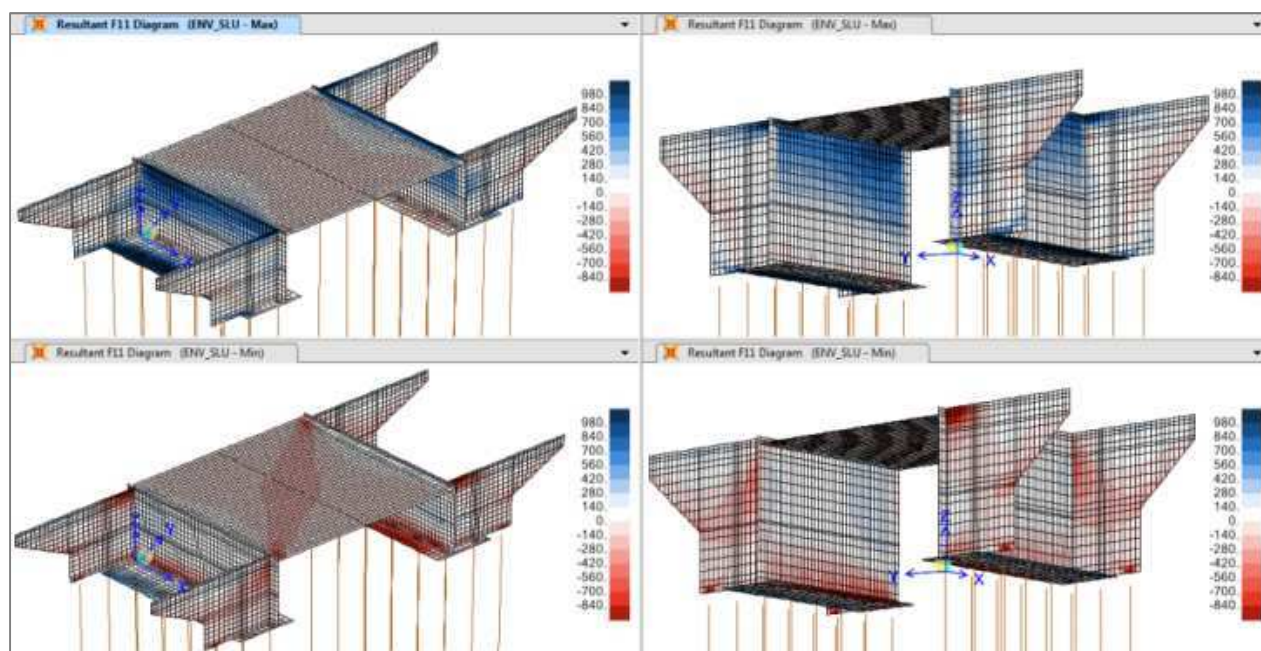


Figura 8.18: Sforzo assiale F11 (SLU).

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <p><b>Committente:</b></p> <p> <b>Provincia di Bologna</b><br/> <b>Settore Lavori Pubblici.</b><br/> <b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b></p> <p><b>Lavoro:</b><br/>         Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio"</p> | <p><b>Documento:</b><br/>         Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2</p> <p>Codice: S13114 - B.3.1.2<br/>         Data: 21.01.2014</p> |
|---|--|---|

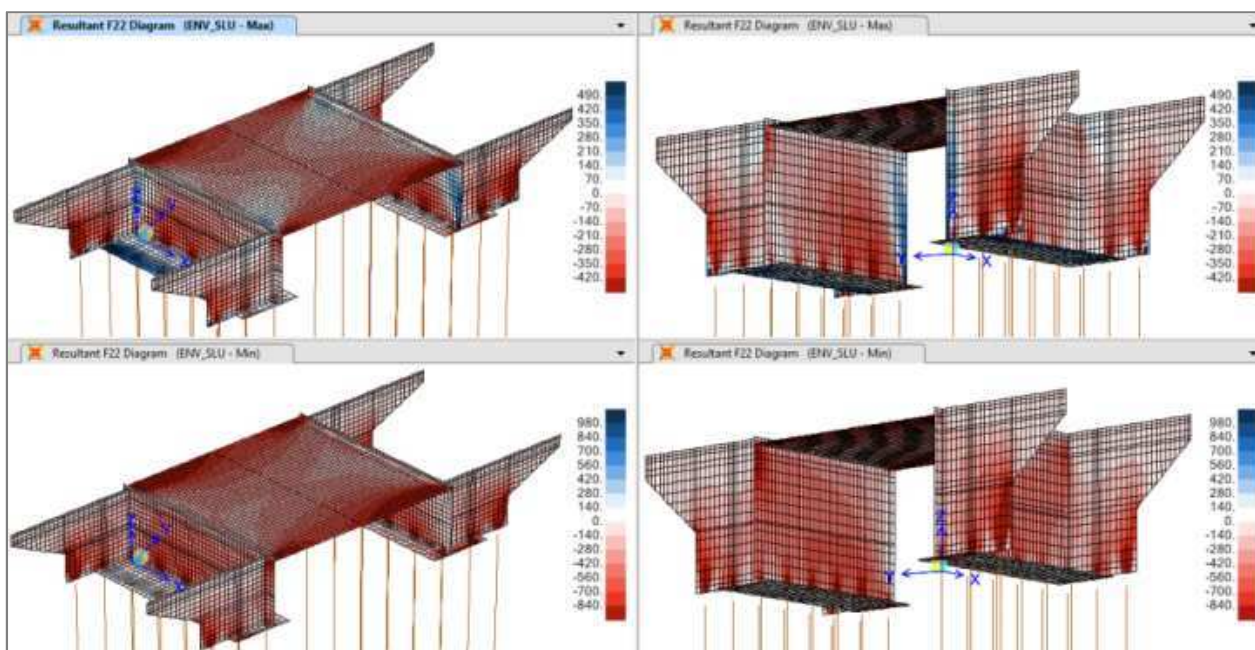


Figura 8.19: Sforzo assiale F22 (SLU).

#### 8.4.3.1.2 Sollecitazioni SLE

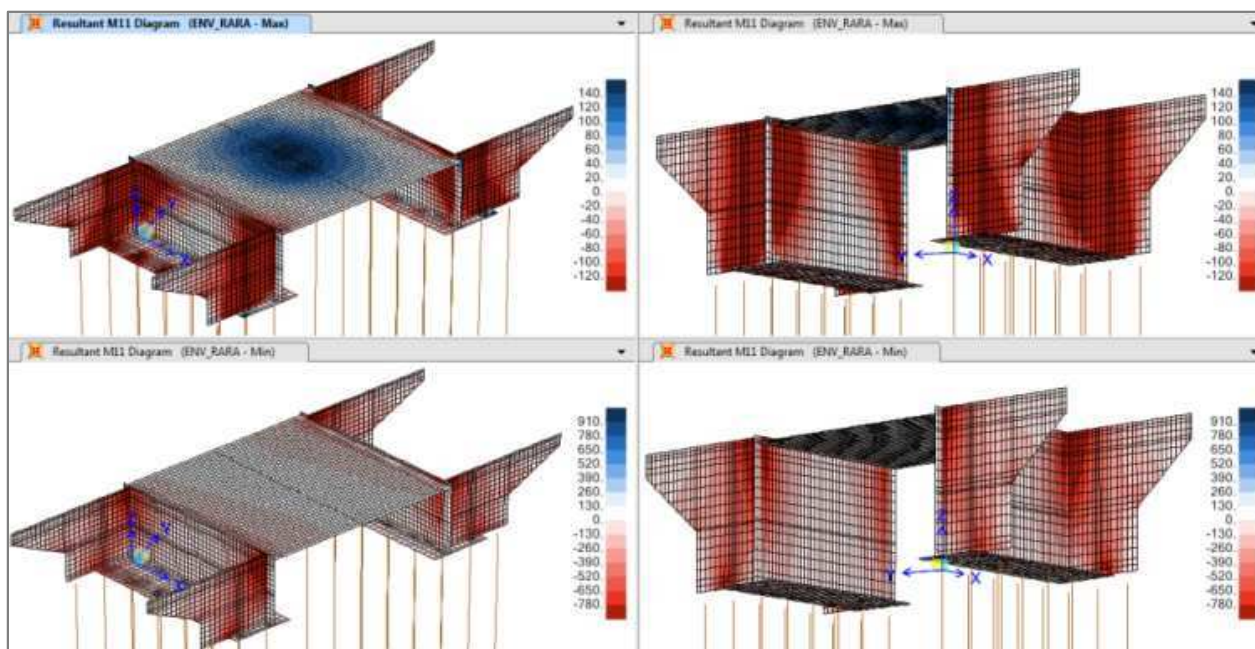


Figura 8.20: Momento M11 (SLE RARA).



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <p><b>Committente:</b></p> <p><b>Provincia di Bologna</b><br/> <b>Settore Lavori Pubblici.</b><br/> <b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b></p> <p><b>Lavoro:</b><br/>         Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio"</p> | <p><b>Documento:</b><br/>         Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2</p> <p><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br/> <b>Data:</b> 21.01.2014</p> |
|---|--|---|

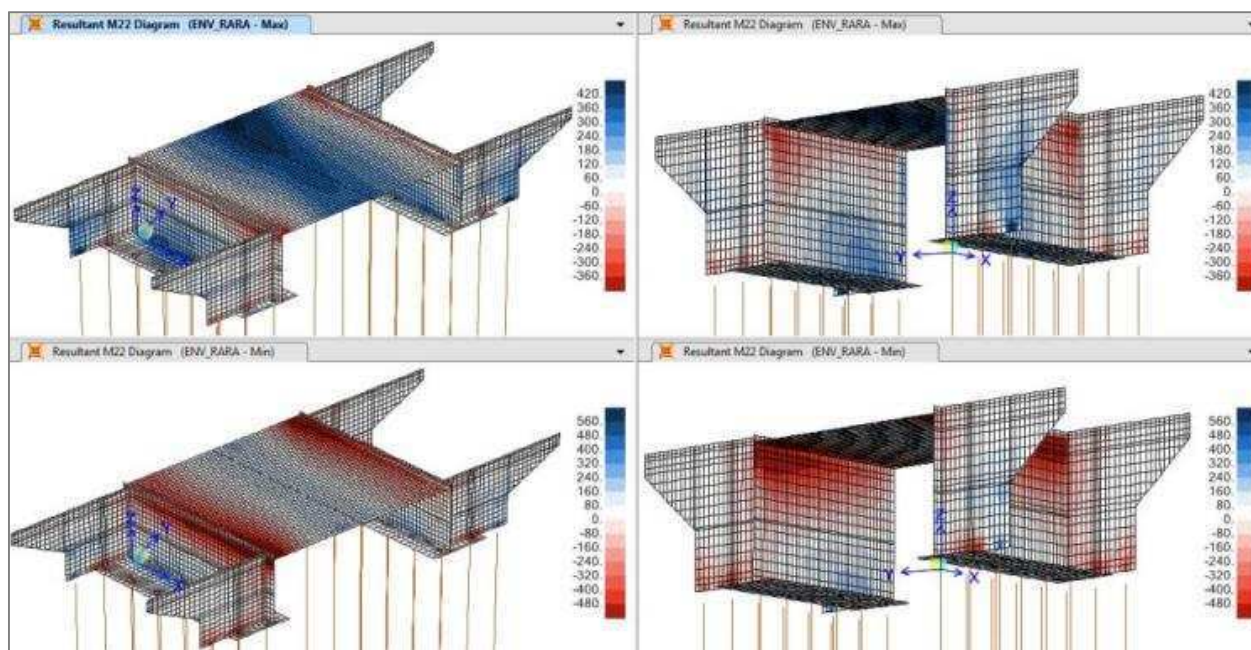


Figura 8.21: Momento M22 (SLE RARA).

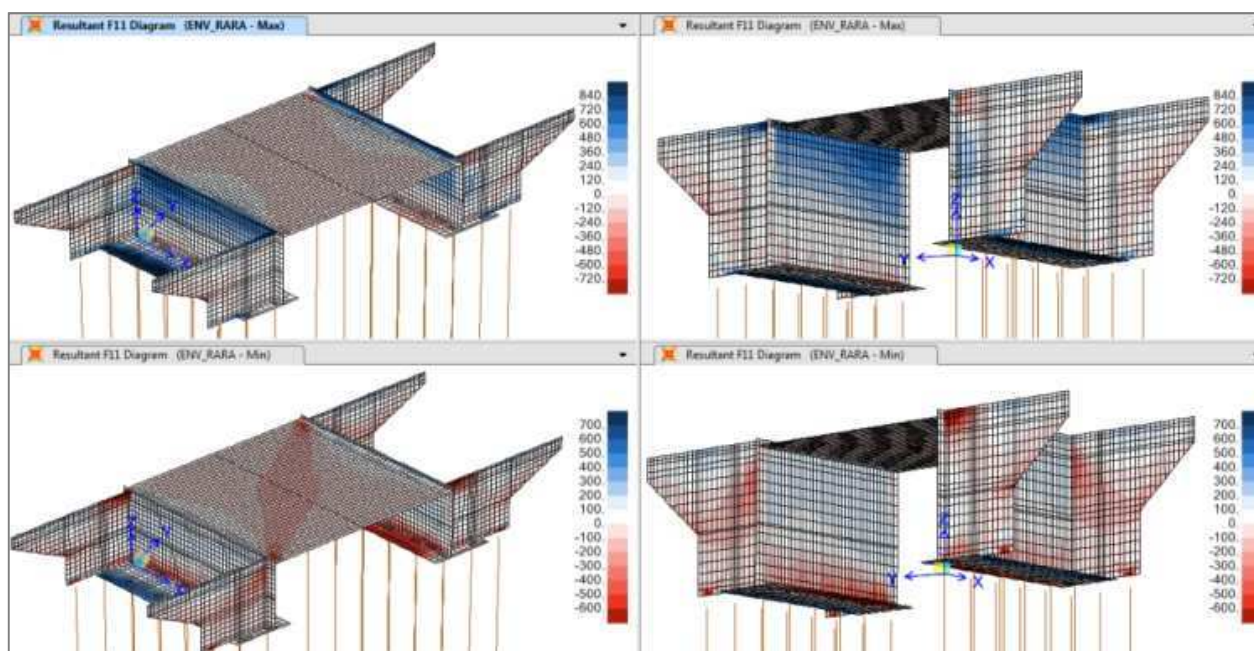


Figura 8.22: Sforzo assiale F11 (SLE RARA).

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

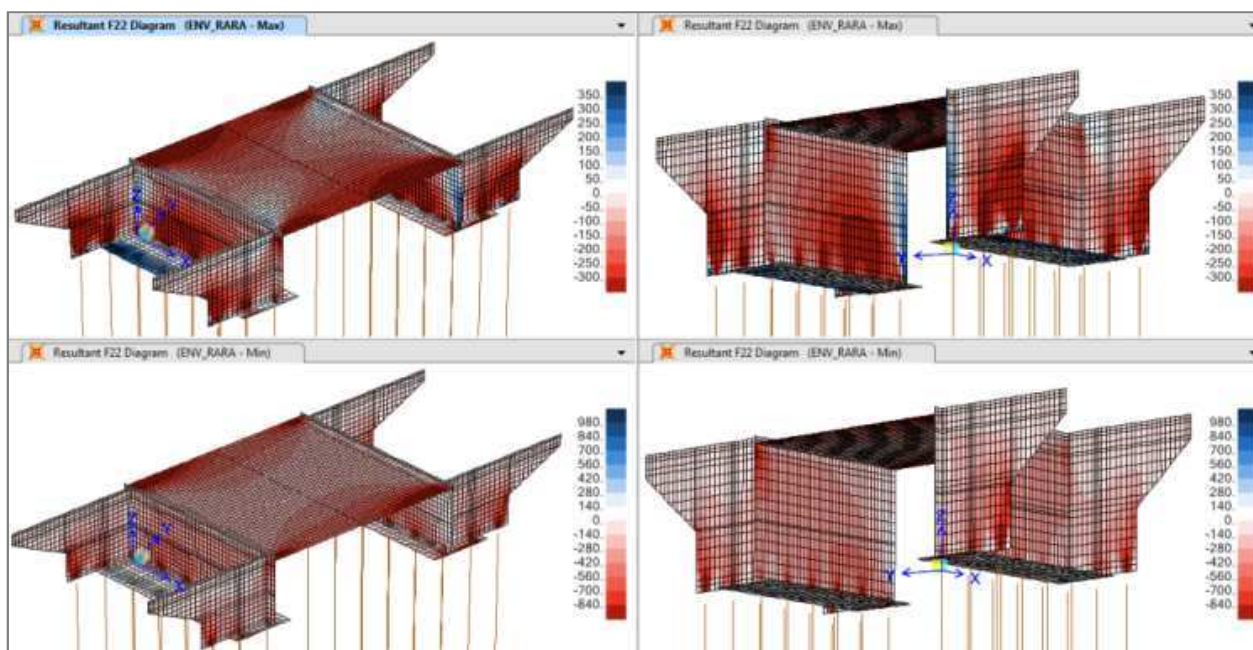


Figura 8.23: Sforzo assiale F22 (SLE RARA).

#### 8.4.3.1.3 Sollecitazioni SLV

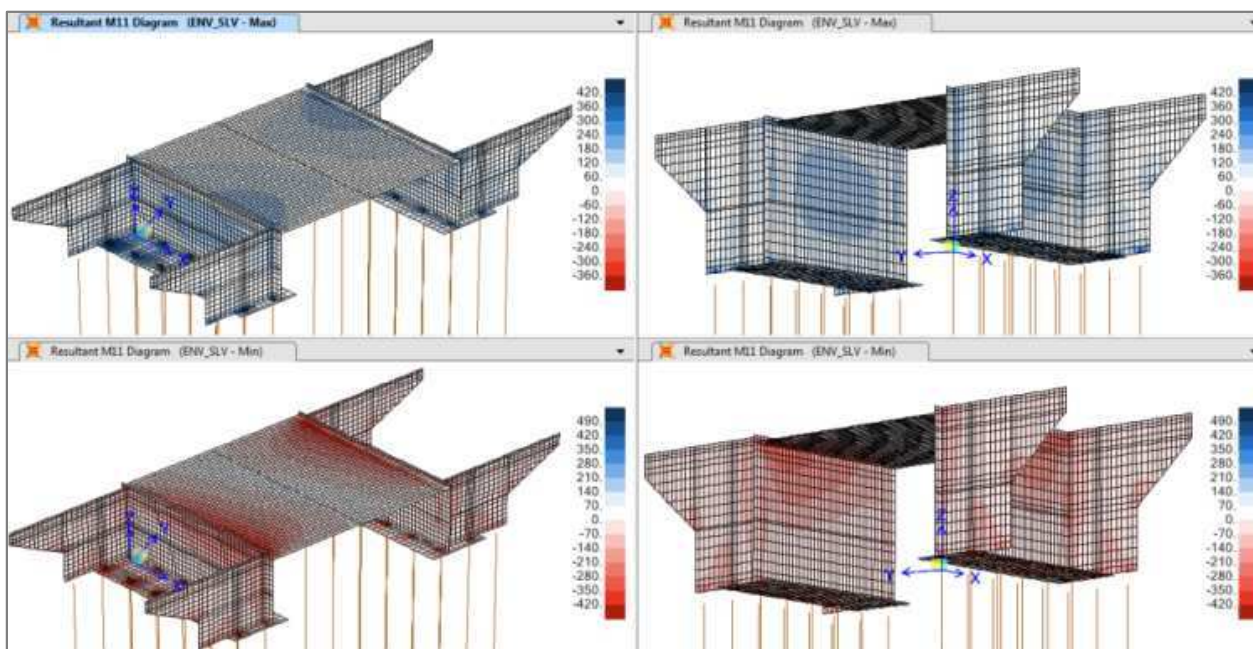


Figura 8.24: Momento M11 (SLV).



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <p><b>Committente:</b></p> <p><b>Provincia di Bologna</b><br/> <b>Settore Lavori Pubblici.</b><br/> <b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b></p> <p><b>Lavoro:</b><br/>         Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio"</p> | <p><b>Documento:</b><br/>         Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2</p> <p>Codice: S13114 - B.3.1.2<br/>         Data: 21.01.2014</p> |
|---|--|---|

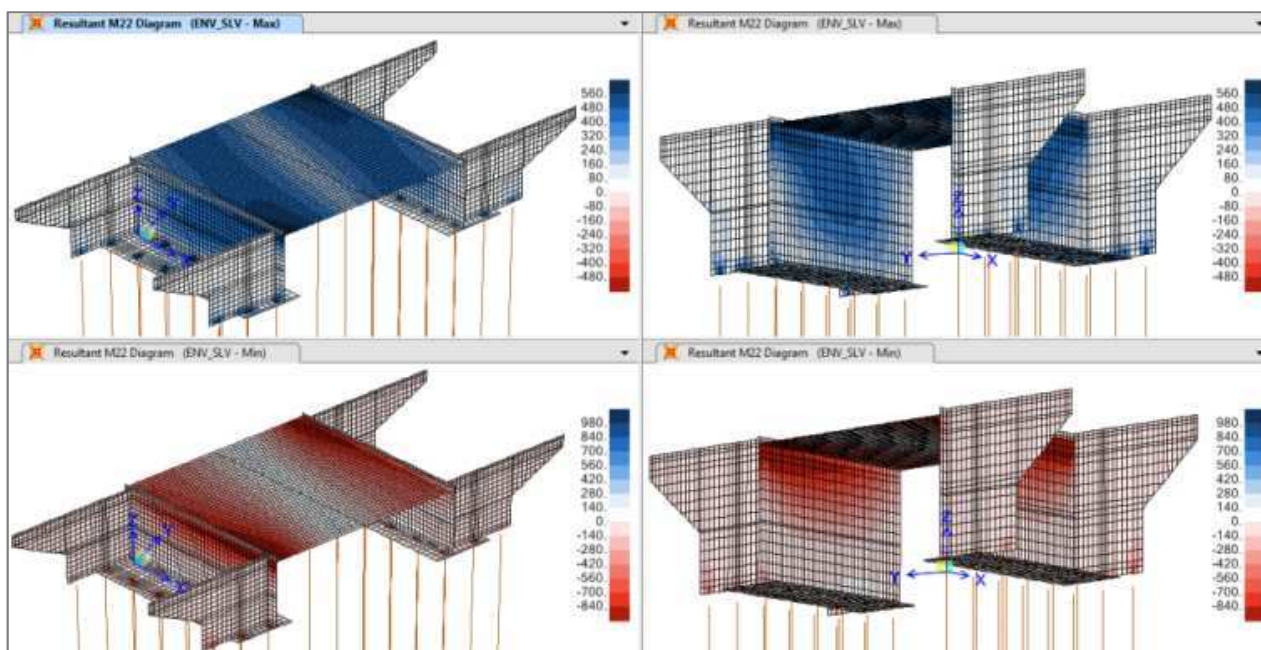


Figura 8.25: Momento M22 (SLV).

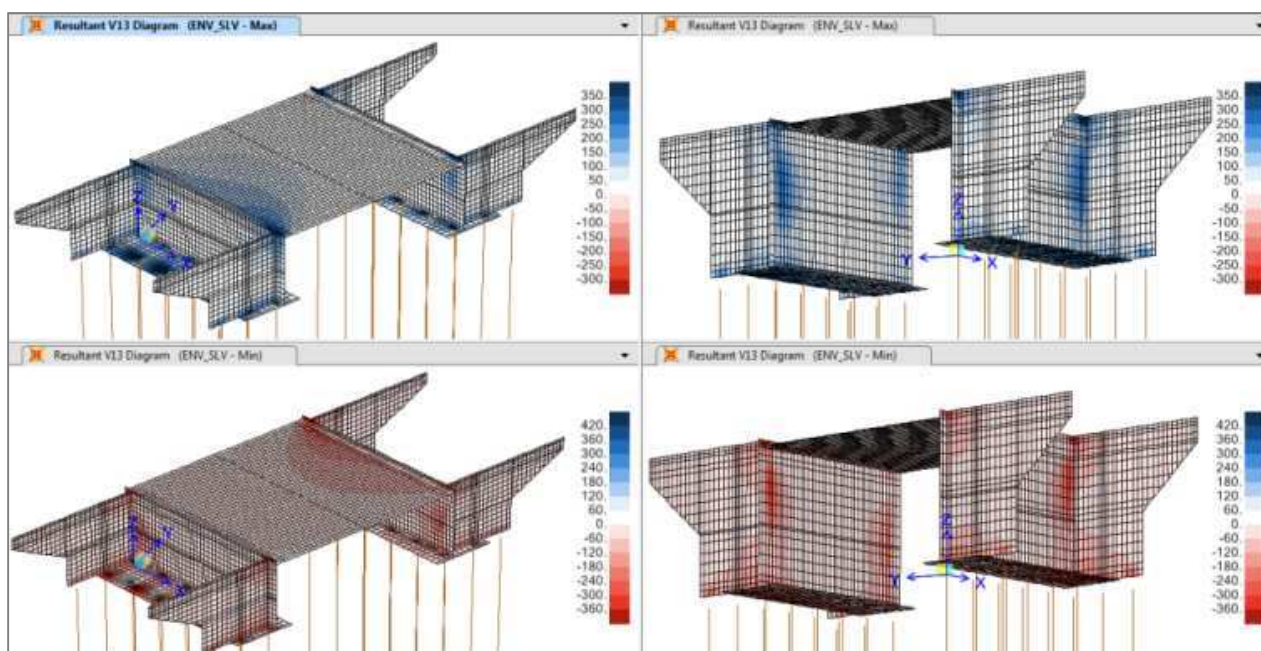


Figura 8.26: Taglio V13 (SLV).



|  |   |  |
|--|---|--|
|  <b>ENSER</b><br>SOCIETA' DI INGEGNERIA | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|--|---|--|

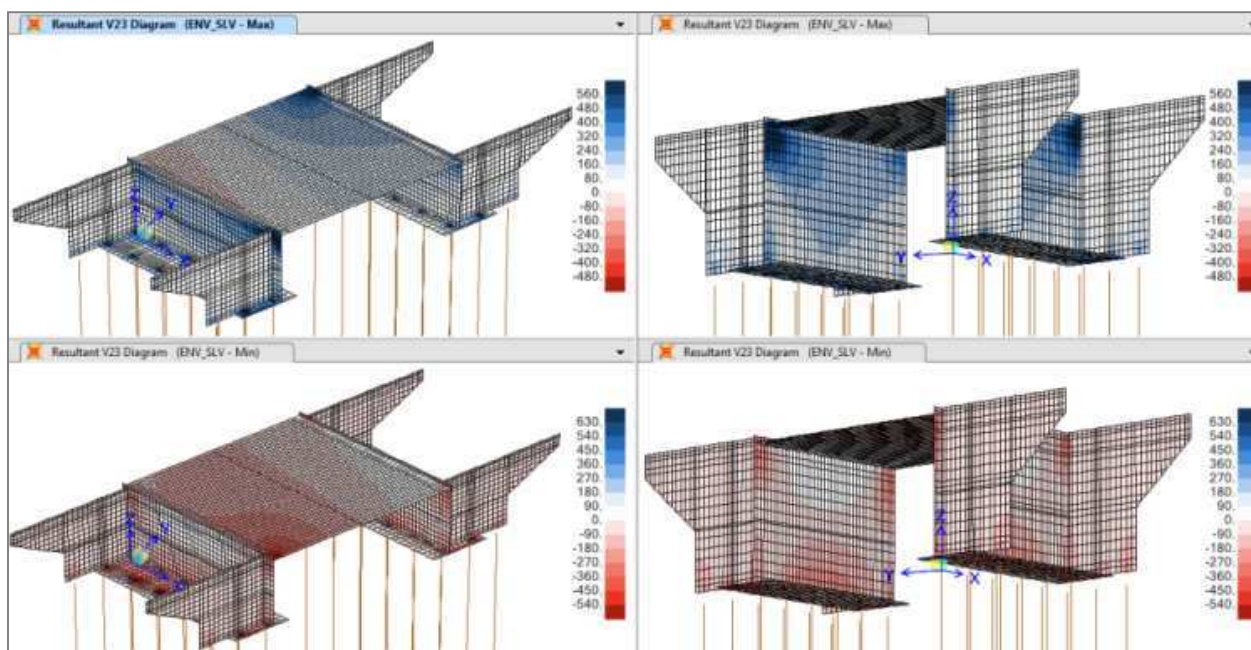


Figura 8.27: Taglio V23 (SLV).

#### 8.4.3.1.4 Involuppo sollecitazioni

Nella tabella seguente si riportano le sollecitazioni massime di taglio e momento (longitudinali e trasversali) per l'impalcato.

Tabella 8.6: Sollecitazioni massime di taglio e momento sull'impalcato per le combinazioni SLU e SLV.

| Involuppo   | $M_T$<br>[kNm] | $M_{L,Mezzeria}$<br>[kNm] | $M_{L,Appoggi}$<br>[kNm] | $V_T$<br>[kN] | $V_L$<br>[kN] |
|-------------|----------------|---------------------------|--------------------------|---------------|---------------|
| <b>SLV</b>  | +134<br>-289   | +204<br>-7                | +364<br>-693             | 240           | 288           |
| <b>SLU</b>  | +160<br>-212   | +346                      | -562                     | 306           | 410           |
| <b>RARA</b> | +118<br>-158   | +255                      | -418                     | -             | -             |
| <b>FR</b>   | +89<br>-113    | +208                      | -294                     | -             | -             |

I termini in tabella hanno il seguente significato:

- $M_T$ : Momento Trasversale (su 1m di larghezza);
- $M_L$ : Momento Longitudinale (su 60cm di larghezza)
- $V_T$ : Taglio Trasversale (su 1m di larghezza);
- $V_L$ : Taglio Longitudinale (su 60cm di larghezza).

Si intende che i momenti positivi per l'impalcato tendono le fibre inferiori.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

#### 8.4.3.1.5 Validazione risultati software

Per validare i risultati ottenuti attraverso il software SAP2000 si effettuerà un rapido confronto relativo al massimo momento longitudinale agente sulla mezzeria.

Si consideri una sezione composta da una sola trave, larga 60cm, con i seguenti carichi applicati:

- Peso proprio  $25kN/m^3 \times 0,7m \times 0,6m = 10,5kN/m$
- Peso pavimentazione  $3kN/m^2 \times 0,6m = 1,8kN/m$
- Azione del traffico  $9kN/m^2 \times 0,6m = 5,4kN/m$
- Carichi concentrati da traffico  $150kN \times \frac{0,6m}{1m} = 90kN$  applicati in mezzeria

La luce di calcolo dell'impalcato è

$$l = 13,5m$$

Allo stato limite ultimo il massimo momento agente in mezzeria ottenuto dal software sarà compreso tra i valori ottenuti per lo schema di trave con semi-incastro e quello di trave incastrata, ovvero

$$M_{semi-incastro} = 1,35 \times \frac{(10,5 + 1,8 + 5,4)kNm \times (13,5m)^2}{12} + 1,35 \times \frac{90kN \times 13,5m}{6} = 636kNm$$

$$M_{incastrato} = 1,35 \times \frac{(10,5 + 1,8 + 5,4)kNm \times (13,5m)^2}{24} + 1,35 \times \frac{90kN \times 13,5m}{8} = 386kNm$$

Il valore fornito dal software SAP2000 è pari a 346kNm, valore che si scosta per -10% dal valore calcolato per l'incastro perfetto. Questa riduzione si può spiegare con il momento di sovra-incastro prodotto dalla spinta del terreno sulle spalle. I risultati ottenuti dal modello agli elementi finiti possono considerarsi attendibili.

#### 8.4.3.2 Pali

La figura seguente mostra l'involuppo SLU (STR) delle sollecitazioni di momento principale, sforzo assiale e taglio per il palo maggiormente sollecitato a momento flettente.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |



Figura 8.28: Inviluppo SLU (STR) delle sollecitazioni sul palo maggiormente sollecitato a momento flettente

La figura seguente mostra l'inviluppo SLV delle sollecitazioni di momento principale, sforzo assiale e taglio per il palo maggiormente sollecitato a momento flettente.

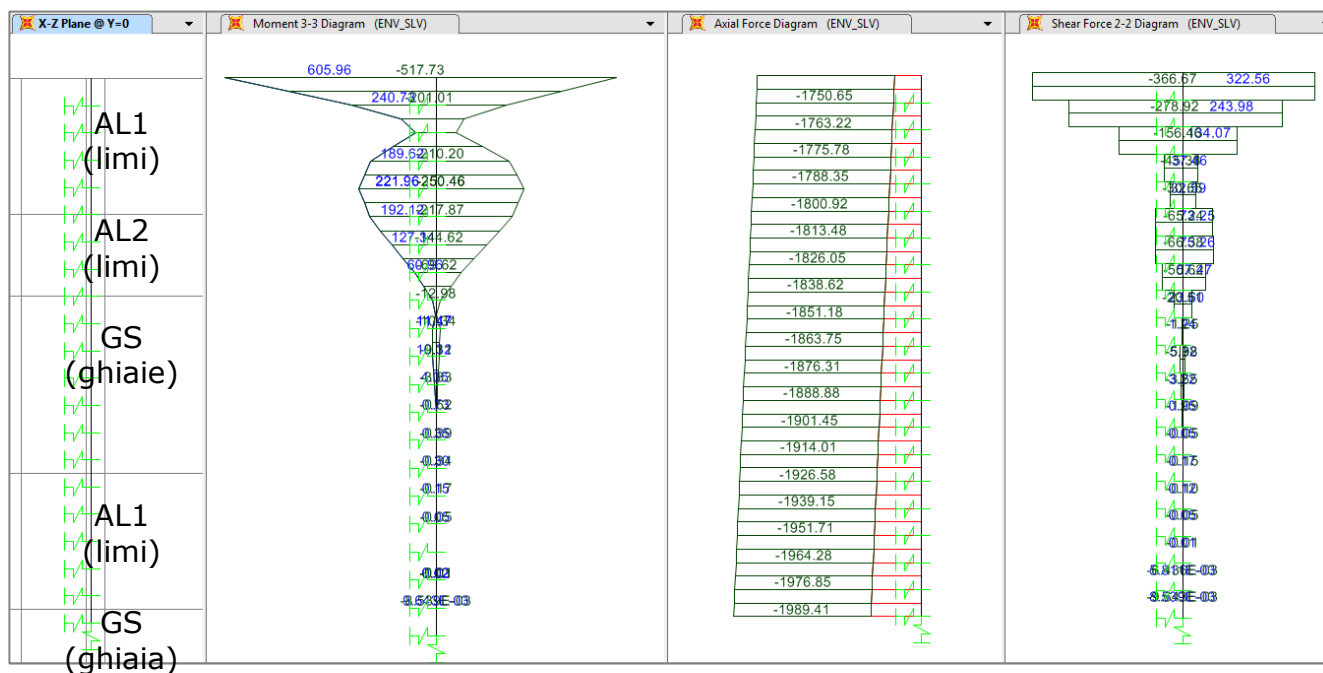


Figura 8.29: Inviluppo SLV delle sollecitazioni sul palo maggiormente sollecitato a momento flettente

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

La figura seguente mostra l'inviluppo SLU (GEO) delle sollecitazioni di momento principale, sforzo assiale e taglio per il palo maggiormente sollecitato a momento flettente.

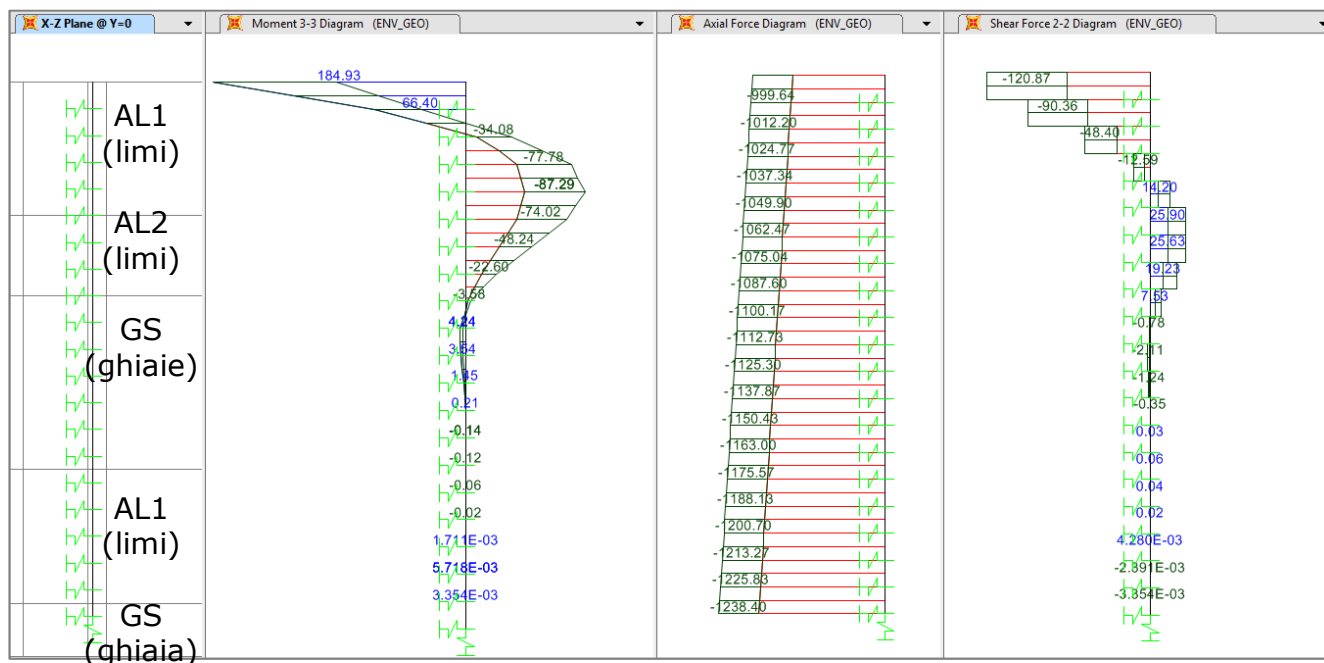


Figura 8.30: Inviluppo SLU delle sollecitazioni sul palo maggiormente sollecitato a momento flettente

Nella tabella seguente si riportano le sollecitazioni massime di taglio e momento (longitudinali e trasversali) e il minimo e il massimo sforzo assiale agente in testa ai pali per le combinazioni SLU, SLV e GEO.

Tabella 8.7: Sintesi delle sollecitazioni in testa ai pali.

| Inviluppo  | M<br>[kNm] | N <sub>MAX</sub><br>[kN] | N <sub>min</sub><br>[kN] | V<br>[kN]  |
|------------|------------|--------------------------|--------------------------|------------|
| <b>SLV</b> | <b>709</b> | <b>-2520</b>             | <b>569</b>               | <b>455</b> |
| <b>SLU</b> | <b>508</b> | <b>-2127</b>             | <b>-536</b>              | <b>381</b> |
| <b>GEO</b> | <b>409</b> | <b>-1744</b>             | <b>-514</b>              | <b>300</b> |

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

## 9. VERIFICHE

### 9.1 Travi prefabbricate e impalcato

Nel seguente paragrafo vengono effettuate le verifiche agli stati limite ultimi e di esercizio relative alla soletta superiore composta dalle travi prefabbricate in C.A.P. e dal getto di completamento in opera

#### 9.1.1 Geometria della trave in C.A.P. e della trave omogeneizzata

Le dimensioni della trave prefabbricata sono visibili nell'immagine seguente.

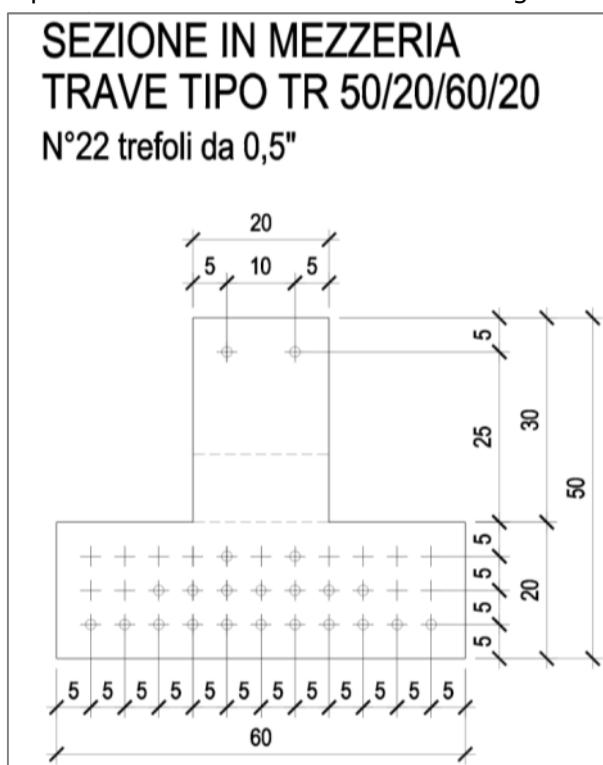


Figura 9.1: Sezione di mezzera trave in C.A.P

In seconda fase un getto di completamento porta lo spessore totale dell'impalcato da 50 a 70 cm.

La sezione di calcolo in seconda fase si ottiene omogeneizzando il getto di calcestruzzo al calcestruzzo prefabbricato mediante il coefficiente di omogeneizzazione  $n$  che vale

$$n = \frac{E_{\text{getto}}}{E_{\text{CAP}}} = \frac{33346 \text{ MPa}}{36283 \text{ MPa}} = 0,92$$

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

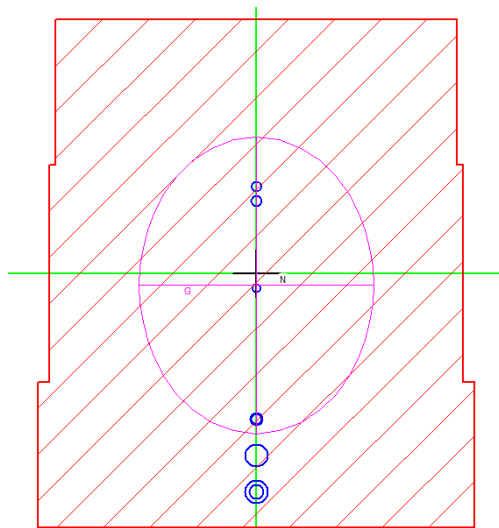


Figura 9.2: trave in C.A.P. e getto di completamento, sezione omogeneizzata

### 9.1.2 Calcolo delle perdite di precompressione

La tensione iniziale di tiro è pari a

$$\sigma_{sp,i} = 1350 \text{ MPa}$$

Tale tensione rispetta i limiti imposti al § 4.1.8.1.5 delle NTC2008.

$$0,90 f_{p(0,1)k} = 0,9 \times 1670 \text{ MPa} = 1503 \text{ MPa.}$$

$$0,80 f_{ptk} = 0,8 \times 1860 \text{ MPa} = 1488 \text{ MPa.}$$

Il valore delle perdite di precompressione prodotte dal rilassamento, dal ritiro e dal fluage vengono assunte pari al 20% della tensione iniziale di tiro. La tensione di precompressione depurata delle perdite è pari a

$$\sigma_{sp,f} = 0,8 \times 1350 \text{ MPa} = 1080 \text{ MPa}$$

### 9.1.3 Riepilogo armatura impalcato (getto in opera e travi prefabbricate)

Le tabelle seguenti riassumono la disposizione dell'armatura nell'impalcato, relativamente al getto in opera e alla trave prefabbricata.

Tabella 9.1: Riepilogo armatura impalcato (getto di completamento).

| Strato di armatura            | Distanza da estradosso impalcato [cm] | Sezione di appoggio                   | Sezione a 100 $\phi_{nom}$ dalla testata | Sezione di mezzeria                   |
|-------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|
| <b>Strato 1g</b>              | 6,5                                   | 7 $\phi$ 24<br>[31,1cm <sup>2</sup> ] | 7 $\phi$ 24<br>[31,1cm <sup>2</sup> ]    | 5 $\phi$ 12<br>[5,65cm <sup>2</sup> ] |
| <b>Strato 2g</b>              | 44                                    | 3 $\phi$ 20<br>[9,42cm <sup>2</sup> ] | 3 $\phi$ 20<br>[9,42cm <sup>2</sup> ]    | 2 $\phi$ 12<br>[2,26cm <sup>2</sup> ] |
| <b>Precompressione attiva</b> |                                       | NO                                    | SÌ                                       | SÌ                                    |

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

Tabella 9.2: Riepilogo armatura lenta nelle travi prefabbricate

| Strato di Armatura     | Distanza da estradosso trave [cm] | Sezione 100 $\phi_{nom}$ dalla testata | Sezione di mezzzeria                  |
|------------------------|-----------------------------------|--|---------------------------------------|
| Strato 1t              | 3                                 | 2 $\phi$ 10<br>[1,57cm <sup>2</sup> ]  | 2 $\phi$ 10<br>[1,57cm <sup>2</sup> ] |
| Strato 2t              | 17                                | 2 $\phi$ 8<br>[1,01cm <sup>2</sup> ]   | 2 $\phi$ 8<br>[1,01cm <sup>2</sup> ]  |
| Strato 3t              | 35                                | 4 $\phi$ 8<br>[2,01cm <sup>2</sup> ]   | 4 $\phi$ 8<br>[2,01cm <sup>2</sup> ]  |
| Strato 4t              | 45                                | 4 $\phi$ 10<br>[3,14cm <sup>2</sup> ]  | 4 $\phi$ 10<br>[3,14cm <sup>2</sup> ] |
| Precompressione attiva |                                   | SÌ                                     | SÌ                                    |

Tabella 9.3: Riepilogo armatura di precompressione nelle travi prefabbricate

| Strato di armatura | Distanza da estradosso trave [cm] | Sezione a 100 $\phi_{nom}$ dalla testata | Sezione di mezzzeria                     |
|--------------------|-----------------------------------|--|--|
| Strato 1           | 5                                 | 2 trefoli ½"<br>[1,86cm <sup>2</sup> ]   | 2 trefoli ½"<br>[1,86cm <sup>2</sup> ]   |
| Strato 2           | 35                                | 2 trefoli ½"<br>[1,86cm <sup>2</sup> ]   | 2 trefoli ½"<br>[1,86cm <sup>2</sup> ]   |
| Strato 3           | 40                                | 4 trefoli ½"<br>[3,72cm <sup>2</sup> ]   | 7 trefoli ½"<br>[6,51cm <sup>2</sup> ]   |
| Strato 4           | 45                                | 8 trefoli ½"<br>[7,44cm <sup>2</sup> ]   | 11 trefoli ½"<br>[10,23cm <sup>2</sup> ] |

#### 9.1.4 Verifica a momento flettente (SLU e SLV)

##### 9.1.4.1 Sezione di appoggio

Il massimo momento sollecitante negativo per la configurazione finale agli appoggi si ha per la combinazione SLV08 e vale

$$M_{Ed} = -693kNm$$

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br>Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014 |
|---|---|--|

**Titolo:** Cassola Agricolo - Configurazione finale - Appoggio

N° figure elementari: 3 Zoom N° strati barre: 6 Zoom

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1  | 55.2   | 20     | 1  | 31.67    | 6.5    |
| 2  | 56.8   | 30     | 2  | 9.42     | 44     |
| 3  | 60     | 20     | 3  | 0        | 23     |
|    |        |        | 4  | 0        | 32     |
|    |        |        | 5  | 0        | 55     |
|    |        |        | 6  | 0        | 65     |

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

N<sub>Ed</sub> 0 kN  
M<sub>xEd</sub> 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0 kNm

**P.to applicazione N:** Centro Baricentro cls  
Coord.[cm] xN 0 yN 0

**Tipo rottura:** Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

**Materiali:** B450C C45/55

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> 25.5 ‰  
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> 16  
σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0.9333  
τ<sub>c1</sub> 2.543

M<sub>xRd</sub> -795.9 kNm  
σ<sub>c</sub> -25.5 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 391.3 N/mm²  
ε<sub>c</sub> 3.5 ‰  
ε<sub>s</sub> 13.63 ‰  
d 63.5 cm  
x 12.97 x/d 0.2043  
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

Figura 9.3: Momento resistente sezione di appoggio.

Come mostra la figura precedente, il momento resistente vale

$$M_{Rd} = -795 \text{ kNm}$$

La verifica risulta soddisfatta con un fattore di sicurezza pari a

$$F.S. = \frac{M_{Rd}}{M_{Ed}} = 1,15$$

#### 9.1.4.2 Sezione di appoggio (armatura trasversale)

Le tabelle seguenti riassumono la disposizione dell'armatura trasversale nell'impalcato.

Tabella 9.4: Riepilogo armatura trasversale impalcato (getto di completamento) in mezzeria.

| Strato di armatura | Distanza da estradosso impalcato [cm] | Armatura Trasversale per metro di larghezza |
|--------------------|---------------------------------------|---|
| Strato 1           | 5                                     | 10ø12<br>[10,05cm²]                         |
| Strato 2           | 46                                    | 3ø24<br>[13,56cm²]                          |

Il massimo momento sollecitante negativo per la configurazione finale agli appoggi si ha per la combinazione SLV12 e vale

$$M_{Ed} = -289 \text{ kNm}$$



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

**Titolo:** Cassola Agricola - Configurazione finale-Armatura trasversale

N° figure elementari: 1 Zoom N° strati barre: 2 Zoom

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1  | 100    | 70     | 1  | 10.05    | 5      |
|    |        |        | 2  | 13.56    | 46     |

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

N<sub>Ed</sub>: 0 kN  
M<sub>Ed</sub>: 0 kNm  
M<sub>yEd</sub>: 0

**P.to applicazione N:** Centro Baricentro cls  
Coord. [cm]: xN: 0 yN: 0

**Tipo rottura:** Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

**Materiali:** B450C C32/40

$\epsilon_{su}$ : 67.5 ‰  $\epsilon_{c2}$ : 2 ‰  
 $f_{yd}$ : 391.3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$ : 3.5 ‰  
 $E_s$ : 200'000 N/mm²  $f_{cd}$ : 18.13 N/mm²  
 $E_s/E_c$ : 15  $f_{cc}/f_{cd}$ : 0.8  
 $\epsilon_{syd}$ : 1.957 ‰  $\sigma_{c,adm}$ : 12.25 N/mm²  
 $\sigma_{s,adm}$ : 255 N/mm²  $\tau_{co}$ : 0.7333  $\tau_{c1}$ : 2.114

$\sigma_c$ : -18.13 N/mm²  
 $\sigma_s$ : 391.3 N/mm²  
 $\epsilon_c$ : 3.5 ‰  
 $\epsilon_s$ : 32.72 ‰  
 $\kappa$ : 6.281  $\kappa/d$ : 0.09663  
 $\delta$ : 0.7

**Tipo Sezione:** Rettangolare Trapezi a T Circolare Rettangoli Coord.

**Metodo di calcolo:** 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

Figura 9.4: Momento resistente negativo armatura trasversale.

Come mostra la figura precedente, il momento resistente vale

$$M_{Rd} = -358 \text{ kNm}$$


La verifica risulta soddisfatta con un fattore di sicurezza pari a

$$F.S. = \frac{M_{Rd}}{M_{Ed}} = 1,24$$

#### 9.1.4.3 Sezione di prima precompressione

La sezione di prima precompressione, ovvero la prima sezione in cui la precompressione è totalmente efficace, viene localizzata ad una distanza pari a 100 volte il diametro nominale dei trefoli di precompressione. A  $100\phi_{nom}$  (=125cm) il momento sollecitante massimo si ha per la combinazione SLV08 e vale

$$M_{Ed} = -548 \text{ kNm}$$

|  |  |   |
|--|--|---|
|  <b>ENSER</b><br>SOCIETA' DI INGEGNERIA | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|  | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

**TITOLO:** Cassola Agricolo - Configurazione finale-Sezione di prima precompressione

**N° figure elementari** 3 **Zoom** **N° strati barre** 6 **Zoom**

| N° | b [cm] | h [cm] |
|----|--------|--------|
| 1  | 55.2   | 20     |
| 2  | 56.8   | 30     |
| 3  | 60     | 20     |

| N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|----------|--------|
| 1  | 27.14    | 6.5    |
| 2  | 9.42     | 44     |
| 3  | 1.57     | 23     |
| 4  | 1.01     | 37     |
| 5  | 2.01     | 55     |
| 6  | 3.14     | 65     |

**Tipologia Sezione:**  
☐ Rettang. re ☐ Trapezi  
☒ a T ☐ Circolare  
☐ Rettangoli ☐ Coord.

**Armatura Precompressione**  
**N° strati cavi** 4 **Zoom**

| N° | As [cm²] | d [cm] | σ <sub>st</sub> [MPa] |
|----|----------|--------|-----------------------|
| 1  | 1.86     | 25     | 1080                  |
| 2  | 1.86     | 55     | 1080                  |
| 3  | 3.72     | 60     | 1080                  |
| 4  | 7.44     | 65     | 1080                  |

**Sollecitazioni:**  
 S.L.U. Metodo n  
 N<sub>Ed</sub> 0 kN  
 M<sub>xEd</sub> 0 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 kNm

**P.to applicazione N:**  
☒ Centro ☐ Baricentro cls  
☐ Coord. [cm] xN 0 yN 0

**Tipologia rottura:**  
 Lato calcestruzzo - Cavo snervato

**Metodo di calcolo:**  
☒ S.L.U. + ☐ S.L.U. - ☐ Metodo n

**Tipologia flessione:**  
☒ Retta ☐ Deviata

**Materiali:**  
 B450C C45/55  
 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> 25.5 ‰  
 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> 16  
 σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0.9333  
 τ<sub>c1</sub> 2.543

**Calcoli:**  
 M<sub>xRd</sub> -769.6 kNm  
 σ<sub>c</sub> -25.5 N/mm²  
 σ<sub>s</sub> 391.3 N/mm²  
 ε<sub>c</sub> 3.5 ‰  
 ε<sub>s</sub> 8.094 ‰  
 d 63.5 cm  
 x 19.17 x/d 0.3019  
 δ 0.8174

**Calcoli di progetto:**  
 Tipo cavo: Trefolo  
 ε<sub>su</sub> 67.5 ‰  
 f<sub>yd</sub> 1'409 N/mm²  
 E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 6  
 ε<sub>syd</sub> 7.045 ‰  
 σ<sub>s,adm</sub> 1080 N/mm²  
 σ<sub>sp</sub> 1'409 N/mm²  
 ε<sub>sp</sub> 10.12 ‰ compressa predef.

**Calcoli di controllo:**  
 N° rett. 100  
 Calcola MRd Dominio M-N  
 L<sub>0</sub> 0 cm Col. modello

☒ Precompresso

Figura 9.5: Momento resistente sezione di prima precompressione.

Come mostra la figura precedente, il momento resistente vale

$$M_{Rd} = -769 \text{ kNm}$$

La verifica risulta soddisfatta con un fattore di sicurezza pari a

$$F.S. = \frac{M_{Rd}}{M_{Ed}} = 1,40$$

#### 9.1.4.4 Sezione di mezzeria

Il massimo momento sollecitante positivo per la configurazione finale in mezzeria si ha per la combinazione SLU056 e vale

$$M_{Ed} = 346 \text{ kNm}$$

|   |   |  |
|---|---|--|
|  <b>ENSER</b><br>SOCIETÀ DI INGEGNERIA | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

**Titolo:** Cassola agricolo - Configurazione finale-Sezione di mezzeria

**N° figure elementari:** 3 **Zoom** **N° strati barre:** 6 **Zoom**

| N° | b [cm] | h [cm] |
|----|--------|--------|
| 1  | 55.2   | 20     |
| 2  | 56.8   | 30     |
| 3  | 60     | 20     |

| N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|----------|--------|
| 1  | 5.65     | 6.5    |
| 2  | 2.26     | 44     |
| 3  | 1.57     | 23     |
| 4  | 1.01     | 37     |
| 5  | 2.01     | 55     |
| 6  | 3.14     | 65     |

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

**N<sub>Ed</sub>** 0 **kN**  
**M<sub>Ed</sub>** 0 **kNm**  
**M<sub>yEd</sub>** 0

**P.to applicazione N:** Centro **Baricentro cls**  
**Coord. [cm]** xN 0 yN 0

**Tipo rottura:** Lato calcestruzzo - Cavo snervato

**M<sub>Rd</sub>** 1'529 **kNm**

**Materiali:** B450C C45/55  
**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>** 25.5 ‰  
**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>** 16  
**σ<sub>s,adm</sub>** 255 N/mm² **τ<sub>co</sub>** 0.9333  
**τ<sub>c1</sub>** 2.543

**σ<sub>c</sub>** -25.5 N/mm²  
**σ<sub>s</sub>** 391.3 N/mm²  
**ε<sub>c</sub>** 3.5 ‰  
**ε<sub>s</sub>** 5.432 ‰  
**d** 65 cm  
**x** 25.47 **x/d** 0.3919  
**δ** 0.9298

**Tipo Sezione:** Rettang. re Trapezi  
 a T Circolare  
 Rettangoli Coord.

**Armatura Precompressione:** N° strati cavi 4 **Zoom**

| N° | As [cm²] | d [cm] | σ <sub>ps</sub> [MPa] |
|----|----------|--------|-----------------------|
| 1  | 1.86     | 25     | 1080                  |
| 2  | 1.86     | 55     | 1080                  |
| 3  | 6.51     | 60     | 1080                  |
| 4  | 10.23    | 65     | 1080                  |

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

**Tipo flessione:** Retta Deviata

**Calcola MRd** **Dominio M-N**  
**L<sub>0</sub>** 0 **Col. modello**

**N° rett.** 100

**σ<sub>sp</sub>** 1'409 N/mm²  
**ε<sub>sp</sub>** 10.83 ‰ compressa predef.

**Tipo cavo:** Trefolo  
**ε<sub>su</sub>** 67.5 ‰  
**f<sub>yd</sub>** 1'409 N/mm²  
**E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub>** 6  
**ε<sub>syd</sub>** 7.045 ‰  
**σ<sub>s,adm</sub>** 1080 N/mm²

☒ Precompresso

Figura 9.6: Momento resistente sezione di mezzeria.

Come mostra la figura precedente, il momento resistente vale

$$M_{Rd} = 1529 \text{ kNm}$$

La verifica risulta soddisfatta con un fattore di sicurezza pari a

$$F.S. = \frac{M_{Rd}}{M_{Ed}} = 4,42$$

#### 9.1.4.5 Sezione di mezzeria (armatura trasversale)

Le tabelle seguenti riassumono la disposizione dell'armatura trasversale nell'impalcato.

Tabella 9.5: Riepilogo armatura trasversale impalcato (getto di completamento) in mezzeria.

| Strato di armatura | Distanza da estradosso impalcato [cm] | Armatura Trasversale per metro di larghezza |
|--------------------|---------------------------------------|---|
| Strato 1           | 5                                     | 5ø12<br>[5,65cm²]                           |
| Strato 2           | 46                                    | 3ø24<br>[13,56cm²]                          |

Il massimo momento sollecitante positivo per la configurazione finale in mezzeria vale

$$M_{Ed} = 160 \text{ kNm}$$

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br>Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014 |
|---|---|--|

**Titolo:** Cassola Agricolo - Configurazione finale-Armatura trasversale

N° figure elementari: 1 Zoom N° strati barre: 2 Zoom

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1  | 100    | 50     | 1  | 5.65     | 5      |
|    |        |        | 2  | 13.56    | 46     |

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

N<sub>Ed</sub> 0 kN  
M<sub>xEd</sub> 0 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0 kNm

**P.to applicazione N:** Centro Baricentro cls  
Coord.[cm] xN 0 yN 0

**Tipo rottura:** Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

**Materiali:**  
**B450C** **C32/40**  
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> 18.13 N/mm²  
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> 12.25 N/mm²  
σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0.7333  
τ<sub>cl</sub> 2.114

M<sub>xRd</sub> 237.5 kNm  
σ<sub>c</sub> -18.13 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 391.3 N/mm²  
ε<sub>c</sub> 3.5 ‰  
ε<sub>s</sub> 35.26 ‰  
d 46 cm  
x 4.154 x/d 0.09031  
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

Figura 9.7: Momento resistente positivo armatura trasversale.

Come mostra la figura precedente, il momento resistente vale

$$M_{Rd} = 237 \text{ kNm}$$

La verifica risulta soddisfatta con un fattore di sicurezza pari a

$$F.S. = \frac{M_{Rd}}{M_{Ed}} = 1,48$$

## 9.1.5 Verifica a taglio (SLU)

### 9.1.5.1 Fase I

Il taglio sollecitante massimo agli appoggi in fase I vale

$$V_{Ed,I} = 72,6 \text{ kN}$$

Si dispongono agli appoggi staffe a due bracci ø10/10. Il taglio resistente vale

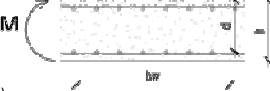
$$V_{Rd} = 441 \text{ kN}$$

La verifica risulta soddisfatta con un fattore di sicurezza pari a

$$F.S. = \frac{V_{Rd}}{V_{Ed,I}} = 6,07$$

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br>Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014 |
|---|---|--|

Tabella 9.6: Verifica a taglio – sezione di appoggio – Fase I.

| Verifica a taglio secondo NTC2008  |   |  |                      |
|--|---|--|----------------------|
| Geometria della sezione considerata  |   |  |                      |
|                 | Larghezza della sezione   | $b_w =$  | 20 cm                |
|  | Altezza della sezione   | $h =$  | 50 cm                |
|  | Copriferro (asse dell'armatura tesa)                                    | $c =$  | 5 cm                 |
|  | Numero di barre d'acciaio tese a flessione M sulla larghezza $b_w$      |  | 2                    |
|  | Diametro delle barre d'acciaio tese a flessione M sulla larghezza $b_w$ |  | 20                   |
|  | Sezione d'acciaio tesa a flessione M sulla larghezza $b_w$              | $A_s =$  | 6.28 cm <sup>2</sup> |
| Caratteristiche dei materiali impiegati [calcestruzzo e acciaio]                                 |   |  |                      |
| Classe di resistenza del calcestruzzo $\square$  |   |  | C45/55               |
|  |   | $R_{ck} =$   | 55.00 MPa            |
|  |   | $f_{ck} =$   | 45.00 MPa            |
|  |   | $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot x f_{ck} / \gamma_c = 0,85 \cdot x f_{ck} / 1,5 =$ | 25.50 MPa            |
| Acciaio $\square$  |   | $f_{yk} =$   | 450.00 MPa           |
|  |   | $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = f_{yk} / 1,15 =$                                 | 391.30 MPa           |
| Resistenza ultima a taglio senza armature trasversali $V_{Rd}$                                   |   |  |                      |
| Altezza utile $d = (h - c) \square$  |   | $d =$  | 450.00 mm            |
| $k = 1 + (200/d)^{0,5} \leq 2,0$ con $d$ in mm $\square$   |   | $k =$  | 1.6667 -             |
| $\rho_1 = A_s / (b_w d) \leq 0,02 \square$   |   | $\rho_1 =$   | 0.0070 -             |
| Assiale agente per la combinazione di carico considerata ( $N > 0$ = compressione)               |   | $N_{Ed} =$   | 0.0 kN               |
| $\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c = N_{Ed} / (b_w h) < 0,2 f_{cd} \square$                             |   | $\sigma_{cp} =$  | 0.000 MPa            |
| $C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_c =$   |   |  | 0.12 -               |
| $k_1 =$  |   |  | 0.15 -               |
| $v_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} =$   |   |  | 0.505 -              |
| $V_{Rd,c2} = (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d =$  |   |  | 45.47 kN             |
| $V_{Rd,c1} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d =$                   |   |  | 56.80 kN             |
|  |   | $V_{Rd} = \max(V_{Rd,c1}; V_{Rd,c2}) =$  | 56.8 kN              |
| Resistenza ultima della sezione con armature trasversali   |   |  |                      |
| numero di bracci nella larghezza $b_w$   |   | 2  |                      |
| diametro $\phi$  |   | 10 mm  |                      |
| interasse s tra due armature trasversali consecutive $\rightarrow$                               |   | $s =$  | 10 cm                |
| Area dell'armatura trasversale $\square$   |   | $A_{sw} =$   | 1.57 cm <sup>2</sup> |
| Inclinazione delle barre d'armatura trasversale $\square$  |   | $\alpha =$   | 90 °                 |
| Inclinazione dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della sezione $\square$               |   | $\cotg(\theta)_{calc} =$   | 1.77                 |
| 1.000 $\leq \cotg(\theta) \leq$  |   |  | 2.500                |
| Inclinazione dei puntoni di calcestruzzo di calcolo $\square$                                    |   | $\cotg(\theta)_{eff} =$  | 1.77                 |
|  |   | $\theta_{eff} =$   | 29.4 °               |
| $v = 0,6 \times (1 - f_{ck} / 250) =$  |   |  | 0.50                 |
|  |   | $\alpha_c =$   | 1.00                 |
| Resistenza lato acciaio $V_{Rd,s} = (A_{sw} / s) \times z f_{yd} \cotg \theta =$                 |   | $V_{Rd,s} =$   | 441.72 kN            |
| Resistenza lato calcestruzzo $V_{Rd,c} = \alpha_c b_w z v f_{cd} (\cotg \theta + \tan \theta) =$ |   | $V_{Rd,c} =$   | 441.72 kN            |
|  |   | $V_{Rd,max} =$   | 441.72 kN            |
|  |   | <b>Resistenza al taglio <math>V_{Rd} = \min(V_{Rd,s}; V_{Rd,max}) =</math></b> | <b>441.7 kN</b>      |

### 9.1.5.2 Fase finale

Il taglio sollecitante massimo agli appoggi per la configurazione finale si ha per la combinazione SLU007 e vale

$$V_{Ed,L} = 410 \text{ kN}$$

Si considera cautelativamente come sezione resistente una sezione larga 60cm e alta 50 cm (corrispondente alla sezione del getto in opera).

Si dispongono agli appoggi staffe a due bracci  $\phi 10/10$ . Il taglio resistente vale

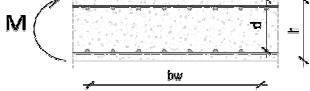
$$V_{Rd,L} = 601 \text{ kN}$$

La verifica risulta soddisfatta con un fattore di sicurezza pari a

$$F.S. = \frac{V_{Rd,L}}{V_{Ed,L}} = 1,47$$

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

Tabella 9.7: Verifica a taglio – sezione di appoggio.

| Verifica a taglio secondo NTC2008  |  |  |                        |
|--|--|--|------------------------|
| Geometria della sezione considerata  |  |  |                        |
|                   | Larghezza della sezione  | $b_w =$                                    | 60 cm                  |
|  | Altezza della sezione  | $h =$                                      | 50 cm                  |
|  | Copri ferro (asse dell'armatura tesa)                              | $c =$                                      | 6.5 cm                 |
|  | Numero di barre d'acciaio tese a flessione M sulla larghezza $b_w$ |  | 5                      |
| Diametro delle barre d'acciaio tese a flessione M sulla larghezza $b_w$                            |  |  | 24                     |
| Sezione d'acciaio tesa a flessione M sulla larghezza $b_w$   |  | $A_s =$                                    | 22.62 cm <sup>2</sup>  |
| Caratteristiche dei materiali impiegati [calcestruzzo e acciaio]                                   |  |  |                        |
| Classe di resistenza del calcestruzzo $\bar{f}_{cd}$   |  |  |                        |
|  |  |  | C32/40                 |
|  |  | $R_{ck} =$                                 | 40.00 MPa              |
|  |  | $f_{ck} =$                                 | 32.00 MPa              |
|  |  | $f_{cd} =$                                 | 18.13 MPa              |
|  |  |  | Acciaio $\bar{f}_{yk}$ |
|  |  | $f_{yk} =$                                 | 450.00 MPa             |
|  |  | $f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s = f_{yk}/1.15 =$ | 391.30 MPa             |
| Resistenza ultima a taglio senza armature trasversali $V_{Rd}$                                     |  |  |                        |
| Altezza utile $d = (h - c)$  |  | $d =$                                      | 435.00 mm              |
| $k = 1 + (200/d)^{0.5} \leq 2.0$ con $d$ in mm   |  | $k =$                                      | 1.6781 -               |
| $\rho_1 = A_{s1}/(b_w d) \leq 0.02$  |  | $\rho_1 =$                                 | 0.0087 -               |
| Sforzo assiale agente per la combinazione di carico considerata ( $N > 0$ = compressione)          |  | $N_{Ed} =$                                 | 0.0 kN                 |
| $\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c = N_{Ed}/(b_w h) < 0.2 f_{cd}$   |  | $\sigma_{cp} =$                            | 0.000 MPa              |
| $C_{Rd,c} = 0.18/\gamma_c$   |  |  | 0.12 -                 |
| $k_1 =$  |  |  | 0.15 -                 |
| $v_{min} = 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$   |  |  | 0.430 -                |
| $V_{Rd,c2} = (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d$  |  |  | 112.33 kN              |
| $V_{Rd,c1} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d$                       |  |  | 159.08 kN              |
| $V_{Rd} = \max(V_{Rd,c1}, V_{Rd,c2}) =$  |  |  | 159.1 kN               |
| Resistenza ultima della sezione con armature trasversali   |  |  |                        |
| numero di bracci nella larghezza $b_w$   |  | 2  |                        |
| diametro $\phi$  |  | 10 mm                                      |                        |
| interasse $s$ tra due armature trasversali consecutive $\rightarrow$                               |  | $s =$                                      | 10 cm                  |
| Area dell'armatura trasversale $\bar{A}_{sw}$  |  | $A_{sw} =$                                 | 1.57 cm <sup>2</sup>   |
| Inclinazione delle barre d'armatura trasversale $\bar{\alpha}$                                     |  | $\alpha =$                                 | 90 °                   |
| Inclinazione dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della sezione $\bar{\theta}$            |  | $\cotg(\theta)_{calc} =$                   | 2.80                   |
| 1.000 $\leq \cotg(\theta) \leq$  |  |  | 2.500                  |
| Inclinazione dei puntoni di calcestruzzo di calcolo $\bar{\theta}$                                 |  | $\cotg(\theta)_{eff} =$                    | 2.50                   |
|  |  | $\theta_{eff} =$                           | 21.8 °                 |
| $v = 0.6 \times (1 - f_{cd}/250) =$  |  |  | 0.50                   |
| $\alpha_c =$   |  |  | 1.00                   |
| Resistenza lato acciaio $V_{Rd,s} = (A_{sw}/s) \times z f_{yd} \cotg \theta =$                     |  | $V_{Rd,s} =$                               | 601.60 kN              |
| Resistenza lato calcestruzzo $V_{Rd,c} = \alpha_c b_w z v f_{cd} / (\cotg \theta + \tan \theta) =$ |  | $V_{Rd,max} =$                             | 734.40 kN              |
| <b>Resistenza al taglio <math>V_{Rd} = \min(V_{Rd,s}, V_{Rd,max}) =</math></b>                     |  |  | <b>601.6 kN</b>        |

A distanza di 1,5m dagli appoggi si dispongono invece staffe  $\phi 10/20$ , Il cui taglio resistente vale

$$V_{Rd,L} = 301 \text{ kN}$$

Il taglio massimo in direzione trasversale si ha per la combinazione SLU007 e vale

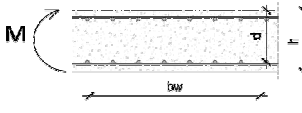
$$V_{Ed,T} = 306 \text{ kN}$$

Le staffe in direzione longitudinale agli appoggi possono considerarsi in direzione trasversale su 100cm di larghezza come staffe a dieci bracci  $\phi 10/30$ . Il taglio resistente vale di conseguenza

$$V_{Rd,T} = 1002 \text{ kN}$$

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

Tabella 9.8: Verifica a taglio trasversale – sezione di appoggio.

| Verifica a taglio secondo NTC2008  |  |  |                      |
|--|--|--|----------------------|
| Geometria della sezione considerata  |  |  |                      |
|                 | Larghezza della sezione  | $b_w =$  | 100 cm               |
|  | Altezza della sezione  | $h =$  | 50 cm                |
|  | Copriferro (asse dell'armatura tesa)                               | $c =$  | 6.5 cm               |
|  | Numero di barre d'acciaio tese a flessione M sulla larghezza $b_w$ |  | 5                    |
| Diametro delle barre d'acciaio tese a flessione M sulla larghezza $b_w$                          |  |  | 12                   |
| Sezione d'acciaio tesa a flessione M sulla larghezza $b_w$                                       |  | $A_s =$  | 5.65 cm <sup>2</sup> |
| Caratteristiche dei materiali impiegati [calcestruzzo e acciaio]                                 |  |  |                      |
| Classe di resistenza del calcestruzzo $f_{ck}$   |  |  |                      |
|  |  |  | C32/40               |
|  |  | $R_{ck} =$   | 40.00 MPa            |
|  |  | $f_{ck} =$   | 32.00 MPa            |
|  |  | $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c = 0.85 \cdot f_{ck} / 1.5 =$ | 18.13 MPa            |
|  |  | Acciaio $f_{yk}$   | 450.00 MPa           |
|  |  | $f_{ytd} = f_{yk} / \gamma_s = f_{yk} / 1.15 =$                            | 391.30 MPa           |
| Resistenza ultima a taglio senza armature trasversali $V_{Rd}$                                   |  |  |                      |
| Altezza utile $d = (h - c)$  |  | $d =$  | 435.00 mm            |
| $k = 1 + (200/d)^{0.5} \leq 2.0$ con $d$ in mm   |  | $k =$  | 1.6781 -             |
| $\rho_1 = A_{s1} / (b_w d) \leq 0.02$  |  | $\rho_1 =$   | 0.0013 -             |
| Sforzo assiale agente per la combinazione di carico considerata ( $N > 0$ = compressione)        |  | $N_{Ed} =$   | 0.0 kN               |
| $\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c = N_{Ed} / (b_w h) < 0.2 f_{cd}$                                     |  | $\sigma_{cp} =$  | 0.000 MPa            |
| $C_{Rd,c} = 0.18 / \gamma_c$   |  |  | 0.12 -               |
| $k_1 =$  |  |  | 0.15 -               |
| $v_{min} = 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$   |  |  | 0.430 -              |
| $V_{Rd,c2} = (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d$  |  |  | 187.22 kN            |
| $V_{Rd,c1} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d$                     |  |  | 140.88 kN            |
| $V_{Rd} = \max(V_{Rd,c1}, V_{Rd,c2}) =$  |  |  | 187.2 kN             |
| Resistenza ultima della sezione con armature trasversali   |  |  |                      |
| numero di bracci nella larghezza $b_w$   |  | 10   | diametro $\phi$      |
| interasse $s$ tra due armature trasversali consecutive $\rightarrow$                             |  |  | 30 cm                |
| Area dell'armatura trasversale $A_{sw}$  |  |  | 7.85 cm <sup>2</sup> |
| Inclinazione delle barre d'armatura trasversale $\alpha$   |  |  | 90 °                 |
| Inclinazione dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della sezione $\rightarrow$           |  | $\cotg(\theta)_{calc} =$   | 2.80                 |
| 1.000 $\leq \cotg(\theta) \leq$  |  |  | 2.500                |
| Inclinazione dei puntoni di calcestruzzo di calcolo $\rightarrow$                                |  | $\cotg(\theta)_{eff} =$  | 2.50                 |
|  |  | $\theta_{eff} =$   | 21.8 °               |
| $v = 0.6 \times (1 - f_{ck}/250) =$  |  |  | 0.50                 |
| $\alpha_c =$   |  |  | 1.00                 |
| Resistenza lato acciaio $V_{Rd,s} = (A_{sw}/s) \times z f_{ytd} \cotg \theta =$                  |  | $V_{Rd,s} =$   | 1002.66 kN           |
| Resistenza lato calcestruzzo $V_{Rd,c} = \alpha_c b_w z v f_{cd} (\cotg \theta + \tan \theta) =$ |  | $V_{Rd,max} =$   | 1224.00 kN           |
| <b>Resistenza al taglio <math>V_{Rd} = \min(V_{Rd,s}, V_{Rd,max}) =</math></b>                   |  |  | <b>1002.7 kN</b>     |

La verifica risulta soddisfatta con un fattore di sicurezza pari a

$$F.S. = \frac{V_{Rd,T}}{V_{Ed,T}} = 3,27$$

Tuttavia poiché alle staffe disposte in direzione longitudinale sono sollecitate anche per la direzione trasversale la verifica a taglio si ritiene soddisfatta se risulta

$$\frac{V_{Ed,L}}{V_{Rd,L}} + \frac{V_{Ed,T}}{V_{Rd,T}} \leq 1$$

Nel caso in esame si ha

$$\frac{410 \text{ kN}}{601 \text{ kN}} + \frac{306 \text{ kN}}{1002 \text{ kN}} = 0,99 \leq 1$$

La verifica risulta soddisfatta



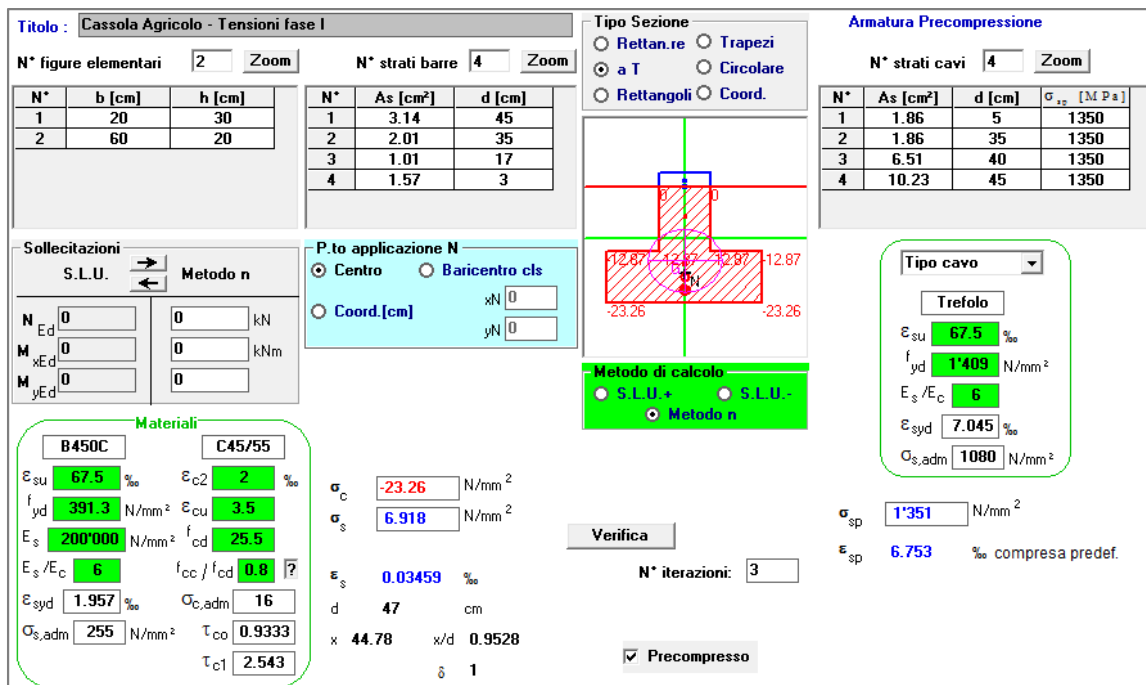
|   |  |  |
|---|--|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |  |

### 9.1.6 Verifica delle tensioni nel conglomerato cementizio all'atto del tiro (SLE)

In base alle prescrizioni del § 4.1.8.1.4 delle NTC 2008 è necessario verificare che all'atto del tiro la compressione massima nel calcestruzzo sia inferiore a  $0,70 f_{ckj}$  con  $f_{ckj}$  resistenza caratteristica del calcestruzzo all'atto del tiro. Si considera  $f_{ckj} = 0,75 f_{ck} = 33,75 \text{ MPa}$ . La tensione massima di conseguenza vale

$$\sigma_{c,max} = 0,70 \times f_{ckj} = 0,70 \times 33,75 \text{ MPa} = 23,62 \text{ MPa}$$

La figura seguente mostra le tensioni nella trave in C.A.P. all'atto del tiro. Trascurando a favore di sicurezza il momento flettente dato dal peso proprio si ottiene una tensione massima di compressione nel calcestruzzo pari a 23,26 MPa, pertanto la verifica risulta soddisfatta.



**Titolo:** Cassola Agricolo - Tensioni fase I

**N° figure elementari:** 2 **Zoom** **N° strati barre:** 4 **Zoom**

| N° | b [cm] | h [cm] |
|----|--------|--------|
| 1  | 20     | 30     |
| 2  | 60     | 20     |

| N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|----------|--------|
| 1  | 3.14     | 45     |
| 2  | 2.01     | 35     |
| 3  | 1.01     | 17     |
| 4  | 1.57     | 3      |

**Tipologia Sezione:**  
☐ Rettang. ☐ Trapezi  
☒ a T ☐ Circolare  
☐ Rettangoli ☐ Coord.

**Armatura Precompressione**  
**N° strati cavi:** 4 **Zoom**

| N° | As [cm²] | d [cm] | $\sigma_{sp}$ [MPa] |
|----|----------|--------|---------------------|
| 1  | 1.86     | 5      | 1350                |
| 2  | 1.86     | 35     | 1350                |
| 3  | 6.51     | 40     | 1350                |
| 4  | 10.23    | 45     | 1350                |

**Sollecitazioni:**  
 S.L.U. **Metodo n**  
 N<sub>Ed</sub> 0 kN  
 M<sub>Ed</sub> 0 kNm  
 M<sub>Ed</sub> 0 kNm

**P.to applicazione N:**  
☒ Centro ☐ Baricentro cls  
☐ Coord. [cm] xN 0 yN 0

**Metodo di calcolo:**  
☐ S.L.U. + ☐ S.L.U. - ☒ Metodo n

**Materiali:**  
**B450C** **C45/55**  
 $\epsilon_{su}$  67.5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391.3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3.5 ‰  
 $E_s$  200'000 N/mm²  $f_{cd}$  25.5 N/mm²  
 $E_s/E_c$  6  $f_{cc}/f_{cd}$  0.8  
 $\epsilon_{syd}$  1.957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  16 N/mm²  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0.9333  
 $\tau_{c1}$  2.543

$\sigma_c$  -23.26 N/mm²  
 $\sigma_s$  6.918 N/mm²  
 $\epsilon_s$  0.03459 ‰  
 d 47 cm  
 x 44.78 x/d 0.9528  
 $\delta$  1

**Verifica**  
**N° iterazioni:** 3  
☒ Precompresso

**Tipo cavo:** Trefolo  
 $\epsilon_{su}$  67.5 ‰  
 $f_{yd}$  1'409 N/mm²  
 $E_s/E_c$  6  
 $\epsilon_{syd}$  7.045 ‰  
 $\sigma_{s,adm}$  1080 N/mm²  
 $\sigma_{sp}$  1'351 N/mm²  
 $\epsilon_{sp}$  6.753 ‰ compressa predef.

Figura 9.8: Tensioni all'atto del rilascio dei cavi nella trave in C.A.P.

Nella zona di ancoraggio la compressione  $\sigma_c$  è data da

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{sp,i}}{a_{ancoraggio}} \times \frac{A_{trefolo}}{A_{influenza}} < 0,9 f_{ckj}$$

dove

$\sigma_{sp,i}$  indica la tensione iniziale sul singolo trefolo

$A_{trefolo}$  indica l'area del singolo trefolo

$A_{influenza}$  indica l'area di calcestruzzo all'interno della quale si trova un trefolo.

$a_{ancoraggio}$  è un coefficiente pari a 2 che tiene conto dell'applicazione graduale della tensione nel calcestruzzo nella zona di ancoraggio dei trefoli.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

Risulta

$$\sigma_c = \frac{1350 \text{ N/mm}^2}{2} \times \frac{93 \text{ mm}^2}{50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}} = 25,1 \text{ MPa} < 30,4 \text{ MPa} = 0,9 f_{ckj}$$

### 9.1.7 Tensioni nella trave in C.A.P. in fase I

Qui di seguito si riassumono le sollecitazioni interne e le tensioni normali della trave in CAP in fase I, nelle sezioni di interesse. Queste ultime sono state determinate mediante l'utilizzo del programma VCA-SLU, del quale vengono forniti gli output nelle immagini seguenti.

Il momento nella sezione di mezzeria vale

$$M_{Ed,I} = 245 \text{ kNm}$$

La tabella seguente mostra il valore delle tensioni normali nella sezione di mezzeria in fase I, considerando la precompressione al 100%.

Tabella 9.9: Tensioni normali nelle fibre della sezione di mezzeria in fase I.

| Tensione         | Valore     |
|------------------|------------|
| $\sigma_{c,int}$ | -11,23 MPa |
| $\sigma_{c,est}$ | -19,04 MPa |
| $\sigma_{sp}$    | 1278 MPa   |

La tabella seguente mostra invece il valore delle tensioni normali, considerando il valore della precompressione depurato di tutte le perdite.

Tabella 9.10: Tensioni normali nelle fibre della sezione di mezzeria in fase I, considerando le perdite di precompressione.

| Tensione         | Valore     |
|------------------|------------|
| $\sigma_{c,int}$ | -6,60 MPa  |
| $\sigma_{c,est}$ | -19,49 MPa |
| $\sigma_{sp}$    | 1033 MPa   |

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

**Titolo:** Cassola Agricolo - Tensioni fase I

N° figure elementari: 2 Zoom N° strati barre: 4 Zoom

| N° | b [cm] | h [cm] |
|----|--------|--------|
| 1  | 20     | 30     |
| 2  | 60     | 20     |

| N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|----------|--------|
| 1  | 3.14     | 45     |
| 2  | 2.01     | 35     |
| 3  | 1.01     | 17     |
| 4  | 1.57     | 3      |

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

**Armatura Precompressione**  
 N° strati cavi: 4 Zoom

| N° | As [cm²] | d [cm] | σ <sub>sp</sub> [MPa] |
|----|----------|--------|-----------------------|
| 1  | 1.86     | 5      | 1080                  |
| 2  | 1.86     | 35     | 1080                  |
| 3  | 6.51     | 40     | 1080                  |
| 4  | 10.23    | 45     | 1080                  |

**Sollecitazioni:**  
 S.L.U. Metodo n  
 N<sub>Ed</sub>: 0 kN  
 M<sub>xEd</sub>: 0 kNm  
 M<sub>yEd</sub>: 0 kNm

**P.to applicazione N:**  
☒ Centro ☐ Baricentro cls  
☐ Coord.[cm] xN: 0 yN: 0

**Metodo di calcolo:**  
☐ S.L.U.+ ☐ S.L.U.- ☒ Metodo n

**Materiali:**  
 B450C C45/55  
 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>: 25.5 ‰  
 E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub>: 6 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub>: 0.8  
 ε<sub>syd</sub>: 1.957 ‰ σ<sub>c,adm</sub>: 16  
 σ<sub>s,adm</sub>: 255 N/mm² τ<sub>co</sub>: 0.9333  
 τ<sub>c1</sub>: 2.543

**Tipo cavo:**  
 Trefolo  
 ε<sub>su</sub>: 67.5 ‰  
 f<sub>yd</sub>: 1'409 N/mm²  
 E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub>: 6  
 ε<sub>syd</sub>: 7.045 ‰  
 σ<sub>s,adm</sub>: 1080 N/mm²

**Verifica:**  
 σ<sub>c</sub>: -19.49 N/mm²  
 ε<sub>s</sub>: -0.2367 ‰  
 σ<sub>sp</sub>: 1'033 N/mm²  
 ε<sub>sp</sub>: 5.163 ‰ compresa predef.  
 N° iterazioni: 0  
☒ Precompresso

Figura 9.9: Fase I - tensioni in mezzeria a perdite avvenute.

### 9.1.8 Tensioni in combinazione rara

Il momento in mezzeria in fase II per la combinazione rara vale

$$M_{Ed,II-rara} = 166 \text{ kNm}$$

Questo momento comporta un valore di sollecitazioni normali così riassunte:

Tabella 9.11: Tensioni in mezzeria in combinazione rara (fase I + fase II).

| Tensione         | Fase I     | Fase II   | Fase I + Fase II |
|------------------|------------|-----------|------------------|
| $\sigma_{c,int}$ | -6,60 MPa  | 2,64 MPa  | -3,96 MPa        |
| $\sigma_{c,est}$ | -19,49 MPa | -2,07 MPa | -21,56 MPa       |
| $\sigma_{sp}$    | 1033 MPa   | -         | 1033 MPa         |

Le tensioni nel calcestruzzo sono inferiori al limite  $0,60 f_{ck} = 27,0 \text{ MPa}$ .

La tensione massima di trazione del trefolo è inferiore al limite

$$0,80 f_{p(0,1)k} = 0,8 \times 1670 \text{ MPa} = 1336 \text{ MPa}.$$

Le verifiche risultano pertanto soddisfatte.

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br>Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014 |
|---|---|--|

**Titolo:** Cassola Agricolo - Fase II-Sezione di mezzeria

N° figure elementari: 3 Zoom N° strati barre: 6 Zoom

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1  | 55.2   | 20     | 1  | 5.65     | 6.5    |
| 2  | 56.8   | 30     | 2  | 2.26     | 44     |
| 3  | 60     | 20     | 3  | 1.57     | 23     |
|    |        |        | 4  | 1.01     | 37     |
|    |        |        | 5  | 2.01     | 55     |
|    |        |        | 6  | 3.14     | 65     |

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

N<sub>Ed</sub> 0 260 kN  
M<sub>xEd</sub> 0 166 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0 0

**P.to applicazione N:** Centro Baricentro cls  
Coord.[cm] xN 0 yN 0

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

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

**Materiali:** B450C C45/55

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> 25.5 N/mm²  
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> 16 N/mm²  
σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0.9333  
τ<sub>c1</sub> 2.543

σ<sub>c</sub> -3.96 N/mm²  
σ<sub>c</sub> 2.643 N/mm²  
ε<sub>s</sub> 0.1629 ‰

Verifica

Precompresso

Figura 9.10: Sollecitazioni in combinazione RARA, sezione di mezzeria.

All'appoggio il momento sollecitante (valutato in configurazione finale) vale

$$M_{Ed} = -418 \text{ kNm.}$$

**Titolo:** Cassola Agricolo - Configurazione finale - Appoggio

N° figure elementari: 3 Zoom N° strati barre: 6 Zoom

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1  | 55.2   | 20     | 1  | 31.67    | 6.8    |
| 2  | 56.8   | 30     | 2  | 9.42     | 43.6   |
| 3  | 60     | 20     | 3  | 0        | 23     |
|    |        |        | 4  | 0        | 32     |
|    |        |        | 5  | 0        | 55     |
|    |        |        | 6  | 0        | 65     |

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

N<sub>Ed</sub> 0 54 kN  
M<sub>xEd</sub> 0 -418 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0 0

**P.to applicazione N:** Centro Baricentro cls  
Coord.[cm] xN 0 yN 0

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

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

**Materiali:** B450C C45/55

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> 25.5 N/mm²  
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> 16 N/mm²  
σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0.9333  
τ<sub>c1</sub> 2.543

σ<sub>c</sub> -10.44 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 232.2 N/mm²  
ε<sub>s</sub> 1.161 ‰  
d 63.2 cm  
x 25.45 x/d 0.4027  
δ 0.9434

Verifica

N° iterazioni: 4

Precompresso

Figura 9.11: Tensioni in combinazione RARA, sezione agli incastri.

Le tensioni nel calcestruzzo sono inferiori al limite  $0,60 f_{ck} = 27,0 \text{ MPa}$ .

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

La tensione massima di trazione nell'armatura lenta è inferiore al limite

$$0,80 f_{yk} = 0,8 \times 450 \text{ MPa} = 360 \text{ MPa.}$$

Le verifiche risultano pertanto soddisfatte.

### 9.1.9 Tensioni in combinazione quasi permanente

Il momento in mezzzeria in fase II per la combinazione quasi-permanente vale

$$M_{Ed,II-qp} = 14 \text{ kNm}$$

Questo momento comporta un valore di sollecitazioni normali così riassunte:

Tabella 9.12: Tensioni in mezzzeria in combinazione quasi permanente (fase I + fase II).

| Tensione         | Fase I     | Fase II   | Fase I + Fase II |
|------------------|------------|-----------|------------------|
| $\sigma_{c,int}$ | -6,60 MPa  | -0,07 MPa | -6,67 MPa        |
| $\sigma_{c,est}$ | -19,49 MPa | -0,49 MPa | -19,98 MPa       |

Le tensioni nel calcestruzzo sono inferiori al limite  $0,45 f_{ck} = 20,25 \text{ MPa}$ .

Le verifiche risultano pertanto soddisfatte.

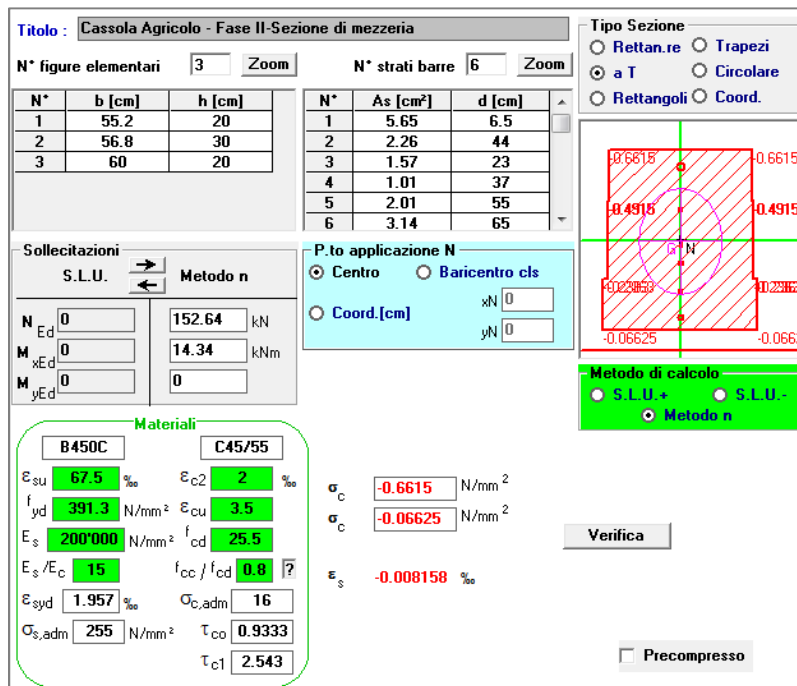


Figura 9.12: Sollecitazioni in combinazione quasi permanente, sezione di mezzzeria.

All'appoggio il momento sollecitante massimo (valutato in configurazione finale) vale

$$M_{Ed} = -183 \text{ kNm.}$$

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br>Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014 |
|---|---|--|

**Titolo:** Cassola Agricolo - Configurazione finale - Appoggio

N° figure elementari: 3 Zoom N° strati barre: 6 Zoom

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1  | 55.2   | 20     | 1  | 31.67    | 6.8    |
| 2  | 56.8   | 30     | 2  | 9.42     | 43.6   |
| 3  | 60     | 20     | 3  | 0        | 23     |
|    |        |        | 4  | 0        | 32     |
|    |        |        | 5  | 0        | 55     |
|    |        |        | 6  | 0        | 65     |

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

N<sub>Ed</sub> 0 289 kN  
M<sub>xEd</sub> 0 -183 kNm  
M<sub>yEd</sub> 0 0

**P.to applicazione N:** Centro Baricentro cls Coord.[cm]  
xN 0 yN 0

**Materiali:** B450C C45/55

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> 25.5 N/mm²  
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> 16 N/mm²  
σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm² τ<sub>co</sub> 0.9333  
τ<sub>cl</sub> 2.543

σ<sub>c</sub> -5.056 N/mm²  
σ<sub>s</sub> 69.67 N/mm²  
ε<sub>s</sub> 0.3483 ‰  
d 63.2 cm  
x 32.94 x/d 0.5212  
δ 1

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

**Verifica:** N° iterazioni: 4

☐ Precompresso

Figura 9.13: Tensioni in combinazione quasi permanente, sezione agli incastri.

Le tensioni nel calcestruzzo sono inferiori al limite  $0,45 f_{ck} = 20,25$  MPa.

Le verifiche risultano pertanto soddisfatte.

### 9.1.10 Verifiche allo stato limite di fessurazione

In accordo a quanto indicato al §4.1.2.2.4 e nella circolare al § 4.1.2.2.4.6, per il caso in esame si hanno armature sensibili per la mezzeria e armature poco sensibili agli appoggi. Le condizioni ambientali sono molto aggressive (classe di esposizione di riferimento XF4).

Per la sezione di mezzeria, la verifica per lo stato limite di fessurazione sarà soddisfatta qualora sotto la combinazione di carico frequente la sezione risulti interamente compressa.

Il massimo momento in mezzeria in fase II si ha per la combinazione FR04 e vale

$$M_{Ed,II-fr} = 119 \text{ kNm}$$

Tabella 9.13: Tensioni in mezzeria all'intradosso in combinazione frequente (fase I + fase II).

| Tensione         | Fase I    | Fase II  | Fase I + Fase II |
|------------------|-----------|----------|------------------|
| $\sigma_{c,int}$ | -6,60 MPa | 2,32 MPa | -4,28 MPa        |

Le verifiche risultano pertanto soddisfatte.

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

**Titolo:** Cassola Agricolo - Fase II-Sezione di mezzeria

N° figure elementari: 3 Zoom N° strati barre: 6 Zoom

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1  | 55.2   | 20     | 1  | 5.65     | 6.5    |
| 2  | 56.8   | 30     | 2  | 2.26     | 44     |
| 3  | 60     | 20     | 3  | 1.57     | 23     |
|    |        |        | 4  | 1.01     | 37     |
|    |        |        | 5  | 2.01     | 55     |
|    |        |        | 6  | 3.14     | 65     |

**Sollecitazioni**  
 S.L.U. Metodo n  
 N<sub>Ed</sub> 0 kN  
 M<sub>Ed</sub> 0 119 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

**P.to applicazione N**  
☒ Centro ☐ Baricentro cls  
☐ Coord.[cm] xN 0 yN 0

**Materiali**  
 B450C C45/55  
 $\epsilon_{su}$  67.5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391.3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3.5 ‰  
 $E_s$  200'000 N/mm²  $f_{cd}$  25.5 N/mm²  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0.8  
 $\epsilon_{syd}$  1.957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  16 N/mm²  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0.9333  $\tau_{c1}$  2.543

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

$\sigma_c$  -2.381 N/mm²  
 $\sigma_s$  2.317 N/mm²  
 $\epsilon_s$  0.1486 ‰

Verifica

☐ Precompresso

Figura 9.14: Sollecitazioni in combinazione frequente, sezione di mezzeria.

All'appoggio il massimo momento sollecitante (valutato in configurazione finale) si ha per la combinazione FR04 e vale

$$M_{Ed} = -294 \text{ kNm.}$$

Con uno sforzo normale pari a

$$N_{Ed} = 133 \text{ kN}$$

**Titolo:** Cassola Agricolo - Configurazione finale - Appoggio

N° figure elementari: 3 Zoom N° strati barre: 6 Zoom

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1  | 55.2   | 20     | 1  | 31.67    | 6.8    |
| 2  | 56.8   | 30     | 2  | 9.42     | 43.6   |
| 3  | 60     | 20     | 3  | 0        | 23     |
|    |        |        | 4  | 0        | 32     |
|    |        |        | 5  | 0        | 55     |
|    |        |        | 6  | 0        | 65     |

**Sollecitazioni**  
 S.L.U. Metodo n  
 N<sub>Ed</sub> 0 133 kN  
 M<sub>Ed</sub> 0 -294 kNm  
 M<sub>yEd</sub> 0 0

**P.to applicazione N**  
☒ Centro ☐ Baricentro cls  
☐ Coord.[cm] xN 0 yN 0

**Materiali**  
 B450C C45/55  
 $\epsilon_{su}$  67.5 ‰  $\epsilon_{c2}$  2 ‰  
 $f_{yd}$  391.3 N/mm²  $\epsilon_{cu}$  3.5 ‰  
 $E_s$  200'000 N/mm²  $f_{cd}$  25.5 N/mm²  
 $E_s/E_c$  15  $f_{cc}/f_{cd}$  0.8  
 $\epsilon_{syd}$  1.957 ‰  $\sigma_{c,adm}$  16 N/mm²  
 $\sigma_{s,adm}$  255 N/mm²  $\tau_{co}$  0.9333  $\tau_{c1}$  2.543

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

$\sigma_c$  -7.541 N/mm²  
 $\sigma_s$  151.3 N/mm²  
 $\epsilon_s$  0.7563 ‰  
 d 63.2 cm  
 x 27.04 x/d 0.4279  
 $\delta$  0.9748

Verifica

N° iterazioni: 4

☐ Precompresso

Figura 9.15: Tensioni in combinazione frequente, sezione agli incastri.



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

Il diametro massimo delle barre è pari a 24mm. Le tensioni nelle barre di acciaio sono inferiori al limite di 160 MPa.

Le verifiche risultano pertanto soddisfatte.

### 9.1.11 Verifiche allo stato limite di deformazione

In riferimento al §5.1.4.5 NTC2008, occorre verificare che l'assetto della struttura risulti compatibile con la geometria della struttura stessa in relazione alle esigenze del traffico.

Come riportato nella figura riportata al paragrafo 8.3, il massimo abbassamento verticale della mezzeria si ha per la combinazione RARA36 e vale 12,7mm, mentre il minimo abbassamento verticale vale 3,2mm (agli appoggi).

La massima freccia  $\delta$  vale quindi

$$\delta = 12,7\text{mm} - 3,2\text{mm} = 9,5\text{mm} = \frac{13500\text{mm}}{1421} = \frac{l}{1421}$$

Tale deflessione (inferiore a un millesimo della luce in combinazione rara) non reca disturbo al transito dei carichi mobili.

La verifica risulta pertanto soddisfatta.

## 9.2 Spalle e muri d'ala

### 9.2.1 Riepilogo armatura

Le tabelle seguenti riassumono la disposizione dell'armatura nelle spalle e nei muri d'ala.

Tabella 9.14: Riepilogo armatura spalle e muri d'ala.

| Sezione  | h<br>[cm] | b<br>[cm] | c<br>[cm] | c'<br>[cm] | A <sub>s</sub><br>[cm <sup>2</sup> ] | A' <sub>s</sub><br>[cm <sup>2</sup> ] | M <sup>+</sup> <sub>Rd</sub><br>[kNm] | M <sup>-</sup> <sub>Rd</sub><br>[kNm] |
|--|-----------|-----------|-----------|------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Nodo spalla- impalcato<br/>(armatura verticale)</b>     | 105       | 100       | 7,5       | 7,5        | 10ø24<br>[45,2]                      | 10ø24<br>[45,2]                       | 1662                                  | -1662                                 |
| <b>Spalla<br/>(armatura verticale)</b>                     | 140       | 100       | 7,5       | 7,5        | 5ø20<br>[15,7]                       | 5ø20<br>[15,7]                        | 822                                   | -822                                  |
| <b>Nodo spalla- zattera<br/>(armatura verticale)</b>       | 140       | 100       | 7,5       | 7,5        | 5ø24<br>[22,6]                       | 5ø24<br>[22,6]                        | 1168                                  | -1168                                 |
| <b>Spalla<br/>(armatura orizzontale)</b>                   | 140       | 100       | 5         | 5          | 5ø20<br>[15,7]                       | 5ø20<br>[15,7]                        | 824                                   | -824                                  |
| <b>Nodo Spalla - muro d'ala<br/>(armatura orizzontale)</b> | 140       | 100       | 5         | 5          | 5ø24<br>[22,6]                       | 10ø24<br>[45,2]                       | 1179                                  | -2332                                 |
| <b>Muro d'ala<br/>(armatura orizzontale)</b>               | 120       | 100       | 5         | 5          | 5ø24<br>[15,7]                       | 5ø24<br>[31,4]                        | 1104                                  | -1104                                 |
| <b>Nodo Muro d'ala - Spalla<br/>(armatura orizzontale)</b> | 120       | 100       | 5         | 5          | 5ø24<br>[22,6]                       | 10ø24<br>[45,2]                       | 1003                                  | -1978                                 |
| <b>Muro d'ala<br/>(armatura verticale)</b>                 | 120       | 100       | 7,5       | 7,5        | 5ø20<br>[15,7]                       | 5ø20<br>[15,7]                        | 702                                   | -702                                  |

Il significato dei simboli della tabella precedente è riportato di seguito:

**h** altezza utile della sezione di calcestruzzo;

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

**b** larghezza della sezione di calcestruzzo. In generale si considerano i calcoli su un metro di larghezza;

**c** copriferro armatura lato esterno;

**c'** copriferro armatura lato terreno;

**A<sub>s</sub>** quantità di armatura lato esterno;

**A'<sub>s</sub>** quantità di armatura lato terreno;

**M<sup>+</sup><sub>Rd</sub>** Momento resistente positivo (fibre tese lato esterno);

**M<sup>-</sup><sub>Rd</sub>** momento resistente negativo (fibre tese lato terreno).

## 9.2.2 Verifica a momento flettente (SLU e SLV)

### 9.2.2.1 Spalle - Armatura verticale

Le figure seguenti mostrano gli involuppi delle sollecitazioni allo stato limite ultimo e allo stato limite di salvaguardia della vita sulle spalle per i momenti che tendono le armature disposte verticalmente. Di volta in volta verranno evidenziate rispettivamente in blu e in rosso le zone in cui l'armatura positiva e negativa non sono sufficienti a soddisfare le verifiche. Le zone chiare sono invece le zone per cui le verifiche sono soddisfatte.

Nella figura seguente le zone in blu sono quelle per cui il massimo momento sollecitante positivo è superiore a 822 kNm.

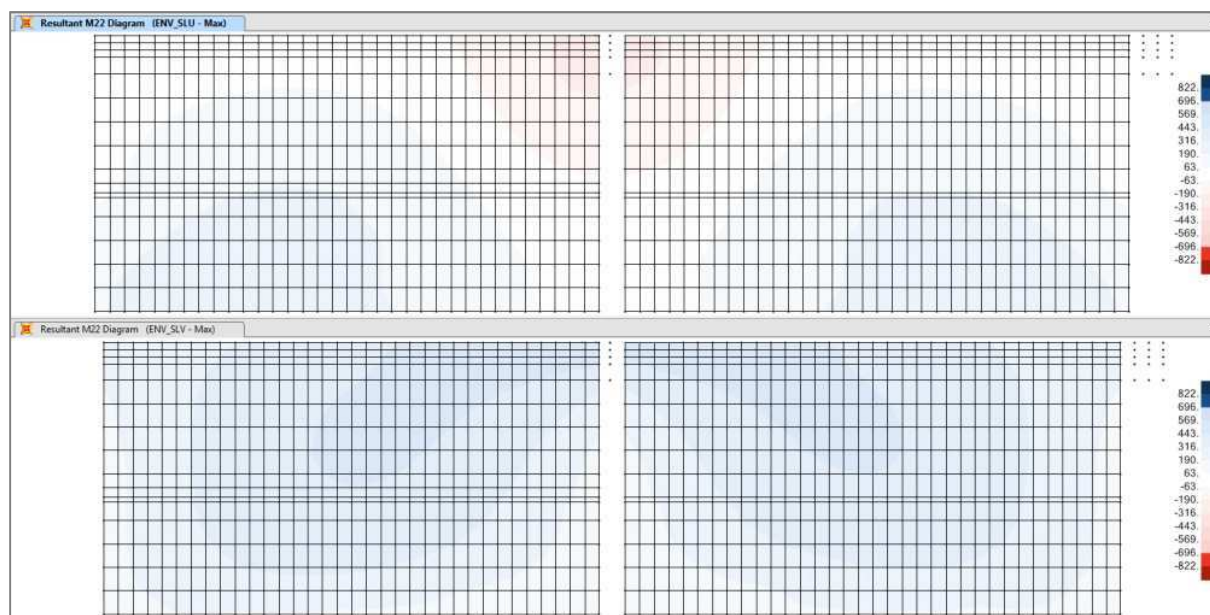


Figura 9.16: Involuppi momenti verticali positivi (inflexione lato esterno) SLU e SLV sulle spalle.

L'armatura verticale a momento positivo è sufficiente a soddisfare le verifiche

Nelle tre figure seguenti le zone in rosso sono quelle per cui il massimo momento sollecitante negativo è superiore rispettivamente a -822 kNm (per la parte centrale della spalla), -1168kNm (per il nodo spalla-zattera) e -1662kNm (per il nodo spalla-impalcato).

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

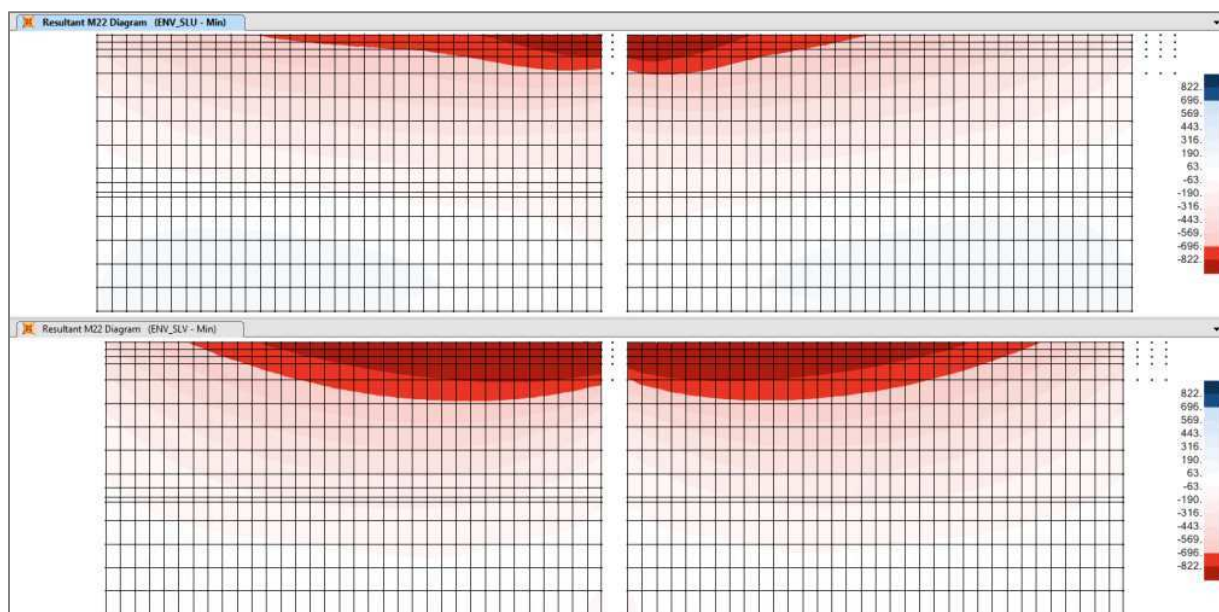


Figura 9.17: Involuppi momenti verticali negativi (inflessione lato esterno) SLU e SLV sulle spalle (1/3)

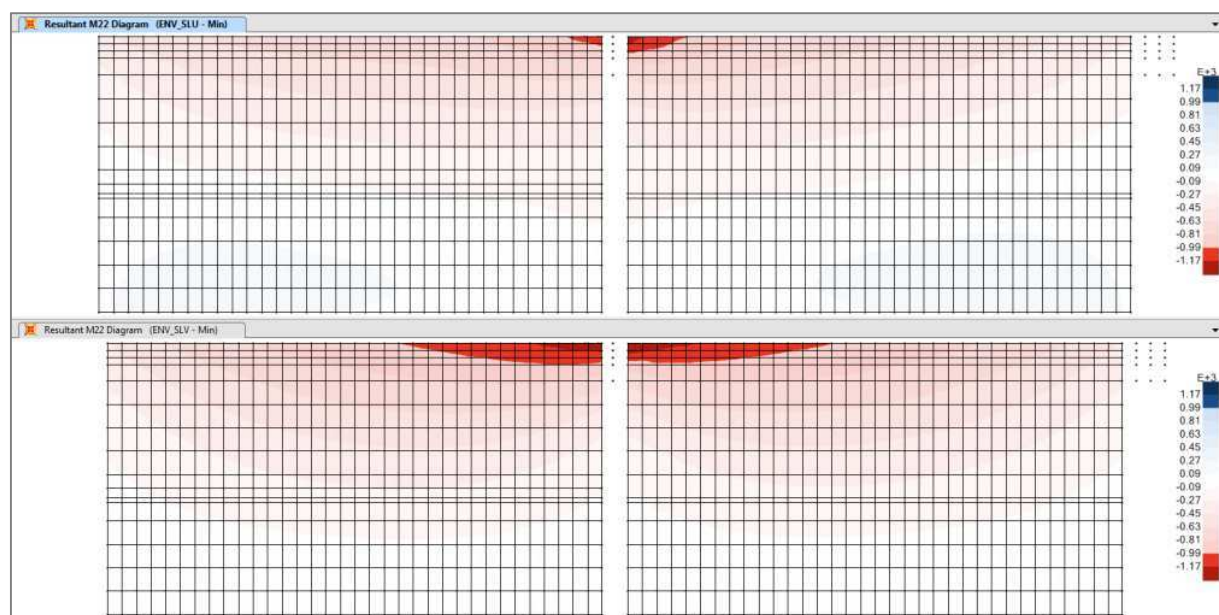


Figura 9.18: Involuppi momenti verticali negativi (inflessione lato esterno) SLU e SLV sulle spalle (2/3)

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014                            |

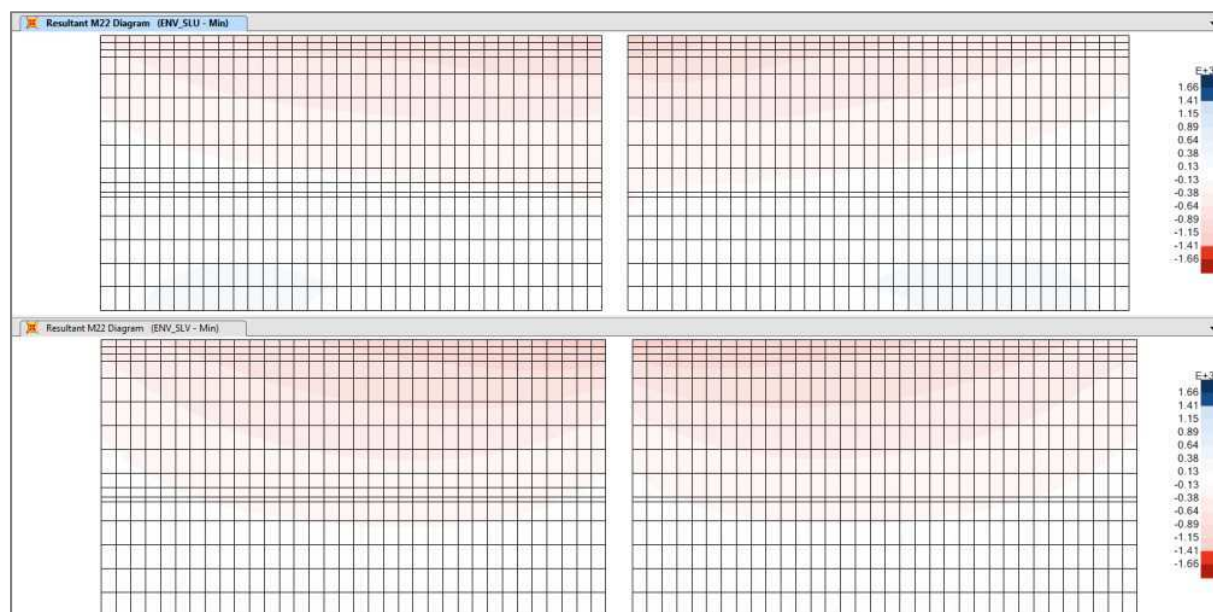


Figura 9.19: Involuppi momenti verticali negativi (inflexione lato esterno) SLU e SLV sulle spalle (3/3)

L'armatura verticale a momento negativo è sufficiente a soddisfare le verifiche

### 9.2.2.2 Spalle - Armatura orizzontale

Le figure seguenti mostrano gli involuppi delle sollecitazioni allo stato limite ultimo e allo stato limite di salvaguardia della vita sulle spalle per i momenti che tendono le armature disposte orizzontalmente. Di volta in volta verranno evidenziate rispettivamente in blu e in rosso le zone in cui l'armatura positiva e negativa non sono sufficienti a soddisfare le verifiche. Le zone chiare sono invece le zone per cui le verifiche sono soddisfatte.

Nella figura seguente le zone in blu sono quelle per cui il massimo momento sollecitante positivo è superiore a 824 kNm.

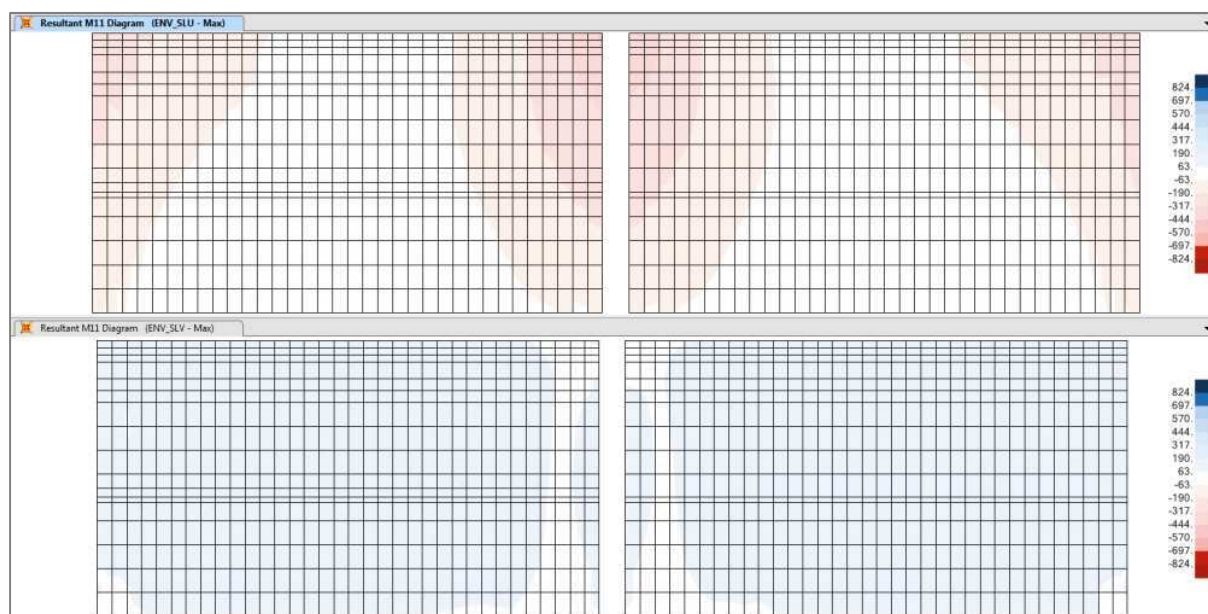


Figura 9.20: Involuppi momenti orizzontali positivi (inflexione lato esterno) SLU e SLV sulle spalle.



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

L'armatura orizzontale a momento positivo è sufficiente a soddisfare le verifiche

Nelle due figure seguenti le zone in rosso sono quelle per cui il massimo momento sollecitante negativo è superiore rispettivamente a -824 kNm (per la parte corrente della spalla) e -2332 kNm (per il nodo spalla-muro d'ala).

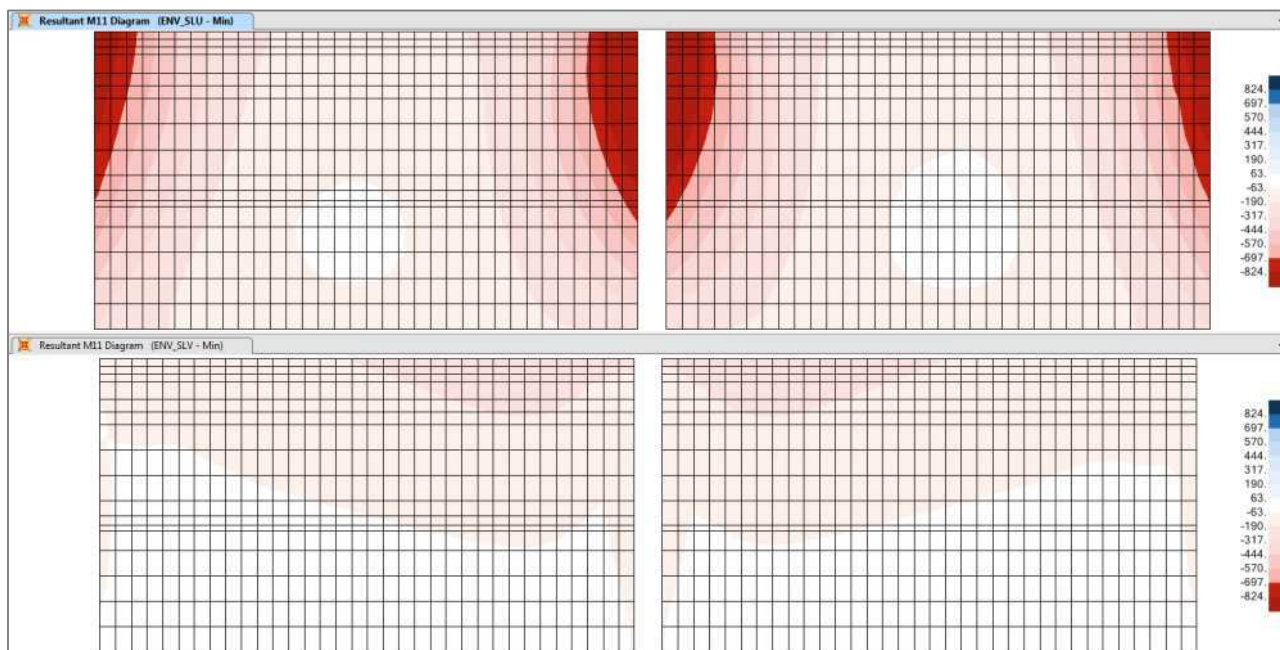


Figura 9.21: Involuppi momenti orizzontali negativi (inflessione lato esterno) SLU e SLV sulle spalle (1/2)

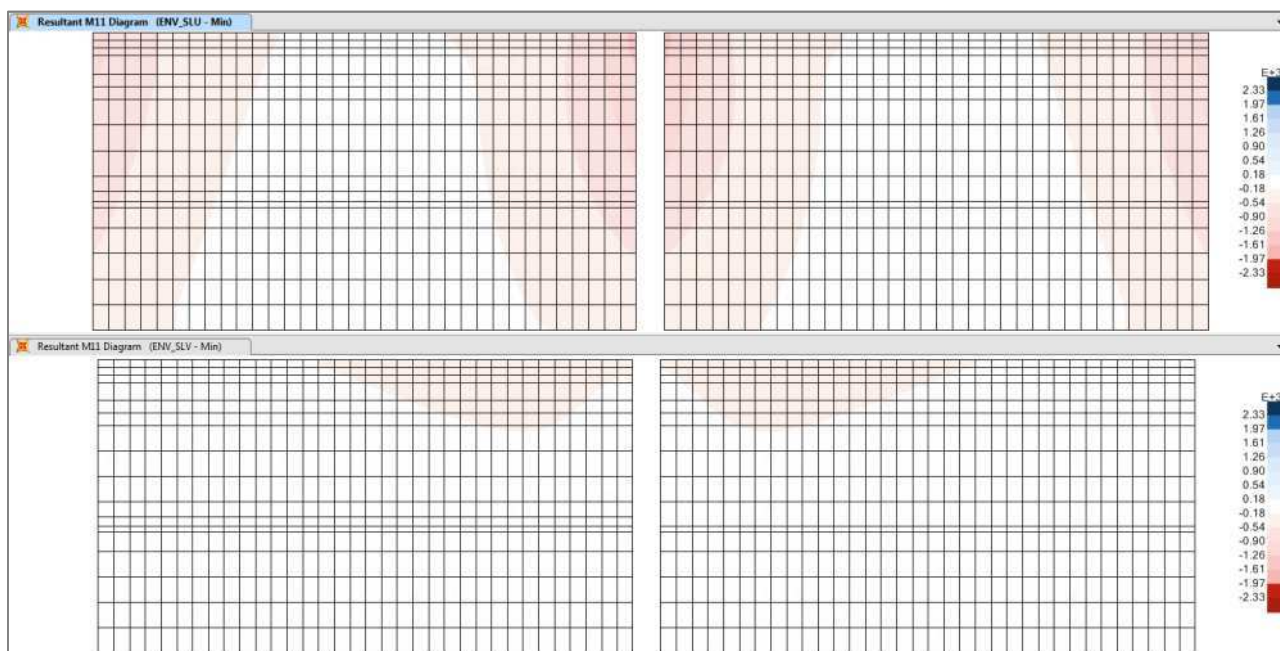


Figura 9.22: Involuppi momenti orizzontali negativi (inflessione lato esterno) SLU e SLV sulle spalle (2/2)

L'armatura orizzontale a momento negativo è sufficiente a soddisfare le verifiche

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

### 9.2.2.3 Muri d'ala - Armatura verticale

Le figure seguenti mostrano gli involuppi delle sollecitazioni allo stato limite ultimo e allo stato limite di salvaguardia della vita sui muri d'ala per i momenti che tendono le armature disposte verticalmente. Di volta in volta verranno evidenziate rispettivamente in blu e in rosso le zone in cui l'armatura positiva e negativa non sono sufficienti a soddisfare le verifiche. Le zone chiare sono invece le zone per cui le verifiche sono soddisfatte.

Nella figura seguente le zone in blu sono quelle per cui il massimo momento sollecitante positivo è superiore a 702 kNm.

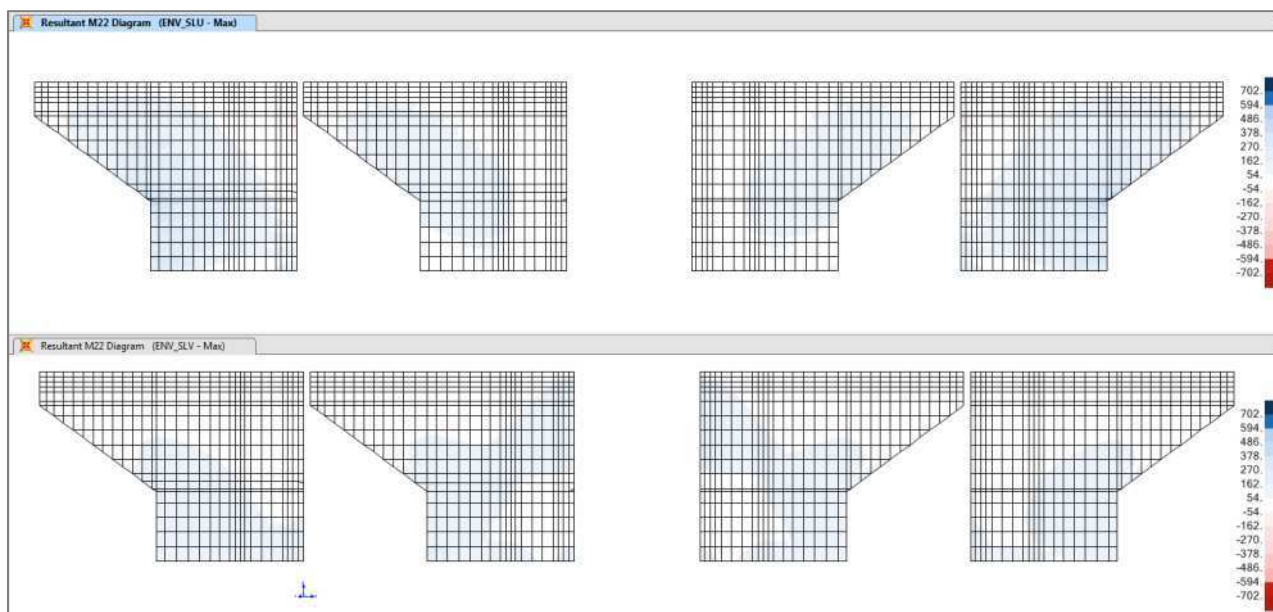


Figura 9.23: Involuppi momenti verticali positivi (inflexione lato esterno) SLU e SLV sui muri d'ala

L'armatura verticale a momento positivo è sufficiente a soddisfare le verifiche

Nella figura seguente le zone in rosso sono quelle per cui il massimo momento sollecitante negativo è superiore a -702 kNm.

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

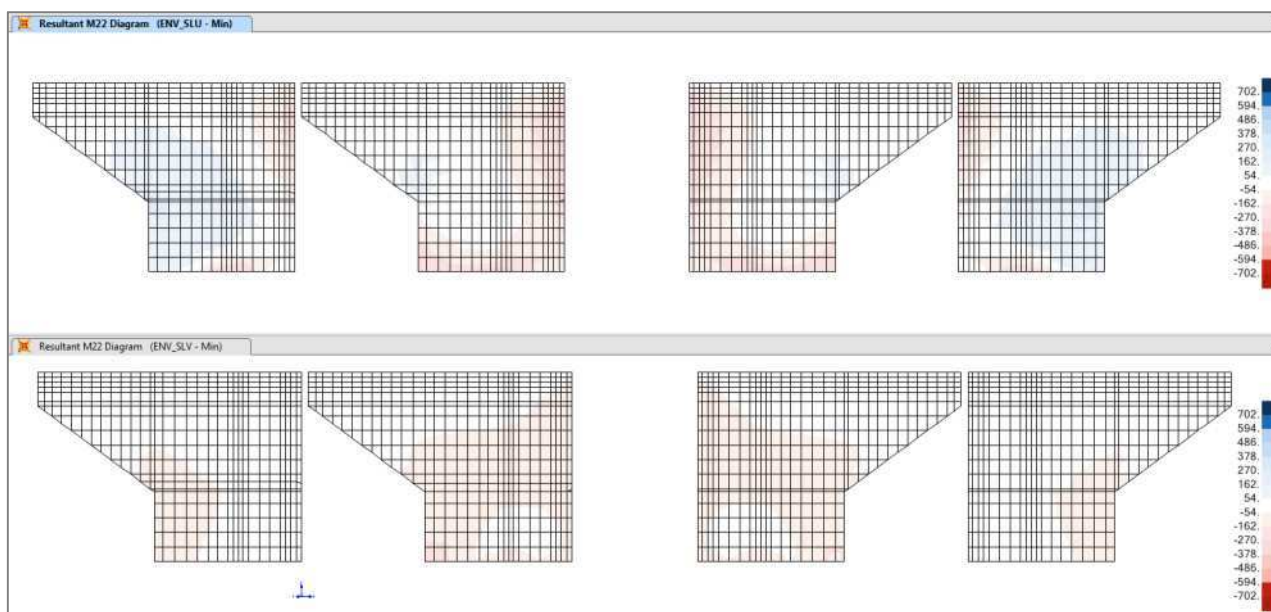


Figura 9.24: Involuppi momenti verticali negativi (inflessione lato esterno) SLU e SLV sui muri d'ala

L'armatura verticale a momento negativo è sufficiente a soddisfare le verifiche



|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

### 9.2.2.4 Muri d'ala - Armatura orizzontale

Le figure seguenti mostrano gli involuppi delle sollecitazioni allo stato limite ultimo e allo stato limite di salvaguardia della vita sui muri d'ala per i momenti che tendono le armature disposte orizzontalmente. Di volta in volta verranno evidenziate rispettivamente in blu e in rosso le zone in cui l'armatura positiva e negativa non sono sufficienti a soddisfare le verifiche. Le zone chiare sono invece le zone per cui le verifiche sono soddisfatte.

Nella figura seguente le zone in blu sono quelle per cui il massimo momento sollecitante positivo è superiore a 1104 kNm.

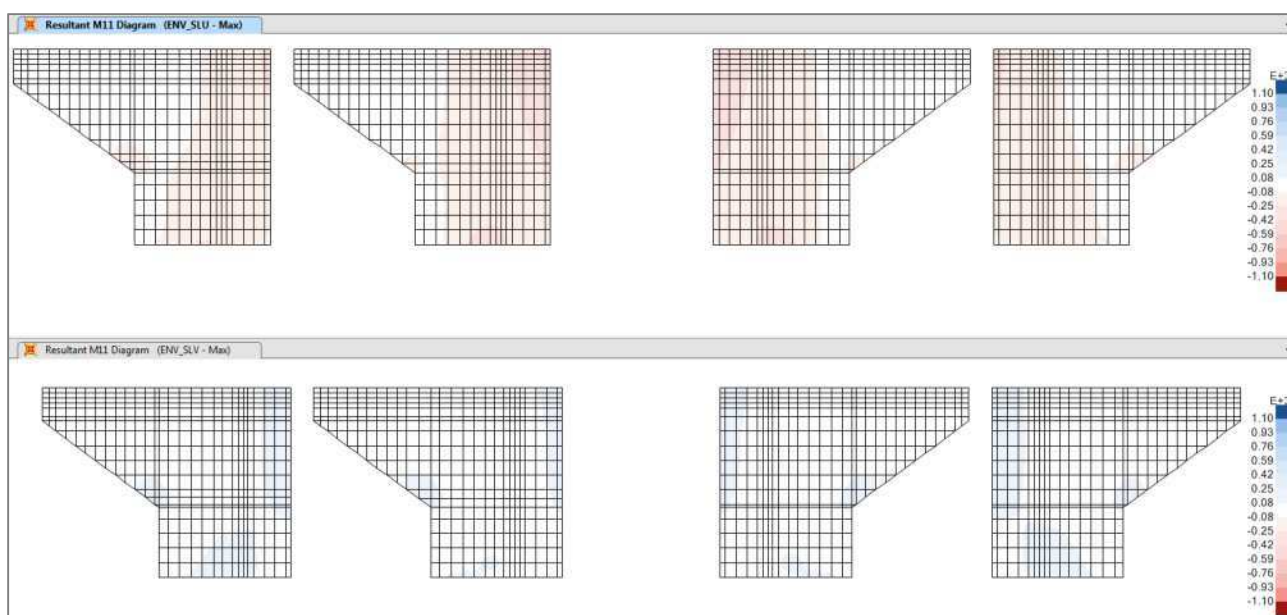


Figura 9.25: Involuppi momenti orizzontali positivi (inflexione lato esterno) SLU e SLV sui muri d'ala.

L'armatura orizzontale a momento positivo è sufficiente a soddisfare le verifiche

Nelle due figure seguenti le zone in rosso sono quelle per cui il massimo momento sollecitante negativo è superiore rispettivamente a -1104 kNm (per la parte corrente del muro d'ala) e -1978 kNm (per il nodo spalla-muro d'ala).

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

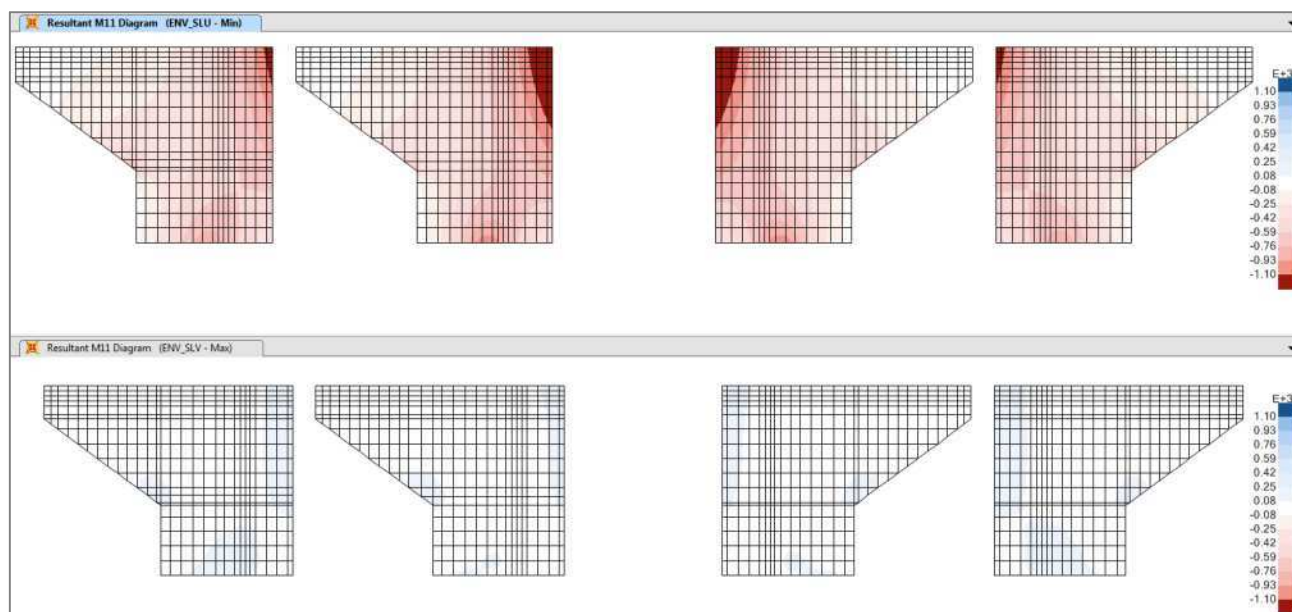


Figura 9.26: Involuppi momenti orizzontali negativi (inflexione lato esterno) SLU e SLV sui muri d'ala (1/2)

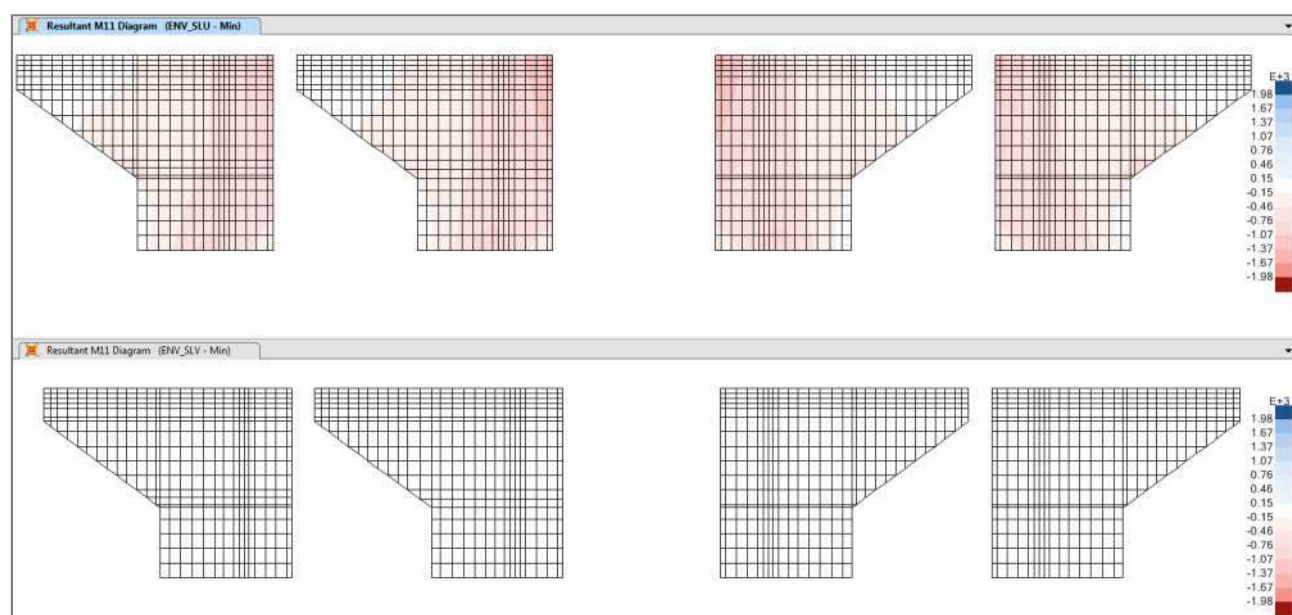


Figura 9.27: Involuppi momenti orizzontali negativi (inflexione lato esterno) SLU e SLV sui muri d'ala (2/2)

L'armatura orizzontale a momento negativo è sufficiente a soddisfare le verifiche

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

## 9.2.3 Verifica a taglio (SLU e SLV)

### 9.2.3.1 Spalle - Armatura verticale

La spalla viene armata a taglio con staffe  $\varnothing 12/40 \times 40$ . Il taglio resistente nella sezione più sfavorevole (ovvero il nodo spalla-impalcato) vale

$$V_{Rd} = 606 \text{ kN}$$

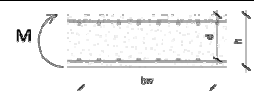
| Verifica a taglio secondo NTC2008  |   |  |                           |
|--|---|--|---------------------------|
| Geometria della sezione considerata  |   |  |                           |
|                 | Larghezza della sezione   | $b_w =$  | 100 cm                    |
|  | Altezza della sezione   | $h =$  | 105 cm                    |
|  | Copri ferro (asse dell'armatura tesa)                                   | $c =$  | 7.5 cm                    |
|  | Numero di barre d'acciaio tese a flessione M sulla larghezza $b_w$      |  | 10                        |
|  | Diametro delle barre d'acciaio tese a flessione M sulla larghezza $b_w$ |  | 24                        |
|  | Sezione d'acciaio tesa a flessione M sulla larghezza $b_w$              | $A_s =$  | 45.24 cm <sup>2</sup>     |
| Caratteristiche dei materiali impiegati [calcestruzzo e acciaio]                                 |   |  |                           |
| Classe di resistenza del calcestruzzo $\square$  |   |  |                           |
|  |   | $C_{32/40}$  |                           |
|  |   | $R_{ck} =$   | 40.00 MPa                 |
|  |   | $f_{ck} =$   | 32.00 MPa                 |
|  |   | $f_{ctd} =$  | 18.13 MPa                 |
|  |   | $f_{yk} =$   | 450.00 MPa                |
|  |   | $f_{ytd} =$  | 391.30 MPa                |
| Resistenza ultima a taglio senza armature trasversali $V_{Rd}$                                   |   |  |                           |
|  |   | Altezza utile $d = (h - c) \square$  | $d =$ 97.50 mm            |
|  |   | $k = 1 + (200/d)^{1/5} \leq 2.0$ con $d$ in mm $\square$                           | $k =$ 1.4529 -            |
|  |   | $\rho = A_{st}/(b_w d) \leq 0.02 \square$  | $\rho =$ 0.0046 -         |
|  |   | Assiale agente per la combinazione di carico considerata ( $N > 0$ = compressione) | $N_{Ed} =$ 0.0 kN         |
|  |   | $\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c = N_{Ed}/(b_w h) < 0.2 f_{ctd} \square$                  | $\sigma_{cp} =$ 0.000 MPa |
|  |   | $C_{Rd,c} = 0.18 / \gamma_c =$   | 0.12 -                    |
|  |   | $k_1 =$  | 0.15 -                    |
|  |   | $v_{min} = 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} \leq$  | 0.347 -                   |
|  |   | $V_{Rd,c2} = (V_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d =$                                  | 338.07 kN                 |
|  |   | $V_{Rd,c1} = [C_{Rd,c} k (100 \rho f_{ck})^{1/2} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d =$       | 417.81 kN                 |
|  |   | $V_{Rd} = \text{MAX}(V_{Rd,c1}; V_{Rd,c2}) =$                                      | 417.8 kN                  |
| Resistenza ultima della sezione con armature trasversali   |   |  |                           |
| numero di bracci nella larghezza $b_w$   |   | $n =$  | 2.5                       |
| diametro $\varnothing$   |   | $\varnothing =$  | 12 mm                     |
| interasse s tra due armature trasversali consecutive $\rightarrow$                               |   | $s =$  | 40 cm                     |
| Area dell'armatura trasversale $\square$   |   | $A_{st} =$   | 2.83 cm <sup>2</sup>      |
| Inclinazione delle barre d'armatura trasversale $\square$  |   | $\alpha =$   | 90 °                      |
| Inclinazione dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della sezione $\square$               |   | $\cot(\theta)_{calc} =$  | 5.64                      |
| 1.000 $\leq \cot(\theta) \leq$   |   |  | 2.500                     |
| Inclinazione dei puntoni di calcestruzzo di calcolo $\square$                                    |   | $\cot(\theta)_{eff} =$   | 2.50                      |
|  |   | $\theta_{eff} =$   | 21.8 °                    |
| $v = 0.6 \times (1 - f_{ck}/250) \leq$   |   |  | 0.50                      |
| $\alpha_c =$   |   |  | 1.00                      |
| Resistenza lato acciaio $V_{Rd,s} = (A_{st}/s) \times z f_{yk} \cot \theta =$                    |   | $V_{Rd,s} =$   | 606.78 kN                 |
| Resistenza lato calcestruzzo $V_{Rd,c} = \alpha_c b_w z v f_{ctd} (\cot \theta + \tan \theta) =$ |   | $V_{Rd,c} =$   | 2743.45 kN                |
| Resistenza al taglio $V_{Rd} = \text{MIN}(V_{Rd,s}; V_{Rd,c}) =$                                 |   |  | 606.8 kN                  |

Figura 9.28: Resistenza a taglio – nodo spalla-impalcato.

Le figure seguenti mostrano gli involuipi delle sollecitazioni di taglio sulle spalle per le armature verticali allo stato limite ultimo e allo stato limite di salvaguardia della vita. Le zone in rosso e in blu sono quelle per cui il massimo taglio è superiore a 606 kN.

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

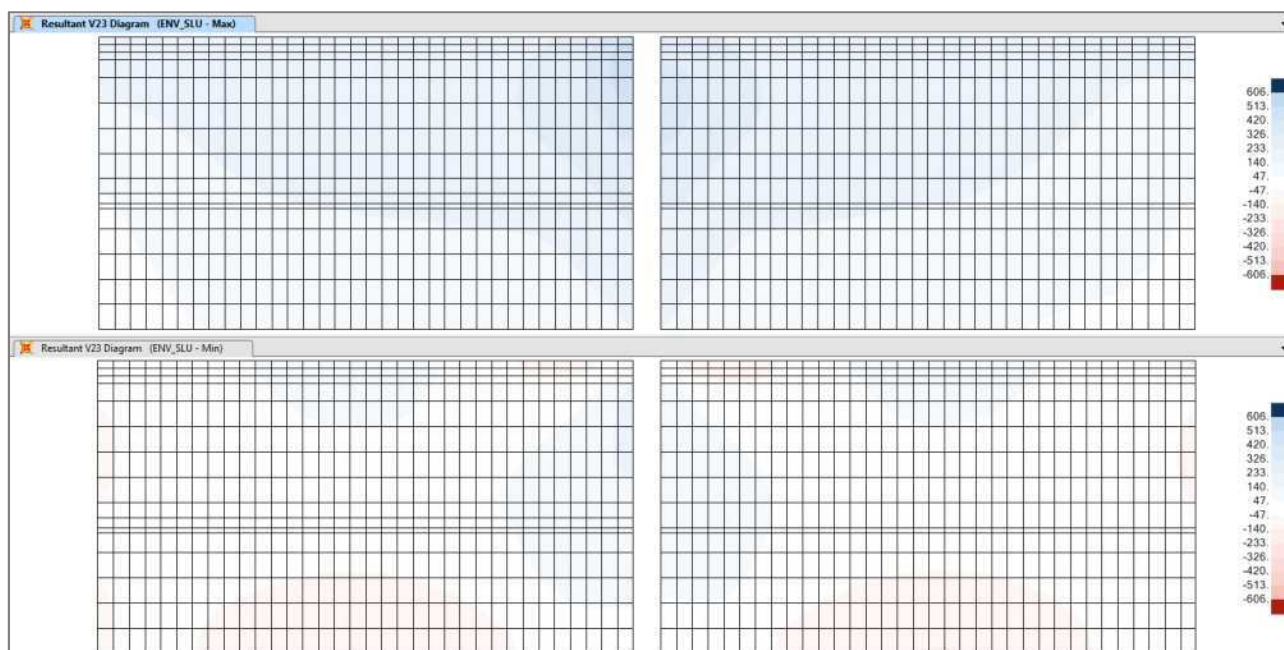


Figura 9.29: Inviluppi sollecitazioni SLU sulle spalle – taglio sulle armature verticali.

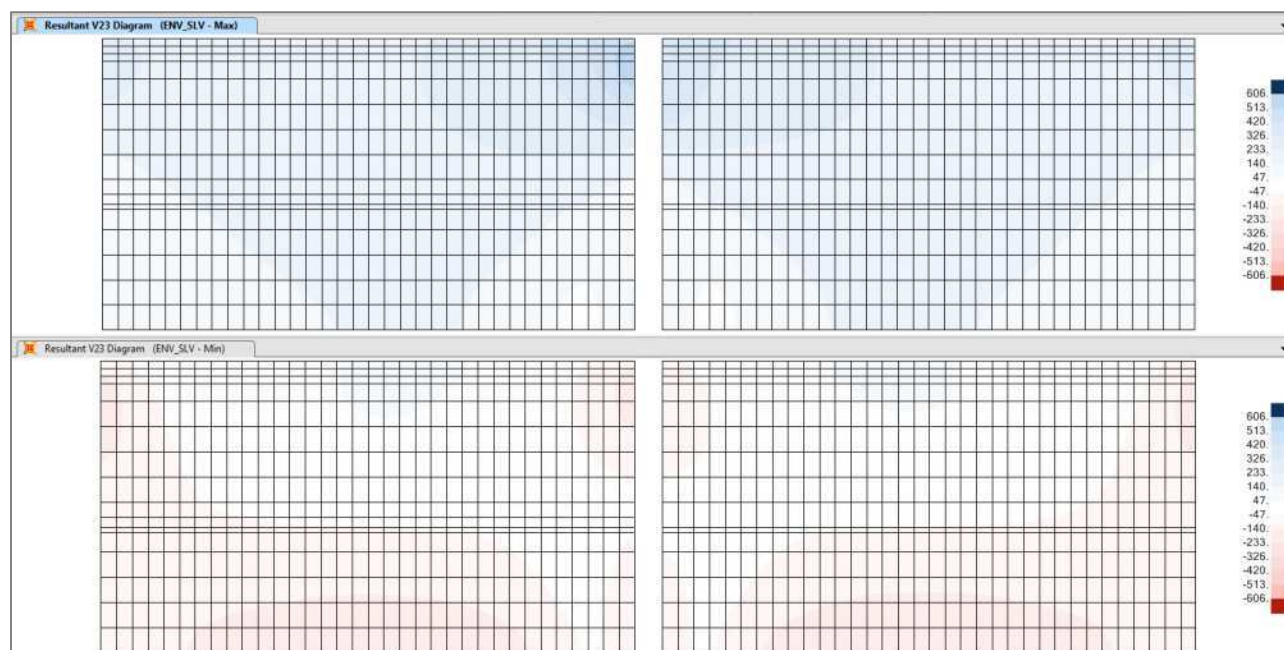


Figura 9.30: Inviluppi sollecitazioni SLV sulle spalle – taglio sulle armature verticali.

Come mostrano le figure precedenti, in nessuna zona i tagli sollecitanti superano il minimo taglio resistente per l'armatura verticale.

Le verifiche sono ovunque soddisfatte.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

### 9.2.3.2 Spalle - Armatura orizzontale

La spalla viene armata a taglio con staffe  $\varnothing 12/40 \times 40$ . Il taglio resistente vale

$$V_{Rd} = 840 \text{ kN}$$

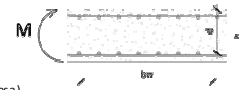
| Verifica a taglio secondo NTC2008   |   |                           |                       |
|---|---|---------------------------|-----------------------|
| Geometria della sezione considerata   |   |                           |                       |
|                                    | Larghezza della sezione   | $b_w =$                   | 100 cm                |
|   | Altezza della sezione   | $h =$                     | 140 cm                |
|   | Copriferro (asse dell'armatura tesa)                                    | $c =$                     | 5 cm                  |
|   | Numero di barre d'acciaio tese a flessione M sulla larghezza $b_w$      |                           | 5                     |
|   | Diametro delle barre d'acciaio tese a flessione M sulla larghezza $b_w$ |                           | 16                    |
| Sezione d'acciaio tesa a flessione M sulla larghezza $b_w$  |   |                           |                       |
|   |   | $A_s =$                   | 10.05 cm <sup>2</sup> |
| Caratteristiche dei materiali impiegati [calcestruzzo e acciaio]  |   |                           |                       |
| Classe di resistenza del calcestruzzo $\square$   |   |                           |                       |
| C32/40  |   |                           |                       |
| $R_{ct} =$  |   |                           |                       |
| 40.00 MPa   |   |                           |                       |
| $f_{ctk} =$   |   |                           |                       |
| 32.00 MPa   |   |                           |                       |
| $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot x f_{ctk} / \gamma_c = 0,85 x f_{ctk} / 1,5 =$  |   |                           |                       |
| 18.13 MPa   |   |                           |                       |
| Acciaio $\square$   |   |                           |                       |
| $f_{yk} =$  |   |                           |                       |
| 450.00 MPa  |   |                           |                       |
| $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = f_{yk} / 1,15 =$  |   |                           |                       |
| 391.30 MPa  |   |                           |                       |
| Resistenza ultima a taglio senza armature trasversali $V_{Rd}$  |   |                           |                       |
| Altezza utile $d = (h - c) \square$   |   |                           |                       |
| $d =$   |   |                           |                       |
| 1350.00 mm  |   |                           |                       |
| $k = 1 + (200/d)^{0.5} \leq 2,0$ con $d$ in mm $\square$  |   |                           |                       |
| $k =$   |   |                           |                       |
| 1.3849 -  |   |                           |                       |
| $\rho_l = A_{sl} / (b_w d) \leq 0,02 \square$   |   |                           |                       |
| $\rho_l =$  |   |                           |                       |
| 0.0007 -  |   |                           |                       |
| Assiale agente per la combinazione di carico considerata ( $N > 0$ = compressione)                                  |   |                           |                       |
| $N_{Ed} =$  |   |                           |                       |
| 0.0 kN  |   |                           |                       |
| $\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c = N_{Ed} / (b_w h) < 0,2 f_{ctd} \square$   |   |                           |                       |
| $\sigma_{cp} =$   |   |                           |                       |
| 0.000 MPa   |   |                           |                       |
| $C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_c =$  |   |                           |                       |
| 0.12 -  |   |                           |                       |
| $k_1 =$   |   |                           |                       |
| 0.15 -  |   |                           |                       |
| $v_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ctk}^{1/2} =$   |   |                           |                       |
| 0.323 -   |   |                           |                       |
| $V_{Rd,c1} = (V_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d =$   |   |                           |                       |
| 435.62 kN   |   |                           |                       |
| $V_{Rd,c2} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ctk})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d =$                                     |   |                           |                       |
| 299.67 kN   |   |                           |                       |
| <b><math>V_{Rd} = \text{MAX}(V_{Rd,c1}; V_{Rd,c2}) =</math></b>   |   |                           |                       |
| <b>435.6 kN</b>   |   |                           |                       |
| Resistenza ultima della sezione con armature trasversali  |   |                           |                       |
| numero di bracci nella larghezza $b_w$  |   | di diametro $\varnothing$ |                       |
| 2.5   |   | 12 mm                     |                       |
| interasse s tra due armature trasversali consecutive $\rightarrow$  |   | $s =$                     | 40 cm                 |
| Area dell'armatura trasversale $\square$  |   | $A_{sw} =$                | 2.83 cm <sup>2</sup>  |
| Inclinazione delle barre d'armatura trasversale $\square$   |   |                           |                       |
| $\alpha =$  |   |                           |                       |
| 90 °  |   |                           |                       |
| Inclinazione dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della sezione $\square$                                  |   |                           |                       |
| $\cotg(\theta)_{cal} =$   |   |                           |                       |
| 5.64  |   |                           |                       |
| 1.000 $s \cotg(\theta) \leq$  |   |                           |                       |
| 2.500   |   |                           |                       |
| Inclinazione dei puntoni di calcestruzzo di calcolo $\square$   |   |                           |                       |
| $\cotg(\theta)_{eff} =$   |   |                           |                       |
| 2.50  |   |                           |                       |
| $\theta_{eff} =$  |   |                           |                       |
| 21.8 °  |   |                           |                       |
| $v = 0,6 \times (1 - f_{ctk} / 250) =$  |   |                           |                       |
| 0.50  |   |                           |                       |
| $\alpha_c =$  |   |                           |                       |
| 1.00  |   |                           |                       |
| Resistenza lato acciaio $V_{Rd,s} = (A_{sw} / s) \times z f_{yk} \cotg \theta =$                                    |   |                           |                       |
| $V_{Rd,s} =$  |   |                           |                       |
| 840.16 kN   |   |                           |                       |
| Resistenza lato calcestruzzo $V_{Rd,c} = \alpha_c \cdot b_w \cdot z \cdot f_{ctd} / (\cotg \theta + \tan \theta) =$ |   |                           |                       |
| $V_{Rd,c} =$  |   |                           |                       |
| 3798.62 kN  |   |                           |                       |
| <b>Resistenza al taglio <math>V_{Rd} = \text{MIN}(V_{Rd,s}; V_{Rd,c}) =</math></b>                                  |   |                           |                       |
| <b>840.2 kN</b>   |   |                           |                       |

Figura 9.31: Resistenza a taglio – nodo spalla-impalcato.

Le figure seguenti mostrano gli involuipi delle sollecitazioni di taglio sulle spalle per le armature orizzontali allo stato limite ultimo e allo stato limite di salvaguardia della vita. Le zone in rosso e in blu sono quelle per cui il massimo taglio è superiore a 840 kN.



|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

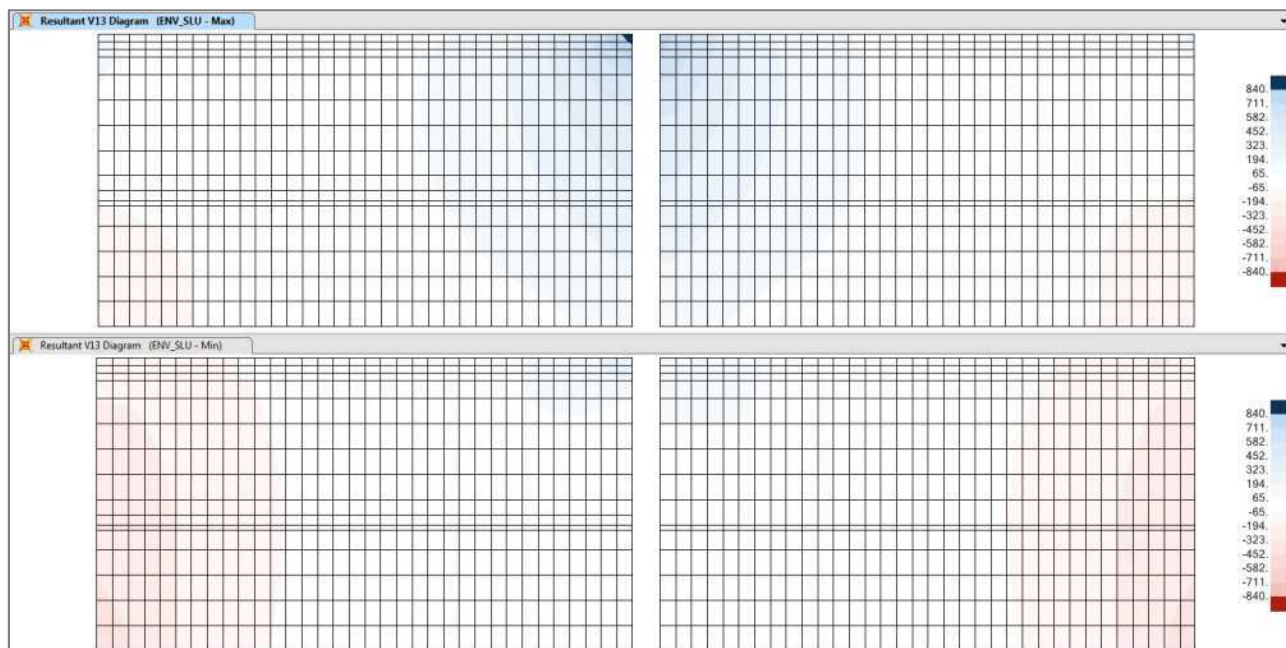


Figura 9.32: Involuppi sollecitazioni SLV sulle spalle – taglio sulle armature orizzontali.

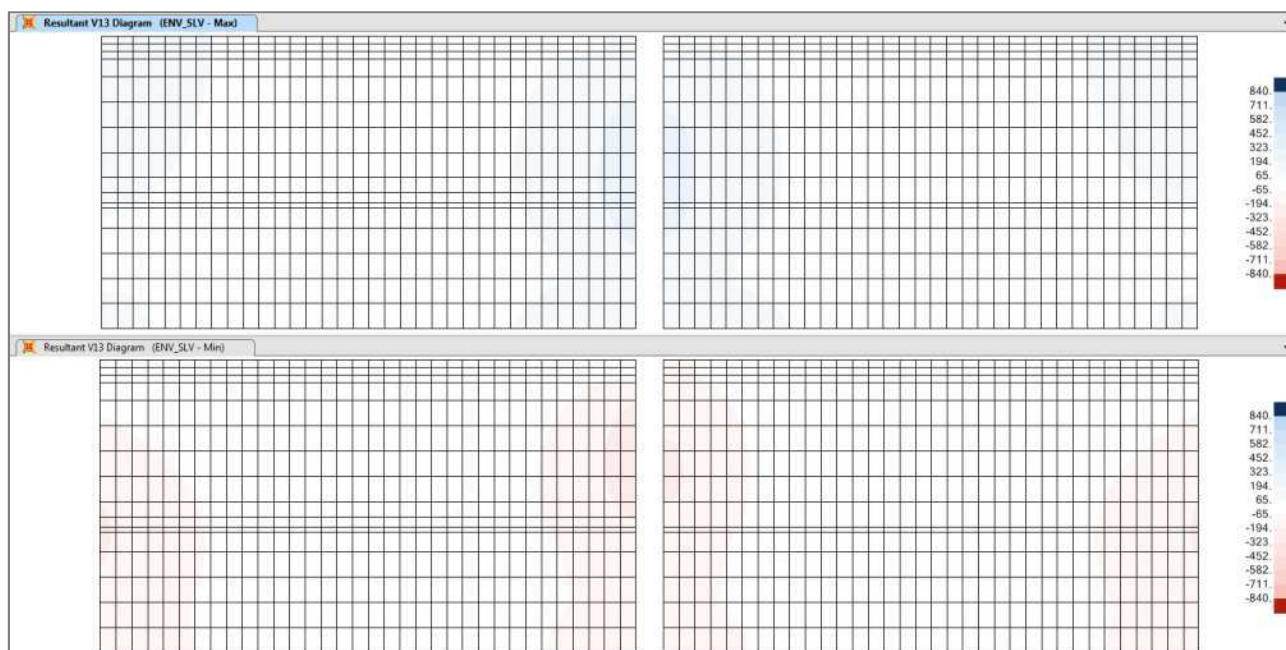


Figura 9.33: Involuppi sollecitazioni SLV sulle spalle – taglio sulle armature orizzontali.

Come mostrano le figure precedenti, a meno di concentrazioni puntuali di sforzi, in nessuna zona i tagli sollecitanti superano il minimo taglio resistente per l'armatura verticale.

Le verifiche sono ovunque soddisfatte.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

### 9.2.3.3 Muri d'ala - Armatura verticale

I muri d'ala vengono armati a taglio con staffe  $\varnothing 12/40 \times 40$ . Il taglio resistente vale

$$V_{Rd} = 700 \text{ kN}$$

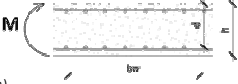
| Verifica a taglio secondo NTC2008   |   |                        |                       |
|---|---|------------------------|-----------------------|
| Geometria della sezione considerata   |   |                        |                       |
|  | Larghezza della sezione   | $b_w =$                | 100 cm                |
|   | Altezza della sezione   | $h =$                  | 120 cm                |
|   | Copriferro (asse dell'armatura tesa)  | $c =$                  | 7.5 cm                |
|   | Numero di barre d'acciaio tese a flessione M sulla larghezza $b_w$                              |                        | 5                     |
|   | Diametro delle barre d'acciaio tese a flessione M sulla larghezza $b_w$                         |                        | 20                    |
| Sezione d'acciaio tesa a flessione M sulla larghezza $b_w$                        |   |                        |                       |
|   |   | $A_s =$                | 15.71 cm <sup>2</sup> |
| Caratteristiche dei materiali impiegati [calcestruzzo e acciaio]                  |   |                        |                       |
| Classe di resistenza del calcestruzzo $\square$                                   |   |                        |                       |
|   |   | $R_{ck} =$             | 40.00 MPa             |
|   |   | $f_{ck} =$             | 32.00 MPa             |
|   | $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot x f_{ck} / \gamma_c = 0.85 x f_{ck} / 1.5 =$                        | $f_{cd} =$             | 18.13 MPa             |
| Acciaio $\square$   |   |                        |                       |
|   |   | $f_{yk} =$             | 450.00 MPa            |
|   | $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = f_{yk} / 1.15 =$  | $f_{yd} =$             | 391.30 MPa            |
| Resistenza ultima a taglio senza armature trasversali $V_{Rd}$                    |   |                        |                       |
|   | Altezza utile $d = (h - c) \square$   | $d =$                  | 1125.00 mm            |
|   | $k = 1 + (200/d)^{0.5} \leq 2.0$ con $d$ in mm $\square$  | $k =$                  | 1.4216 -              |
|   | $\rho = A_{st} / (b_w d) \leq 0.02 \square$   | $\rho =$               | 0.0014 -              |
|   | Assiale agente per la combinazione di carico considerata ( $N > 0$ = compressione)              | $N_{Ed} =$             | 0.0 kN                |
|   | $\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c = N_{Ed} / (b_w h) < 0.2 f_{cd} \square$                            | $\sigma_{cp} =$        | 0.000 MPa             |
|   | $C_{Rd,c} = 0.18 / \gamma_c =$  | $C_{Rd,c} =$           | 0.12 -                |
|   | $k_1 =$   | $k_1 =$                | 0.15 -                |
|   | $v_{min} = 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{-1/2} =$   | $v_{min} =$            | 0.336 -               |
|   | $V_{Rd,c1} = (V_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d =$   | $V_{Rd,c1} =$          | 377.55 kN             |
|   | $V_{Rd,c2} = [C_{Rd,c} k (100 \rho f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d =$                    | $V_{Rd,c2} =$          | 316.10 kN             |
|   | <b><math>V_{Rd} = \text{MAX}(V_{Rd,c1}; V_{Rd,c2}) =</math></b>                                 |                        | <b>377.6 kN</b>       |
| Resistenza ultima della sezione con armature trasversali                          |   |                        |                       |
|   | numero di bracci nella larghezza $b_w$  | $n =$                  | 2.5                   |
|   | di diametro $\varnothing$   | $\varnothing =$        | 12 mm                 |
|   | interasse s tra due armature trasversali consecutive $\rightarrow$                              | $s =$                  | 40 cm                 |
|   | Area dell'armatura trasversale $\square$  | $A_{st} =$             | 2.83 cm <sup>2</sup>  |
|   | Inclinazione delle barre d'armatura trasversale $\square$                                       | $\alpha =$             | 90 °                  |
|   | Inclinazione dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della sezione $\square$              | $\cot(\theta)_{cal} =$ | 5.64                  |
|   | 1.000 $\leq \cot(\theta) \leq$  | $\cot(\theta) \leq$    | 2.500                 |
|   | Inclinazione dei puntoni di calcestruzzo di calcolo $\square$                                   | $\cot(\theta)_{eff} =$ | 2.50                  |
|   |   | $\theta_{eff} =$       | 21.8 °                |
|   | $v = 0.6 \times (1 - f_{ck} / 250) =$   | $v =$                  | 0.50                  |
|   |   | $\alpha_c =$           | 1.00                  |
|   | Resistenza lato acciaio $V_{Rd,s} = (A_{st} / s) \times z f_{yk} \cot \theta =$                 | $V_{Rd,s} =$           | 700.14 kN             |
|   | Resistenza lato calcestruzzo $V_{Rd,c} = \alpha_c b_w z v f_{cd} (\cot \theta + \tan \theta) =$ | $V_{Rd,c} =$           | 3165.52 kN            |
|   | <b>Resistenza al taglio <math>V_{Rd} = \text{MIN}(V_{Rd,s}; V_{Rd,c}) =</math></b>              |                        | <b>700.1 kN</b>       |

Figura 9.34: Resistenza a taglio senza armatura trasversale – muri d'ala.

Le figure seguenti mostrano gli involuipi delle sollecitazioni di taglio sui muri d'ala per le armature verticali allo stato limite ultimo e allo stato limite di salvaguardia della vita. Le zone in rosso e in blu sono quelle per cui il massimo taglio è superiore a 700 kN.



|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

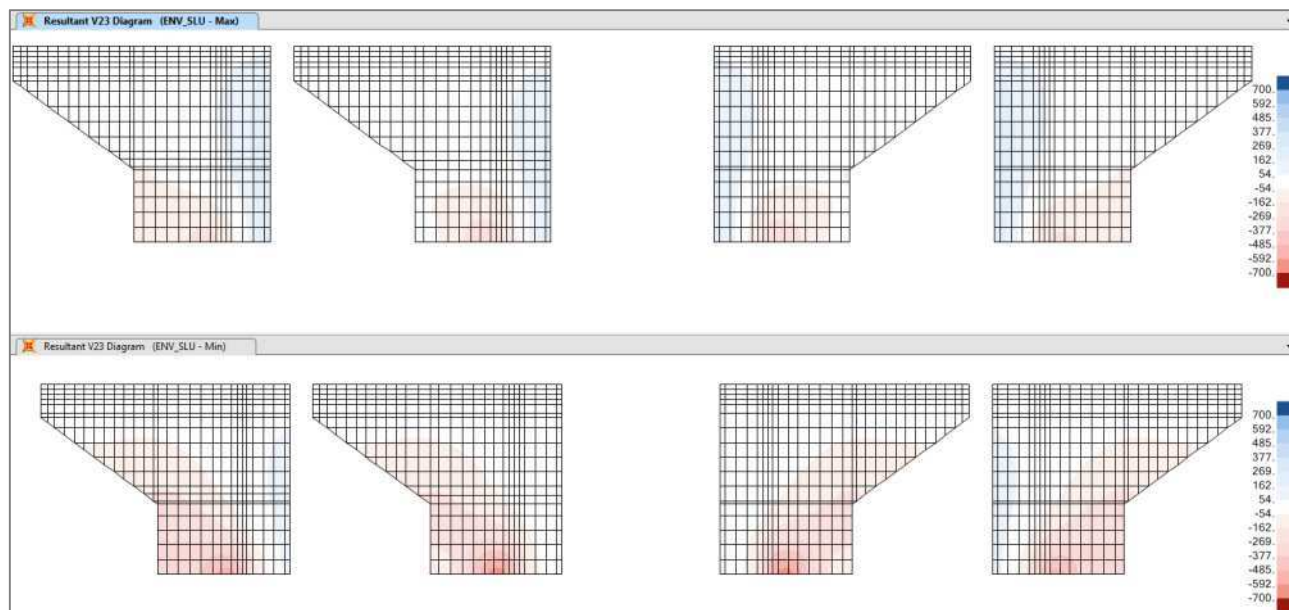


Figura 9.35: Involuppi sollecitazioni SLV sui muri d'ala – taglio sulle armature verticali.

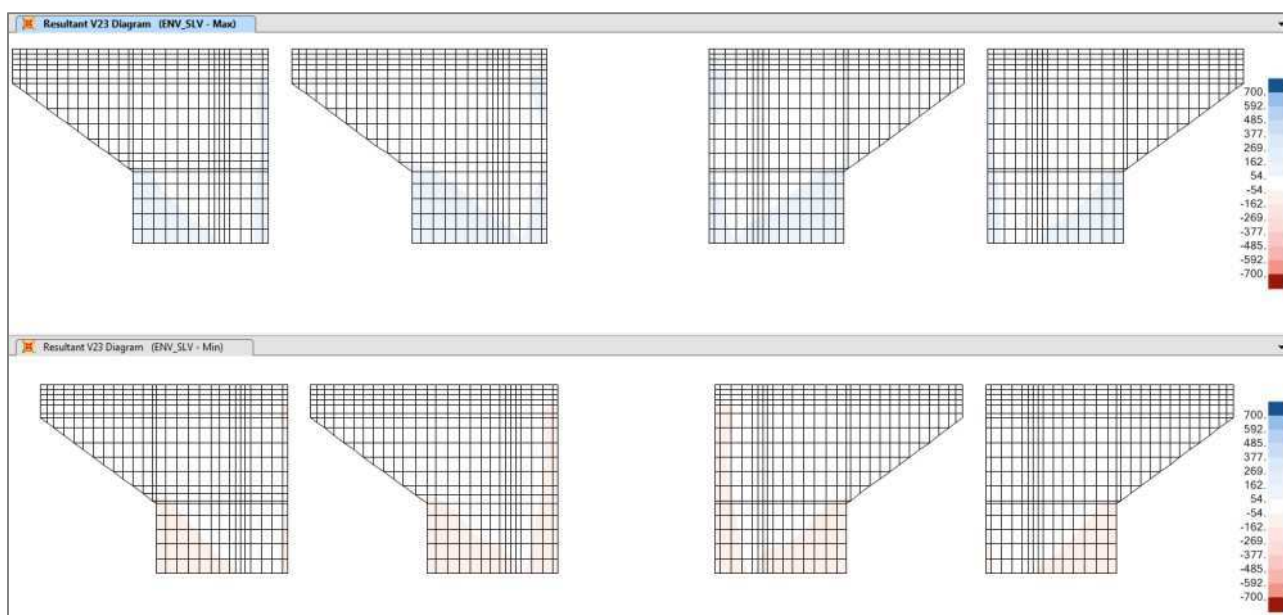


Figura 9.36: Involuppi sollecitazioni SLV sui muri d'ala – taglio sulle armature verticali.

Come mostrano le figure precedenti, in nessuna zona i tagli sollecitanti superano il minimo taglio resistente per l'armatura verticale.

Le verifiche sono ovunque soddisfatte.

|   |  |  |
|---|--|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |  |

### 9.2.3.4 Muri d'ala - Armatura orizzontale

I muri d'ala vengono armati a taglio con staffe  $\varnothing 12/40 \times 40$ . Il taglio resistente vale

$$V_{Rd} = 715 \text{ kN}$$

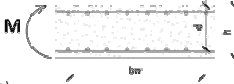
| Verifica a taglio secondo NTC2008  |   |  |                       |
|--|---|--|-----------------------|
| Geometria della sezione considerata  |   |  |                       |
| Larghezza della sezione  |  | $b_w =$                                | 100 cm                |
| Altezza della sezione  |   | $h =$                                  | 120 cm                |
| Copriferro (asse dell'armatura tesa)   |   | $c =$                                  | 5 cm                  |
| Numero di barre d'acciaio tese a flessione M sulla larghezza $b_w$                               |   |  | 5                     |
| Diametro delle barre d'acciaio tese a flessione M sulla larghezza $b_w$                          |   |  | 24                    |
| Sezione d'acciaio tesa a flessione M sulla larghezza $b_w$                                       |   | $A_s =$                                | 22.62 cm <sup>2</sup> |
| Caratteristiche dei materiali impiegati [calcestruzzo e acciaio]                                 |   |  |                       |
| Classe di resistenza del calcestruzzo $\square$  |   | C32/40                                 |                       |
|  |   | $R_{ck} =$                             | 40.00 MPa             |
|  |   | $f_{ck} =$                             | 32.00 MPa             |
| $f_{ctd} = \alpha_{ct} x f_{ctd} / \gamma_c = 0.85 x f_{ctd} / 1.5 =$                            |   | $f_{ctd} =$                            | 18.13 MPa             |
| Acciaio $\square$  |   | $f_{yk} =$                             | 450.00 MPa            |
| $f_{ytd} = f_{yk} / \gamma_s = f_{yk} / 1.15 =$  |   | $f_{ytd} =$                            | 391.30 MPa            |
| Resistenza ultima a taglio senza armature trasversali $V_{Rd}$                                   |   |  |                       |
| Altezza utile $d = (h - c) \square$  |   | $d =$                                  | 1150.00 mm            |
| $k = 1 + (200/d)^{0.5} \leq 2.0$ con $d$ in mm $\square$   |   | $k =$                                  | 1.4170 -              |
| $\rho = A_{st} / (b_w d) \leq 0.02 \square$  |   | $\rho =$                               | 0.0020 -              |
| Assiale agente per la combinazione di carico considerata ( $N > 0$ = compressione)               |   | $N_{Ed} =$                             | 0.0 kN                |
| $\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c = N_{Ed} / (b_w h) < 0.2 f_{ctd} \square$                            |   | $\sigma_{cp} =$                        | 0.000 MPa             |
| $C_{Rd,c} = 0.18 / \gamma_c =$   |   | $C_{Rd,c} =$                           | 0.12 -                |
| $k_1 =$  |   | $k_1 =$                                | 0.15 -                |
| $V_{min} = 0.035 k^{3/2} f_{ctd}^{1/2} =$  |   | $V_{min} =$                            | 0.334 -               |
| $V_{Rd,c1} = (V_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d =$  |   | $V_{Rd,c1} =$                          | 384.07 kN             |
| $V_{Rd,c2} = [C_{Rd,c} k (100 \rho f_{ctd})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d =$                    |   | $V_{Rd,c2} =$                          | 361.05 kN             |
| <b><math>V_{Rd} = \text{MAX}(V_{Rd,c1}; V_{Rd,c2}) =</math></b>                                  |   | <b>384.1 kN</b>                        |                       |
| Resistenza ultima della sezione con armature trasversali   |   |  |                       |
| numero di bracci nella larghezza $b_w$   | 2.5   | diametro $\varnothing$                 | 12 mm                 |
| interasse s tra due armature trasversali consecutive $\rightarrow$                               |   | $s =$                                  | 40 cm                 |
| Area dell'armatura trasversale $\square$   |   | $A_{st} =$                             | 2.83 cm <sup>2</sup>  |
| Inclinazione delle barre d'armatura trasversale $\square$  |   | $\alpha =$                             | 90 °                  |
| Inclinazione dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della sezione $\square$               |   | $\cot(\theta)_{calc} =$                | 5.64                  |
| 1.000 $\leq \cot(\theta) \leq$   |   | $\cot(\theta) \leq$                    | 2.500                 |
| Inclinazione dei puntoni di calcestruzzo di calcolo $\square$                                    |   | $\cot(\theta)_{eff} =$                 | 2.50                  |
|  |   | $\theta_{eff} =$                       | 21.8 °                |
|  |   | $v = 0.6 \times (1 - f_{ctd} / 250) =$ | 0.50                  |
|  |   | $\alpha_c =$                           | 1.00                  |
| Resistenza lato acciaio $V_{Rd,s} = (A_{st} / s) \times z f_{ytd} \cot \theta =$                 |   | $V_{Rd,s} =$                           | 715.69 kN             |
| Resistenza lato calcestruzzo $V_{Rd,c} = \alpha_c b_w z v f_{ctd} (\cot \theta + \tan \theta) =$ |   | $V_{Rd,c} =$                           | 3235.86 kN            |
| <b>Resistenza al taglio <math>V_{Rd} = \text{MIN}(V_{Rd,s}; V_{Rd,c}) =</math></b>               |   | <b>715.7 kN</b>                        |                       |

Figura 9.37: Resistenza a taglio senza armatura trasversale – muri d'ala.

Le figure seguenti mostrano gli involuppi delle sollecitazioni di taglio sui muri d'ala per le armature orizzontali allo stato limite ultimo e allo stato limite di salvaguardia della vita. Le zone in rosso e in blu sono quelle per cui il massimo taglio è superiore a 715 kN.

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

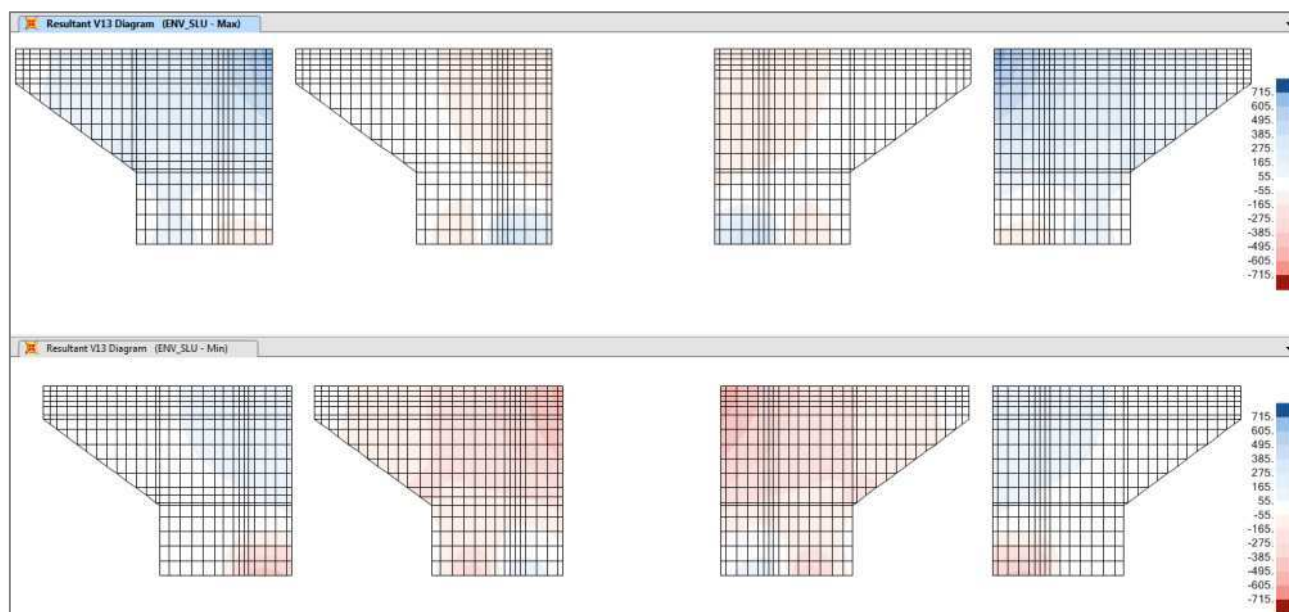


Figura 9.38: Involuppi sollecitazioni SLU sui muri d'ala – taglio sulle armature verticali.

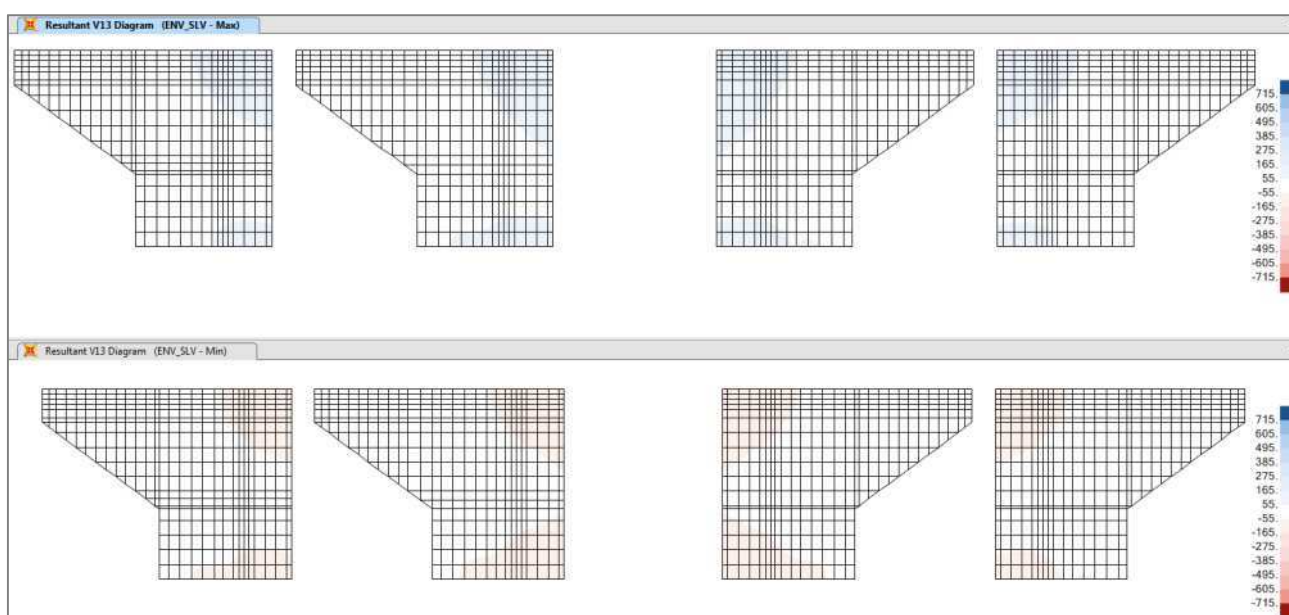


Figura 9.39: Involuppi sollecitazioni SLV sui muri d'ala – taglio sulle armature verticali.

Come mostrano le figure precedenti, in nessuna zona i tagli sollecitanti superano il minimo taglio resistente per l'armatura orizzontale.

Le verifiche sono ovunque soddisfatte.

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

## 9.2.4 Verifica delle tensioni massime in esercizio (SLE)

Per la combinazione rara devono essere rispettate le seguenti condizioni:

-Tensioni nel calcestruzzo inferiori al limite  $0,60 f_{ck} = 19,2 \text{ MPa}$ .

-Tensione massima di trazione nell'acciaio inferiore al limite  $0,80 f_{yk} = 0,8 \times 450 \text{ MPa} = 360 \text{ MPa}$ .

Nelle tabelle seguenti si riportano i risultati delle verifiche per le sezioni significative. Lo sforzo assiale si intende positivo se di trazione.

Tabella 9.15: Riepilogo verifiche tensionali (combinazione rara).

| Sezione  | h<br>[cm] | c<br>[cm] | c'<br>[cm] | A <sub>s</sub><br>[cm <sup>2</sup> ] | A' <sub>s</sub><br>[cm <sup>2</sup> ] | M <sub>Ed</sub><br>[kNm] | N <sub>Ed</sub><br>[kN] | σ <sub>c</sub><br>[MPa] | σ <sub>s</sub><br>[MPa] |
|--|-----------|-----------|------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>Nodo spalla- impalcato<br/>(armatura verticale)</b>     | 105       | 7,5       | 7,5        | 10ø24<br>[45,2]                      | 10ø24<br>[45,2]                       | -858                     | -473                    | 5,7                     | 166                     |
| <b>Nodo spalla- zattera<br/>(armatura verticale)</b>       | 140       | 7,5       | 7,5        | 5ø24<br>[22,6]                       | 5ø24<br>[22,6]                        | 229                      | -704                    | 1,1                     | 2                       |
| <b>Nodo Spalla - muro d'ala<br/>(armatura orizzontale)</b> | 140       | 5         | 5          | 5ø24<br>[22,6]                       | 10ø24<br>[45,2]                       | -1012                    | 501                     | -3,5                    | 230                     |
| <b>Muro d'ala<br/>(armatura orizzontale)</b>               | 120       | 5         | 5          | 5ø24<br>[22,6]                       | 10ø24<br>[45,2]                       | -1052                    | 126                     | -5,3                    | 233                     |

Per la combinazione quasi permanente deve essere rispettata la seguente condizione:

-Tensioni nel calcestruzzo inferiori al limite  $0,45 f_{ck} = 14,4 \text{ MPa}$ .

Nelle tabelle seguenti si riportano i risultati delle verifiche per la sezione di incastro spalla-impalcato e per la sezione di incastro spalla-zattera. Lo sforzo assiale si intende positivo se di trazione.

Tabella 9.16: Riepilogo verifiche tensionali (combinazione quasi permanente).

| Sezione  | h<br>[cm] | c<br>[cm] | c'<br>[cm] | A <sub>s</sub><br>[cm <sup>2</sup> ] | A' <sub>s</sub><br>[cm <sup>2</sup> ] | M <sub>Ed</sub><br>[kNm] | N <sub>Ed</sub><br>[kN] | σ <sub>c</sub><br>[MPa] | σ <sub>s</sub><br>[MPa] |
|--|-----------|-----------|------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>Nodo spalla- impalcato<br/>(armatura verticale)</b> | 105       | 7,5       | 7,5        | 10ø24<br>[45,2]                      | 10ø24<br>[45,2]                       | -415                     | -234                    | 2,7                     | 80                      |
| <b>Nodo spalla- zattera<br/>(armatura verticale)</b>   | 140       | 7,5       | 7,5        | 5ø24<br>[22,6]                       | 5ø24<br>[22,6]                        | 187                      | -511                    | 0,9                     | 3                       |

Le verifiche risultano soddisfatte.

## 9.2.5 Verifiche allo stato limite di fessurazione (SLE)

In accordo a quanto indicato al §4.1.2.2.4 e nella circolare al § 4.1.2.2.4.6, per il caso in esame si hanno armature poco sensibili e condizioni ambientali aggressive (classe di esposizione di riferimento XC4).

Nelle tabelle seguenti si riportano i risultati delle verifiche di fessurazione per le sezioni significative. Lo sforzo assiale si intende positivo se di trazione.

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br>Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014 |
|---|---|--|

Tabella 9.17: Riepilogo verifiche a fessurazione (combinazione frequente)

| Sezione  | h<br>[cm] | c<br>[cm] | c'<br>[cm] | A <sub>s</sub><br>[cm <sup>2</sup> ] | A' <sub>s</sub><br>[cm <sup>2</sup> ] | M <sub>Ed</sub><br>[kNm] | N <sub>Ed</sub><br>[kN] | σ <sub>s</sub><br>[MPa] | σ <sub>lim</sub><br>[MPa] |
|--|-----------|-----------|------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| <b>Nodo spalla- impalcato<br/>(armatura verticale)</b>     | 105       | 7,5       | 7,5        | 10ø24<br>[45,2]                      | 10ø24<br>[45,2]                       | -637                     | -373                    | 121                     | 200                       |
| <b>Nodo spalla- zattera<br/>(armatura verticale)</b>       | 140       | 7,5       | 7,5        | 5ø24<br>[22,6]                       | 5ø24<br>[22,6]                        | 222                      | -579                    | 4                       | 200                       |
| <b>Nodo Spalla - muro d'ala<br/>(armatura orizzontale)</b> | 140       | 5         | 5          | 5ø24<br>[22,6]                       | 10ø24<br>[45,2]                       | -856                     | 424                     | 195                     | 220                       |
| <b>Muro d'ala<br/>(armatura orizzontale)</b>               | 120       | 5         | 5          | 5ø24<br>[22,6]                       | 10ø24<br>[45,2]                       | -885                     | 105                     | 196                     | 220                       |

Le verifiche risultano soddisfatte

## 9.3 Pali

I pali sono pali trivellati ø800 armati in testa con 20ø26 e una spirale ø12/20.

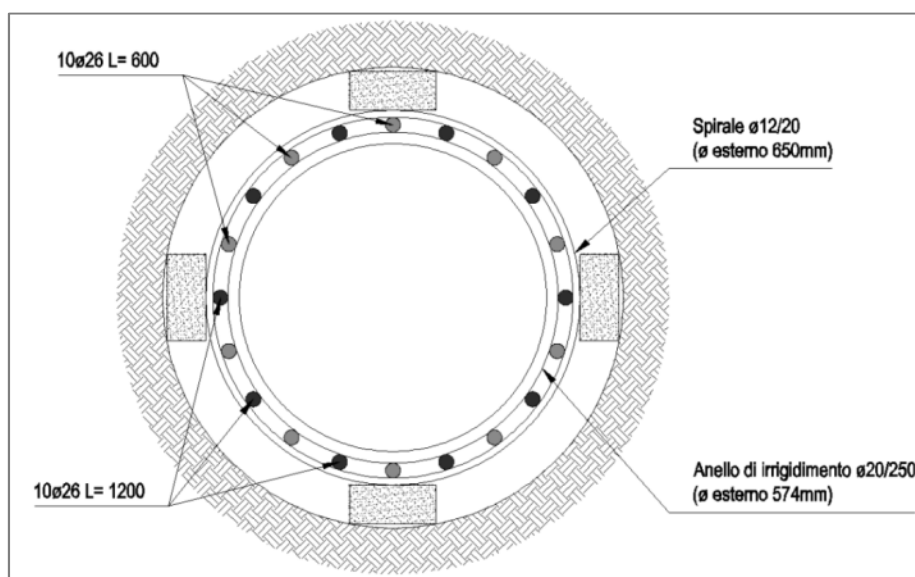


Figura 9.40: Geometria della sezione in testa palo.

La tabella seguente riassume le sollecitazioni sui pali per le tre combinazioni significative.

Tabella 9.18: Riepilogo delle sollecitazioni in testa ai pali.

| Combinazioni GEO | Max di P | Min di P | Max di V | Max di M |
|------------------|----------|----------|----------|----------|
| Z01-01           | -1061    | -1744    | 241      | 316      |
| Z02-01           | -654     | -1157    | 243      | 375      |
| Z03-01           | -979     | -1571    | 180      | 206      |
| Z04-01           | -744     | -1231    | 195      | 293      |
| Z05-01           | -907     | -1419    | 137      | 188      |
| Z06-01           | -829     | -1305    | 154      | 231      |



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

|                         |                 |                 |                 |                 |
|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Z07-01                  | -836            | -1272           | 154             | 229             |
| Z08-01                  | -913            | -1384           | 121             | 185             |
| Z09-01                  | -765            | -1128           | 186             | 279             |
| Z10-01                  | -998            | -1468           | 162             | 193             |
| Z11-01                  | -690            | -987            | 226             | 347             |
| Z12-01                  | -1087           | -1571           | 220             | 306             |
| Z13-01                  | -1122           | -1453           | 271             | 369             |
| Z14-01                  | -722            | -1111           | 254             | 409             |
| Z15-01                  | -1017           | -1244           | 220             | 325             |
| Z16-01                  | -773            | -1123           | 224             | 373             |
| Z17-01                  | -912            | -1173           | 199             | 339             |
| Z18-01                  | -836            | -1137           | 197             | 348             |
| Z19-01                  | -829            | -1118           | 197             | 351             |
| Z20-01                  | -908            | -1157           | 192             | 333             |
| Z21-01                  | -756            | -1073           | 212             | 366             |
| Z22-01                  | -1002           | -1194           | 206             | 323             |
| Z23-01                  | -690            | -1047           | 237             | 386             |
| Z24-01                  | -1119           | -1338           | 247             | 361             |
| Z25-01                  | -887            | -1471           | 300             | 395             |
| Z26-01                  | -536            | -1317           | 153             | 264             |
| Z27-01                  | -514            | -1277           | 156             | 267             |
| Z28-01                  | -843            | -1450           | 300             | 405             |
| <b>Totale GEO</b>       | <b>-514</b>     | <b>-1744</b>    | <b>300</b>      | <b>409</b>      |
| <b>Combinazioni SLU</b> | <b>Max di P</b> | <b>Min di P</b> | <b>Max di V</b> | <b>Max di M</b> |
| Z01-01                  | -1060           | -2127           | 293             | 434             |
| Z02-01                  | -663            | -1442           | 257             | 405             |
| Z03-01                  | -981            | -1925           | 221             | 289             |
| Z04-01                  | -752            | -1534           | 206             | 327             |
| Z05-01                  | -912            | -1753           | 169             | 222             |
| Z06-01                  | -836            | -1626           | 167             | 264             |
| Z07-01                  | -844            | -1594           | 166             | 271             |
| Z08-01                  | -920            | -1726           | 157             | 209             |
| Z09-01                  | -770            | -1438           | 203             | 324             |
| Z10-01                  | -1005           | -1855           | 209             | 273             |
| Z11-01                  | -683            | -1287           | 251             | 398             |
| Z12-01                  | -1089           | -2009           | 282             | 420             |
| Z13-01                  | -1173           | -1860           | 332             | 495             |
| Z14-01                  | -704            | -1433           | 275             | 472             |
| Z15-01                  | -1012           | -1607           | 279             | 427             |
| Z16-01                  | -770            | -1439           | 246             | 446             |
| Z17-01                  | -911            | -1496           | 249             | 420             |
| Z18-01                  | -841            | -1451           | 236             | 424             |
| Z19-01                  | -833            | -1426           | 244             | 431             |



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

|                         |                 |                 |                 |                 |
|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Z20-01                  | -908            | -1479           | 240             | 410             |
| Z21-01                  | -765            | -1374           | 249             | 447             |
| Z22-01                  | -995            | -1543           | 269             | 419             |
| Z23-01                  | -700            | -1341           | 270             | 468             |
| Z24-01                  | -1126           | -1758           | 323             | 482             |
| Z25-01                  | -886            | -1817           | 381             | 504             |
| Z26-01                  | -557            | -1598           | 192             | 332             |
| Z27-01                  | -536            | -1567           | 197             | 339             |
| Z28-01                  | -844            | -1802           | 379             | 508             |
| <b>Totale SLU</b>       | <b>-536</b>     | <b>-2127</b>    | <b>381</b>      | <b>508</b>      |
| <b>Combinazioni SLV</b> | <b>Max di P</b> | <b>Min di P</b> | <b>Max di V</b> | <b>Max di M</b> |
| Z01-01                  | -93             | -2037           | 421             | 709             |
| Z02-01                  | -281            | -1748           | 431             | 588             |
| Z03-01                  | -268            | -1808           | 414             | 694             |
| Z04-01                  | -501            | -1507           | 409             | 605             |
| Z05-01                  | -430            | -1598           | 405             | 676             |
| Z06-01                  | -499            | -1480           | 385             | 624             |
| Z07-01                  | -511            | -1468           | 414             | 657             |
| Z08-01                  | -420            | -1606           | 389             | 643             |
| Z09-01                  | -513            | -1498           | 438             | 637             |
| Z10-01                  | -259            | -1814           | 398             | 662             |
| Z11-01                  | -288            | -1738           | 456             | 620             |
| Z12-01                  | -84             | -2040           | 405             | 677             |
| Z13-01                  | -351            | -1604           | 408             | 680             |
| Z14-01                  | -193            | -1759           | 421             | 571             |
| Z15-01                  | -565            | -1366           | 412             | 697             |
| Z16-01                  | -356            | -1553           | 405             | 613             |
| Z17-01                  | -598            | -1330           | 408             | 692             |
| Z18-01                  | -499            | -1409           | 382             | 639             |
| Z19-01                  | -500            | -1407           | 402             | 674             |
| Z20-01                  | -596            | -1332           | 391             | 657             |
| Z21-01                  | -358            | -1548           | 433             | 648             |
| Z22-01                  | -557            | -1371           | 395             | 662             |
| Z23-01                  | -196            | -1752           | 449             | 606             |
| Z24-01                  | -341            | -1611           | 392             | 648             |
| Z25-01                  | 121             | -2113           | 285             | 282             |
| Z26-01                  | 569             | -2520           | 303             | 374             |
| Z27-01                  | 547             | -2493           | 321             | 404             |
| Z28-01                  | 145             | -2137           | 269             | 259             |
| <b>Totale SLV</b>       | <b>569</b>      | <b>-2520</b>    | <b>456</b>      | <b>709</b>      |

|  |  |   |
|--|--|---|
|  <b>ENSER</b><br>SOCIETA' DI INGEGNERIA | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|  | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

### 9.3.1 Verifiche a presso-flessione (SLU e SLV)

La figura seguente mostra i risultati delle verifiche a presso-flessione allo stato limite ultimo e allo stato limite di salvaguardia della vita per le sezioni di testa palo.

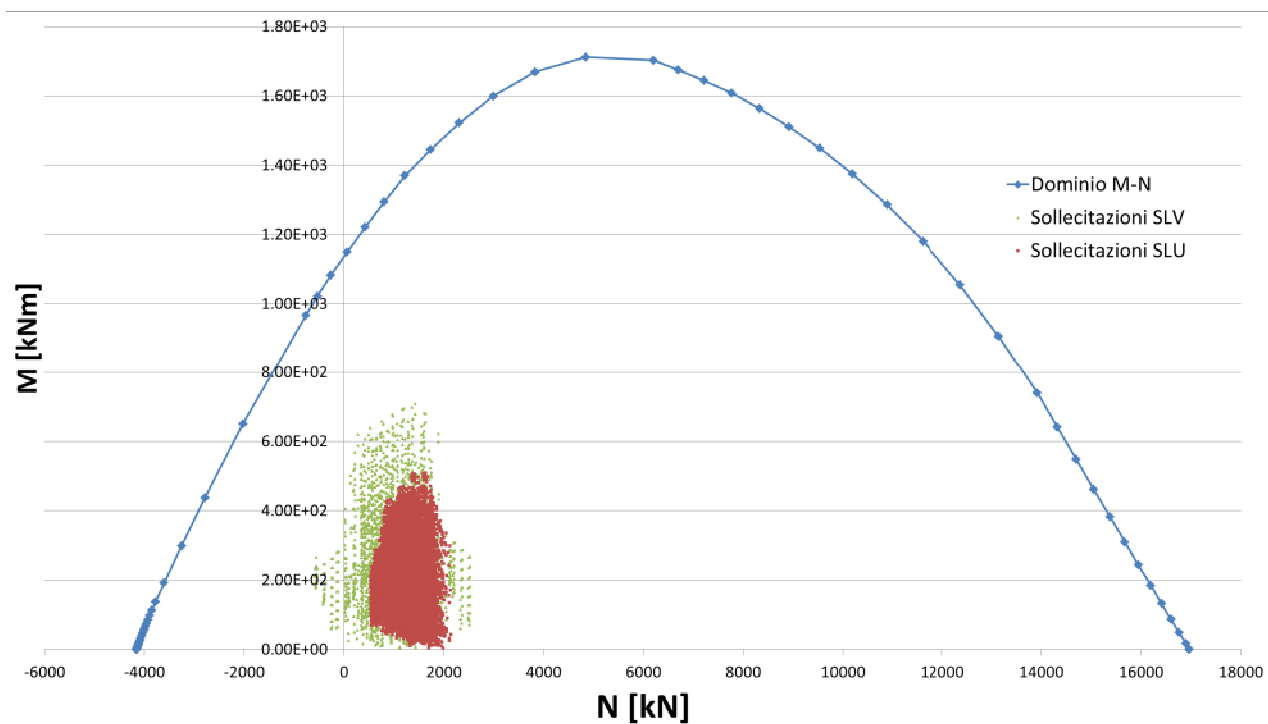


Figura 9.41: Verifiche a presso-flessione per le sezioni in testa palo.

Come si vede tutti i punti cadono all'interno del dominio.

Le verifiche sono soddisfatte.

### 9.3.2 Verifiche a taglio (SLU e SLV)

Il taglio sollecitante massimo in testa ai pali si ha per lo SLV e vale

$$V_{Ed,max} = 456kN$$

Al massimo taglio SLV occorre aggiungere l'effetto prodotto dall'eccentricità accidentale calcolato al 8.1.8.2. Risulta

$$V_{Ed-SLV,max} = 456kN + 30kN = 486kN$$

Il taglio resistente vale

$$V_{Rd} = 588kN$$

La verifica è soddisfatta

|   |   |  |
|---|---|--|
|  <b>ENSER</b><br>SOCIETÀ DI INGEGNERIA | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

| Circular Section - Shear Verification                      |            |                                    |   |                        |                        |                      |  |          |
|--|------------|------------------------------------|---|------------------------|------------------------|----------------------|--|----------|
| Input  |            |                                    |   |                        |                        |                      |  |          |
| <b>Section Data</b>  |            |                                    |   |                        |                        |                      |  |          |
| $\phi$   | 800        | mm                                 | Diameter of section   |                        |                        |                      |  |          |
| r  | 400        | mm                                 | Radius of section   |                        |                        |                      |  |          |
| c <sub>s</sub>   | 75         | mm                                 | External Cover  |                        |                        |                      |  |          |
| $\phi_t$   | 12         | mm                                 | Transverse reinforcement diameter                                       |                        |                        |                      |  |          |
| $\phi_l$   | 26         | mm                                 | Longitudinal reinforcement diameter                                     |                        |                        |                      |  |          |
| n  | 20         |                                    | Number of bars for longitudinal reinforcement                           |                        |                        |                      |  |          |
| c  | 100        | mm                                 | Gross Cover   |                        |                        |                      |  |          |
| r <sub>s</sub>   | 300        | mm                                 | Radius of longitudinal reinforcement                                    |                        |                        |                      |  |          |
| d <sub>eq</sub>  | 591.08     | mm                                 | Effective depth EC8_2_2005 5.6.3.3                                      |                        |                        |                      |  |          |
| h <sub>eq</sub>  | 691.08     | mm                                 | Height of equivalent rectangular section                                |                        |                        |                      |  |          |
| A  | 502400     | mm <sup>2</sup>                    | Area of circular section  |                        |                        |                      |  |          |
| b <sub>eq</sub>  | 726.98     | mm                                 | Width of equivalent rectangular section                                 |                        |                        |                      |  |          |
| A <sub>t</sub>   | 530.66     | mm <sup>2</sup>                    | Area of single bar  |                        |                        |                      |  |          |
| A <sub>s</sub>   | 10613.2    | mm <sup>2</sup>                    | Area of longitudinal reinforcements                                     |                        |                        |                      |  |          |
| <b>Materials Data</b>                                      |            |                                    |   |                        |                        |                      |  |          |
| <b>Concrete</b>  |            |                                    |   |                        |                        |                      |  |          |
| R <sub>ck</sub>  | 35         | MPa                                | Characteristic Cubic Compressive Strength                               |                        |                        |                      |  |          |
| f <sub>ck</sub>  | 29         | MPa                                | Characteristic Compressive Strength                                     |                        |                        |                      |  |          |
| f <sub>cd</sub>  | 16         | MPa                                | Design Compressive Strength   |                        |                        |                      |  |          |
| f <sub>cm</sub>  | 37         | MPa                                | Mean Compressive Strength   |                        |                        |                      |  |          |
| f <sub>ctm</sub>   | 2.8        | MPa                                | Tensile Strength  |                        |                        |                      |  |          |
| f <sub>ctd,0.5</sub>                                       | 2.0        | MPa                                |   |                        |                        |                      |  |          |
| f <sub>ctk</sub>   | 2.4        | MPa                                |   |                        |                        |                      |  |          |
| f <sub>ctd,0.5</sub>                                       | 2.6        | MPa                                |   |                        |                        |                      |  |          |
| E <sub>cm</sub>  | 33         | MPa                                | Young's Modulus   |                        |                        |                      |  |          |
| <b>Steel</b>   |            |                                    |   |                        |                        |                      |  |          |
| f <sub>yk</sub>  | 450        | MPa                                | Yield Strength of Steel   |                        |                        |                      |  |          |
| f <sub>td</sub>  | 391        | MPa                                | Design Strength of Steel  |                        |                        |                      |  |          |
| E <sub>s</sub>   | 200000     | MPa                                | Young's Modulus   |                        |                        |                      |  |          |
| <b>Parameters for shear verification</b>                   |            |                                    |   |                        |                        |                      |  |          |
| $\gamma_c$   | 1.5        |                                    | Partial Factor for Concrete   |                        |                        |                      |  |          |
| $\alpha$   | 90         |                                    | Angle of shear reinforcement  |                        |                        |                      |  |          |
| N <sub>ed</sub>  | 0          | N                                  | Design Value of the applied axial force                                 |                        |                        |                      |  |          |
| cotg $\alpha$  | 0.00       |                                    |   |                        |                        |                      |  |          |
| k <sub>1</sub>   | 0.15       |                                    |   |                        |                        |                      |  |          |
| f <sub>cd</sub>  | 16.46      | MPa                                | Design Compressive Strength for Concrete                                |                        |                        |                      |  |          |
| f <sub>cd</sub>  | 8.23       | MPa                                | Reduced Design Compressive Strength for Concrete                        |                        |                        |                      |  |          |
| A <sub>st</sub>  | 6898.58    | mm <sup>2</sup>                    | Area of reinforcement   |                        |                        |                      |  |          |
| k  | 1.58       |                                    |   |                        |                        |                      |  |          |
| 1/ $\sigma_{min}$  | 0.38       | MPa                                |   |                        |                        |                      |  |          |
| $\rho_l$   | 0.0161     |                                    | Reinforcement Ratio for longitudinal reinforcement                      |                        |                        |                      |  |          |
| $\sigma_{cp}$  | 0.00       | MPa                                | Compressive stress in the concrete from axial load                      |                        |                        |                      |  |          |
| C <sub>rd</sub>  | 0.12       |                                    |   |                        |                        |                      |  |          |
| If structure is not pre-stressed write 1, else write 0     |            |                                    |   |                        |                        |                      |  |          |
| $\alpha_{cw}$  | 1          |                                    | Factor for taking account of the state of the stress in the compression |                        |                        |                      |  |          |
| $\nu$  | 0.530      |                                    | Strength reduction factor for concrete cracked in shear                 |                        |                        |                      |  |          |
| Calculates Neutral Axis Depth at SLU                       |            |                                    |   |                        |                        |                      |  |          |
| <b>Values of Shear Resistance with shear reinforcement</b> |            |                                    |   |                        |                        |                      |  |          |
| $\phi$   | n° of legs | A <sub>st</sub> (mm <sup>2</sup> ) | s (mm)  | V <sub>Rd,s</sub> (kN) | V <sub>Rd,c</sub> (kN) | V <sub>Rd</sub> (kN) | V <sub>Ed</sub> Applied shear force (kN) |          |
| 12   | 2          | 226                                | 200   | 588.27                 | 1164.10                | 588.27               | 581.00                                   | Verified |

Figura 9.42: Taglio resistente per la sezione circolare in testa al palo.

### 9.3.3 Verifiche di capacità portante

#### 9.3.3.1 Singolo palo

La verifica di capacità portante è condotta in riferimento alle seguenti 3 combinazioni:

- GEO = SLU Approccio 1, combinazione 2;
- SLU = SLU Approccio 1, combinazione 1;
- SLV = SLU Approccio 1, Combinazione 2 in condizioni sismiche.

I carichi massimi e minimi agenti in testa al singolo palo nelle tre combinazioni suddette assumono i seguenti valori (positivi se di compressione):

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" |   |

$$N_{max,GEO} = 1745kN, N_{min,GEO} = 514kN;$$

$$N_{max,SLU} = 2128kN, N_{min,SLU} = 536kN;$$

$$N_{max,SLV} = 2521kN, N_{min,SLV} = -569kN.$$

Nella combinazione SLV si ha trazione nei pali.

Vengono realizzati pali lunghi

$$L_{palo} = 28m$$

Come desumibile dalle seguenti Figura 9.43 e Figura 9.44, i relativi valori di capacità portante in compressione sono:

$$Q_{GEO} = 2169kN$$

$$Q_{SLU} = 3306kN$$

$$Q_{SLV} = 2788kN$$

La resistenza a trazione è calcolata per la sola combinazione SLV in accordo i criteri riportati al §3.6.1 e vale:

$$Q_{SLV,TRAZ} = -1944kN$$

La verifica risulta pertanto sempre soddisfatta con i seguenti fattori di sicurezza:

$$FS_{GEO} = \frac{2169}{1744} = 1,24$$

$$FS_{SLU} = \frac{3306}{2127} = 1,55$$

$$FS_{SLV} = \frac{2788}{2520} = 1,11$$

$$FS_{SLV,TRAZ} = \frac{-1944}{-569} = 3,42$$

#### STRATIGRAFIA

| UNITA' | da   | a    | $\gamma$             | $C_{uk}$ | $\alpha C_u$ | $\phi'_k$ | k    | $\tan \phi'_k$ | $\tan \phi'_k$ | $N_s^*$ |
|--------|------|------|----------------------|----------|--------------|-----------|------|----------------|----------------|---------|
| [m]    | [m]  | [m]  | [kN/m <sup>3</sup> ] | [kPa]    | [kPa]        | [°]       |      |                |                |         |
| A      | 0,0  | 5,0  | 19,5                 | 150      | 60           | 22        |      |                |                |         |
| B      | 5,0  | 8,0  | 19,5                 | 250      | 100          | 25        |      |                |                |         |
| C      | 8,0  | 14,5 | 21,0                 | 0        | 0            | 44        | 0,40 | 0,97           | 0,39           | 40      |
| D      | 14,5 | 19,5 | 19,5                 | 150      | 60           | 22        |      |                |                |         |
| E      | 19,5 | 21,5 | 21,0                 | 0        | 0            | 44        | 0,40 | 0,97           | 0,39           | 40      |
| F      | 21,5 | 26,0 | 19,5                 | 150      | 60           | 22        |      |                |                |         |
| G      | 26,0 | 35,0 | 21,0                 | 0        | 0            | 44        | 0,40 | 0,97           | 0,39           | 40      |

| Prof. Falda [m]                       |      |
|---------------------------------------|------|
| da piano campagna                     | 1    |
| da intradosso fondazione              | -0,5 |
| Prof. Intradosso fondazione da PC [m] |      |
|                                       | 1,5  |
| Numero di verticali indagate          |      |
| (CPT P8bis, molto lontana)            | 1    |

| $\phi_{palo}$ | qai lim |
|---------------|---------|
| [mm]          | [kPa]   |
| 800           | 100     |

|     |     |
|-----|-----|
| A = | AL1 |
| B = | AL2 |
| C = | GS  |
| D = | AL1 |
| E = | GS  |
| F = | AL1 |
| G = | GS  |

| $\xi_3$ |
|---------|
| 1,70    |

|               | R1   | R2   | R3   |
|---------------|------|------|------|
| $\gamma_b$    | 1,00 | 1,70 | 1,35 |
| $\gamma_s$    | 1,00 | 1,45 | 1,15 |
| $\gamma_{st}$ | 1,00 | 1,60 | 1,25 |
| $\gamma_i$    | 1,00 | 1,60 | 1,30 |

| numero verticali indagate | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 7    | 10   |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\xi_3$                   | 1,70 | 1,65 | 1,60 | 1,55 | 1,50 | 1,45 | 1,40 |
| $\xi_4$                   | 1,70 | 1,55 | 1,48 | 1,42 | 1,34 | 1,28 | 1,21 |

|                     | EQU  | (A1)STR | (A2)GEO |
|---------------------|------|---------|---------|
| $\gamma_{st}$ slav. | 1,10 | 1,30    | 1,00    |

#### CAPACITÀ PORTANTE PALI TRIVELLATI

| CAPACITÀ PORTANTE PALI TRIVELLATI |             |      |                                |      |                      |                      |            |             |       |              |                            |  |          |          |         |       |       |       | D.M. 14/01/2008 |              |            |           |        |        |                |        |                      |
|-----------------------------------|-------------|------|--------------------------------|------|----------------------|----------------------|------------|-------------|-------|--------------|----------------------------|--|----------|----------|---------|-------|-------|-------|-----------------|--------------|------------|-----------|--------|--------|----------------|--------|----------------------|
| UNITA'                            | Prof. da PC |      | Prof. da intradosso fondazione |      | $\gamma$             | $\gamma'$            | $\sigma_v$ | $\sigma'_v$ | $c_u$ | $\alpha c_u$ | $\tan\phi'/\beta\sigma'_v$ |  | $q_{ci}$ | $Q_{ci}$ | $N_s^*$ | $q_b$ | $Q_b$ | $Q_c$ | $W_p$           | $\Delta W_p$ | $L_{palo}$ | $Q_{lim}$ | RdA1,1 | RdA1,2 | RdA1,2 sismico | RdA2,1 | RdA2,1 sismico TRAZ. |
|                                   | [m]         |      | [m]                            |      | [kN/m <sup>3</sup> ] | [kN/m <sup>3</sup> ] | [kPa]      | [kPa]       | [kPa] | [kPa]        | [kPa]                      |  | [kPa]    | [kN]     |         | [kPa] | [kN]  | [kN]  | [kN]            | [kN]         | [m]        | [kN]      | [kN]   | [kN]   | [kN]           | [kN]   | [kN]                 |
|                                   | da          | a    | da                             | a    |                      |                      |            |             |       |              |                            |  |          |          |         |       |       |       |                 |              |            |           |        |        |                |        |                      |
| G                                 | 29.0        | 29.5 | 27.5                           | 28.0 | 21.0                 | 11.0                 | 558.8      | 281.3       | 0     | 0            | 108.6                      |  | 108.6    | 126      | 40      | 11250 | 4574  | 1508  | 209             | 68           | 28.0       | 5873      | 3306   | 2169   | 2788           | 2725   | -1944                |

Figura 9.43: Capacità portante del singolo palo per il sottopasso rio Cassola.

|   |   |  |
|---|---|--|
|  <b>ENSER</b><br>SOCIETÀ DI INGEGNERIA | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

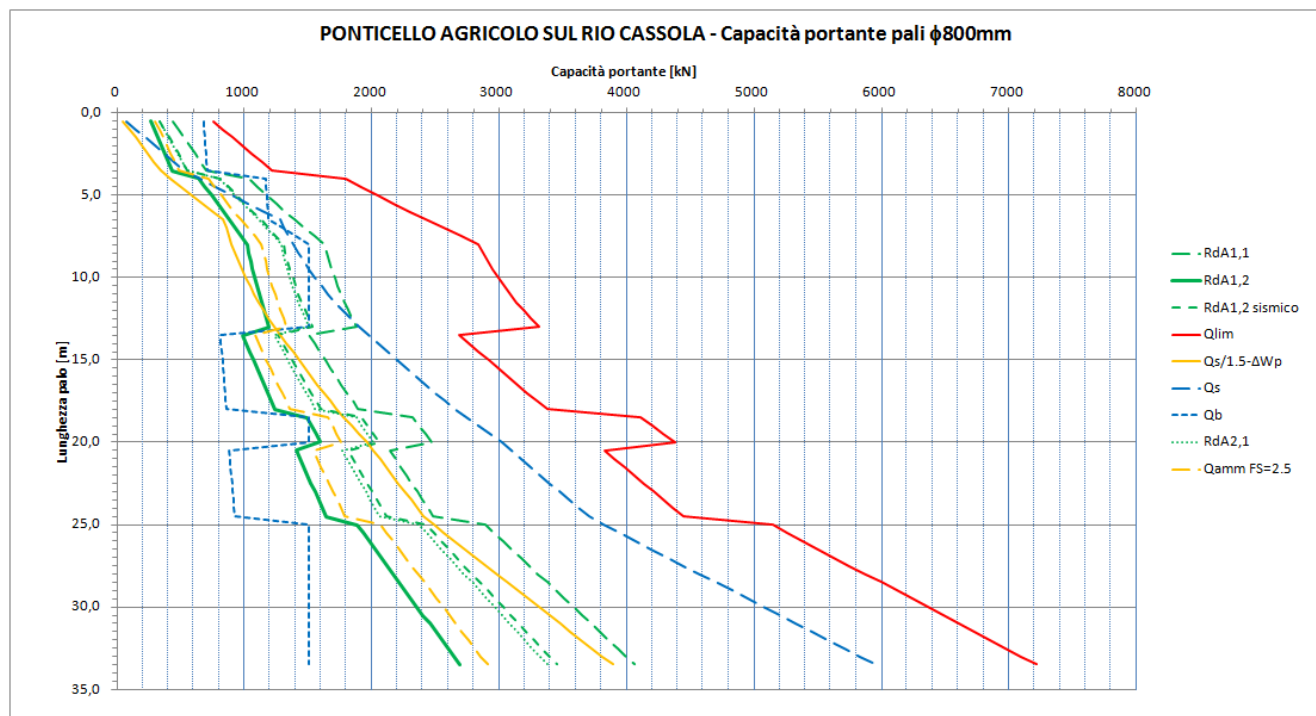


Figura 9.44: Curve di capacità portante del singolo palo per il sottopasso rio Cassola.

### 9.3.3.2 Pali in gruppo

I pali distano fra loro 3 diametri, per cui si rende necessaria la verifica dei pali in gruppo.

Il carico limite del gruppo di pali  $Q_{lim,N}$  è dato dalla seguente formula:

$$Q_{lim,N} = N \times E_v \times Q_{lim}$$

Dove

$N$  è il numero di pali

$E_v$  è il coefficiente di efficienza della palificata (uguale a 0,7 per interasse dei pali di 3 diametri)

$Q_{lim}$  è il carico limite del singolo palo

Nel caso in studio risulta quindi

$$Q_{lim,N-GEO} = 14 \times 0,7 \times 2169\text{kN} = 21\,256\text{ kN}$$

$$Q_{lim,N-SLU} = 14 \times 0,7 \times 3306\text{kN} = 32\,399\text{ kN}$$

$$Q_{lim,N-SLV} = 14 \times 0,7 \times 2788\text{kN} = 27\,322\text{ kN}$$

I massimi carichi sulla palificata valgono:

$$Q_{max,N-GEO} = 16\,049\text{ kN} \quad (\text{combinazione GEO24})$$

$$Q_{max,N-SLU} = 21\,110\text{ kN} \quad (\text{combinazione SLU020})$$

$$Q_{max,N-SLV} = 15\,314\text{ kN} \quad (\text{combinazione SLV08})$$

La verifica risulta pertanto sempre soddisfatta con i seguenti fattori di sicurezza:

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

$$FS_{GEO} = \frac{21\,256}{16\,049} = 1,32$$

$$FS_{SLU} = \frac{32\,399}{21\,110} = 1,53$$

$$FS_{SLV} = \frac{27\,322}{15\,314} = 1,78$$

### 9.3.3.3 Valutazione dei cedimenti

#### 9.3.3.3.1 Palo singolo

Il cedimento del palo singolo è valutato mediante il software Group 2013.8.19 di Ensoft, secondo l'approccio dettagliatamente descritto al § 4.1 della "relazione geotecnica delle opere" B.3.4. Il modello relativo alle palificate di fondazione del ponte sul Rio Martignone è stato realizzato coi seguenti dati:

- 2 pali Ø800, L=28m (il programma consente l'analisi di non meno di 2 pali).
- Testa pali a -1.5m da p.c..
- Falda a -1.0m da p.c..
- E=32836600 kPa;
- Stratigrafia come indicato al 2.1. Laddove i parametri geotecnici sono compresi in un intervallo, sono stati implementati quelli al limite inferiore dello stesso. Trattandosi di una verifica nei confronti di uno SLE, i parametri geotecnici sono stati assunti con il loro valore caratteristico. Nella modellazione è trascurato lo spessore di terreno a quota superiore rispetto alla testa dei pali.
- Sforzo normale in testa al singolo palo pari a quello massimo ottenuto con la combinazione GEO (Tabella 8.7). Ad esso è sommato il peso immerso del palo ed il valore così ottenuto è raddoppiato per considerare la presenza di due pali. Si ha:  

$$F_x = (1744 + 15 \cdot 0.5027 \cdot 28) \cdot 2 = 3910 \text{ kN}$$
 dove x è l'asse verticale, orientato verso il basso.

Il cedimento così ottenuto è pari a:

$$w_{palo} \cong 0.002 \text{ m} = 2 \text{ mm}$$

Nelle seguenti Figura 9.45 e Figura 9.46 sono rappresentati, rispettivamente, il modello numerico ed il diagramma degli spostamenti del pile cap in direzione x.



|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

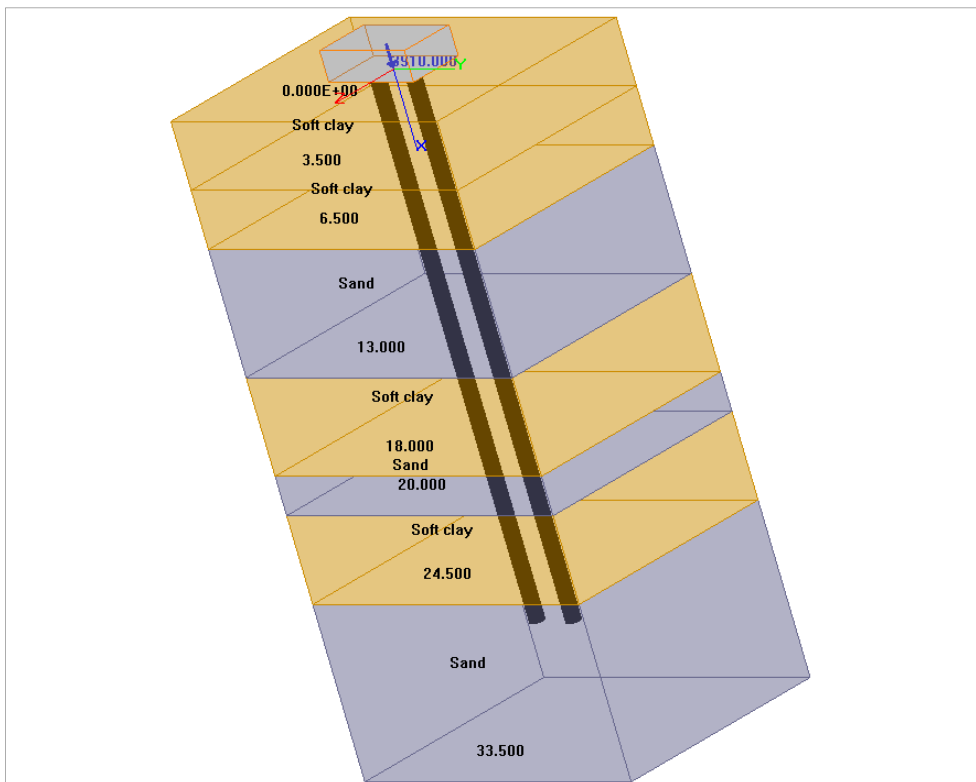


Figura 9.45: modello numerico dei pali di fondazione del ponte agricolo sul rio Cassola.

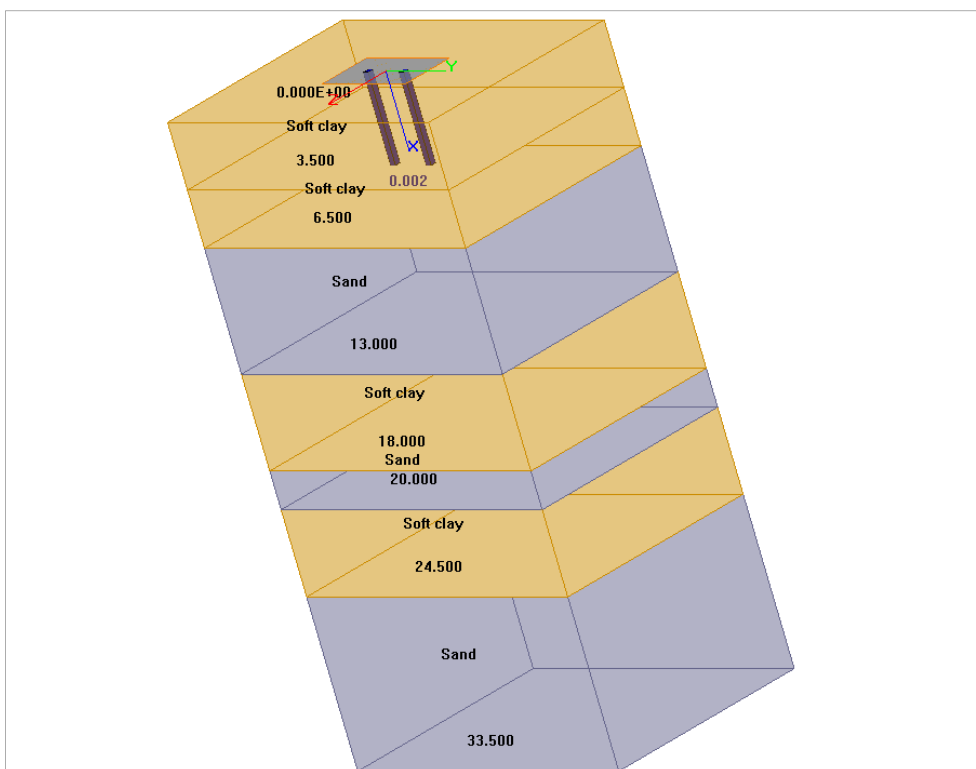


Figura 9.46: cedimenti in testa ai pali – ponte agricolo sul rio Cassola.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

### 9.3.3.3.2 Pali in gruppo

L'amplificazione del cedimento per effetto gruppo è valutato con il metodo descritto al § 4.2 della "relazione geotecnica delle opere" B.3.4.

Le palificate sotto a ciascuna delle spalle presentano le seguenti caratteristiche geometriche:

- $n=14$ ;
- $s=2.4m$ ;
- $L=28m$ .

Si ha quindi:

$$R = \sqrt{\frac{n \cdot s}{L}} = \sqrt{\frac{14 \cdot 2.4}{28}} \cong 1.0954$$

$$R_G = 0.39 \cdot R^{-1.25} = 0.39 \cdot 1.0954^{-1.25} \cong 0.3480$$

$$E_G = R_G \cdot n = 0.3480 \cdot 14 \cong 4.9$$

Per cui il cedimento medio della palificata è:

$$w_{gruppo} = E_G \cdot w_{palo} = 4.9 \cdot 2 \cong 10mm$$

## 9.4 Cordolo impalcato

Sul cordolo in esame agiscono le seguenti azioni:

- Il peso proprio del cordolo:  $P_{cor} = 25 \times 0,81 \times 0,65 = 13,2 \text{ kN/m}$  ( $G_1$ );
- Il peso della barriera:  $P_{H3} = 1,5 \text{ kN/m}$  ( $G_2$ );
- L'azione dell'urto del veicolo in svio ( $A_d$ ).

La combinazione di carico SLU (§2.5.3 NTC 2008) che tiene in conto dell'azione del vento è la Fondamentale mentre quella per valutare l'urto sul sicurvita è l'Eccezionale.

La sezione più sollecitata a taglio e a momento flettente è quella indicata come X-X in figura seguente.

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

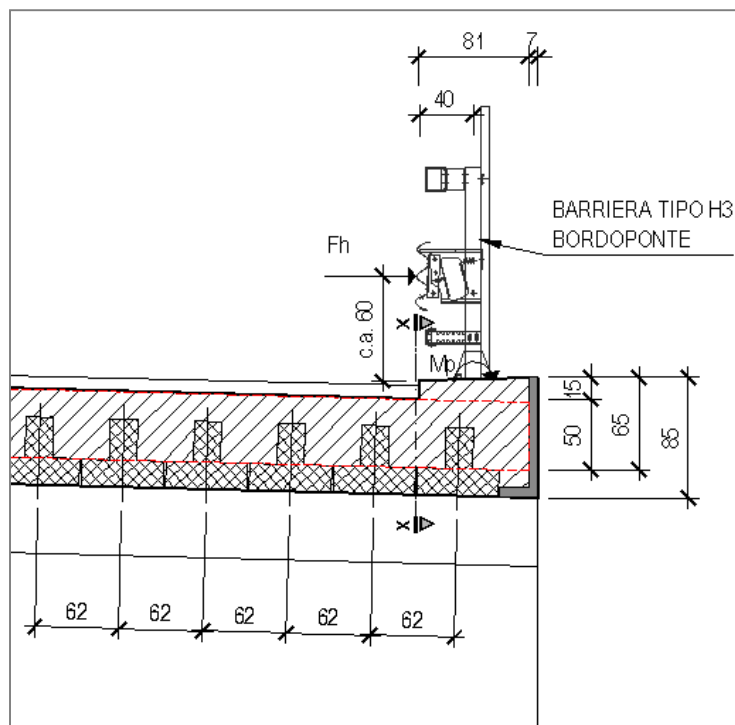


Figura 9.47: Sezione X-X.

La sezione studiata per le verifiche ha larghezza unitaria ed altezza pari a 0,5 m (si veda la zona tratteggiata in rosso in Figura 9.47).

Per l'azione dell'urto viene calcolato il momento agente in corrispondenza dell'asse della sezione suddetta.

Per la sezione X-X i bracci delle azioni agenti sono i seguenti:

- $P_{cor}$ :  $b_{cor} = 0,405$  m;
- $P_{H3}$ :  $b_{H3} = 0,4$  m;
- Urto:  $b_{urto} = (0,6+0,15+0,25) = 1$  m.

## 9.4.1 Azioni, combinazioni e sollecitazioni di progetto

### 9.4.1.1 Urto

L'urto genera sulla sezione di verifica un momento flettente ed uno sforzo assiale di trazione.

Per rendere possibile una sovrapposizione locale degli effetti, l'urto viene riferito ad un metro di larghezza. Lo schema riportato nella figura seguente rappresenta in pianta la diffusione dell'azione di urto fino all'asse della sezione in esame.

|  |  |   |
|--|--|---|
|  <b>ENSER</b><br>SOCIETA' DI INGEGNERIA | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|  | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014                            |

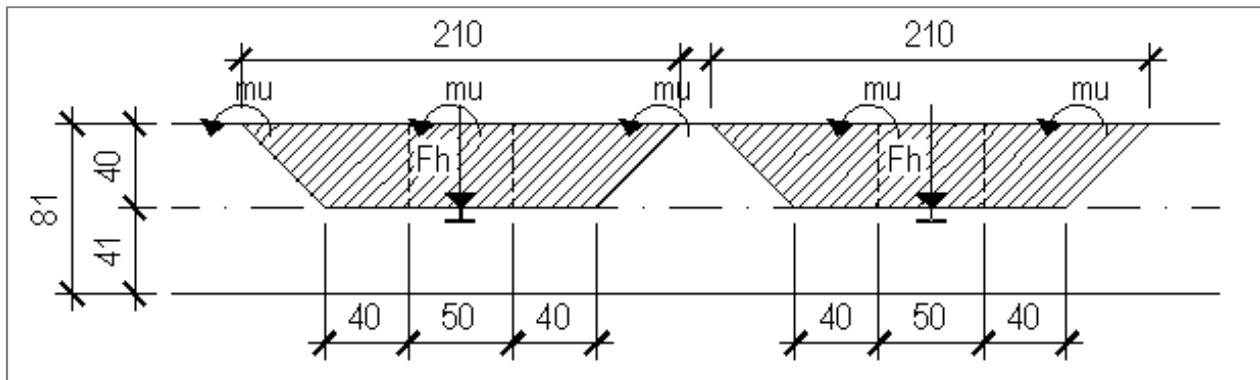


Figura 9.48: Schema di diffusione e sovrapposizione delle sollecitazioni.

La combinazione Eccezionale si riporta nel seguito:

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \sum_i \psi_{2i} Q_{ki}$$

Dove i coefficienti di contemporaneità delle azioni sono quelli riportati al § 5.2 (Tabella 5.1.VI).

Nella tabella seguente vengono riassunte le sollecitazioni di momento flettente, taglio e sforzo assiale agenti sulla sezione in esame per la combinazione Eccezionale:

Tabella 9.19: Sollecitazioni sulla sezione di verifica per la combinazione Eccezionale.

|               | Momento |           | Taglio |          | Sforzo Assiale |          |
|---------------|---------|-----------|--------|----------|----------------|----------|
|               | M [kNm] | m [kNm/m] | V [kN] | v [kN/m] | N [kN]         | n [kN/m] |
| Peso cordolo  | 5,4     | 5,4       | 13,2   | 13,2     | -              | -        |
| Peso barriera | 0,6     | 0,6       | 1,5    | 1,5      | -              | -        |
| Urto          | 91,5    | 43,6      | -      | -        | 91,5           | 43,6     |
| TOT           | 97,5    | 49,6      | 14,7   | 14,7     | 91,5           | 43,6     |

Le sollecitazioni evidenziate sono quelle utilizzate per la verifica.

## 9.4.2 Verifiche

La sezione studiata per le verifiche ha le seguenti caratteristiche:

$A_s = 10,05 \text{ cm}^2$  (5Ø16) (superiore);

$A'_s = 13,57 \text{ cm}^2$  (3Ø24) (inferiore);

$d = 4 \text{ cm}$ ;

$d' = 47 \text{ cm}$ ;

$b = 100 \text{ cm}$ ;

$h = 50 \text{ cm}$ .

|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b><br><br><b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte minori Variante SP 27 rev.2<br><br><b>Codice:</b> S13114 - B.3.1.2<br><b>Data:</b> 21.01.2014 |
|---|---|--|

#### 9.4.2.1 Verifica a tensoflessione

La coppia (M;N) sollecitante è: (49,6 kNm; -43,6 kN).

Il dominio (M;N) per la sezione in esame è rappresentato in Figura 9.49 unitamente alla coppia sollecitante.

Il momento resistente della sezione in presenza di uno sforzo normale pari a  $N_s = -43,6 \text{ kN}$  è pari a (Figura 9.50):

$$M_{Rd} = 167 \text{ kNm} > M_{sd} = 49,6 \text{ kNm}.$$

La verifica a tensoflessione risulta quindi soddisfatta.

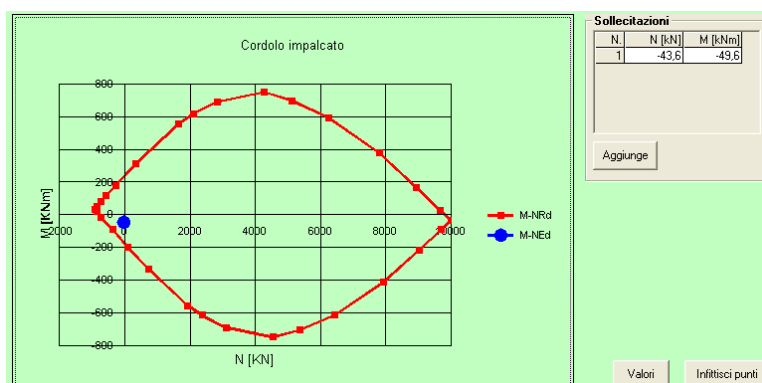


Figura 9.49: Dominio M-N della sezione e coppia (M<sub>s</sub>; N<sub>s</sub>)<sub>d</sub> per la combinazione Eccezionale.

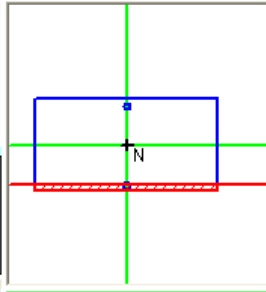
| <b>Titolo :</b> Cordolo impalcato  |                                      |  |                 | <b>N° strati barre</b> 2 <b>Zoom</b>                        |                     | <b>Tipo Sezione</b><br><input checked="" type="radio"/> Rettan.re <input type="radio"/> Trapezi<br><input type="radio"/> a T <input type="radio"/> Circolare<br><input type="radio"/> Rettangoli <input type="radio"/> Coord. |                       |   |                       |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
|--|--------------------------------------|--|-----------------|---|---------------------|---|-----------------------|---|-----------------------|---|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------|-------|-----------------------|--|--|--|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|---|---|-----|---|------|------|--------|-------|-----|------|----|-------|---------|-----|---|--|
| <table border="1"> <tr> <th>N°</th> <th>b [cm]</th> <th>h [cm]</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>100</td> <td>50</td> </tr> </table>  |                                      | N°   | b [cm]          | h [cm]  | 1                   | 100   | 50                    | <table border="1"> <tr> <th>N°</th> <th>As [cm²]</th> <th>d [cm]</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>10,05</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>13,57</td> <td>47</td> </tr> </table> |                       | N°  | As [cm²]                             | d [cm]                   | 1                        | 10,05                        | 4                      | 2     | 13,57                 | 47   |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
| N°   | b [cm]                               | h [cm]   |                 |   |                     |   |                       |   |                       |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
| 1  | 100                                  | 50   |                 |   |                     |   |                       |   |                       |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
| N°   | As [cm²]                             | d [cm]   |                 |   |                     |   |                       |   |                       |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
| 1  | 10,05                                | 4  |                 |   |                     |   |                       |   |                       |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
| 2  | 13,57                                | 47   |                 |   |                     |   |                       |   |                       |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
| <b>Sollecitazioni</b><br>S.L.U. <input checked="" type="radio"/> Metodo n <input type="radio"/>  |                                      | <b>P.to applicazione N</b><br><input checked="" type="radio"/> Centro <input type="radio"/> Baricentro cls<br><input type="radio"/> Coord.[cm] xN 0 yN 0 |                 | <b>Tipo rottura</b><br>Lato calcestruzzo - Acciaio snervato |                     |   |                       |   |                       |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
| <table border="1"> <tr> <th>N</th> <th>M</th> <th>N<sub>Ed</sub></th> <th>M<sub>Ed</sub></th> </tr> <tr> <td>-43,6</td> <td>-49,6</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </table>  |                                      | N  | M               | N <sub>Ed</sub>   | M <sub>Ed</sub>     | -43,6   | -49,6                 | 0   | 0                     | <table border="1"> <tr> <th>N</th> <th>M</th> <th>N<sub>Ed</sub></th> <th>M<sub>Ed</sub></th> </tr> <tr> <td>-43,6</td> <td>-49,6</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </table> |                                      | N                        | M                        | N <sub>Ed</sub>              | M <sub>Ed</sub>        | -43,6 | -49,6                 | 0  | 0  | <b>Metodo di calcolo</b><br><input type="radio"/> S.L.U.+ <input checked="" type="radio"/> S.L.U.- <input type="radio"/> Metodo n<br><b>Tipo flessione</b><br><input checked="" type="radio"/> Retta <input type="radio"/> Deviata |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
| N  | M                                    | N <sub>Ed</sub>  | M <sub>Ed</sub> |   |                     |   |                       |   |                       |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
| -43,6  | -49,6                                | 0  | 0               |   |                     |   |                       |   |                       |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
| N  | M                                    | N <sub>Ed</sub>  | M <sub>Ed</sub> |   |                     |   |                       |   |                       |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
| -43,6  | -49,6                                | 0  | 0               |   |                     |   |                       |   |                       |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
| <b>Materiali</b><br><table border="1"> <tr> <th>B450C</th> <th>C32/40</th> </tr> <tr> <td>ε<sub>su</sub> 67,5 ‰</td> <td>ε<sub>c2</sub> 2 ‰</td> </tr> <tr> <td>f<sub>yd</sub> 391,3 N/mm²</td> <td>ε<sub>cu</sub> 3,5 ‰</td> </tr> <tr> <td>E<sub>s</sub> 210.000 N/mm²</td> <td>f<sub>cd</sub> 18,13</td> </tr> <tr> <td>E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub> 7</td> <td>f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub> 0,8</td> </tr> <tr> <td>ε<sub>syd</sub> 1,863 ‰</td> <td>σ<sub>c,adm</sub> 12,25</td> </tr> <tr> <td>σ<sub>s,adm</sub> 255 N/mm²</td> <td>τ<sub>co</sub> 0,7333</td> </tr> <tr> <td></td> <td>τ<sub>c1</sub> 2,114</td> </tr> </table> |                                      | B450C  | C32/40          | 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> 210.000 N/mm²  | f <sub>cd</sub> 18,13 | E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub> 7  | f <sub>cc</sub> /f <sub>cd</sub> 0,8 | ε <sub>syd</sub> 1,863 ‰ | σ <sub>c,adm</sub> 12,25 | σ <sub>s,adm</sub> 255 N/mm² | τ <sub>co</sub> 0,7333 |       | τ <sub>c1</sub> 2,114 | <table border="1"> <tr> <th>M</th> <th>xRd</th> <th>σ<sub>c</sub></th> <th>σ<sub>s</sub></th> <th>ε<sub>c</sub></th> <th>ε<sub>s</sub></th> <th>d</th> <th>x</th> <th>x/d</th> <th>δ</th> </tr> <tr> <td>-167</td> <td>-167</td> <td>-18,13</td> <td>391,3</td> <td>3,5</td> <td>53,7</td> <td>46</td> <td>2,815</td> <td>0,06119</td> <td>0,7</td> </tr> </table> |  | M  | xRd | σ <sub>c</sub> | σ <sub>s</sub> | ε <sub>c</sub> | ε <sub>s</sub> | d | x | x/d | δ | -167 | -167 | -18,13 | 391,3 | 3,5 | 53,7 | 46 | 2,815 | 0,06119 | 0,7 | <b>Calcola MRd</b> <b>Dominio M-N</b><br>L <sub>0</sub> 0 cm <b>Col. modello</b><br><input type="checkbox"/> Precompresso |  |
| B450C  | C32/40                               |  |                 |   |                     |   |                       |   |                       |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
| 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> 210.000 N/mm²   | f <sub>cd</sub> 18,13                |  |                 |   |                     |   |                       |   |                       |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
| E <sub>s</sub> /E <sub>c</sub> 7   | f <sub>cc</sub> /f <sub>cd</sub> 0,8 |  |                 |   |                     |   |                       |   |                       |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
| ε <sub>syd</sub> 1,863 ‰   | σ <sub>c,adm</sub> 12,25             |  |                 |   |                     |   |                       |   |                       |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
| σ <sub>s,adm</sub> 255 N/mm²   | τ <sub>co</sub> 0,7333               |  |                 |   |                     |   |                       |   |                       |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
|  | τ <sub>c1</sub> 2,114                |  |                 |   |                     |   |                       |   |                       |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
| M  | xRd                                  | σ <sub>c</sub>   | σ <sub>s</sub>  | ε <sub>c</sub>  | ε <sub>s</sub>      | d   | x                     | x/d   | δ                     |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |
| -167   | -167                                 | -18,13   | 391,3           | 3,5   | 53,7                | 46  | 2,815                 | 0,06119   | 0,7                   |   |                                      |                          |                          |                              |                        |       |                       |  |  |  |     |                |                |                |                |   |   |     |   |      |      |        |       |     |      |    |       |         |     |   |  |

Figura 9.50: Dati della verifica a tensoflessione per la combinazione Eccezionale.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Committente:</b><br> <b>Provincia di Bologna</b><br><b>Settore Lavori Pubblici.</b><br><b>Via Malvasia, 4 - 40131 BOLOGNA</b>  | <b>Documento:</b><br>Relazione di calcolo opere d'arte<br>minori Variante SP 27 rev.2 |
|   | <b>Lavoro:</b><br>Progetto di completamento della variante generale alla s.p. 569 da via lunga in comune di Crespellano alla s.p. 78 in comune di Bazzano e realizzazione di varianti stradali alla s.p. 27 "valle del Samoggia" e s.p. 78 "Castelfranco- Monteveglio" | Codice: S13114 - B.3.1.2<br>Data: 21.01.2014  |

### 9.4.3 Verifica a taglio

Il taglio sollecitante è:  $V = 14,7 \text{ kN}$ .

Nella sezione risulta agente anche uno sforzo di trazione pari a:  $N = -43,6 \text{ kN}$ .

Nella figura seguente è illustrata la verifica a taglio per solette in cemento armato secondo NTC 2008.

| Resistenza a taglio secondo NTC 2008                              |         |                 |   |
|---|---------|-----------------|---|
| Geometria sezione   |         |                 |   |
| $b_w =$   | 100     | cm              |   |
| $h =$   | 50      | cm              |   |
| $c =$   | 4       | cm              |   |
| $A_s =$   | 10,05   | cm <sup>2</sup> |   |
| Materiali   |         |                 |   |
| <b>Calcestruzzo C 32/40</b>                                       |         |                 |   |
| $R_{ck} =$  | 40,00   | MPa             |   |
| $f_{ck} =$  | 32,00   | MPa             | Resistenza caratteristica calcestruzzo          |
| $f_{cd} =$  | 18,13   | MPa             |   |
| $f_{yk} =$  | 450     | MPa             | Resistenza caratteristica a snervamento acciaio |
| $f_{yd} =$  | 391,3   | MPa             |   |
| Resistenza a taglio della sezione in assenza di armatura a taglio |         |                 |   |
| $d =$   | 460     | mm              |   |
| $k =$   | 1,6594  | -               |   |
| $\rho_1 =$  | 0,0022  | -               |   |
| $N_{Ed} =$  | -43,6   | kN              |   |
| $\sigma_{cp} =$   | -0,0916 | MPa             |   |
| $v_{min} =$   | 0,4232  | -               |   |
| $V_{Rd} =$  | 188,4   | kN              | Resistenza a taglio                             |

Figura 9.51: Verifica a taglio per la combinazione Eccezionale.

Il taglio resistente risulta:

$$V_{Rd} = 188 \text{ kN} > V = 14,7 \text{ kN}.$$

La verifica a taglio risulta quindi soddisfatta.