

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



U.O. PROGETTAZIONE INTEGRATA NORD

PROGETTO DEFINITIVO

ADEGUAMENTO E POTENZIAMENTO IMPIANTO DI VADO LIGURE ZONA INDUSTRIALE

2^ FASE - PRG CON MODULO 750 m DI UN BINARIO; ACC CON IMPLEMENTAZIONE IN APPARATO DI SEGNALAMENTO ALTO DA TRENO

Sottovia

SL02 - Via Leopardi

Relazione di calcolo scatolare

SCALA:

-

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

IV0H 02 D 26 CL SL0200 001 A

| Rev. | Descrizione | Redatto | Data | Verificato | Data | Approvato | Data | Autorizzato Data |
|------|---------------------|----------|---------------|-------------|---------------|-----------|---------------|----------------------------|
| A | Emissione Esecutiva | C. Soave | Febbraio 2022 | M. Andreani | Febbraio 2022 | G. Fadda | Febbraio 2022 | A. Perego Febbraio 2022 |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |



File: IV0H02D26CLSL0200001A.doc

n. Elab.: 92



PROGETTO DEFINITIVO

SOTTOVIA

SL02 – VIA LEOPARDI

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE

| PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|------------|------|---------|
| IV0H | 02 | D 26 CL | SL0200 001 | A | 2 DI 55 |

Sommario

| | | |
|-------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Scopo del Documento | 4 |
| 2 | Normativa di Riferimento | 5 |
| 2.1 | Elaborati di riferimento | 5 |
| 3 | Caratteristiche dei Materiali | 6 |
| 3.1 | Calcestruzzo Strutture | 6 |
| 3.2 | Calcestruzzo Magrone | 7 |
| 3.3 | Acciaio da c.a. | 7 |
| 4 | Descrizione dell'opera..... | 8 |
| 5 | Caratterizzazione Geotecnica..... | 10 |
| 6 | Modellazione della Struttura | 11 |
| 7 | Analisi dei Carichi..... | 14 |
| 7.1 | Peso Proprio degli Elementi Strutturali | 14 |
| 7.2 | Carichi Permanenti Non Strutturali | 14 |
| 7.3 | Pressione del terreno a tergo del muro (SPTSX, SPTDX) | 15 |
| 7.4 | Azioni verticali dovute al carico ferroviario..... | 17 |
| 7.4.1 | Condizione accidentale verticale..... | 17 |
| 7.4.2 | Spinta sui piedritti prodotta dal sovraccarico (SPACCSX, SPACCDX) | 19 |
| 7.4.3 | Frenatura e avviamento | 20 |
| 7.5 | Azioni verticali da traffico..... | 20 |
| 7.6 | Variazione termica..... | 20 |
| 7.7 | Ritiro..... | 21 |
| 7.8 | Azione Sismica..... | 23 |
| 7.8.1 | Forze sismiche agenti sulla struttura | 27 |
| 7.8.2 | Spinta sismica del terreno (SPSDX, SPSSX)..... | 28 |
| 8 | Combinazioni di Carico | 29 |
| 9 | Sollecitazioni..... | 32 |
| 9.1 | Combinazione SLU | 32 |
| 9.2 | Combinazione SLV | 33 |
| 9.3 | Combinazione SLE Rara | 34 |
| 9.4 | Combinazione SLE Quasi Permanente..... | 35 |
| 10 | Verifiche strutturali | 36 |
| 10.1 | Metodi di verifica | 36 |
| 10.2 | Verifica soletta superiore..... | 37 |

**PROGETTO DEFINITIVO****SOTTOVIA****SL02 – VIA LEOPARDI****RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE**

| PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|------------|------|---------|
| IV0H | 02 | D 26 CL | SL0200 001 | A | 3 DI 55 |

| | | |
|--------|-----------------------------------|----|
| 10.2.1 | Verifica SLU a Flessione..... | 37 |
| 10.2.2 | Verifica SLU a Taglio..... | 38 |
| 10.2.3 | Verifica SLE - Tensione | 40 |
| 10.2.4 | Verifica SLE - Fessurazione | 41 |
| 10.3 | Verifica piedritti | 43 |
| 10.3.1 | Verifica SLU a Flessione..... | 43 |
| 10.3.2 | Verifica SLU a Taglio..... | 44 |
| 10.3.3 | Verifica SLE - Tensione | 46 |
| 10.3.4 | Verifica SLE - Fessurazione | 48 |
| 10.4 | Verifica soletta inferiore..... | 49 |
| 10.4.1 | Verifica SLU a Flessione..... | 49 |
| 10.4.2 | Verifica SLU a Taglio..... | 50 |
| 10.4.3 | Verifica SLE - Tensione | 52 |
| 10.4.4 | Verifica SLE - Fessurazione | 54 |
| 11 | Conclusioni | 55 |

**PROGETTO DEFINITIVO****SOTTOVIA****SL02 – VIA LEOPARDI****RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE**

| PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|-------------|------|---------|
| IV0H | 02 | D 26 CL | SL.0200 001 | A | 4 DI 55 |

1 SCOPO DEL DOCUMENTO

Il presente documento si colloca all'interno delle opere di Progettazione Definitiva relative agli interventi previsti per l'adeguamento ed il potenziamento dell'impianto in zona industriale di Vado Ligure.

La presente relazione di calcolo ha come oggetto il dimensionamento e le verifiche strutturali del sottopasso ciclopedonale SL02 di Via Leopardi relativo alla Seconda Fase del progetto di adeguamento e potenziamento dell'impianto di Vado Ligure.

Nel seguito, dopo una breve descrizione dell'opera, si analizzano le azioni gravanti sulla struttura e si determinano le massime sollecitazioni per le verifiche dei singoli elementi.

Le analisi sono state svolte in accordo al Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 17 Gennaio 2018 "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni", nel seguito indicato con NTC 2018. Le verifiche strutturali sono state svolte con il metodo semiprobabilistico agli Stati Limite.

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------|-------------------------|-----------|-------------------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL0200 001 | REV. A | FOGLIO 5 DI 55 |

2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

I calcoli e le disposizioni esecutive sono conformi alle norme attualmente in vigore e nel seguito elencate:

- D.M. Min. delle Infrastrutture e dei Trasporti del 17 Gennaio 2018 – Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”;
- CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP - Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018;
- UNI EN 206:2016 – “Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità”;
- UNI EN 11104:2016 – “Calcestruzzo - Specificazione. prestazione. produzione e conformità - Specificazioni complementari per l’applicazione della EN 206;
- UNI EN 1992-1-1:2015 “Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo – Parte 1-1: Regole generali e regole per edifici”;
- UNI EN 1998-5:2005 “Eurocodice 8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici”;
- RFI DTC SI MA IFS 001 E – Manuale di progettazione delle opere Civili;
- RFI DTC SI SP IFS 001 E – Capitolato Generale di Appalto delle Opere Civili.

2.1 Elaborati di riferimento

- IV0H02D26BASL0200001A – Scatolare: Pianta e sezione longitudinale
- IV0H02D26BASL0200002A – Scatolare: Sezioni e prospetti

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|-------------------------------------------|-----------|-------------------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA DOCUMENTO D 26 CL SL.0200 001 | REV. A | FOGLIO 6 DI 55 |

3 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Di seguito si riportano le caratteristiche meccaniche dei materiali da costruzione utilizzati per la realizzazione dell'opera.

3.1 Calcestruzzo Strutture

Per la realizzazione dei cassettoni si prevede l'utilizzo di calcestruzzo avente classe di resistenza C32/40 ($R_{ck} \geq 40 \text{ N/mm}^2$), che presenta le seguenti caratteristiche:

- Resistenza Caratteristica a Compressione (Cilindrica) $\rightarrow f_{ck} = 0,83 \times R_{ck} = 32 \text{ N/mm}^2$
- Classe di Esposizione $\rightarrow \text{XS1 (condizione ambiental aggressiva)}$
- Resistenza Media a Compressione $\rightarrow f_{cm} = f_{ck} + 8 = 40 \text{ N/mm}^2$
- Modulo Elastico $\rightarrow E_{cm} = 22000 \times (f_{cm}/10)^{0,3} = 33.345 \text{ N/mm}^2$
- Coefficiente di Sicurezza $\rightarrow \gamma_c = 1,5$
- Resistenza di Calcolo a Compressione $\rightarrow f_{cd} = \alpha_{cc} \times f_{ck} / \gamma_c = 18,13 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza a Trazione Media $\rightarrow f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{2/3} = 3,02 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza a Trazione $\rightarrow f_{ctk} = 0,7 \times f_{ctm} = 2,12 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza a Trazione di Calcolo $\rightarrow f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_c = 1,41 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza a Compressione (Comb. Rara) $\rightarrow \sigma_c = 0,55 \times f_{ck} = 17,6 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza a Compressione (Comb. Quasi Permanente) $\rightarrow \sigma_c = 0,40 \times f_{ck} = 12,8 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza tangenziale caratteristica di aderenza $\rightarrow f_{bk} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctk} = 4,76 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza tangenziale di aderenza di calcolo $\rightarrow f_{bd} = f_{bk} / \gamma_c = 3,18 \text{ N/mm}^2$
- Deformazione Ultima a Rottura $\rightarrow \epsilon_{cu} = 0,0035$

Per gli elementi strutturali si assume un copriferro di 40 mm (valutato al netto della staffa).

Per quanto riguarda la scelta degli stati limiti di fessurazione, si fa riferimento a quanto riportato al paragrafo 2.5.1.8.3.2.4 del MdP, il quale impone che per tutte le strutture a permanente contatto con il terreno e per le zone non ispezionabili, come nel caso in esame, il limite da adottare per la verifica sia $\delta_f \leq w_3 = 0,2 \text{ mm}$ in Combinazione Rara.



PROGETTO DEFINITIVO

SOTTOVIA

SL02 – VIA LEOPARDI

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE

| PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|------------|------|---------|
| IV0H | 02 | D 26 CL | SL0200 001 | A | 7 DI 55 |

3.2 Calcestruzzo Magrone

Per la realizzazione dei cassettoni si prevede l'utilizzo di calcestruzzo avente classe di resistenza C12/15 ($R_{ck} \geq 15 \text{ N/mm}^2$), che presenta le seguenti caratteristiche:

- Resistenza Caratteristica a Compressione (Cilindrica) $\rightarrow f_{ck} = 0,83 \times R_{ck} = 12 \text{ N/mm}^2$
- Classe di Esposizione $\rightarrow X0$ (condizione ambientale ordinaria)
- Resistenza Media a Compressione $\rightarrow f_{cm} = f_{ck} + 8 = 20 \text{ N/mm}^2$
- Modulo Elastico $\rightarrow E_{cm} = 22000 \times (f_{cm}/10)^{0,3} = 27.085 \text{ N/mm}^2$
- Coefficiente di Sicurezza $\rightarrow \gamma_c = 1,5$
- Resistenza di Calcolo a Compressione $\rightarrow f_{cd} = \alpha_{cc} \times f_{ck} / \gamma_c = 6,80 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza a Trazione Media $\rightarrow f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{2/3} = 1,57 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza a Trazione $\rightarrow f_{ctk} = 0,7 \times f_{ctm} = 1,10 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza a Trazione di Calcolo $\rightarrow f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_c = 0,73 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza a Compressione (Comb. Rara) $\rightarrow \sigma_c = 0,55 \times f_{ck} = 6,60 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza a Compressione (Comb. Quasi Permanente) $\rightarrow \sigma_c = 0,40 \times f_{ck} = 4,80 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza tangenziale caratteristica di aderenza $\rightarrow f_{bk} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctk} = 2,48 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza tangenziale di aderenza di calcolo $\rightarrow f_{bd} = f_{bk} / \gamma_c = 1,65 \text{ N/mm}^2$
- Deformazione Ultima a Rottura $\rightarrow \epsilon_{cu} = 0,0035$

3.3 Acciaio da c.a.

Barre B450C

- Tensione di snervamento caratteristica $\rightarrow f_{yk} \geq 450 \text{ N/mm}^2$
- Tensione caratteristica a rottura $\rightarrow f_{tk} \geq 540 \text{ N/mm}^2$
- Fattore di sicurezza acciaio $\rightarrow \gamma_s = 1,15$
- Resistenza a trazione di calcolo $\rightarrow f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 391 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza a Trazione (Comb. Rara) $\rightarrow \sigma_s = 0,75 \times f_{yk} = 337,5 \text{ N/mm}^2$
- Modulo Elastico $\rightarrow E_a = 210.000 \text{ N/mm}^2$
- Deformazione di Snervamento di Progetto $\rightarrow \epsilon_{yd} = 0,0019$
- Densità $\rightarrow \rho = 7.850 \text{ kg/m}^3$

4 DESCRIZIONE DELL'OPERA

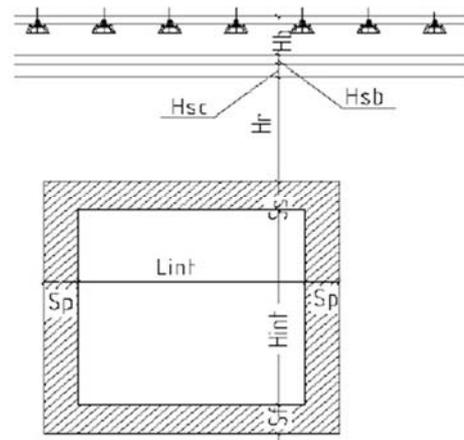
Nell'ambito degli interventi di adeguamento e di potenziamento dell'impianto in zona industriale di Vado Ligure è prevista la realizzazione di un nuovo sottopasso ciclopedonale.

L'opera consiste in uno scatolare in c.a. gettato in opera caratterizzato da una sezione trasversale retta con una luce interna L_{int} di 3,00 m ed un'altezza netta H_{int} di 3,00 m; lo spessore della platea di fondazione S_f è di 0,60 m, come lo spessore della soletta di copertura S_s e dei piedritti S_p .

Segue una tabella riepilogativa delle caratteristiche geometriche:

Caratteristiche geometriche strutturali

| | | |
|-----------|--------|------------------------------------|
| H_b | 0,8 m | Spessore medio ballast e armamento |
| H_{tb} | 0,35 m | Spessore traversina e rotaie |
| H_{sb} | 0 m | Spessore del sub ballast |
| H_{sc} | 0 m | Spessore dello spercompattato |
| H_r | 0 m | Spessore del riporto |
| L_{tot} | 4,2 m | Larghezza totale del sottopasso |
| L_{int} | 3 m | Larghezza utile del sottopasso |
| S_s | 0,6 m | Spessore soletta superiore |
| S_p | 0,6 m | Spessore piedritti |
| S_f | 0,6 m | Spessore platea di fondazione |
| H_{ln} | 3 m | Altezza libera del sottopasso |
| H_{tot} | 4,2 m | Altezza totale del sottopasso |
| b | 1 m | Larghezza striscia di carico |



Di seguito si riporta una sezione trasversale e longitudinale dell'opera:

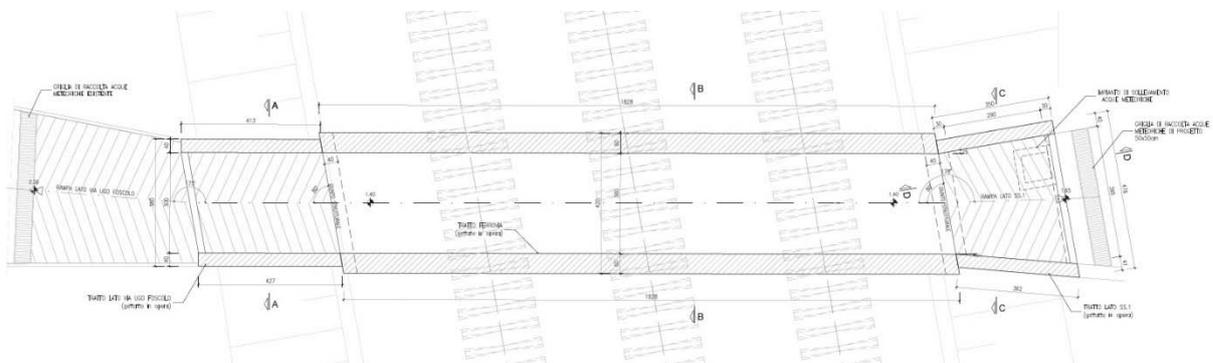


Figura 4.1 - Pianta sottopasso ciclopedonale

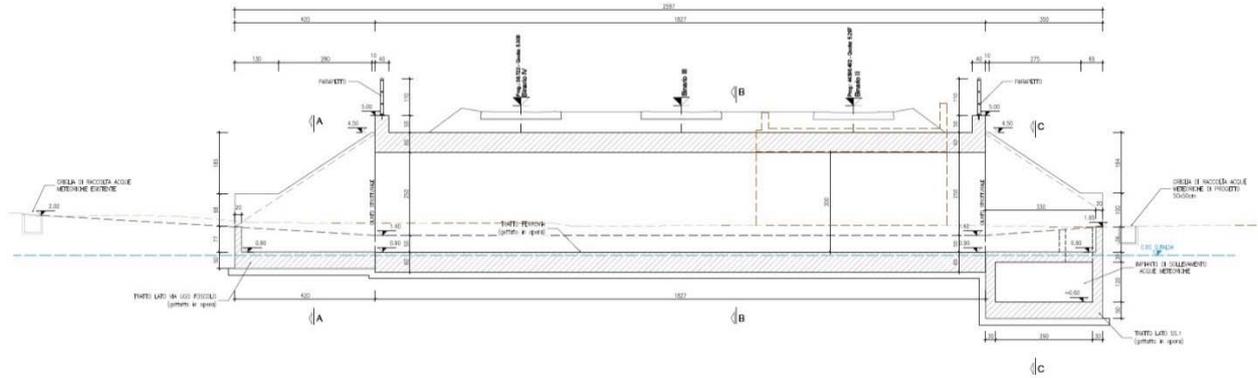


Figura 4.2 - Sezione longitudinale sottopasso ciclopedonale

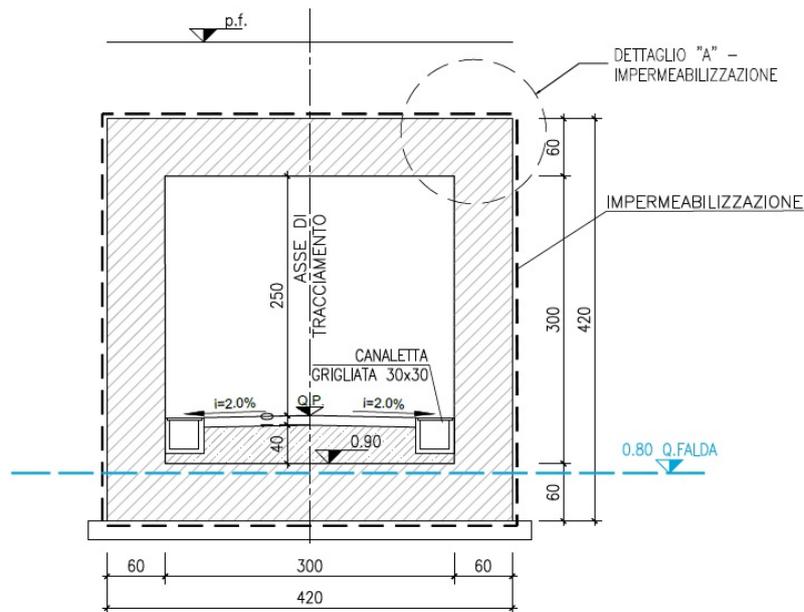


Figura 4.3 - Sezione trasversale sottopasso ciclopedonale

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL.0200 001 | REV. A |

5 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

In accordo con le analisi geotecniche effettuate nell'area oggetto di intervento si riportano i parametri geotecnici di progetto dei terreni interessati:

| Unità | Descrizione | Tipo di terreno | z iniziale (m da p.c.) | z finale (m da p.c.) | spessore (m) | Peso di volume (kN/m ³) | Densità relativa (%) | Angolo di resistenza al taglio ϕ' (°) | c' (kPa) | Cu (kPa) | Modulo elastico Eop (MPa) | Modulo non drenato Eu (MPa) | K media (m/s) |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------|----------------------|--------------|-------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------|----------|----------|---------------------------|-----------------------------|---------------|
| R | Ripporto antropico | GG | 0 | 2 | 2 | 18 | - | - | - | - | - | - | - |
| 1a | Limo con sabbia debolmente argilloso, talvolta ghiaioso da poco a mediamente addensato | GG | 2 | 8.5 | 6.5 | 18 | 40-50 | 28-30 | - | - | 10-30 | - | 1.13E-04 |
| 1b | Limo sabbioso, talvolta argilloso mediamente addensato | GF | 8.5 | 30 | 21.5 | 18 | - | 28-30 | 0 | 80-90 | 40 | 60-70 | - |

Figura 5.1 - Modello geotecnico ai fini dell'analisi di progetto

La fondazione dell'opera si trova poggiante in uno strato di limo con sabbia debolmente argilloso, talvolta ghiaioso, con stato di addensamento variabile, caratterizzato dalle proprietà presenti nella tabella soprariportate.

Lateralmente, invece, risulta confinata da un terreno di ricoprimento le cui caratteristiche geotecniche sono di seguito riportate:

- Peso di volume naturale $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$;
- Angolo di resistenza al taglio $\phi' = 38^\circ$;
- Coesione drenata $c' = 0 \text{ kPa}$

Dalle indagini geotecniche, inoltre, come si evidenzia all'interno della relazione geotecnica di riferimento e dalle immagini relative alle sezioni longitudinali e trasversali precedentemente riportate, è stata desunta una quota di falda che interferisce quasi completamente con l'altezza della soletta inferiore dell'opera in esame (50 cm). Al fine dell'analisi si ritiene opportuno trascurarne la presenza visto la limitata influenza con l'opera stessa.

Ai fini della definizione della categoria sismica del sottosuolo, nei pressi dell'opera è stata eseguita una prova MASW dalla quale è stata estrapolata una velocità Vs tale da ricondurre il terreno ad una categoria stratigrafica di tipo C.

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL.0200 001 | REV. A |

6 MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA

L'analisi della struttura è condotta con il software di calcolo Midas Gen 2021 (v3.1), di Midas Information Technology Co. Ltd, seguendo quanto specificato dalle NTC 2018 al § 7.2.6.



Figura 6.1 - Info e licenza software

Le unità di misura adottate sono le seguenti:

- lunghezze: [m]
- forze: [kN]
- temperature: gradi centigradi [C°]

Convenzione assi:

- x: asse trasversale del cassettone in c.a;
- y: asse longitudinale del cassettone in c.a.;
- z: asse verticale del cassettone in c.a.;

Il modello di calcolo attraverso il quale viene discretizzata la struttura è quello di telaio chiuso dove la geometria è stata ricalcata dalla linea baricentrica degli elementi costituenti l'opera.

La struttura scatolare in esame è stata modellata dunque con un modello piano che identifica la rispettiva sezione trasversale di sviluppo unitario.

Per simulare il comportamento del terreno di fondazione vengono inserite molle alla Winkler calibrate sul modello geotecnico del terreno. Il coefficiente di Winkler verticale è stato valutato secondo la relazione di Vesic (1965) che propone la seguente formula:

$$K = \frac{0.65E}{1-\nu^2} \sqrt[3]{\frac{Eb^4}{(EJ)_{fond}}}$$

dove:

| | |
|--------------------------|-------------------------------------|
| $E = 20 \text{ MPa}$ | modulo elastico del terreno |
| $\nu = 0,3$ | coefficiente di Poisson |
| $b = 3,6 \text{ m}$ | larghezza unitaria della fondazione |
| $h = 0,6 \text{ m}$ | spessore della fondazione |
| $J = 0,0648 \text{ m}^4$ | inerzia trave |

La geometria del modello, come raffigurato, ricalca la linea baricentrica degli elementi costituenti l'opera.

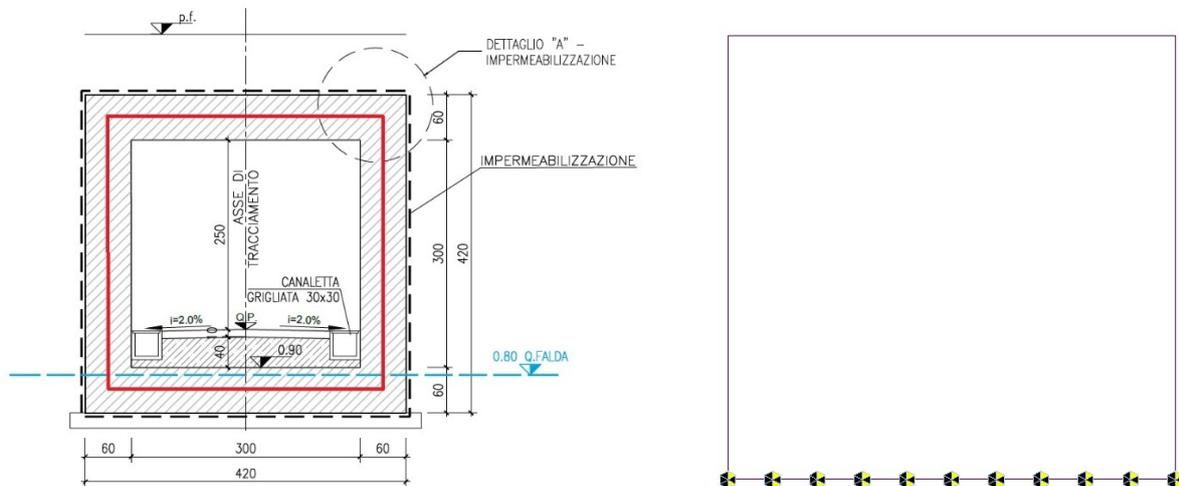


Figura 6.2 – Modellazione di calcolo con linee baricentriche dei singoli elementi costituenti l'opera

Per quanto riguarda le caratteristiche geometriche si fa riferimento alla tabella che segue:

| | |
|----------------------------------|--------|
| luce netta canna L | 3,60 m |
| altezza netta H | 3,60 m |
| spessore soletta superiore S_s | 0,60 m |
| spessore piedritto/i S_p | 0,60 m |
| spessore soletta inferiore S_i | 0,60 m |

La trave di fondazione viene divisa in 10 elementi per poter schematizzare, tramite le molle applicate, l'interazione terreno-struttura.

Per la realizzazione delle molle, nel caso in esame, si assume un valore del modulo di reazione verticale $K_s=14839,78 \text{ kN/m}^3$, funzione del modulo elastico del terreno.

Con questo valore si ricavano i valori delle singole molle, ottenendo per le 5 molle centrali un valore di:

$$K_{\text{centrale}} = K_s \times (Sp/2 + L_{\text{int}} + Sp/2)/10 = 14839,78 \times (0,60/2 + 3,00 + 0,60/2)/10 = 5342,32 \text{ kN/m}$$

$$= K_6, K_7, K_8, K_9, K_{10} = 5342,32 \text{ kN/m}$$

I valori delle molle di spigolo si ottengono con la seguente formulazione:

$$K_3, K_{13} = 2 \times K_s \times [(Sp/2 + L_{\text{int}} + Sp/2)/10 / 2 + Sp/2] =$$

$$= 2 \times 14839,78 \times [(0,6/2 + 3,00 + 0,6/2)/10 / 2 + 0,6/2] = 14246,19 \text{ kN/m}$$

Ed infine i valori delle molle nei nodi restanti, come da letteratura, si assumono:

$$K_4, K_5, K_{11}, K_{12} = 1.5 \times K_{\text{centrale}} = 8013,48 \text{ kN/m}$$

Ai nodi della platea di fondazione sono anche introdotti molle orizzontali con un valore pari a 50% del valore delle molle verticali centrali.

$$K_h = 0,5 \times 5342,32 = 2671,16 \text{ kN/m}$$

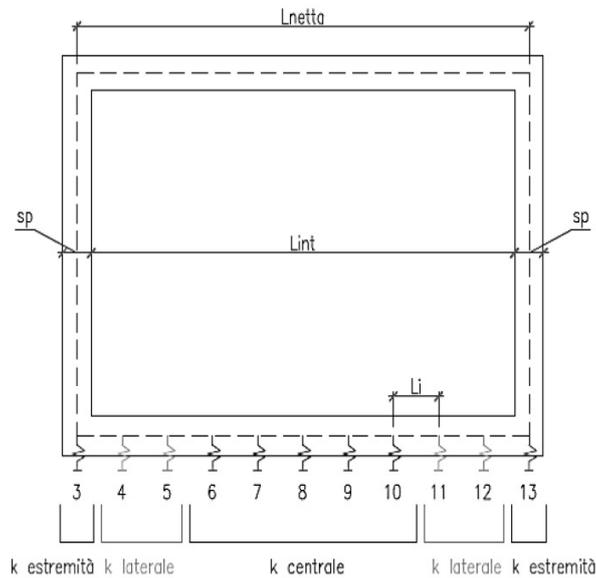


Figura 6.3 - Schematizzazione modello con molle

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL.0200 001 | REV. A |

7 ANALISI DEI CARICHI

Il calcolo strutturale oggetto d'esame è svolto con riferimento alla località di Vado Ligure, nello specifico via Leopardi, pertanto, i dati di riferimento utilizzati, quali azioni ambientali, caratterizzazione sismica del sito e parametrizzazione geotecnica del sottosuolo, sono stati definiti in modo da considerare le azioni più gravose fra quelle possibili nel sito in oggetto.



Figura 7.1 - Inquadramento geografico dell'area di studio

Come prescritto dalle NTC 2018, sono state considerate agenti sulla struttura diverse condizioni di carico elementari, combinate tra loro in modo da determinare gli effetti più sfavorevoli ai fini delle verifiche dei singoli elementi strutturali. Per il calcolo delle sollecitazioni sugli elementi strutturali è stato utilizzato il programma di calcolo Midas Gen.

7.1 Peso Proprio degli Elementi Strutturali

Il peso degli elementi strutturali modellati viene calcolato automaticamente dal programma di calcolo utilizzato, assumendo $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$.

7.2 Carichi Permanenti Non Strutturali

- Peso dell'armamento e ballast

Congruentemente a quanto riportato al § 5.2.2.1.1 delle NTC per la determinazione dei carichi permanenti portati relativi al peso della massicciata, dell'armamento e dell'impermeabilizzazione si è assunto, convenzionalmente, un peso per unità di volume pari a 18 kN/m^3 .

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL.0200 001 | REV. A |

Nel caso in esame si considera uno spessore dal piano del ferro pari a 0,80 m

$$P_{\text{ballast}} = 0,80 \text{ m} \times 18 \text{ kN/m}^3 = 14,4 \text{ kN/m}^2$$

- Peso sovraccarichi soletta inferiore

Oltre alla presenza del ballast e dell'armamento si considera, come evidenziato in IVH02D26BASL020000A, la presenza di un pacchetto interno di 0,10 m e di un sottofondo stabilizzato in ghiaia e sabbia dello spessore di 0,4 m, con pesi per unità di volume rispettivamente pari a 20 kN/m³ e 24 kN/m³.

Tali spessori sono stati considerati congruentemente a quanto riportato nella sezione trasversale B-B dell'elaborato sopracitato in corrispondenza dell'asse di tracciamento.

Pertanto:

$$P_{\text{pacchetto}} = 0,10 \text{ m} \times 20 \text{ kN/m}^3 = 2,00 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{\text{sottofondo}} = 0,40 \text{ m} \times 24 \text{ kN/m}^3 = 9,60 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{\text{soletta,inf.}} = 2,00 \text{ kN/m}^2 + 9,60 \text{ kN/m}^2 = 11,60 \text{ kN/m}^2$$

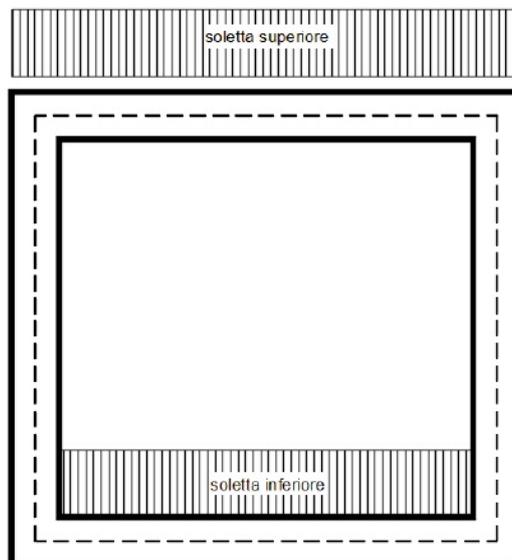


Figura 7.2 - Applicazione carichi permanenti non strutturali

7.3 Pressione del terreno a tergo del muro (SPTSX, SPTDX)

La spinta del terreno viene considerata in regime di spinta a riposo con le seguenti caratteristiche meccaniche di riempimento, cautelative per l'opera analizzata.

$\gamma = 20$ peso per unità di volume

$\varphi = 38$ angolo di attrito

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|-------------------------|-----------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL0200 001 | REV. A |

da cui si ricava:

- $K_0 = 1 - \text{sen}(\varphi) = 1 - \text{sen}(38) = 0,38$
- Pressione in corrispondenza della quota di estradosso della soletta superiore:
 $P_1 = 0,38 \times (0,80 \times 18) = 5,47 \text{ kN/m}^2$
- Pressione in asse alla soletta superiore:
 $P_2 = P_1 + 0,38 \times (0,60/2 \times 20,00) = 7,75 \text{ kN/m}^2$
- Pressione in asse alla soletta inferiore:
 $P_3 = P_2 + (0,38 \times 20,00 \times (0,60/2 + 3,00 + 0,60/2)) = 35,11 \text{ kN/m}^2$
- Pressione in corrispondenza della quota di intradosso della soletta inferiore:
 $P_4 = P_3 + (0,38 \times 0,60/2 \times 20,00) = 37,39 \text{ kN/m}^2$

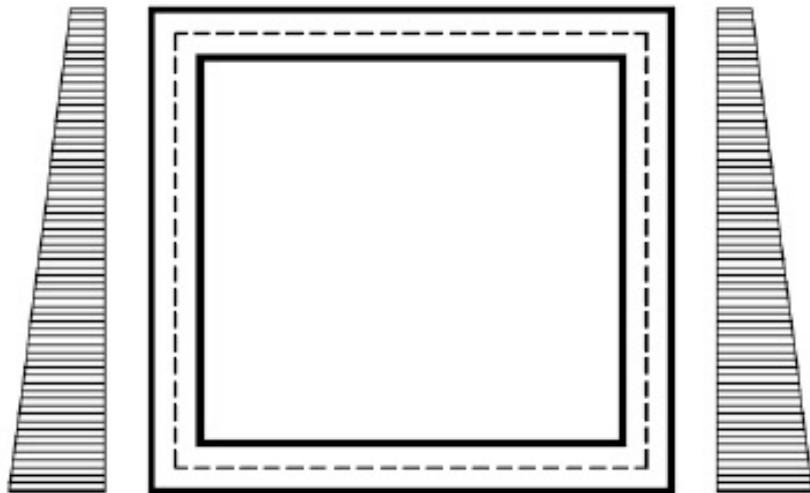


Figura 7.3 - Spinta del terreno

Inoltre, viene aggiunto, come carico concentrato nei nodi di estremità superiori ed inferiori, la parte di spinta del terreno esercitata su mezzo spessore della soletta superiore e su mezzo spessore della soletta inferiore.

- Spinta sul semispessore della soletta superiore:
 $F_1 = (P_1 + P_2) \times (0,60/2)/2 = 1,97 \text{ kN/m}$
- Spinta sul semispessore della soletta inferiore:
 $F_2 = (P_3 + P_4) \times (0,60/2)/2 = 11 \text{ kN/m}$

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL.0200 001 | REV. A |

7.4 Azioni verticali dovute al carico ferroviario

7.4.1 Condizione accidentale verticale

I carichi verticali associati al transito dei convogli ferroviari sono definiti per mezzo di diversi modelli di carico rappresentativi delle diverse tipologie di traffico ferroviario.

Il modello di carico considerato è l'LM71 che schematizza gli effetti statici prodotti dal traffico ferroviario normale come riportato in figura:

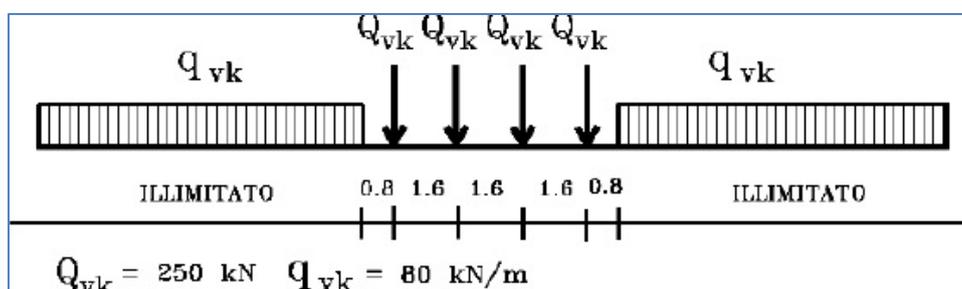


Figura 7.4 - Modello di carico LM71

- Quattro assi da 250 kN disposti ad interasse di 1,60 m;
- Carico distribuito di 80 kN/m in entrambe le direzioni, a partire da 0,80 m dagli assi d'estremità e per una lunghezza illimitata.

Dovendo dimensionare l'opera avente una sezione trasversale di 4,20 m, al fine di valutare gli effetti più gravosi agenti, si considerano agenti sulla stessa tre assi da 250 kN.

Tale valore di carico dovrà essere moltiplicato per un coefficiente di adattamento variabile α in funzione della tipologia dell'infrastruttura che, per questo modello di carico, vale 1,1.

Inoltre, le sollecitazioni e gli spostamenti determinati sulle strutture dall'applicazione statica dei modelli di carico devono essere incrementate per tenere conto della natura dinamica del transito dei convogli.

Secondo quanto riportato in Tab. 5.2.II al § 5.2.2.2.3 delle NTC si considera un coefficiente di amplificazione dinamica $\Phi_3=1,35$ ottenendo quindi un carico di $Q_{vk} = 371,25 \text{ kN}$ per asse.

Come riportato in normativa al § 5.2.2.2.1.4 il valore del carico assiale Q_{vk} può essere distribuito su tre traverse consecutive posto ad interasse uniforme "a", ripartendolo fra la traversa che precede, quella su cui insiste e quella successiva rispettivamente nelle proporzioni di 25%, 50% e 25% come riportato in figura:

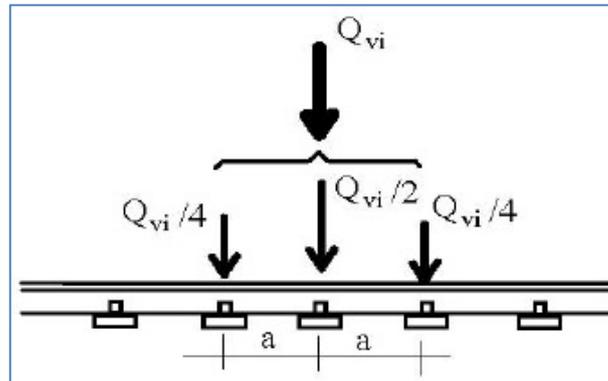


Figura 7.5 - Distribuzione longitudinale dei carichi assiali

In generale, i carichi assiali del modello di carico LM71 possono essere distribuiti uniformemente nel senso longitudinale. Tuttavia, per il progetto di particolari elementi strutturali la distribuzione longitudinale del carico assiale al di sotto della traversa avviene con una pendenza 4:1 come mostrato in figura. Per il calcestruzzo invece la diffusione avviene con pendenza 1:1.

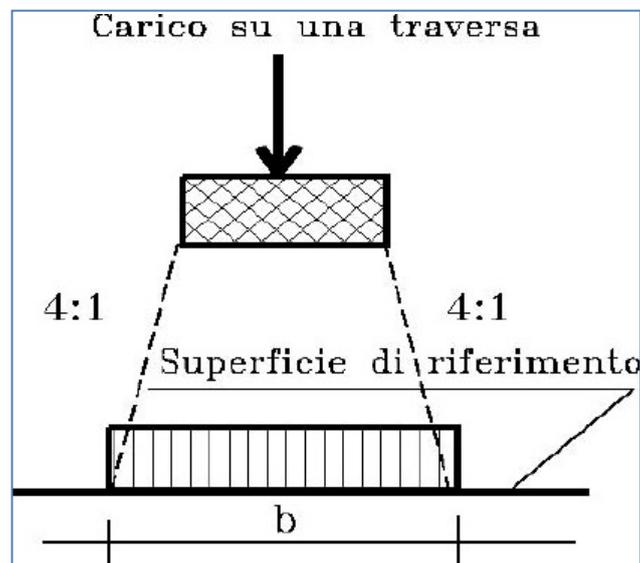


Figura 7.6 - Distribuzione longitudinale dei carichi attraverso il ballast

Per cui, la diffusione del carico in senso trasversale all'asse del binario, considerando la traversina lunga 2,40 m e, cautelativamente, uno spessore del ballast di 0,4 m, ottenuto sottraendo l'altezza della traversina e del fungo dallo spessore del ballast da p.f., risulta:

$$B_{tr} = L_{traversina} + 2 \times (h_{ballast}/4 + h_{supercompattato} + h_{soletta}/2)$$

$$B_{tr} = 2,40 + 2 \times (0,4/4 + 0 + 0,6/2) = 3,20 \text{ m.}$$

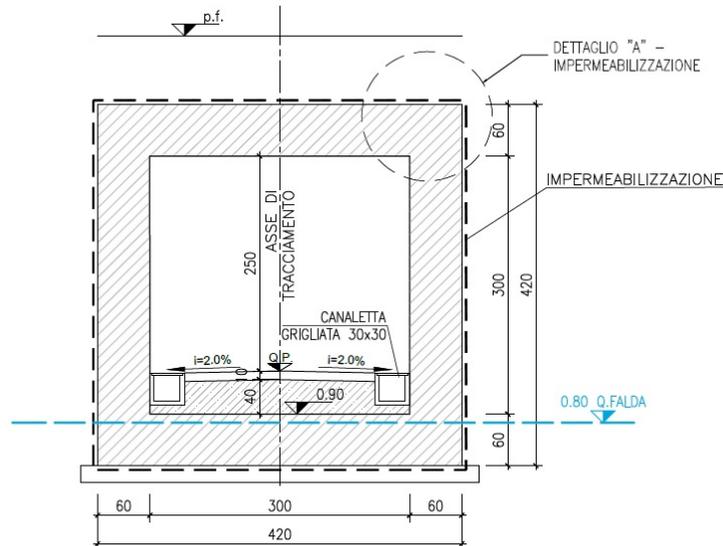


Figura 7.7 - Sezione trasversale dell'opera di riferimento

Pertanto, con riferimento alla sezione trasversale soprariportata, il carico ripartito a metro di profondità dovuto al treno LM71 risulta:

$$Q_{vk/m} = (Q_{vk}/(S_p + L_{int} + S_p))/B_{tr}$$

$$Q_{vk/m} = ((3 \times 371,25)/(0,60 + 3,00 + 0,60))/3,20 = 82,86 \text{ kN/m}$$

7.4.2 Spinta sui piedritti prodotta dal sovraccarico (SPACCSX, SPACCDX)

Per considerare la presenza di un sovraccarico da traffico gravante a tergo dei piedritti si considera un carico uniformemente distribuito. Il valore della spinta risultante al metro è pari a $S = k_0 \times q \times H$ con punto di applicazione posizionato a metà dell'altezza dell'elemento su cui insiste.

Al fine della massimizzazione degli effetti la spinta del sovraccarico a tergo del rilevato verrà considerata agente sia su un solo piedritto che su entrambi.

Pressione del carico accidentale sui piedritti:

$$(Q_{vk} \times \alpha)/(b_1 \times b_2) \times k_0 = ((3 \times 250) \times 1,1)/(3,20 \times 4,20) \times 0,38 = 23,3 \text{ kN/m}^2$$

Oltre a tale carico si considera inoltre la parte di sovrappinta esercitata su mezzo spessore della soletta superiore e mezzo spessore della soletta inferiore.

$$F = 23,3 \times 0,60/2 = 7 \text{ kN}$$

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL.0200 001 | REV. A |

7.4.3 Frenatura e avviamento

Le forze di frenatura e di avviamento agiscono sulla sommità del binario, nella direzione longitudinale dello stesso. Dette forze sono da considerarsi uniformemente distribuite su una lunghezza di binario L determinata per ottenere l'effetto più gravoso sull'elemento strutturale considerato.

Avviamento: $Q_{la,k} = 33 \text{ kN/m} \times 1 \text{ m} = 33 \text{ kN} < 1000 \text{ kN}$

Frenamento: $Q_{lb,k} = 20 \text{ kN/m} \times 1 \text{ m} = 22 \text{ kN} < 6000 \text{ kN}$

I valori caratteristici trovati devono essere moltiplicati per α quindi, valutando le azioni a m:

Avviamento: $Q_{la,k} = (33 \text{ kN/m} \times 1,1)/3,20 \text{ m} = 10,31 \text{ kN/m}$

Frenamento: $Q_{lb,k} = (20 \text{ kN/m} \times 1,1)/3,20 \text{ m} = 6,25 \text{ kN/m}$

7.5 Azioni verticali da traffico

Come previsto al paragrafo 5.1.3.14 delle NTC, al fine di valutare gli effetti prodotti dal traffico ciclopedonale, si prevede l'inserimento un carico accidentale $q = 5 \text{ kN/m}^2$ applicato su tutta la zona significativa della superficie come di seguito rappresentato.

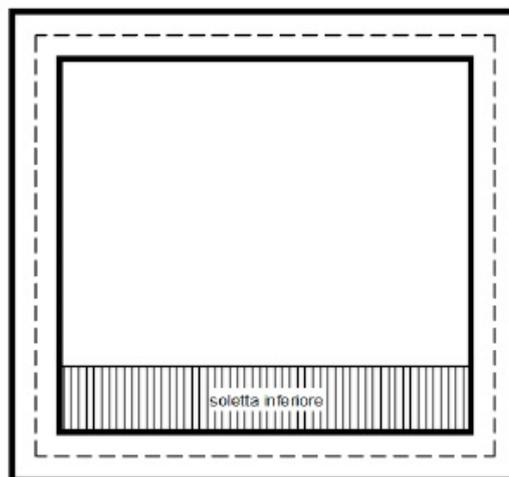


Figura 7.8 – Carico accidentale traffico ciclopedonale

7.6 Variazione termica

Essendo il ricoprimento inferiore a 1.5 m, è necessario considerare l'azione termica agente sulla soletta superiore.

Si considerano pertanto:



PROGETTO DEFINITIVO

SOTTOVIA

SL02 – VIA LEOPARDI

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE

| PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|------------|------|----------|
| IV0H | 02 | D 26 CL | SL0200 001 | A | 21 DI 55 |

- la variazione termica uniforme: $\Delta T_{unif} = +/-15^{\circ}C$ e $\Delta T_{grad} = +/-5^{\circ}C$
- il gradiente di temperatura, per m di spessore, $\Delta T_{grad} = +/-5^{\circ}C$ cui corrisponde quindi un gradiente termico $Grad = 5^{\circ}C / spessore = 5/0.6 = 8,4^{\circ}C/m$.

7.7 Ritiro

Gli effetti del ritiro nel calcestruzzo sono valutati impiegando i coefficienti indicati al punto 11.2.10.6 delle NTC2018. La deformazione totale da ritiro è data dalla somma della deformazione da ritiro per essiccamento e dalla deformazione di ritiro autogeno.

All'interno del modello i fenomeni di ritiro vengono considerati agenti solo sulla soletta di copertura ed applicati nel modello come una variazione termica equivalente pari a:

Caratteristiche del calcestruzzo a tempo zero

| | | |
|----------|--------------|---------------------------------|
| f_{ck} | 32 MPa | classe del calcestruzzo |
| f_{cm} | 40 MPa | resistenza a compressione media |
| E_{cm} | 33345,76 MPa | modulo elastico secante |
| tipo | R | classe del cemento |

Tempo e ambiente

| | | |
|-------|------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| t_s | 2 gg | età del calcestruzzo in giorni, all'inizio del ritiro per essiccamento |
| t_0 | 2 gg | età del calcestruzzo in giorni al momento del carico |
| t | 25550 gg | età del calcestruzzo in giorni |
| u | 1000 mm | perimetro a contatto con l'atmosfera |
| A_c | 600000 mm ² | sezione dell'elemento |
| h_0 | 1200 mm | dimensione fittizia dell'elemento di calcestruzzo |
| RH | 75% | umidità percentuale relativa |

Coefficiente di viscosità $\varphi(t, t_0)$

| | | |
|-------------------|-------------|----------------------------------------------------------------|
| α_1 | 0,91 | coefficiente per la resistenza del calcestruzzo |
| α_2 | 0,97 | coefficiente per la resistenza del calcestruzzo |
| α_3 | 0,94 | coefficiente per la resistenza del calcestruzzo |
| φ_{RH} | 1,83 | coefficiente che tiene conto dell'umidità |
| β_H | 1403,12 | coefficiente che tiene conto dell'umidità relativa |
| $\beta_c(f_{cm})$ | 2,66 | coefficiente che tiene conto della resistenza del calcestruzzo |
| α | 1 | coefficiente per il tipo di cemento |
| t_0 | 6,19 | tempo t_0 corretto in funzione della tipologia di cemento |
| $\beta_c(t_0)$ | 0,65 | coefficiente per l'evoluzione della viscosità nel tempo |
| $\beta_c(t, t_0)$ | 0,98 | coefficiente per la variabilità della viscosità nel tempo |
| φ_0 | 3,15 | coefficiente nominale di viscosità |
| $\varphi(t, t_0)$ | 3,10 | coefficiente di viscosità |
| $E_{cm}(t, t_0)$ | 8126,05 MPa | modulo elastico del calcestruzzo a tempo t |

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE

| PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|-------------|------|----------|
| IV0H | 02 | D 26 CL | SL.0200 001 | A | 22 DI 55 |

Deformazione di ritiro $\epsilon(t, t_0)$

| | | |
|----------------------|----------|--------------------------------------------------------------|
| α_{ds1} | 6 | coefficiente per il tipo di cemento |
| α_{ds2} | 0,11 | coefficiente per il tipo di cemento |
| RH_0 | 100% | |
| f_{cm0} | 10 MPa | |
| β_{RH} | 0,90 | |
| $\epsilon_{cd,0}$ | 0,000432 | deformazione di base |
| k_h | 0,7 | parametro funzione di h_0 (tabella) |
| $\beta_{ds}(t, t_s)$ | 1,00 | coefficiente per la variabilità della deformazione nel tempo |
| $\epsilon_{cd}(t)$ | 0,000302 | deformazione dovuta al ritiro per essicamento |
| $\beta_{as}(t)$ | 1 | |
| ϵ_{ca00} | 0,000055 | |
| $\epsilon_{ca}(t)$ | 5,5E-05 | deformazione dovuta al ritiro autogeno |
| $\epsilon_s(t, t_0)$ | 0,000357 | deformazione del ritiro |

Variazione termica uniforme equivalente agli effetti del ritiro

| | | |
|---------------------|----------|--------------------|
| ΔT_{ritiro} | -8,70398 | variazione termica |
|---------------------|----------|--------------------|

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL.0200 001 | REV. A |

7.8 Azione Sismica

Per il calcolo dell'azione sismica si utilizza il metodo dell'analisi pseudostatica in cui l'azione sismica è rappresentata da una forza statica equivalente pari al prodotto delle forze di gravità per un opportuno coefficiente sismico k . Le forze sismiche sono pertanto le seguenti:

Forza sismica orizzontale: $F_h = k_h \times W$

Forza sismica verticale: $F_v = k_v \times W$

Il valore dei coefficienti sismici orizzontale e verticale possono essere valutati mediante le seguenti espressioni:

$$k_h = a_{\max}/g$$

$$k_v = 0,5 \times k_h$$

Risulta pertanto necessaria la determinazione degli spettri di risposta di progetto la cui definizione avviene mediante l'utilizzo del software-free SPETTRI NTC (v 1.0.3), scaricato dal sito del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici www.cslp.it, il quale fornisce gli spettri di risposta di riferimento per la verifica ai diversi stati limite, determinati congruamente a quanto prescritto dalla norma.

Per fornire gli spettri richiesti è necessario l'inserimento di alcuni parametri caratteristici della struttura in esame e del sito in cui si trova. In particolare, oltre alle coordinate geografiche, è necessario specificare la Vita Nominale V_N della struttura e il suo Coefficiente d'Uso C_U , al fine di poter calcolare il periodo di riferimento dell'azione sismica $V_R = V_N \times C_U$

Per la definizione della **Vita Nominale** da assegnare ad ogni singola opera facente parte di un'infrastruttura ferroviaria si rimanda alla Tabella 2.5.1.1.1-1 *Vita Nominale delle infrastrutture ferroviarie* contenuta nel Manuale di Progettazione delle Opere Civili **RFI DTC SI PS MA IFS 001 E** e di seguito riportata:

| TIPO DI COSTRUZIONE ⁽¹⁾ | Vita Nominale V_N [Anni] ⁽¹⁾ |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| OPERE NUOVE SU INFRASTRUTTURE FERROVIARIE PROGETTATE CON LE NORME VIGENTI PRIMA DEL DM 14/01/2008 A VELOCITÀ CONVENZIONALE ($V < 250$ Km/h) | 50 |
| ALTRE OPERE NUOVE A VELOCITÀ $V < 250$ Km/h | 75 |
| ALTRE OPERE NUOVE A VELOCITÀ $V \geq 250$ km/h | 100 |
| OPERE DI GRANDI DIMENSIONI: PONTI E VIADOTTI CON CAMPATE DI LUCE MAGGIORE DI 150 m | ≥ 100 ⁽²⁾ |
| (1) – La stessa V_N si applica anche ad apparecchi di appoggio, coprigiunti e impermeabilizzazione delle stesse opere. | |
| (2) - Da definirsi per il singolo progetto a cura di FERROVIE. | |

Tab. 2.5.1.1.1-1 – Vita nominale delle infrastrutture ferroviarie

Figura 7.9 –RFI DTC SI PS MA IFS 001 E - Tabella 2.5.1.1.1-1 Vita Nominale delle infrastrutture ferroviarie

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL.0200 001 | REV. A |

L'oggetto della presente relazione rientra nell'ambito di "altre opere nuove a velocità $v < 250$ km/h", dunque le strutture di progetto avranno vita nominale $V_N = 50$ anni.

Il valore del Coefficiente d'Uso C_U varia in relazione alla **Classe d'Uso** dell'edificio, come riportato nella Tabella 2.4.II delle NTC 2018. Le NTC 2018 prevedono quattro diverse Classi d'Uso.

Per la struttura in esame si fa riferimento alla **Classe II** "Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.", alla quale corrisponde un Coefficiente d'Uso $C_U = 1,0$.

Tab. 2.4.II – 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 |

Figura 7.10 – NTC 2018, Coefficiente d'Uso degli edifici

Si ottiene dunque un valore del Periodo di Riferimento per l'azione sismica pari a:

$$V_R = V_N \cdot C_U = 50 \cdot 1 = 50 \text{ anni}$$

È inoltre necessario precisare la **Categoria di Sottosuolo** e la **Categoria Topografica** cui appartiene il sito in esame. Tali informazioni sono reperibili nella relazione geotecnica che prescrive l'assunzione di una Categoria di Sottosuolo **C** e una Categoria Topografica **T₁**.

Quanto ai parametri di amplificazione locale si considera:

$$S_s = 1,5$$

$$S_t = 1,00$$

L'accelerazione massima orizzontale al sito $a_{s,max}$ è calcolata come il prodotto dell'accelerazione al substrato a_g e dei fattori di amplificazione S_s e S_t .

Si ottiene pertanto:

$$a_{s,max(SLV)} = a_g(SLV) \times S_s \times S_t = 0,057 \text{ g} \times 1,5 \times 1,00 = 0,086 \text{ g}$$

da cui ne deriva:

$$k_h = a_{max}/g = 0,086$$

$$k_v = 0,5 \times k_h = 0,043$$

Gli effetti dell'azione sismica verranno valutati tenendo conto delle masse associate ai seguenti carichi gravitazionali dove, nello specifico, per i carichi dovuti al transito dei convogli si assumerà un $\psi_{21} = 0,2$.

Di seguito si riportano gli spettri di risposta oggetto della progettazione:

Parametri e punti dello spettro di risposta orizzontale per lo stato SLV

Parametri indipendenti

| STATO LIMITE | SLV |
|--------------|---------|
| a_g | 0,057 g |
| F_o | 2,610 |
| T_C | 0,307 s |
| S_S | 1,500 |
| C_C | 1,551 |
| S_T | 1,000 |
| q | 0,800 |

Parametri dipendenti

| | |
|--------|---------|
| S | 1,500 |
| η | 1,250 |
| T_B | 0,158 s |
| T_C | 0,475 s |
| T_D | 1,829 s |

Espressioni dei parametri dipendenti

$$S = S_S \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = \sqrt{10/(5+\xi)} \geq 0,55; \quad \eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5})$$

$$T_B = T_C / 3 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.8})$$

$$T_C = C_C \cdot T_C^* \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_g / \xi + 1,6 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.9})$$

Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)

$$0 \leq T < T_B \quad S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)$$

Lo spettro di progetto $S_d(T)$ per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico $S_c(T)$ sostituendo η con $1/q$, dove q è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

Punti dello spettro di risposta

| | T [s] | Se [g] |
|-------|-------|--------|
| | 0,000 | 0,086 |
| T_B | 0,158 | 0,280 |
| T_C | 0,475 | 0,280 |
| | 0,540 | 0,247 |
| | 0,604 | 0,220 |
| | 0,669 | 0,199 |
| | 0,733 | 0,182 |
| | 0,798 | 0,167 |
| | 0,862 | 0,155 |
| | 0,927 | 0,144 |
| | 0,991 | 0,134 |
| | 1,056 | 0,126 |
| | 1,120 | 0,119 |
| | 1,184 | 0,112 |
| | 1,249 | 0,107 |
| | 1,313 | 0,101 |
| | 1,378 | 0,097 |
| | 1,442 | 0,092 |
| | 1,507 | 0,088 |
| | 1,571 | 0,085 |
| | 1,636 | 0,081 |
| | 1,700 | 0,078 |
| | 1,765 | 0,075 |
| T_D | 1,829 | 0,073 |
| | 1,932 | 0,065 |
| | 2,036 | 0,059 |
| | 2,139 | 0,053 |
| | 2,243 | 0,048 |
| | 2,346 | 0,044 |
| | 2,449 | 0,041 |
| | 2,553 | 0,037 |
| | 2,656 | 0,035 |
| | 2,759 | 0,032 |
| | 2,863 | 0,030 |
| | 2,966 | 0,028 |
| | 3,070 | 0,026 |
| | 3,173 | 0,024 |
| | 3,276 | 0,023 |
| | 3,380 | 0,021 |
| | 3,483 | 0,020 |
| | 3,586 | 0,019 |
| | 3,690 | 0,018 |
| | 3,793 | 0,017 |
| | 3,897 | 0,016 |
| | 4,000 | 0,015 |

Figura 7.11 – Parametri spettro di risposta orizzontale allo SLV

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

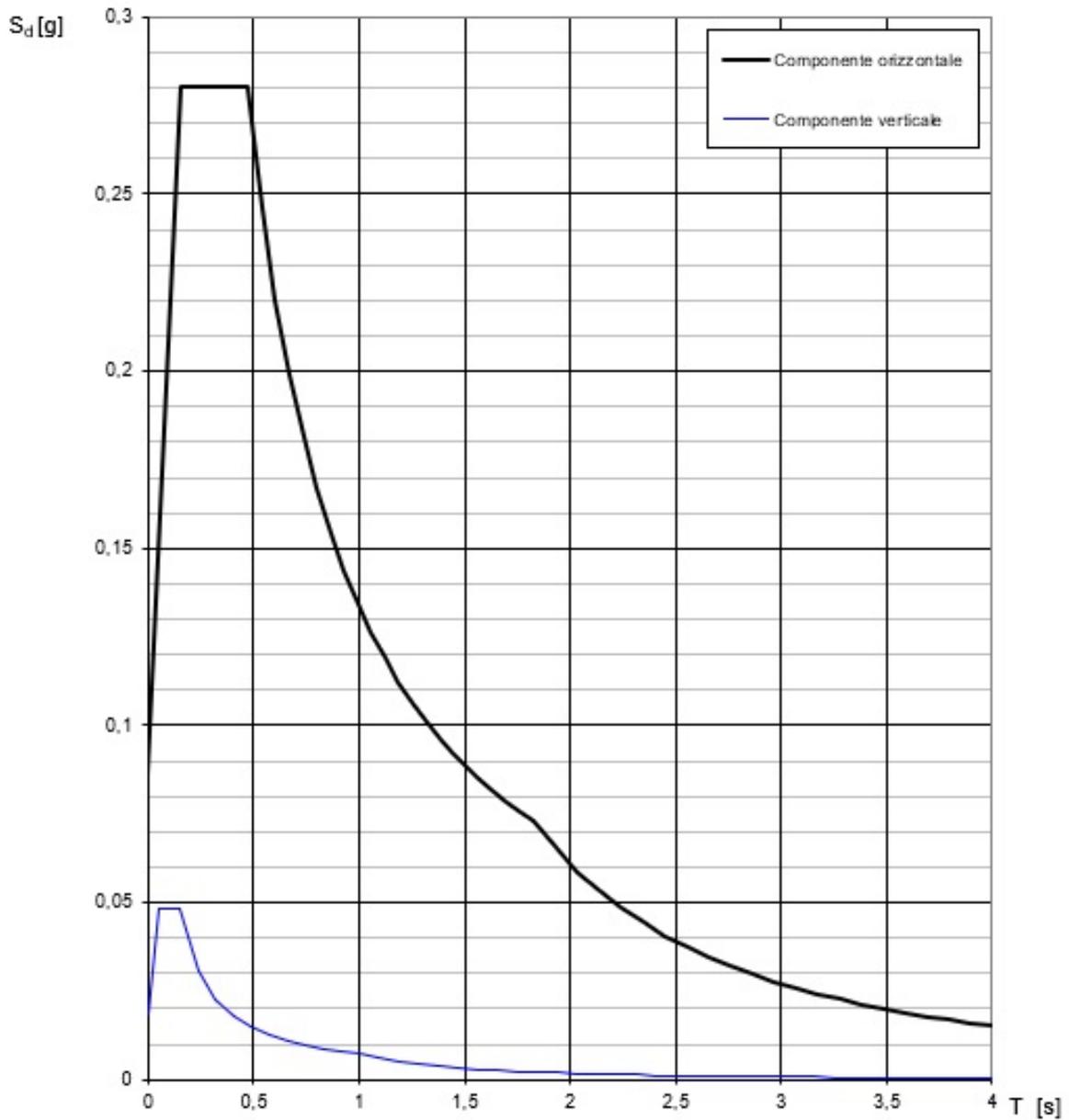


Figura 7.12 – Spettri di risposta orizzontali e verticali allo SLV

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|-------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA DOCUMENTO D 26 CL SL.0200 001 | REV. A | FOGLIO 27 DI 55 |

7.8.1 Forze sismiche agenti sulla struttura

Combinazione sismica: $G_1 + G_2 + \psi_{21} \times Qk_1$

Dalle indicazioni precedentemente riportate, considerando uno spessore del cassettone di 0,60 m, si ottiene un peso di soletta analogo a quello dei piedritti pari 15 kN/m, pertanto si avrà:

Massa associata al peso proprio: $G_1 = 15 \text{ kN/m}$

Massa associata al carico permanente: $G_2 = 14,4 \text{ kN/m}$

Massa treno: $Q_k = 82,9 \text{ kN/m}$

Sisma H

Forza orizzontale sulla soletta di copertura:

$$F'_h = (G_1 + G_2 + \psi_{21} \times Qk_1) \times k_h$$

$$F'_h = (15 + 14,4 + 0,2 \times 82,9) \times 0,086 = 3,95 \text{ kN/m}$$

Forza orizzontale sui piedritti:

$$F'_h = (G_1 + G_2 + \psi_{21} \times Qk_1) \times k_h$$

$$F'_h = 15 \times 0,086 = 1,29 \text{ kN/m}$$

SismaV

Forza verticale sulla soletta di copertura:

$$F'_h = (G_1 + G_2 + \psi_{21} \times Qk_1) \times k_v$$

$$F'_h = (15 + 14,4 + 0,2 \times 82,9) \times 0,043 = 1,97 \text{ kN/m}$$

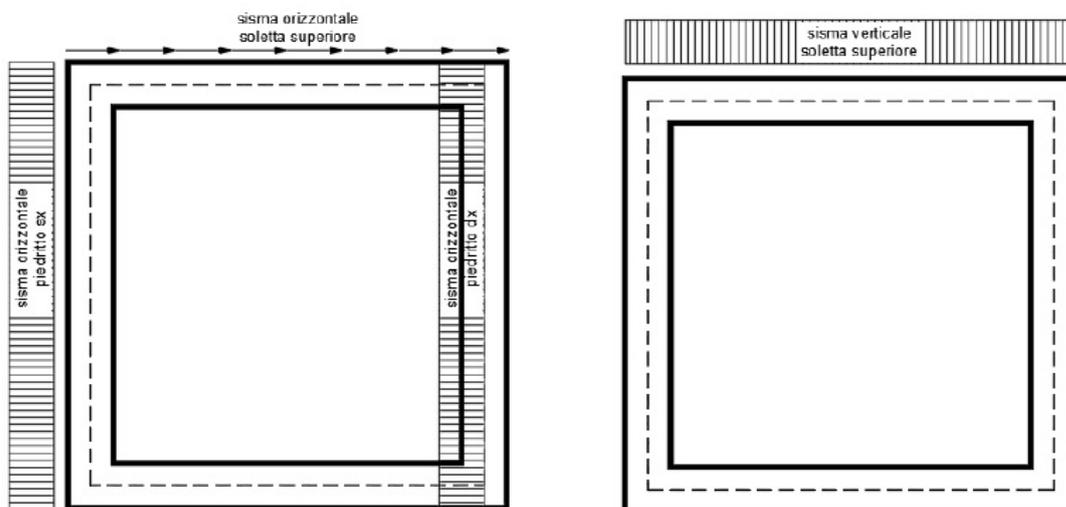


Figura 7.13 - Forze sismiche agenti sulla struttura



PROGETTO DEFINITIVO

SOTTOVIA

SL02 – VIA LEOPARDI

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE

| PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|------------|------|----------|
| IV0H | 02 | D 26 CL | SL0200 001 | A | 28 DI 55 |

7.8.2 Spinta sismica del terreno (SPSDX, SPSSX)

Le spinte delle terre potranno essere determinate secondo la teoria di Wood, secondo la quale la risultante dell'incremento di spinta per effetto del sisma su una parete di altezza H viene determinato con la seguente espressione:

$$\Delta P_d = S_{ag}/g \times \gamma \times h_{str}^2$$

$$\Delta P_d = 0,086 \times 20 \times 4,20^2 = 30,3 \text{ kN/m}^2$$

Tale risultante, applicata ad un'altezza pari ad H/2, sarà considerata agente su uno solo dei piedritti dell'opera.

Essendo ΔP_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:

$$\Delta P = (a_g/g) \times S \times \gamma \times h_{tot}$$

$$\Delta P = 0,086 \times 20 \times 4,20 = 7,2 \text{ kN/m}$$

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL.0200 001 | REV. A |

8 COMBINAZIONI DI CARICO

Per le verifiche nei confronti dei diversi stati limite si adottano le combinazioni delle azioni tratte dal § 2.5.3 NTC 2018:

- Combinazione fondamentale SLU:
 $\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3}..$
- Combinazione caratteristica (rara):
 $G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$
- Combinazione frequente:
 $G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$
- Combinazione quasi permanente:
 $G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$
- Combinazione sismica:
 $E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$

Gli effetti dei carichi verticali dovuti alla presenza dei convogli vengono sempre combinati con altre azioni derivanti dal traffico ferroviario, adottando i coefficienti presenti alla Tabella 5.2.IV delle NTC 2018.

Tab. 5.2.IV - Valutazione dei carichi da traffico

| TIPO DI CARICO | Azioni verticali | | Azioni orizzontali | | | Commenti |
|----------------|----------------------|---------------|------------------------|---------------|---------------|-------------------------------------|
| | Carico verticale (1) | Treno scarico | Frenatura e avviamento | Centrifuga | Serpeggio | |
| Gruppo 1 (2) | 1,0 | - | 0,5 (0,0) | 1,0 (0,0) | 1,0 (0,0) | massima azione verticale e laterale |
| Gruppo 2 (2) | - | 1,0 | 0,0 | 1,0 (0,0) | 1,0 (0,0) | stabilità laterale |
| Gruppo 3 (2) | 1,0 (0,5) | - | 1,0 | 0,5 (0,0) | 0,5 (0,0) | massima azione longitudinale |
| Gruppo 4 | 0,8 (0,6;0,4) | - | 0,8 (0,6;0,4) | 0,8 (0,6;0,4) | 0,8 (0,6;0,4) | Fessurazione |

Figura 8.1 - Tabella di valutazione dei carichi da traffico

In particolare, per ogni gruppo di carico viene individuata un'azione dominante che verrà considerata per intero, per le altre azioni vengono definiti diversi coefficienti di combinazione. Ogni gruppo massimizza una particolare condizione alla quale la struttura dovrà essere verificata.



PROGETTO DEFINITIVO

SOTTOVIA

SL02 – VIA LEOPARDI

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE

PROGETTO LOTTO CODIFICA DOCUMENTO REV. FOGLIO
 IV0H 02 D 26 CL SL.0200 001 A 30 DI 55

Tab. 5.2.V - Coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni di carico agli SLU

| Coefficiente | | | EQU ⁽¹⁾ | A1 | A2 |
|---------------------------------------------------------|-------------|---------------|---------------------|---------------------|------|
| Azioni permanenti | favorevoli | γ_{G1} | 0,90 | 1,00 | 1,00 |
| | sfavorevoli | | 1,10 | 1,35 | 1,00 |
| Azioni permanenti non strutturali ⁽²⁾ | favorevoli | γ_{G2} | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | sfavorevoli | | 1,50 | 1,50 | 1,30 |
| Ballast ⁽³⁾ | favorevoli | γ_B | 0,90 | 1,00 | 1,00 |
| | sfavorevoli | | 1,50 | 1,50 | 1,30 |
| Azioni variabili da traffico ⁽⁴⁾ | favorevoli | γ_Q | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | sfavorevoli | | 1,45 | 1,45 | 1,25 |
| Azioni variabili | favorevoli | γ_{Qi} | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | sfavorevoli | | 1,50 | 1,50 | 1,30 |
| Precompressione | favorevole | γ_P | 0,90 | 1,00 | 1,00 |
| | sfavorevole | | 1,00 ⁽⁵⁾ | 1,00 ⁽⁶⁾ | 1,00 |
| Ritiro, viscosità e cedimenti non imposti appositamente | favorevole | γ_{Ce} | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | sfavorevole | d | 1,20 | 1,20 | 1,00 |

Figura 8.2 - Tabella coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni di carico agli SLU

Tab. 5.2.VI - Coefficienti di combinazione Ψ delle azioni

| Azioni | | Ψ_0 | Ψ_1 | Ψ_2 |
|------------------|---------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|----------|
| Azioni singole | Carico sul rilevato a tergo delle spalle | 0,80 | 0,50 | 0,0 |
| da traffico | Azioni aerodinamiche generate dal transito dei convogli | 0,80 | 0,50 | 0,0 |
| Gruppi di carico | g_{r1} | 0,80 ⁽²⁾ | 0,80 ⁽³⁾ | 0,0 |
| | g_{r2} | 0,80 ⁽²⁾ | 0,80 ⁽³⁾ | - |
| | g_{r3} | 0,80 ⁽²⁾ | 0,80 ⁽³⁾ | 0,0 |
| | g_{r4} | 1,00 | 1,00 ⁽³⁾ | 0,0 |
| Azioni del vento | F_{Wk} | 0,60 | 0,50 | 0,0 |
| Azioni da neve | in fase di esecuzione | 0,80 | 0,0 | 0,0 |
| | SLU e SLE | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Azioni termiche | T_k | 0,60 | 0,60 | 0,50 |

Figura 8.3 - Tabella coefficienti di combinazione delle azioni

Per i diversi stati limite considerati si ottiene quindi:

Combinazione Fondamentale:

| Combinazioni di carico SLU (non sismiche) | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------|------------|-------------|------------|-------|-------|------|---------|---------|---------|-------|---------|--------|
| | PPSTR (G1) | PPNSTR (G2) | G2 Soletta | SPTDX | SPTSX | LM71 | SPACCDX | SPACCSX | AVV/FRN | Folla | Termica | Ritiro |
| SPTSX 100% | SLU_1 | 1.35 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.45 | 1.45 | 1.45 | 1.45 | 0 | 0.9 |
| | SLU_2 | 1.35 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.45 | 1.45 | 0 | 1.45 | 0 | 0.9 |
| | SLU_3 | 1.35 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0 | 1.45 | 0 | 1.45 | 1.45 | 0.9 |
| | SLU_4 | 1.35 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.45 | 0 | 1.45 | 1.45 | 0 | 0.9 |
| SPTSX 100% | SLU_5 | 1.35 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.9 | 1.45 | 1.45 | 1.45 | 1.45 | 0 | 0.9 |
| | SLU_6 | 1.35 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.9 | 1.45 | 1.45 | 0 | 1.45 | 0 | 0.9 |
| | SLU_7 | 1.35 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.9 | 0 | 1.45 | 0 | 1.45 | 1.45 | 0.9 |
| | SLU_8 | 1.35 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.9 | 1.45 | 0 | 1.45 | 1.45 | 0 | 0.9 |
| SPTSX 60% | SLU_9 | 1.35 | 1.5 | 1.5 | 0.9 | 1.5 | 1.45 | 1.45 | 1.45 | 1.45 | 0 | 0.9 |
| | SLU_10 | 1.35 | 1.5 | 1.5 | 0.9 | 1.5 | 1.45 | 1.45 | 0 | 1.45 | 0 | 0.9 |
| | SLU_11 | 1.35 | 1.5 | 1.5 | 0.9 | 1.5 | 1.45 | 1.45 | 0 | 1.45 | 1.45 | 0.9 |
| | SLU_12 | 1.35 | 1.5 | 1.5 | 0.9 | 1.5 | 1.45 | 0 | 1.45 | 1.45 | 0 | 0.9 |



PROGETTO DEFINITIVO
SOTTOVIA
SL02 – VIA LEOPARDI

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE

PROGETTO LOTTO CODIFICA DOCUMENTO REV. FOGLIO
 IV0H 02 D 26 CL SL0200 001 A 31 DI 55

Combinazione Rara:

| Combinazioni di carico SLE Rara | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------|------------|-------------|------------|-------|-------|------|---------|---------|---------|-------|---------|--------|---|
| | | PPSTR (G1) | PPNSTR (G2) | G2 Soletta | SPTDX | SPTSX | LM71 | SPACCDX | SPACCSX | AVV/FRN | Folla | Termica | Ritiro | |
| SPTSX 100% SPTDX 100% | SLE_R1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 1.45 | 0 | 0.5 | 1 |
| | SLE_R2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.8 | 0.8 | 0 | 1.45 | 0 | 0.5 | 1 |
| | SLE_R3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0.8 | 0 | 1.45 | 0.8 | 0.5 | 1 |
| | SLE_R4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.8 | 0 | 0.8 | 1.45 | 0 | 0.5 | 1 |
| SPTSX 100% SPTDX 60% | SLE_R5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.6 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 1.45 | 0 | 0.5 | 1 |
| | SLE_R6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.6 | 0.8 | 0.8 | 0 | 1.45 | 0 | 0.5 | 1 |
| | SLE_R7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.6 | 0 | 0.8 | 0 | 1.45 | 0.8 | 0.5 | 1 |
| | SLE_R8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.6 | 0.8 | 0 | 0.8 | 1.45 | 0 | 0.5 | 1 |
| SPTSX 60% SPTDX 100% | SLE_R9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.6 | 1 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 1.45 | 0 | 0.5 | 1 |
| | SLE_R10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.6 | 1 | 0.8 | 0.8 | 0 | 1.45 | 0 | 0.5 | 1 |
| | SLE_R11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.6 | 1 | 0 | 0.8 | 0 | 1.45 | 0.8 | 0.5 | 1 |
| | SLE_R12 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.6 | 1 | 0.8 | 0 | 0.8 | 1.45 | 0 | 0.5 | 1 |

Combinazione Quasi Permanente:

| Combinazioni di carico SLE Quasi Permanente | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------------|----------|------------|-------------|------------|-------|-------|------|---------|---------|---------|-------|---------|--------|---|
| | | PPSTR (G1) | PPNSTR (G2) | G2 Soletta | SPTDX | SPTSX | LM71 | SPACCDX | SPACCSX | AVV/FRN | Folla | Termica | Ritiro | |
| SPTSX 100% SPTDX 100% | SLE_QP1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.5 | 1 |
| | SLE_QP2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0 | 0.5 | 1 |
| | SLE_QP3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.5 | 1 |
| | SLE_QP4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.5 | 1 |
| SPTSX 100% SPTDX 60% | SLE_QP5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.6 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.5 | 1 |
| | SLE_QP6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.6 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0 | 0.5 | 1 |
| | SLE_QP7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.6 | 0 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.5 | 1 |
| | SLE_QP8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.6 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.5 | 1 |
| SPTSX 60% SPTDX 100% | SLE_QP9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.6 | 1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.5 | 1 |
| | SLE_QP10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.6 | 1 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0 | 0.5 | 1 |
| | SLE_QP11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.6 | 1 | 0 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.5 | 1 |
| | SLE_QP12 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.6 | 1 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.5 | 1 |

Combinazione Sismica:

| Combinazioni di carico SLU (sismiche) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------------|-------------|------------|-------|-------|------|---------|---------|---------|-------|---------|--------|---------|---------|-------|-------|-----|
| | PPSTR (G1) | PPNSTR (G2) | G2 Soletta | SPTDX | SPTSX | LM71 | SPACCDX | SPACCSX | AVV/FRN | Folla | Termica | Ritiro | Sisma H | Sisma V | SPSDX | SPSSX | |
| SLV_H1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0 | -0.5 | 0 | 1 | -0.3 | 0 | 1 |
| SLV_H2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0 | -0.5 | 0 | 1 | -0.3 | 0 | 1 |
| SLV_H3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0 | -0.5 | 0 | 1 | -0.3 | 1 | 0 |
| SLV_H4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0 | -0.5 | 0 | 1 | -0.3 | 1 | 0 |
| SLV_H5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | -0.5 | 0 | 1 | -0.3 | 0 | 1 |
| SLV_H6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | -0.5 | 0 | 1 | -0.3 | 0 | 1 |
| SLV_H7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | -0.5 | 0 | 1 | -0.3 | 1 | 0 |
| SLV_H8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | -0.5 | 0 | 1 | -0.3 | 1 | 0 |
| SLV_V1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0 | -0.5 | 0 | -0.3 | 1 | 0 | 0.3 |
| SLV_V2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0 | -0.5 | 0 | -0.3 | 1 | 0 | 0.3 |
| SLV_V3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0 | -0.5 | 0 | -0.3 | 1 | 0.3 | 0 |
| SLV_V4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0 | -0.5 | 0 | -0.3 | 1 | 0.3 | 0 |
| SLV_V5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | -0.5 | 0 | -0.3 | 1 | 0 | 0.3 |
| SLV_V6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | -0.5 | 0 | -0.3 | 1 | 0 | 0.3 |
| SLV_V7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | -0.5 | 0 | -0.3 | 1 | 0.3 | 0 |
| SLV_V8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | -0.5 | 0 | -0.3 | 1 | 0.3 | 0 |

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|-------------------------|-----------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL0200 001 | REV. A |

9 SOLLECITAZIONI

Di seguito si riportano alcune immagini che illustrano la distribuzione delle sollecitazioni negli elementi della struttura corrispondente ai diversi involuipi per le diverse combinazioni di carico considerate.

9.1 Combinazione SLU

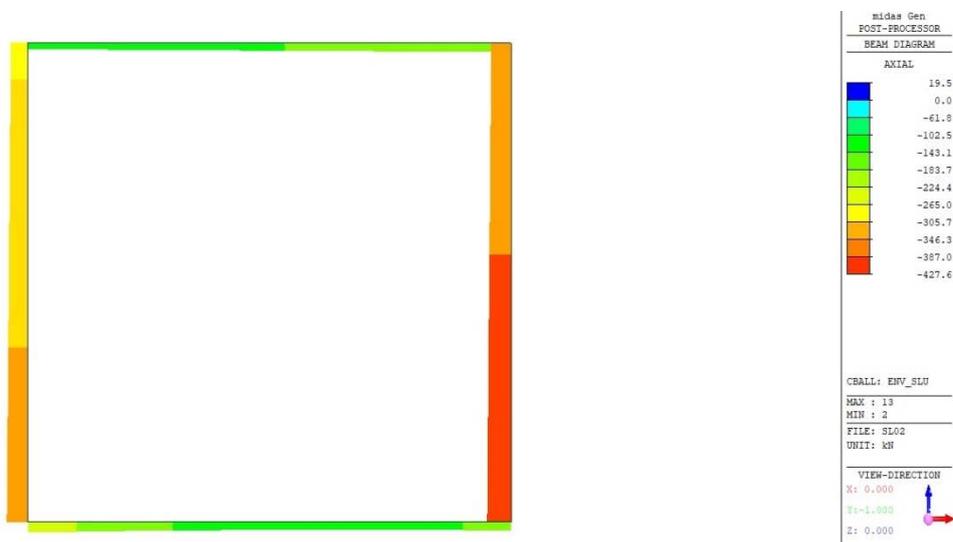


Figura 9.1 - Combinazione SLU – Involuppo valori di Sforzo Normale N

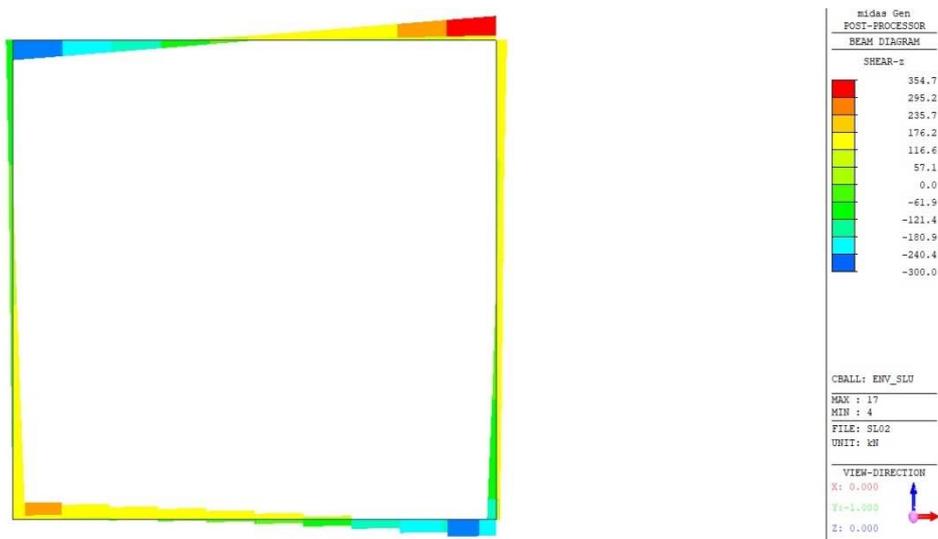


Figura 9.2 - Combinazione SLU – Involuppo valori di Taglio T

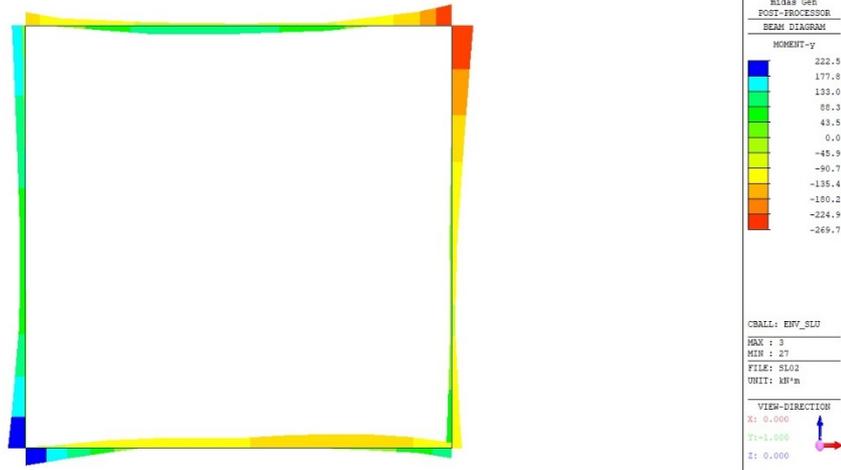


Figura 9.3 - Combinazione SLU – Involuppo Valori di Momento Flettente M

9.2 Combinazione SLV

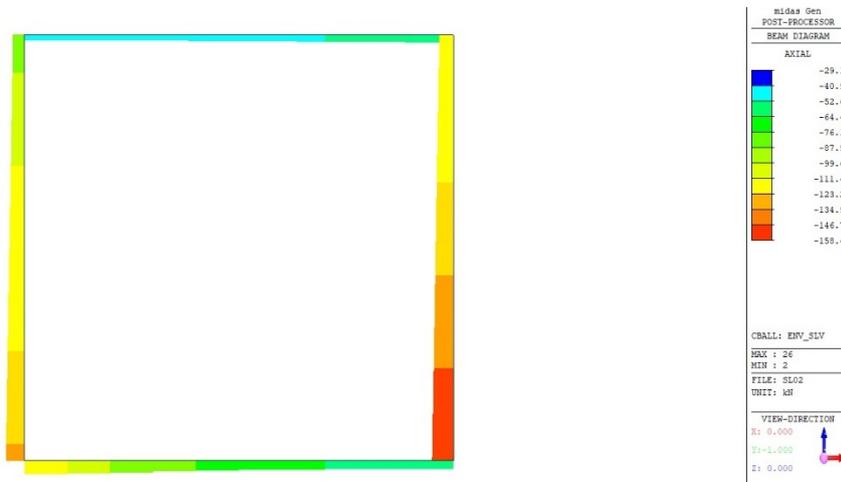


Figura 9.4 - Combinazione SLV – Involuppo valori di Sforzo Normale N

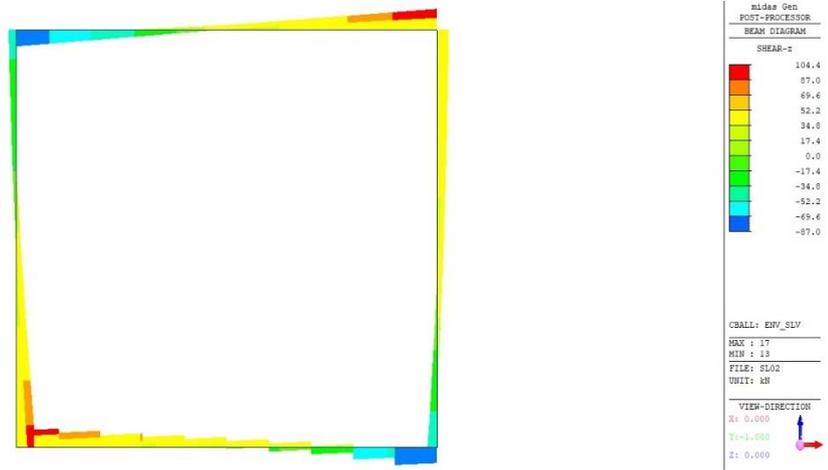


Figura 9.5 - Combinazione SLV – Involuppo valori di Taglio T

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL.0200 001 | REV. A |

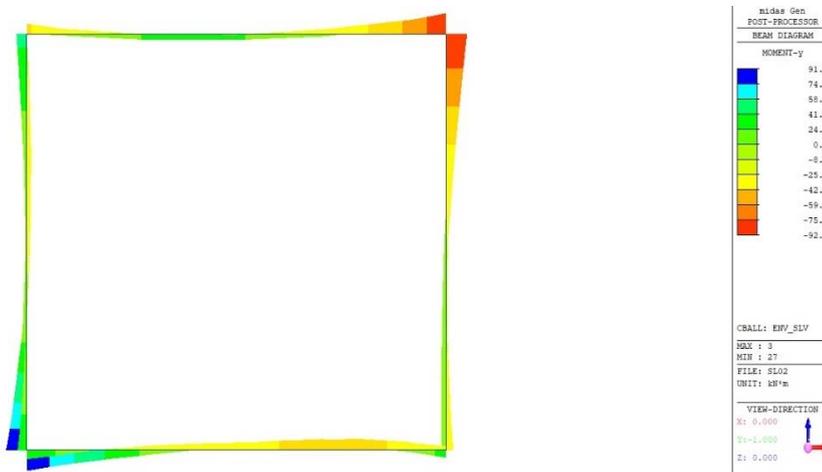


Figura 9.6 - Combinazione SLV – Inviluppo Valori di Momento Flettente M

9.3 Combinazione SLE Rara

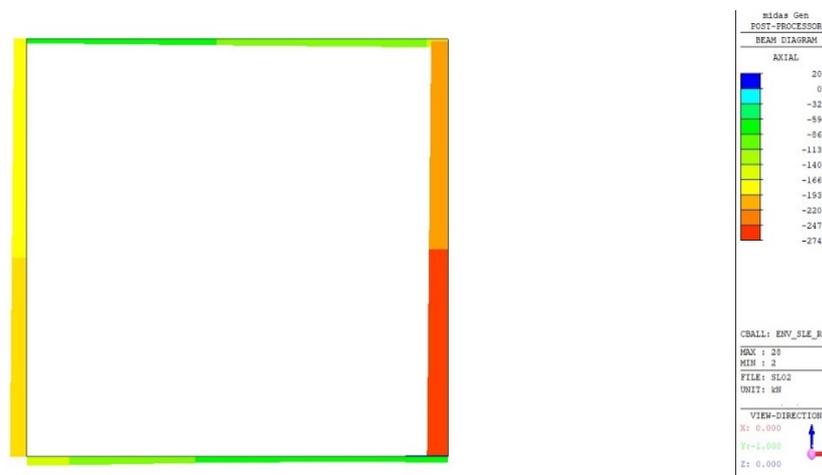


Figura 9.7 - Combinazione SLE Rara – Inviluppo valori di Sforzo Normale N

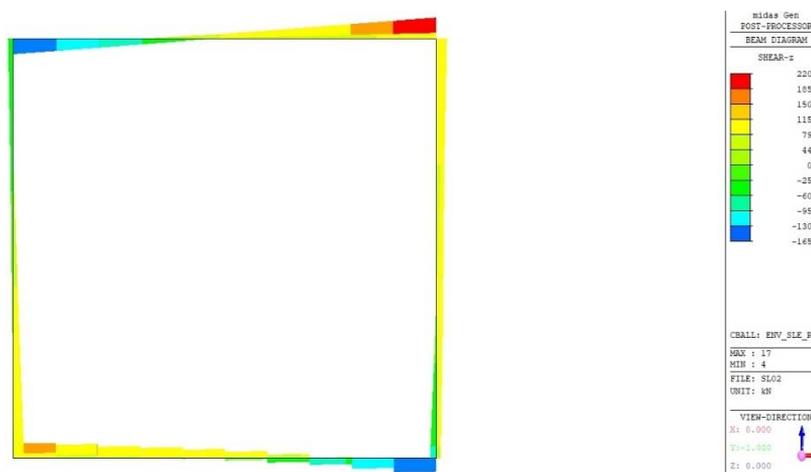


Figura 9.8 - Combinazione SLE Rara – Inviluppo valori di Taglio T

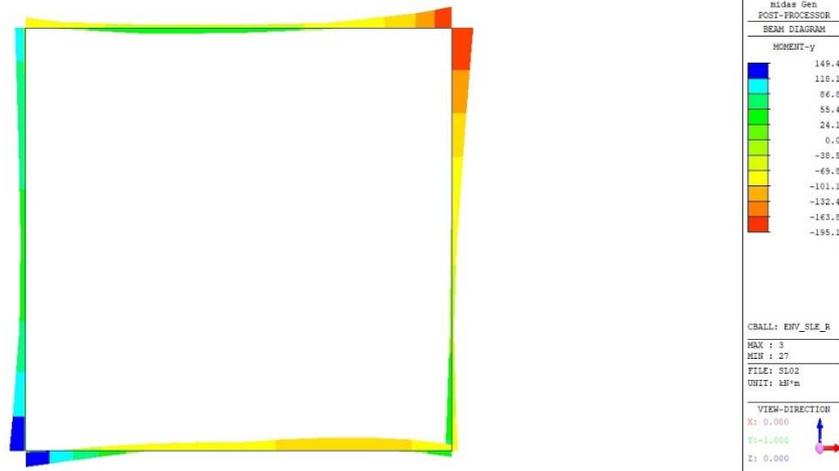


Figura 9.9 - Combinazione SLE Rara – Involuppo Valori di Momento Flettente M

9.4 Combinazione SLE Quasi Permanente

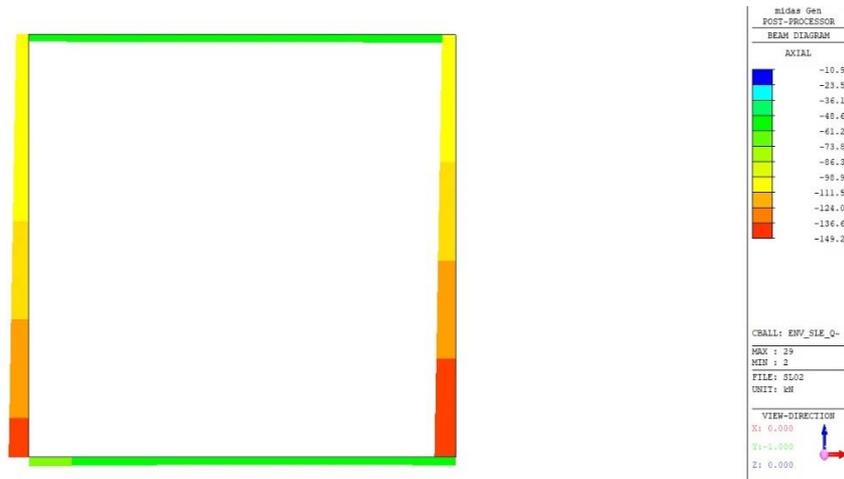


Figura 9.10 - Combinazione SLE Quasi Permanente – Involuppo valori di Sforzo Normale N

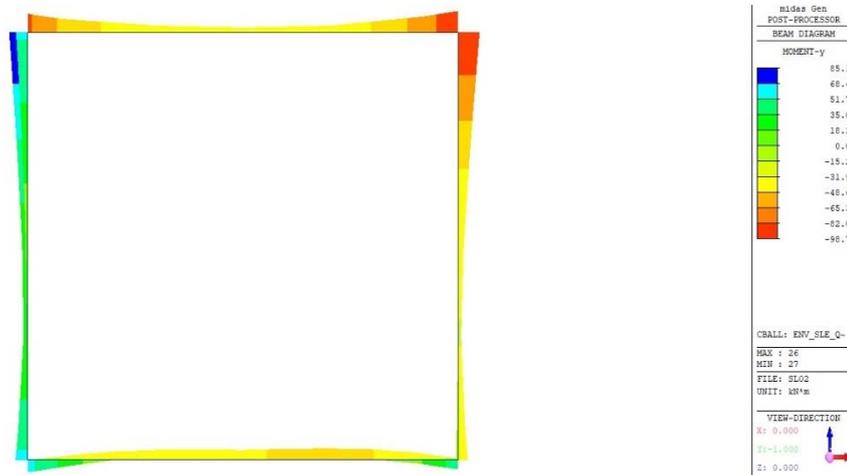


Figura 9.11 – Combinazione SLE Quasi Permanente– Involuppo Valori di Momento Flettente M

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL.0200 001 | REV. A |

10 VERIFICHE STRUTTURALI

10.1 Metodi di verifica

In accordo con le NTC 2018 e il Manuale di Progettazione delle Opere Civili le verifiche si ritengono soddisfatte quando, per ogni elemento, il valore di progetto di ciascuna sollecitazione (E_d) risulta inferiore al corrispondente valore della resistenza di progetto (R_d).

Le caratteristiche di resistenza e i criteri di verifica adottati differiscono a seconda del meccanismo indagato, funzione dei diversi stati limite considerati.

In particolare, nelle NTC18 vengono individuati due tipologie di elementi/meccanismi resistenti strutturali:

- Elementi resistenti duttili: elementi inflessi con o senza sforzo normale;
- Elementi resistenti fragili: elementi sollecitati a taglio.

Si riporta la rappresentazione delle sezioni dove vengono eseguite le verifiche a pressoflessione e a taglio.

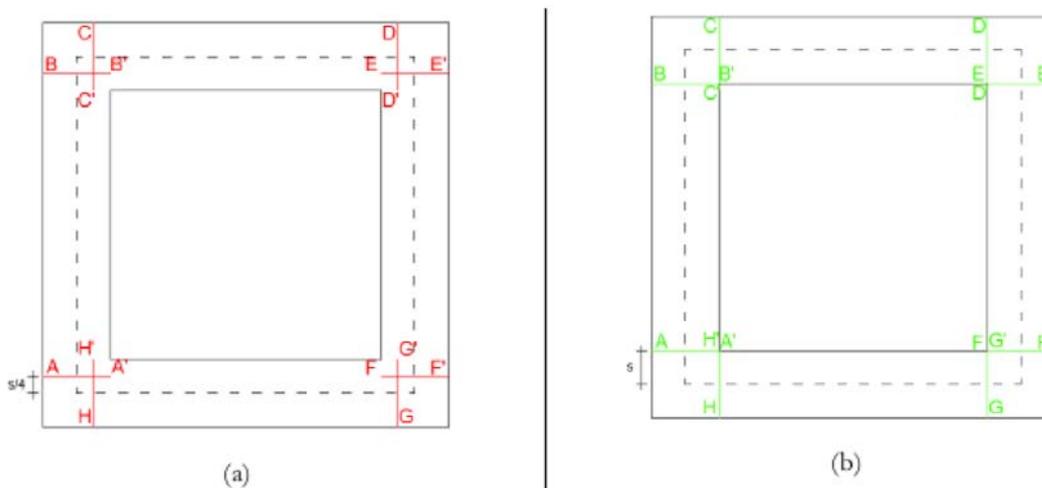


Figura 10.1 - Sezioni di verifica per pressoflessione (a) e taglio (b)

Le verifiche vengono svolte, per tutti gli elementi strutturali, cioè la soletta superiore, i piedritti e soletta inferiore, considerando agenti i carichi permanenti verticali, la spinta sui piedritti (statica e dinamica) del rilevato ferroviario e il carico ferroviario (statico e dinamico).

Nei paragrafi seguenti si riportano le verifiche delle sezioni degli elementi strutturali.

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA DOCUMENTO D 26 CL SL0200 001 | REV. A | FOGLIO 37 DI 55 |

10.2 Verifica soletta superiore

Sollecitazioni massime SLU soletta superiore sezione C, D:

| | | | |
|----|------------------------------|----|--------------------------------|
| C: | $N_{Ed} = 73,9 \text{ kN}$ | D: | $N_{Ed} = 118,1 \text{ kN}$ |
| | $T_{Ed} = -251,4 \text{ kN}$ | | $T_{Ed} = 306,1 \text{ kN}$ |
| | $M_{Ed} = -128 \text{ kN.m}$ | | $M_{Ed} = -218,3 \text{ kN.m}$ |

10.2.1 Verifica SLU a Flessione

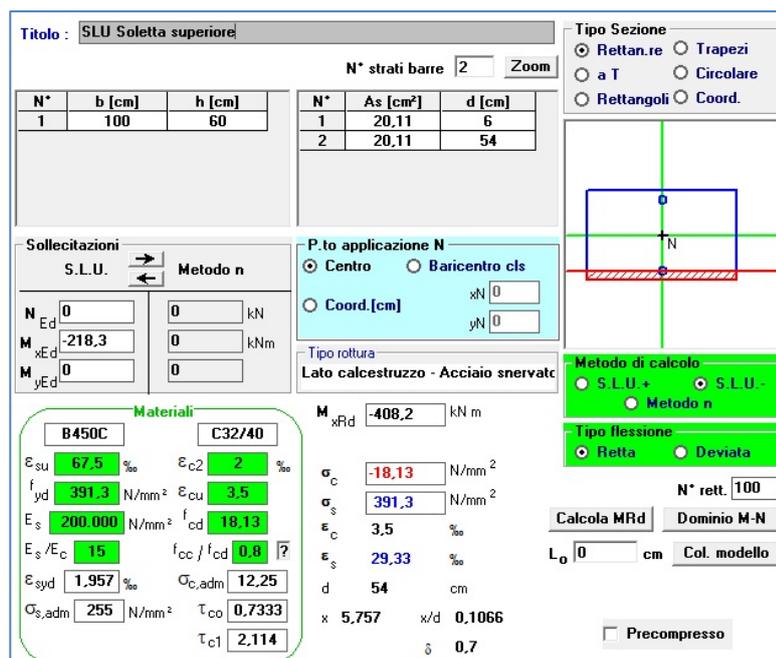
Secondo quanto specificato dalla normativa, la verifica di resistenza a flessione nei confronti delle sollecitazioni determinate dall'analisi globale condotta sulla struttura si conduce controllando la seguente disuguaglianza: $M_{Ed} \leq M_{Rd}$.

Nello specifico, nel caso in esame, considerando di predisporre la medesima armatura inferiormente e superiormente:

$$A_{s_{min}} = \frac{M_{max}}{0,9 \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{218,3 \cdot 10^6}{0,9 \cdot 540 \cdot 391,3} = 1147,91 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Si decide quindi, a favore di sicurezza, di inserire armatura **1+1Ø16 a passo 10 cm**.

Il calcolo del momento resistente si è svolto mediante l'utilizzo del software VCASlu che ha validato il risultato analitico considerando le caratteristiche meccaniche precedentemente descritte. L'analisi è stata condotta trascurando, a favore di sicurezza, il contributo dello sforzo normale.



Titolo: SLU Soletta superiore

N° strati barre: 2

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1 | 100 | 60 | 1 | 20,11 | 6 |
| | | | 2 | 20,11 | 54 |

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N_{Ed} 0 kN
 M_{xEd} -218,3 kNm
 M_{yEd} 0 kNm

P.to applicazione N
 Centro
 Coord. [cm] xN 0, yN 0

Materiali
 B450C: E_{su} 67,5‰, f_{yd} 391,3 N/mm², E_s 200.000 N/mm², E_s/E_c 15, E_{syd} 1.957‰, $\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm²
 C32/40: E_{c2} 2‰, E_{cu} 3,5, f_{cd} 18,13, $\sigma_{c,adm}$ 12,25, τ_{co} 0,7333, τ_{c1} 2,114

Calcolo
 Metodo di calcolo: S.L.U. - Metodo n
 Tipo flessione: Retta
 N° rett. 100
 Calcola MRd, Dominio M-N, L_0 0 cm, Col. modello

Calcoli finali
 M_{xRd} -408,2 kNm
 σ_c -18,13 N/mm²
 σ_s 391,3 N/mm²
 ϵ_c 3,5‰
 ϵ_s 29,33‰
 d 54 cm
 x 5,757, x/d 0,1066
 delta 0,7

Figura 10.2 – Combinazione SLU - Momento massimo flettente

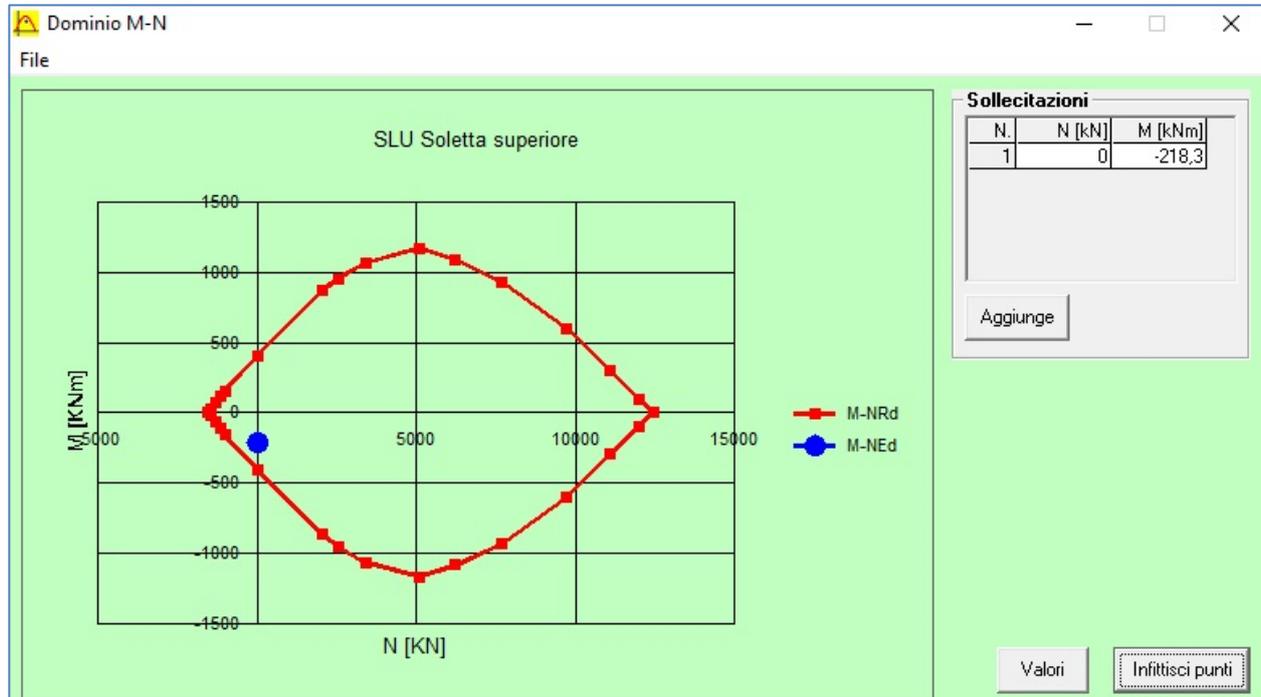


Figura 10.3 - Dominio di resistenza a flessione – Massimo momento flettente – FS = 1,9

10.2.2 Verifica SLU a Taglio

Secondo quanto specificato dalla normativa, la verifica di resistenza a taglio nei confronti delle sollecitazioni determinate dall'analisi globale condotta sulla struttura si conduce controllando la seguente disuguaglianza: $V_{Ed} \leq V_{Rd}$.

• Caratteristiche della sezione

| | | | | |
|----------------------|----------------------------|------------------------------|----------------|------------------------|
| $b_w = 1000$ | mm larghezza | $f_{yk} = 450$ | MPa | resist. caratteristica |
| $h = 600$ | mm altezza | $\gamma_s = 1,15$ | | coeff. sicurezza |
| $c = 60$ | mm copriferro | $f_{yd} = 391,3$ | MPa | resist. di calcolo |
| $f_{ck} = 32$ | MPa resist. caratteristica | Armatura longitudinale tesa: | | |
| $\gamma_c = 1,50$ | coeff. sicurezza | $A_{sl,1} = 10$ | $\emptyset 16$ | $= 20,11 \text{ cm}^2$ |
| $\alpha_{cc} = 0,85$ | coeff. riduttivo | $A_{sl,2} = 0$ | $\emptyset 0$ | $= 0,00 \text{ cm}^2$ |
| $d = 540$ | mm altezza utile | $A_{sl,3} = 0$ | $\emptyset 0$ | $= 0,00 \text{ cm}^2$ |
| $f_{cd} = 18,13$ | MPa resist. di calcolo | | | $20,11 \text{ cm}^2$ |

• Sollecitazioni (compressione<0, trazione>0, taglio in valore assoluto)

| | | | |
|------------|--------|------------|----------|
| $N_{ed} =$ | 0,0 kN | $V_{ed} =$ | 306,1 kN |
|------------|--------|------------|----------|



PROGETTO DEFINITIVO

SOTTOVIA

SL02 – VIA LEOPARDI

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE

| PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|-------------|------|----------|
| IV0H | 02 | D 26 CL | SL.0200 001 | A | 39 DI 55 |

• Elementi senza armature trasversali resistenti a taglio

$$k = 1 + (200/d)^{1/2} < 2 \quad k = 1,609 < 2$$

$$v_{\min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} \quad v_{\min} = 0,404$$

$$\rho_1 = A_{sl}/(b_w \times d) < 0,02 \quad \rho_1 = 0,004 < 0,02$$

$$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c < 0,2 f_{cd} \quad \sigma_{cp} = 0,00 \text{ MPa} < 0,2 f_{cd}$$

$$V_{Rd} = (0,18 \times k \times (100 \times \rho_1 \times f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0,15 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d > (v_{\min} + 0,15 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d$$

$$V_{Rd} = 238,1 \text{ kN}; \quad (\text{con } (v_{\min} + 0,15 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d = 218,1 \text{ kN})$$

$$V_{Rd} = 238,1 \text{ kN} \quad \text{valore di calcolo}$$

la sezione NON è verificata in assenza di armature per il taglio

La sezione non risulta soddisfatta, pertanto risulta necessario prevedere un'apposita armatura di resistenza a taglio. Si prevede quindi di predisporre degli **spilli Ø8 a passo 20 cm in entrambe le direzioni, corrispondenti a staffe Ø8 con 5 bracci a passo 20cm.**

• Elementi con armature trasversali resistenti a taglio

$$\theta = 35,0 \quad \circ \quad \text{inclinaz. bielle cls} \quad \text{angolo ammissibile}$$

$$\alpha = 90,0 \quad \circ \quad \text{inclinaz. staffe}$$

Armatura a taglio (staffatura):

$$A_{sw}/s = \text{staffe } \varnothing 8 \text{ mm con n}^\circ \text{ bracci (trasv)} \quad 5 \quad \text{passo } 20 \text{ cm} = 0,126 \text{ cm}^2/\text{cm}$$

$$V_{Rsd} = 0,90 \times d \times (A_{sw}/s) \times f_{yd} \times (\cotg\alpha + \cotg\theta) \times \text{sen}\alpha \quad V_{Rsd} = 341,3 \text{ kN}$$

$$f_{cd} = 9,07 \quad \text{MPa resist. di calcolo ridotta}$$

$$\alpha_c = 1,000 \quad \text{coeff. maggiorativo}$$

$$V_{Rcd} = 0,90 \times d \times b_w \times \alpha_c \times f_{cd} \times (\cotg\alpha + \cotg\theta) / (1 + \cotg^2\alpha) \quad V_{Rcd} = 2070,4 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = \min(V_{Rcd}, V_{Rsd}) \quad V_{Rd} = 341,3 > 306,1 \text{ kN} \quad \text{c.s.} = 1,1$$

la sezione armata a taglio risulta verificata.

Le verifiche a flessione e a taglio per la soletta superiore risultano soddisfatte con un fattore di sicurezza FS rispettivamente pari a 1,9 e 1,1.

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA DOCUMENTO D 26 CL SL0200 001 | REV. A | FOGLIO 40 DI 55 |

10.2.3 Verifica SLE - Tensione

Si riportano di seguito le verifiche effettuate per le sezioni più sollecitate tenendo conto che i limiti imposti per il controllo della tensione agli stati limite di esercizio sono quelli definiti nel MdP.

Combinazione Rara

- Calcestruzzo Compresso → $\sigma_c = 0,55 \times f_{ck} = 17,60 \text{ N/mm}^2$
- Acciaio Teso → $\sigma_s = 0,75 \times f_{yk} = 337,5 \text{ N/mm}^2$

Sollecitazioni massime SLE Rara soletta superiore sezione C, D:

| | | | |
|----|-------------------------------|----|--------------------------------|
| C: | $N_{Ed} = 40,8 \text{ kN}$ | D: | $N_{Ed} = 85,6 \text{ kN}$ |
| | $M_{Ed} = -72,8 \text{ kN.m}$ | | $M_{Ed} = -163,1 \text{ kN.m}$ |

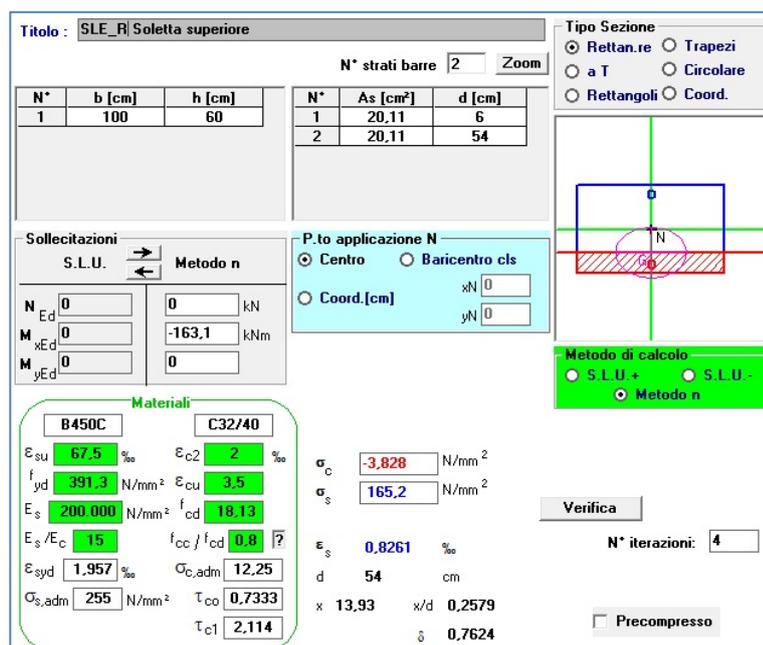
Combinazione Quasi Permanente

- Calcestruzzo Compresso → $\sigma_c = 0,40 \times f_{ck} = 12,80 \text{ N/mm}^2$

Sollecitazioni massime SLE QP soletta superiore sezione C, D:

| | | | |
|----|-------------------------------|----|-----------------------------|
| C: | $N_{Ed} = 53,3 \text{ kN}$ | D: | $N_{Ed} = 59,5 \text{ kN}$ |
| | $M_{Ed} = -72,5 \text{ kN.m}$ | | $M_{Ed} = -85 \text{ kN.m}$ |

Combinazione Rara



Titolo: SLE_R Soletta superiore

N° strati barre: 2 Zoom

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1 | 100 | 60 | 1 | 20.11 | 6 |
| | | | 2 | 20.11 | 54 |

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

Sollecitazioni: S.L.U. Metodo n

N_{Ed} 0 kN
 M_{xEd} 0 kNm
 M_{yEd} 0 kNm

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

Materiali:
B450C **C32/40**
 ϵ_{su} 67.5 ‰ ϵ_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391.3 N/mm² ϵ_{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
 ϵ_{syd} 1.957 ‰ $\sigma_{c,adm}$ 12.25 N/mm²
 $\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm² τ_{co} 0.7333
 τ_{c1} 2.114

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

σ_c -3.828 N/mm²
 σ_s 165.2 N/mm²

Verifica:
 ϵ_s 0.8261 ‰
 d 54 cm
 x 13.93 x/d 0.2579
 δ 0.7624
 N° iterazioni: 4
 Precompresso

Figura 10.4 - Controllo di tensione agli SLE della sezione più sollecitata – Combinazione Rara

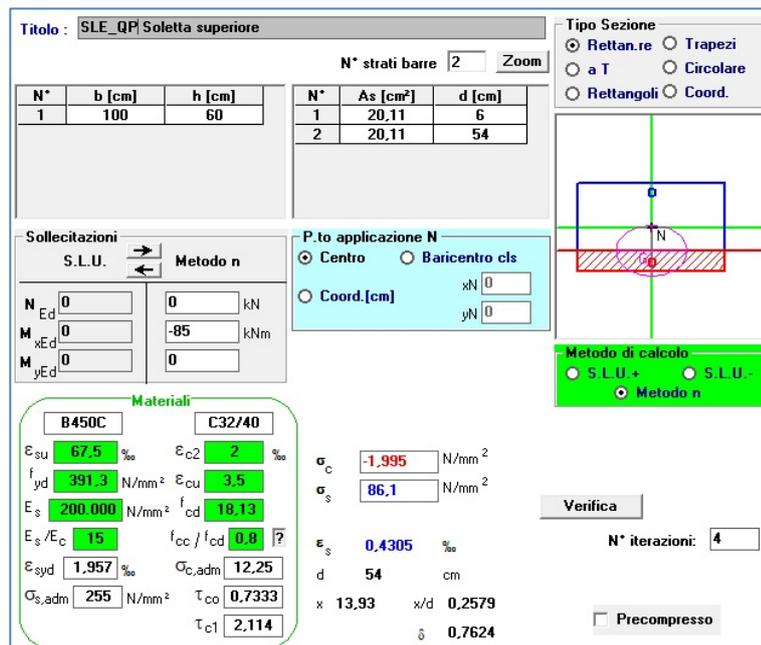
| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL.0200 001 | REV. A |

$$\sigma_s = 165,2 \text{ N/mm}^2 < 337,5 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_c = 3,83 \text{ N/mm}^2 < 17,60 \text{ N/mm}^2.$$

La verifica in combinazione rara pertanto risulta soddisfatta.

Combinazione Quasi Permanente



Titolo: SLE_QP Soletta superiore

N° strati barre: 2

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1 | 100 | 60 | 1 | 20,11 | 6 |
| | | | 2 | 20,11 | 54 |

Sollecitazioni: S.L.U. Metodo n

P.to applicazione N: Centro

Metodo di calcolo: Metodo n

Materiali: B450C, C32/40

Calcoli:
 $\sigma_c = -1,995 \text{ N/mm}^2$
 $\sigma_s = 86,1 \text{ N/mm}^2$
 $\epsilon_s = 0,4305 \text{ ‰}$
 $d = 54 \text{ cm}$
 $x = 13,93$, $x/d = 0,2579$
 $\delta = 0,7624$

Figura 10.5 - Controllo di tensione agli SLE della sezione più sollecitata – Combinazione Quasi Permanente

$$\sigma_s = 86,1 \text{ N/mm}^2 < 337,5 \text{ N/mm}^2;$$

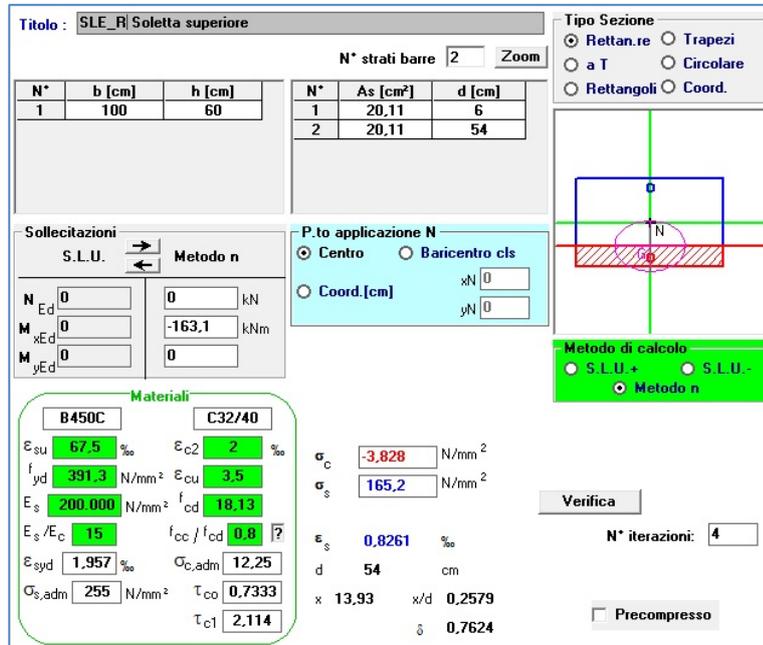
$$\sigma_c = 1,95 \text{ N/mm}^2 < 12,80 \text{ N/mm}^2.$$

La verifica in combinazione quasi permanente pertanto risulta soddisfatta.

10.2.4 Verifica SLE - Fessurazione

Per quanto riguarda la scelta degli stati limite di fessurazione, si fa riferimento a quanto riportato al paragrafo 2.5.1.8.3.2.4 del MdP, il quale impone che per tutte le strutture a permanente contatto con il terreno e per le zone non ispezionabili, come nel caso in esame, il limite da adottare per la verifica sia $\delta_f \leq w_3 = 0,2 \text{ mm}$ in Combinazione Rara. Pertanto:

Combinazione Rara



Titolo: SLE_R| Soletta superiore

N° strati barre: 2

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1 | 100 | 60 | 1 | 20,11 | 6 |
| | | | 2 | 20,11 | 54 |

Sollecitazioni: S.L.U. Metodo n

P.to applicazione N: Centro

Metodo di calcolo: Metodo n

Materiali: B450C, C32/40

Calcoli:
 $\sigma_c = -3,828$ N/mm²
 $\sigma_s = 165,2$ N/mm²
 $\epsilon_s = 0,8261$ ‰
 $\epsilon_{c2} = 2$ ‰
 $\epsilon_{cu} = 3,5$ ‰
 $f_{ctm} = 3,02$ N/mm²
 $f_{cd} = 18,13$ N/mm²
 $\tau_{co} = 0,7333$ N/mm²
 $\tau_{c1} = 2,114$ N/mm²

Verifica: N° iterazioni: 4

Precompresso

Figura 10.6 - Controllo di tensione agli SLE della sezione più sollecitata – Combinazione Rara

Stato Limite di Apertura delle Fessure

Combinazione Rara

| | | |
|------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| σ_s | 165,2 N/mm ² | Tensione nell'armatura tesa valutata nella sezione fessurata in combinazione Rara |
| k_t | 0,4 | 0,4 per carichi di lunga durata, 0,6 per carichi di breve durata |
| f_{ctm} | 3,02 N/mm ² | |
| $h_{c,eff}$ | 150,00 mm | |
| $A_{c,eff}$ | 150000,0 mm ² | Area efficace di calcestruzzo teso attorno all'armatura ($h_{c,eff} \times t_w$) |
| ρ_{eff} | 0,013 | |
| α_e | 6,30 | Rapporto moduli elastici |
| ϵ_{sm} | 0,0005 | Deformazione unitaria media delle barre |
| k_1 | 0,8 | Per barre ad aderenza migliorata |
| k_2 | 0,5 | Caso di flessione |
| k_3 | 3,4 | |
| k_4 | 0,425 | |
| Φ_1 | 16 mm | |
| Φ_2 | 0 mm | |
| Φ_{eq} | 16 mm | |
| $\Delta_{s,max}$ | 223,37 mm | Distanza massima tra le fessure |
| w_3 | 0,20 mm | Armatura poco sensibile |
| $w_{d(r)}$ | 0,18 mm | Valore di calcolo dell'apertura delle fessure |

La verifica in combinazione rara pertanto risulta soddisfatta.

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|-------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA DOCUMENTO D 26 CL SL.0200 001 | REV. A | FOGLIO 43 DI 55 |

10.3 Verifica piedritti

Si riporta, analogamente a quanto fatto per la soletta superiore, le verifiche per i piedritti

Sollecitazioni massime piedritto destro E, F:

| | | | |
|----|--------------------------------|----|--------------------------------|
| E: | $N_{Ed} = 357,7 \text{ kN}$ | F: | $N_{Ed} = 424,6 \text{ kN}$ |
| | $T_{Ed} = 141,1 \text{ kN}$ | | $T_{Ed} = -109,5 \text{ kN}$ |
| | $M_{Ed} = -251,5 \text{ kN.m}$ | | $M_{Ed} = -109,2 \text{ kN.m}$ |

10.3.1 Verifica SLU a Flessione.

Nello specifico, nel caso in esame, considerando di predisporre la medesima armatura inferiormente e superiormente:

$$A_{s_{min}} = \frac{M_{max}}{0,9 \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{251,5 \cdot 10^6}{0,9 \cdot 540 \cdot 391,3} = 1322,5 \text{ mm}^2/m$$

Si decide quindi, cautelativamente, di inserire armatura **1+1Ø16 a passo 10 cm**.

Il calcolo del momento resistente si è svolto mediante l'utilizzo del software VCASlu che ha validato il risultato analitico considerando le caratteristiche meccaniche precedentemente descritte. A favore di sicurezza l'analisi si è svolta considerando agente come sforzo normale solamente il contributo relativo al peso proprio dei piedritti pari a 54 kN (1m x 0,6m x 3,60m x 25kN/m³).

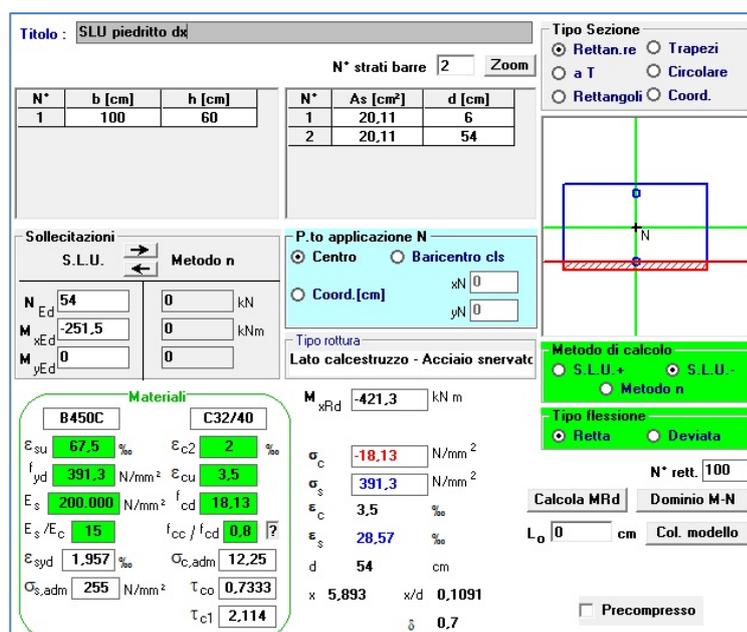


Figura 10.7 – Combinazione SLU - Momento massimo flettente

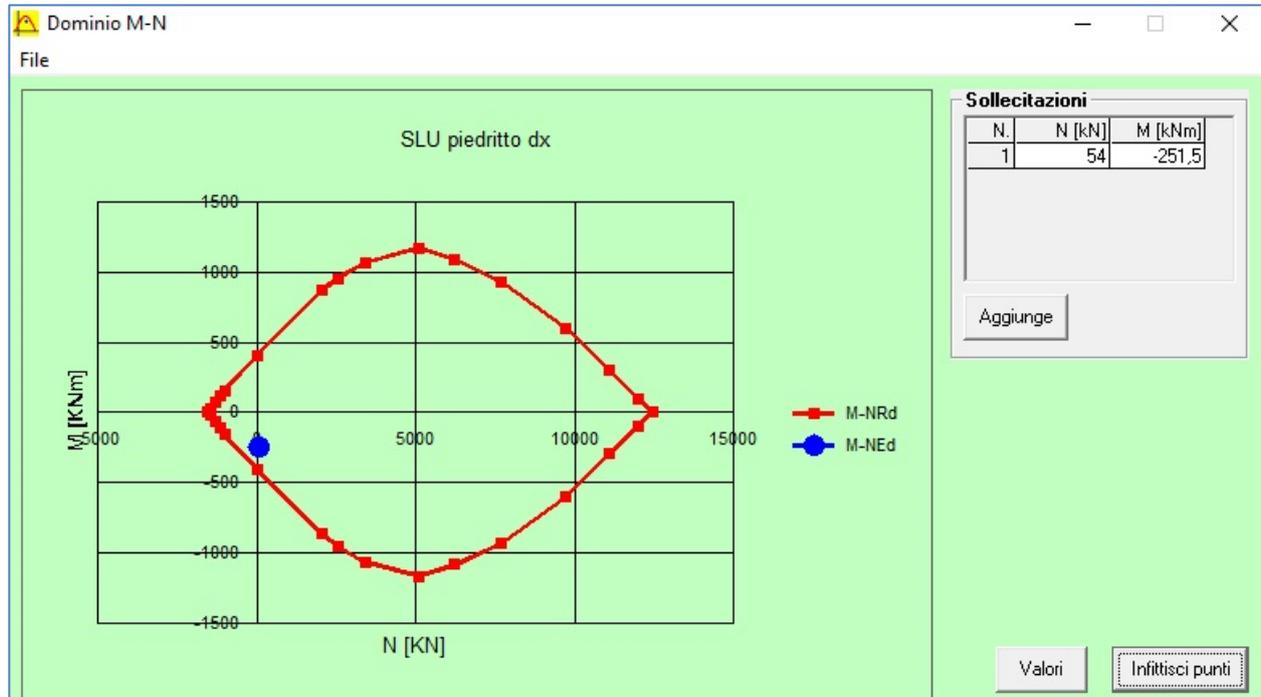


Figura 10.8 - Dominio di resistenza a flessione – Massimo momento flettente – FS = 1,7

10.3.2 Verifica SLU a Taglio

• Caratteristiche della sezione

$b_w = 1000$ mm larghezza $f_{yk} = 450$ MPa resist. caratteristica

$h = 600$ mm altezza $\gamma_s = 1,15$ coeff. sicurezza

$c = 60$ mm copriferro $f_{yd} = 391,3$ MPa resist. di calcolo

$f_{ck} = 32$ MPa resist. caratteristica Armatura longitudinale tesa:

$\gamma_c = 1,50$ coeff. sicurezza $A_{sl,1} = 10 \text{ } \emptyset 16 = 20,11 \text{ cm}^2$

$\alpha_{cc} = 0,85$ coeff. riduttivo $A_{sl,2} = 0 \text{ } \emptyset 0 = 0,00 \text{ cm}^2$

$d = 540$ mm altezza utile $A_{sl,3} = 0 \text{ } \emptyset 0 = 0,00 \text{ cm}^2$

$f_{cd} = 18,13$ MPa resist. di calcolo $20,11 \text{ cm}^2$

• Sollecitazioni (compressione < 0, trazione > 0, taglio in valore assoluto)

$N_{ed} = 0,0$ kN $V_{ed} = 141,1$ kN

• Elementi senza armature trasversali resistenti a taglio

$k = 1 + (200/d)^{1/2} < 2$ $k = 1,609 < 2$

$v_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$ $v_{min} = 0,404$

$\rho_1 = A_{sl}/(b_w \times d) < 0,02$ $\rho_1 = 0,004 < 0,02$

$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c < 0,2 f_{cd}$ $\sigma_{cp} = 0,00$ MPa $< 0,2 f_{cd}$



PROGETTO DEFINITIVO

SOTTOVIA

SL02 – VIA LEOPARDI

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE

| PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|-------------|------|----------|
| IV0H | 02 | D 26 CL | SL.0200 001 | A | 45 DI 55 |

$$V_{Rd} = (0,18 \times k \times (100 \times \rho_1 \times f_{ck})^{1/3} / g_c + 0,15 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d > (v_{min} + 0,15 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d$$

$$V_{Rd} = 238,1 \text{ kN}; \quad (\text{con } (v_{min} + 0,15 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d = 218,1 \text{ kN})$$

$$V_{Rd} = 238,1 \text{ kN} \quad \text{valore di calcolo}$$

la sezione è verificata in assenza di armature per il taglio

La verifica a taglio per i piedritti risulta soddisfatta senza apposita armatura a taglio. Cautelativamente, anche se non richiesto, si prevedere di inserire **spilli Ø8 a passo 20 cm in direzione parallela all'asse dei binari, passo 40 cm in direzione ortogonale agli stessi, corrispondenti a staffe Ø8 con 5 bracci a passo 40cm.**

Le verifiche a flessione e a taglio per la soletta superiore risultano soddisfatte con un fattore di sicurezza FS rispettivamente pari a 1,7 e 1,6.

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL.0200 001 | REV. A |

10.3.3 Verifica SLE - Tensione

Combinazione Rara

Sollecitazioni massime SLE Rara soletta superiore sezione E, F:

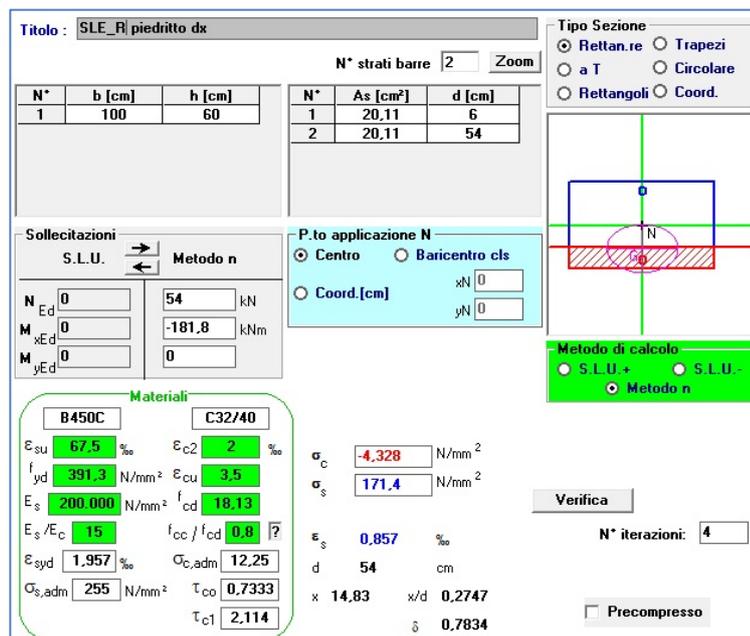
| | | | |
|----|--------------------------------|----|------------------------------|
| E: | $N_{Ed} = 222,4 \text{ kN}$ | F: | $N_{Ed} = 271,9 \text{ kN}$ |
| | $M_{Ed} = -181,8 \text{ kN.m}$ | | $M_{Ed} = 52,8 \text{ kN.m}$ |

Combinazione Quasi Permanente

Sollecitazioni massime SLE QP soletta superiore sezione C, D:

| | | | |
|----|-------------------------------|----|-------------------------------|
| E: | $N_{Ed} = 97,4 \text{ kN}$ | F: | $N_{Ed} = 146,9 \text{ kN}$ |
| | $M_{Ed} = -91,6 \text{ kN.m}$ | | $M_{Ed} = -36,5 \text{ kN.m}$ |

Combinazione Rara



Titolo : SLE_RI piedritto dx

N* strati barre 2 Zoom

| N* | b [cm] | h [cm] | N* | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1 | 100 | 60 | 1 | 20.11 | 6 |
| | | | 2 | 20.11 | 54 |

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N_{Ed} 0 54 kN
 M_{xEd} 0 -181.8 kNm
 M_{yEd} 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 C32/40
 ϵ_{su} 67.5 ‰ ϵ_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391.3 N/mm² ϵ_{cu} 3.5 ‰
 E_s 200.000 N/mm² f_{cd} 18.13 ‰
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0.8
 ϵ_{syd} 1.957 ‰ $\sigma_{c,adm}$ 12.25 ‰
 $\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm² τ_{co} 0.7333
 τ_{c1} 2.114

σ_c -4.328 N/mm²
 σ_s 171.4 N/mm²

Verifica
 ϵ_s 0.957 ‰
 d 54 cm
 x 14.83 x/d 0.2747
 δ 0.7834

N* iterazioni: 4
 Precompresso

Figura 10.9 - Controllo di tensione agli SLE della sezione più sollecitata – Combinazione Rara

$$\sigma_s = 171,4 \text{ N/mm}^2 < 337,5 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_c = 4,33 \text{ N/mm}^2 < 17,60 \text{ N/mm}^2.$$

La verifica in combinazione rara pertanto risulta soddisfatta.

Combinazione Quasi Permanente

Titolo : SLE_QP piedritto dx

N° strati barre 2 Zoom

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1 | 100 | 60 | 1 | 20,11 | 6 |
| | | | 2 | 20,11 | 54 |

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

Sollecitazioni
 S.L.U. Metodo n
 N_{Ed} 0 54 kN
 M_{xEd} 0 -91,6 kNm
 M_{yEd} 0 0

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 C32/40
 E_{su} 67,5 ‰ E_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391,3 N/mm² E_{cu} 3,5 ‰
 E_s 200.000 N/mm² f_{cd} 18,13 ‰
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0,8
 e_{syd} 1,957 ‰ σ_{c,adm} 12,25
 σ_{s,adm} 255 N/mm² τ_{co} 0,7333
 τ_{c1} 2,114

σ_c -2,205 N/mm²
 σ_s 80,13 N/mm²
 ε_s 0,4007 ‰
 d 54 cm
 x 15,78 x/d 0,2922
 δ 0,8052

Verifica
 N° iterazioni: 4
 Precompresso

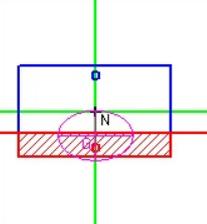


Figura 10.10 - Controllo di tensione agli SLE della sezione più sollecitata – Combinazione Quasi Permanente

$$\sigma_s = 80,13 \text{ N/mm}^2 < 337,5 \text{ N/mm}^2;$$

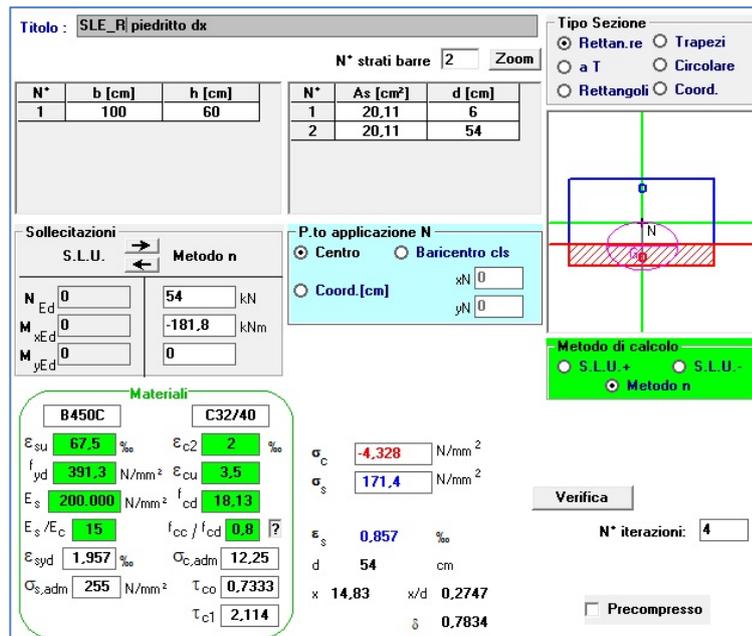
$$\sigma_c = 2,20 \text{ N/mm}^2 < 12,80 \text{ N/mm}^2.$$

La verifica in combinazione quasi permanente pertanto risulta soddisfatta.

| | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL.0200 001 | REV. A |

10.3.4 Verifica SLE - Fessurazione

Combinazione Rara



Titolo: SLE_RI piedritto dx

N° strati barre: 2 Zoom

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1 | 100 | 60 | 1 | 20,11 | 6 |
| | | | 2 | 20,11 | 54 |

Sollecitazioni
 S.L.U. Metodo n
 N_{Ed} 0 54 kN
 M_{xEd} 0 -181,8 kNm
 M_{yEd} 0 0

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

Materiali
 B450C C32/40
 ε_{su} 67,5 ‰ ε_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391,3 N/mm² ε_{cu} 3,5 ‰
 E_s 200.000 N/mm² f_{cd} 18,13 ‰
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0,8
 ε_{syd} 1,957 ‰ σ_{c,adm} 12,25 ‰
 σ_{s,adm} 255 N/mm² τ_{co} 0,7333 ‰
 τ_{c1} 2,114 ‰

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

Verifica
 N° iterazioni: 4
 Precompresso

Calculated values:
 σ_c -4,328 N/mm²
 σ_s 171,4 N/mm²
 ε_s 0,857 ‰
 d 54 cm
 x 14,83 x/d 0,2747
 δ 0,7834

Figura 10.11 - Controllo di tensione agli SLE della sezione più sollecitata – Combinazione Rara

Stato Limite di Apertura delle Fessure

Combinazione Rara

| | | |
|--------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| σ _s | 171,4 N/mm ² | Tensione nell'armatura tesa valutata nella sezione fessurata in combinazione Rara |
| k _t | 0,4 | 0,4 per carichi di lunga durata, 0,6 per carichi di breve durata |
| f _{ctm} | 3,02 N/mm ² | |
| h _{c,eff} | 150,00 mm | |
| A _{c,eff} | 150000,0 mm ² | Area efficace di calcestruzzo teso attorno all'armatura (h _{c,eff} x t _w) |
| ρ _{eff} | 0,013 | |
| α _e | 6,30 | Rapporto moduli elastici |
| ε _{sm} | 0,0005 | Deformazione unitaria media delle barre |
| k ₁ | 0,8 | Per barre ad aderenza migliorata |
| k ₂ | 0,5 | Caso di flessione |
| k ₃ | 3,4 | |
| k ₄ | 0,425 | |
| Φ ₁ | 16 mm | |
| Φ ₂ | 0 mm | |
| Φ _{eq} | 16 mm | |
| Δ _{s,max} | 223,37 mm | Distanza massima tra le fessure |
| w ₃ | 0,20 mm | Armatura poco sensibile |
| w _{d(r)} | 0,19 mm | Valore di calcolo dell'apertura delle fessure |

La verifica in combinazione rara pertanto risulta soddisfatta.

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL.0200 001 | REV. A |

10.4 Verifica soletta inferiore

Si riporta, analogamente a quanto fatto per gli altri elementi, le verifiche per la soletta inferiore.

Sollecitazioni massime soletta inferiore sezione G, H:

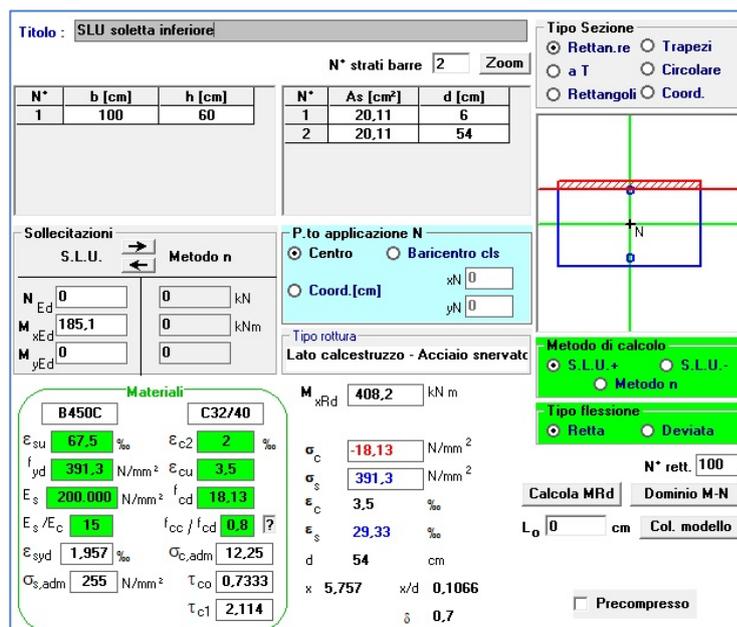
| | | | |
|----|-------------------------------|----|-------------------------------|
| G: | $N_{Ed} = 148,6 \text{ kN}$ | H: | $N_{Ed} = 184,9 \text{ kN}$ |
| | $T_{Ed} = 247 \text{ kN}$ | | $T_{Ed} = 258,3 \text{ kN}$ |
| | $M_{Ed} = -99,2 \text{ kN.m}$ | | $M_{Ed} = 185,1 \text{ kN.m}$ |

10.4.1 Verifica SLU a Flessione.

Nello specifico, nel caso in esame, considerando di predisporre la medesima armatura inferiormente e superiormente:

$$A_{s_{min}} = \frac{M_{max}}{0,9 \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{185,1 \cdot 10^6}{0,9 \cdot 540 \cdot 391,3} = 973,34 \text{ mm}^2/m$$

Si decide quindi, analogamente a quanto previsto per gli altri elementi, di inserire armatura **1+1Ø16 a passo 10 cm**. Il calcolo del momento resistente si è svolto mediante l'utilizzo del software VCASlu che ha validato il risultato analitico considerando le caratteristiche meccaniche precedentemente descritte. L'analisi è stata condotta trascurando, a favore di sicurezza, il contributo dello sforzo normale.



Titolo: SLU soletta inferiore

N° strati barre: 2

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1 | 100 | 60 | 1 | 20,11 | 6 |
| | | | 2 | 20,11 | 54 |

Sollecitazioni: S.L.U. Metodo n

P.to applicazione N: Centro

Materiali: B450C, C32/40

Metodo di calcolo: S.L.U. +

Tipo flessione: Retta

Calcola MRd: 408,2 kNm

Dominio M-N: N° rett. 100

Col. modello: L₀ 0 cm

Precompresso:

Figura 10.12 – Combinazione SLU - Momento massimo flettente

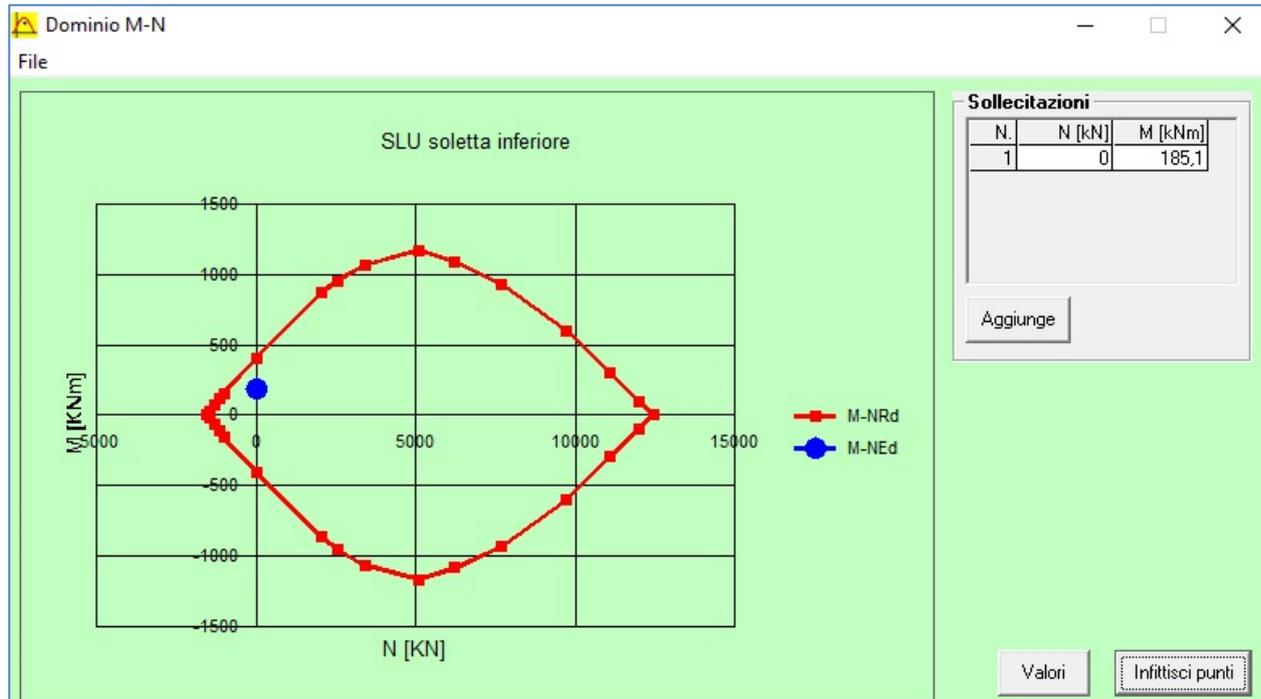


Figura 10.13 - Dominio di resistenza a flessione – Massimo momento flettente – FS = 2,20

10.4.2 Verifica SLU a Taglio

• Caratteristiche della sezione

$b_w = 1000$ mm larghezza $f_{yk} = 450$ MPa resist. caratteristica

$h = 600$ mm altezza $\gamma_s = 1,15$ coeff. sicurezza

$c = 60$ mm copriferro $f_{yd} = 391,3$ MPa resist. di calcolo

$f_{ck} = 32$ MPa resist. caratteristica Armatura longitudinale tesa:

$\gamma_c = 1,50$ coeff. sicurezza $A_{sl,1} = 10 \text{ } \emptyset 16 = 20,11 \text{ cm}^2$

$\alpha_{cc} = 0,85$ coeff. riduttivo $A_{sl,2} = 0 \text{ } \emptyset 0 = 0,00 \text{ cm}^2$

$d = 540$ mm altezza utile $A_{sl,3} = 0 \text{ } \emptyset 0 = 0,00 \text{ cm}^2$

$f_{cd} = 18,13$ MPa resist. di calcolo $20,11 \text{ cm}^2$

• Sollecitazioni (compressione < 0, trazione > 0, taglio in valore assoluto)

$N_{ed} = 0,0$ kN $V_{ed} = 258,3$ kN

• Elementi senza armature trasversali resistenti a taglio

$k = 1 + (200/d)^{1/2} < 2$ $k = 1,609 < 2$

$v_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$ $v_{min} = 0,404$

$\rho_1 = A_{sl}/(b_w \times d) < 0,02$ $\rho_1 = 0,004 < 0,02$

$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c < 0,2 f_{cd}$ $\sigma_{cp} = 0,00$ MPa $< 0,2 f_{cd}$



PROGETTO DEFINITIVO

SOTTOVIA

SL02 – VIA LEOPARDI

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE

| PROGETTO | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|------------|------|----------|
| IV0H | 02 | D 26 CL | SL0200 001 | A | 51 DI 55 |

$$V_{Rd} = (0,18 \times k \times (100 \times \rho_1 \times f_{ck})^{1/3} / g_c + 0,15 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d > (v_{min} + 0,15 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d$$

$$V_{Rd} = 110,8 \text{ kN}; \quad (\text{con } (v_{min} + 0,15 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d = 79,2 \text{ kN})$$

$$V_{Rd} = 110,8 \text{ kN} \quad \text{valore di calcolo}$$

la sezione è verificata in assenza di armature per il taglio

Le verifiche a flessione e a taglio per la soletta superiore risultano soddisfatte con un fattore di sicurezza FS rispettivamente pari a 1,9 e 1,4.

$$V_{Rd} = (0,18 \times k \times (100 \times \rho_1 \times f_{ck})^{1/3} / g_c + 0,15 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d > (v_{min} + 0,15 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d$$

$$V_{Rd} = 238,1 \text{ kN}; \quad (\text{con } (v_{min} + 0,15 \times \sigma_{cp}) \times b_w \times d = 218,1 \text{ kN})$$

$$V_{Rd} = 238,1 \text{ kN} \quad \text{valore di calcolo}$$

la sezione NON è verificata in assenza di armature per il taglio

La sezione non risulta soddisfatta, pertanto risulta necessario prevedere un'apposita armatura di resistenza a taglio. Si prevede quindi di predisporre degli **spilli Ø8 a passo 20 cm in entrambe le direzioni, corrispondenti a staffe Ø8 con 5 bracci a passo 20cm.**

• Elementi con armature trasversali resistenti a taglio

$$\theta = 35,0 \quad \circ \quad \text{inclinaz. bielle cls} \quad \text{angolo ammissibile}$$

$$\alpha = 90,0 \quad \circ \quad \text{inclinaz. staffe}$$

Armatura a taglio (staffatura):

$$A_{sw}/s = \text{staffe } \emptyset \quad 8 \quad \text{mm con n}^\circ \text{ bracci (trasv)} \quad 5 \quad \text{passo} \quad 20 \quad \text{cm} = 0,126 \text{ cm}^2/\text{cm}$$

$$V_{Rsd} = 0,90 \times d \times (A_{sw}/s) \times f_{yd} \times (\cotg\alpha + \cotg\theta) \times \text{sen}\alpha \quad V_{Rsd} = 341,3 \text{ kN}$$

$$f_{cd} = 9,07 \quad \text{MPa resist. di calcolo ridotta}$$

$$\alpha_c = 1,000 \quad \text{coeff. maggiorativo}$$

$$V_{Rcd} = 0,90 \times d \times b_w \times \alpha_c \times f_{cd} \times (\cotg\alpha + \cotg\theta) / (1 + \cotg^2\alpha) \quad V_{Rcd} = 2070,4 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = \min(V_{Rcd}, V_{Rsd}) \quad V_{Rd} = 341,3 > 258,3 \text{ kN} \quad \text{c.s.} = 1,3$$

la sezione armata a taglio risulta verificata.

Le verifiche a flessione e a taglio per la soletta superiore risultano soddisfatte con un fattore di sicurezza FS rispettivamente pari a 2,20 e 1,30.

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL.0200 001 | REV. A |

10.4.3 Verifica SLE - Tensione

Combinazione Rara

Sollecitazioni massime SLE Rara soletta superiore sezione G, H:

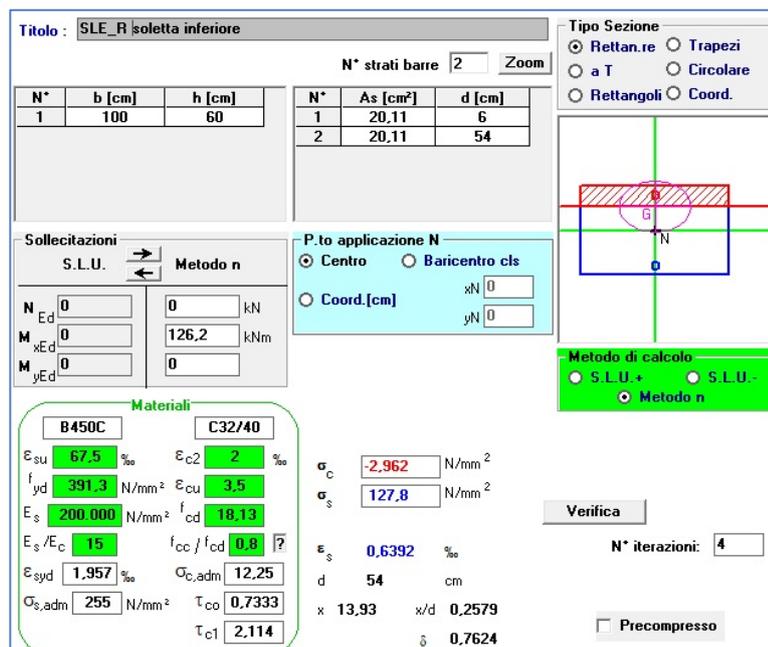
$$\begin{array}{ll}
 \text{G:} & N_{Ed} = 116,8 \text{ kN} \\
 & M_{Ed} = 126,2 \text{ kN.m} \\
 \text{H:} & N_{Ed} = 77,1 \text{ kN} \\
 & M_{Ed} = 77,5 \text{ kN.m}
 \end{array}$$

Combinazione Quasi Permanente

Sollecitazioni massime SLE QP soletta superiore sezione C, D:

$$\begin{array}{ll}
 \text{G:} & N_{Ed} = 62,5 \text{ kN} \\
 & M_{Ed} = 43,9 \text{ kN.m} \\
 \text{H:} & N_{Ed} = 57,5 \text{ kN} \\
 & M_{Ed} = 31 \text{ kN.m}
 \end{array}$$

Combinazione Rara



Titolo: SLE_R soletta inferiore

N° strati barre: 2

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1 | 100 | 60 | 1 | 20,11 | 6 |
| | | | 2 | 20,11 | 54 |

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

Sollecitazioni:
 S.L.U. Metodo n
 N_{Ed}: 0 kN
 M_{xEd}: 0 kNm
 M_{yEd}: 0 kNm

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

Materiali:
 B450C C32/40
 ε_{su}: 67,5 ‰ ε_{c2}: 2 ‰
 f_{yd}: 391,3 N/mm² ε_{cu}: 3,5 ‰
 E_s: 200.000 N/mm² f_{cd}: 18,13
 E_s/E_c: 15 f_{cc}/f_{cd}: 0,8
 ε_{syd}: 1,957 ‰ σ_{c,adm}: 12,25
 σ_{s,adm}: 255 N/mm² τ_{co}: 0,7333
 τ_{c1}: 2,114

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

Verifica:
 σ_c: -2,962 N/mm²
 σ_s: 127,8 N/mm²
 ε_s: 0,6392 ‰
 d: 54 cm
 x: 13,93 x/d: 0,2579
 δ: 0,7624
 N° iterazioni: 4
 Precompresso

Figura 10.14 - Controllo di tensione agli SLE della sezione più sollecitata – Combinazione Rara

$$\sigma_s = 127,8 \text{ N/mm}^2 < 337,5 \text{ N/mm}^2;$$

$$\sigma_c = 2,96 \text{ N/mm}^2 < 17,60 \text{ N/mm}^2.$$

La verifica in combinazione rara pertanto risulta soddisfatta.

Combinazione Quasi Permanente

Titolo : SLE_QP soletta inferiore

N° strati barre | 2 | Zoom

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1 | 100 | 60 | 1 | 20,11 | 6 |
| | | | 2 | 20,11 | 54 |

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

Diagramma della sezione rettangolare con barre e centro di gravità G.

Sollecitazioni
 S.L.U. → Metodo n
 ← Metodo n

N_{Ed} 0 0 kN
 M_{xEd} 0 43,9 kNm
 M_{yEd} 0 0

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 C32/40
 ε_{su} 67,5 ‰ ε_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391,3 N/mm² ε_{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
 ε_{syd} 1,957 ‰ σ_{c,adm} 12,25 N/mm²
 σ_{s,adm} 255 N/mm² τ_{co} 0,7333
 τ_{cl} 2,114

σ_c -1,03 N/mm²
 σ_s 44,47 N/mm²
 ε_s 0,2223 ‰
 d 54 cm
 x 13,93 x/d 0,2579
 δ 0,7624

Verifica
 N° iterazioni: 4

Precompresso

Figura 10.15 - Controllo di tensione agli SLE della sezione più sollecitata – Combinazione Quasi Permanente

$$\sigma_s = 44,47 \text{ N/mm}^2 < 337,5 \text{ N/mm}^2;$$

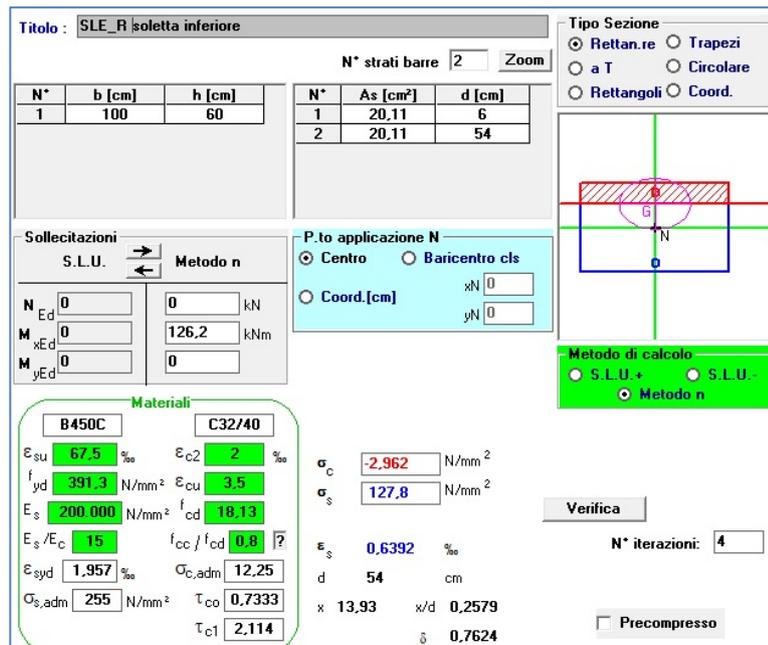
$$\sigma_c = 1,03 \text{ N/mm}^2 < 12,80 \text{ N/mm}^2.$$

La verifica in combinazione quasi permanente pertanto risulta soddisfatta.

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| | RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA DOCUMENTO D 26 CL | REV. SL0200 001 | FOGLIO A 54 DI 55 |

10.4.4 Verifica SLE - Fessurazione

Combinazione Rara



Titolo: SLE_R soletta inferiore

N° strati barre: 2

| N° | b [cm] | h [cm] | N° | As [cm²] | d [cm] |
|----|--------|--------|----|----------|--------|
| 1 | 100 | 60 | 1 | 20,11 | 6 |
| | | | 2 | 20,11 | 54 |

Sollecitazioni: S.L.U. Metodo n

Materiali: B450C, C32/40

Calcoli: $\sigma_s = 127,8$ N/mm², $\sigma_c = -2,962$ N/mm², $\sigma_s = 127,8$ N/mm², $\epsilon_s = 0,6392$ ‰, $\delta = 0,7624$

Figura 10.16 - Controllo di tensione agli SLE della sezione più sollecitata – Combinazione Rara

Stato Limite di Apertura delle Fessure

Combinazione Rara

| | | |
|------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| σ_s | 127,8 N/mm ² | Tensione nell'armatura tesa valutata nella sezione fessurata in combinazione Rara |
| k_t | 0,4 | 0,4 per carichi di lunga durata, 0,6 per carichi di breve durata |
| f_{ctm} | 3,02 N/mm ² | |
| $h_{c,eff}$ | 150,00 mm | |
| $A_{c,eff}$ | 150000,0 mm ² | Area efficace di calcestruzzo teso attorno all'armatura ($h_{c,eff} \times t_w$) |
| ρ_{eff} | 0,013 | |
| α_e | 6,30 | Rapporto moduli elastici |
| ϵ_{sm} | 0,0004 | Deformazione unitaria media delle barre |
| k_1 | 0,8 | Per barre ad aderenza migliorata |
| k_2 | 0,5 | Caso di flessione |
| k_3 | 3,4 | |
| k_4 | 0,425 | |
| Φ_1 | 16 mm | |
| Φ_2 | 0 mm | |
| Φ_{eq} | 16 mm | |
| $\Delta_{s,max}$ | 223,37 mm | Distanza massima tra le fessure |
| w_3 | 0,20 mm | Armatura poco sensibile |
| $w_{d(t)}$ | 0,14 mm | Valore di calcolo dell'apertura delle fessure |

La verifica in combinazione rara pertanto risulta soddisfatta.

| | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|--------------------|
|  | PROGETTO DEFINITIVO SOTTOVIA SL02 – VIA LEOPARDI | | | | | |
| RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARE | PROGETTO IV0H | LOTTO 02 | CODIFICA D 26 CL | DOCUMENTO SL.0200 001 | REV. A | FOGLIO 55 DI 55 |

11 CONCLUSIONI

In virtù di quanto sopra descritto, con particolare riferimento:

- alle caratteristiche geometriche della struttura in oggetto;
- alla tipologia di vincoli esterni;
- alle caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati;
- alle caratteristiche del terreno di fondazione;
- al modello di calcolo;
- ai carichi agenti;

si conclude che la struttura in oggetto della presente relazione è conforme ai criteri di progettazione e di resistenza indicati dalla normativa vigente.

Riassunto incidenze:

Si riportano le incidenze afferenti ai singoli elementi in calcestruzzo:

| | |
|---------------------|-----------------------|
| Soletta superiore: | 180 kg/m ³ |
| Piedritto destro: | 170 kg/m ³ |
| Piedritto sinistro: | 170 kg/m ³ |
| Soletta inferiore: | 180 kg/m ³ |