

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N. 443/01e s.m.i.**

CUP: J14H20000440001

**U.O. PROGETTAZIONE INTEGRATA NORD**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA**

**LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC BRESCIA EST - VERONA**

**NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO OVEST**

SL02 - SOTTOPASSO VIA CARNIA

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA – TRATTO A SINGOLA FORNICE

SCALA:

-

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

I N 1 0    1 0    D    2 6    C L    S L 0 2 0 0    0 0 2    A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	P. Cucino	Ott. 2021	M. Rigo	Ott. 2021	C. Mazzocchi	Ott. 2021	A. Perego



File:IN1010D26CLSL0200002A.doc

n. Elab.:

## INDICE

1	PREMESSA .....	3
2	DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO .....	4
2.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	4
2.2	ELABORATI DI PROGETTO DI RIFERIMENTO .....	5
3	CARATTERISTICHE MATERIALI .....	6
3.1	CALCESTRUZZO .....	6
3.1.1	<i>Magrone</i> .....	6
3.1.2	<i>Calcestruzzo per pali, soletta di fondazione, piedritti e soletta di copertura</i> .....	6
3.2	ACCIAIO .....	6
3.2.1	<i>Acciaio di armatura per c.a.</i> .....	7
4	DESCRIZIONE DELL'OPERA .....	8
5	INQUADRAMENTO GEOTECNICO .....	12
6	DEFINIZIONE DELL'AZIONE SISMICA .....	13
7	CRITERI DI ANALISI E VERIFICA DELLE OPERE .....	16
7.1	APPROCCI PROGETTUALI E METODI DI VERIFICA .....	16
8	VERIFICA DELLE OPERE DELLA STRUTTURA "METODO MILANO" DEL SOTTOPASSO SL02 .....	18
8.1	DESCRIZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO .....	20
8.2	ANALISI DEI CARICHI FERROVIARI .....	21
8.3	FASI DI CALCOLO IMPLEMATE NEI MODELLI .....	24
8.4	VERIFICA DEL COMPLESSO OPERA-TERRENO .....	25
8.5	VERIFICHE STRUTTURALI DEI PALI SCATOLARE .....	28
8.6	VERIFICHE STRUTTURALI DELLE SOLETTE .....	42

## 1 PREMESSA

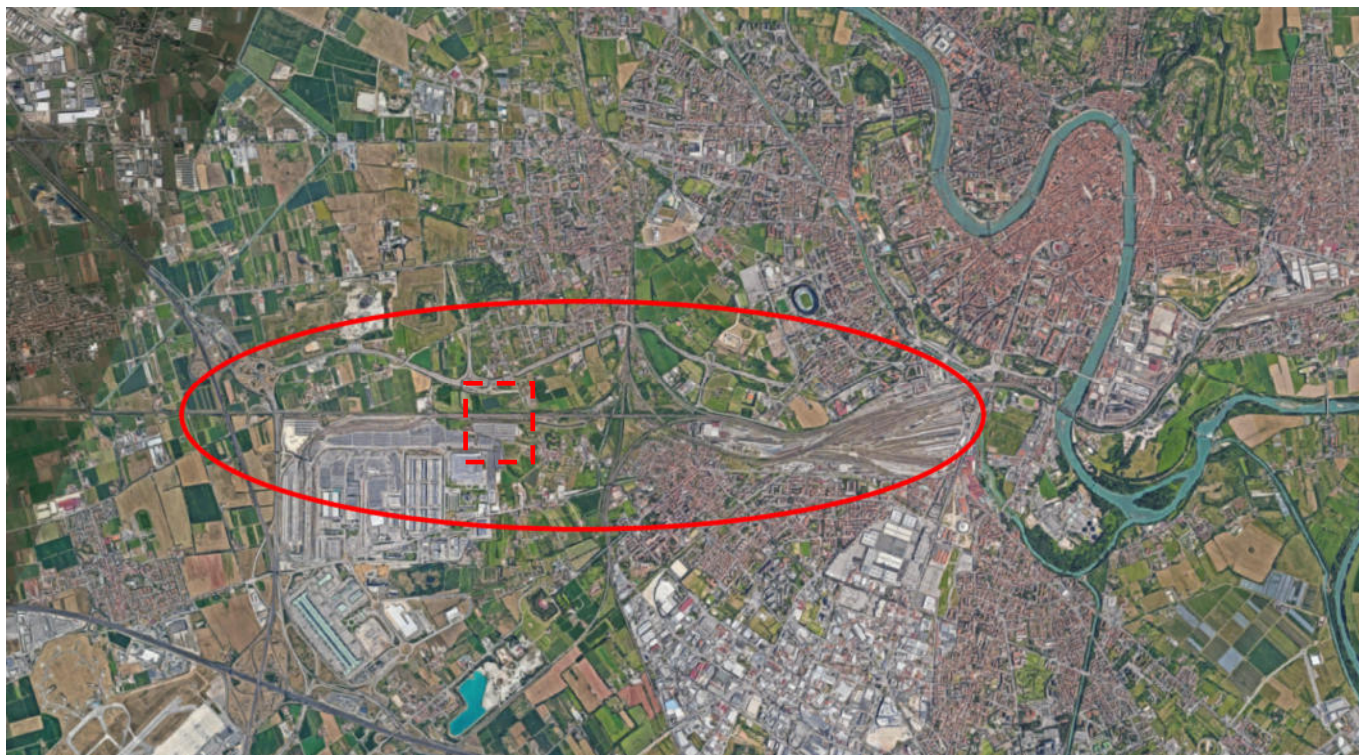
La presente relazione ha per oggetto la progettazione definitiva di opere strutturali relative all’Ingresso Ovest al Nodo AV/AC di Verona Porta Nuova della Tratta AV/AC Brescia-Verona.

L’intervento prevede la realizzazione delle nuove linee, prevalentemente in affiancamento al sedime della attuale Linea Storica Milano-Venezia, nel tratto compreso tra l’intersezione con l’Autostrada del Brennero A22 e la radice est della Stazione Ferroviaria di Verona Porta Nuova, per una estensione di circa 10km. Tali interventi sono funzionali al progetto di linea della Tratta Brescia Est – Verona.

Il progetto prevede la rilocazione della Linea Storica leggermente più a nord al fine di lasciare spazio all’inserimento dei binari della Linea AV/AC. Viene anche prevista la realizzazione di una ulteriore linea denominata “indipendente merci” per il collegamento con la Linea Brennero.

Sono previsti interventi di potenziamento e riconfigurazione della stazione di Verona Porta Nuova e realizzazione di una nuova Sottostazione Elettrica con conseguenti interventi tecnologici per la gestione delle modifiche.

Il progetto comprende tutte le opere atte a consentire l’allaccio e l’interfaccia con le linee storiche esistenti e la risoluzione delle interferenze tra la parte di progetto stesso e l’esistente (viabilità, idrografia, ecc).



**Figura 1 – Individuazione area d’intervento**

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC BRESCIA EST - VERONA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO OVEST</b>					
	RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA TRATTO A SINGOLA FORNICE	COMMESSA IN10	LOTTO 10	CODIFICA D26CL	DOCUMENTO SL 02 00 002	REV. A

## 2 DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

### 2.1 Normativa di riferimento

Le analisi strutturali e le verifiche di sicurezza sono effettuate in accordo con le prescrizioni di seguito elencate e conformi alle normative vigenti:

- ✓ Ministero delle Infrastrutture, DM 17 gennaio 2018, «Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni»
- ✓ Ministero delle Infrastrutture e Trasporti, circolare 11 febbraio 2019, n. 617 C.S.LL.PP., «Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018»
- ✓ Manuale di progettazione RFI Opere Civili RFI DTC SIM AI FS 001 E e relative parti e sezioni.
- ✓ Eurocodice 1 – Azioni sulle strutture, Parte 1-4: Azioni in generale – Azioni del vento (UNI EN 1991-1-4)
- ✓ Regolamento (UE) N.1299/2014 della Commissione del 18 Novembre 2014 relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema “infrastruttura” del sistema ferroviario dell'Unione europea
- ✓ UNI EN 1998-1:2013 – Strutture in zone sismiche – parte 1: generale ed edifici.
- ✓ UNI EN 1998-2:2011 – Strutture in zone sismiche –parte 2: ponti.
- ✓ UNI EN 1992-1-1: EUROCODICE 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici



**LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA**  
**LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC BRESCIA EST - VERONA**  
**NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO OVEST**

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA  
 TRATTO A SINGOLA FORNICE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN10	10	D26CL	SL 02 00 002	A	5 di 60

## 2.2 Elaborati di progetto di riferimento

RELAZIONE TECNICA DESCRITTIVA	IN1010D26RGSLO200001A
RELAZIONE DI CALCOLO RINGROSSI LATERALI	IN1010D26CLSL0200003A
RELAZIONE DI CALCOLO E VERIFICA FUNZIONALITÀ TRATTO SOTTOPASSO ESISTENTE	IN1010D26CLSL0200004A
RELAZIONE DI CALCOLO MURI A U DI SOSTEGNO DELLA RAMPA NORD E SUD	IN1010D26CLSL0200005A
RELAZIONE DI CALCOLO PLATEA E MURO REGGISPINTA	IN1010D26CLSL0200007A
RELAZIONE DI CALCOLO FABBRICATO IMPIANTO DI SOLLEVAMENTO	IN1010D26CLSL0200008A
PLANIMETRIA DI PROGETTO SU CARTOGRAFIA	IN1010D26P9SL0200001A
PLANIMETRIA DI PROGETTO SU ORTOFOTO	IN1010D26P9SL0200002A
PIANTA SCAVI	IN1010D26P9SL0200003A
PIANTA SCAVI	IN1010D26P9SL0200004A
SEZIONI SCAVI	IN1010D26BASLO200001A
SEZIONI SCAVI	IN1010D26BASLO200002A
CARPENTERIA - PIANTE E SEZIONI	IN1010D26BZSL0200007A
CARPENTERIA - PIANTE E SEZIONI	IN1010D26BZSL0200016A
CARPENTERIA - PIANTE E SEZIONI	IN1010D26BZSL0200017A
CARPENTERIA - PIANTE E SEZIONI	IN1010D26BZSL0200018A
CARPENTERIA - PIANTE E SEZIONI	IN1010D26BZSL0200019A
CARPENTERIA - PIANTE E SEZIONI	IN1010D26BZSL0200008A
CARPENTERIA - PIANTE E SEZIONI	IN1010D26BZSL0200009A
CARPENTERIA - PIANTE E SEZIONI	IN1010D26BZSL0200010A
CARPENTERIA - PIANTE E SEZIONI	IN1010D26BZSL0200011A
CARPENTERIA - PIANTE E SEZIONI	IN1010D26BZSL0200012A
CARPENTERIA - PIANTE E SEZIONI	IN1010D26BZSL0200013A
CARPENTERIA - PIANTE E SEZIONI	IN1010D26BZSL0200014A
CARPENTERIA - PIANTE E SEZIONI	IN1010D26BZSL0200015A
CARPENTERIA IMPIANTO DI SOLLEVAMENTO	IN1010D26BASLO200003A
CARPENTERIA IMPIANTO DI SOLLEVAMENTO	IN1010D26BASLO200004A
SEZIONI LONGITUDINALI E TRASVERSALI	IN1010D26BASLO200005A
CARPENTERIA PIANTE SEZIONI LONGITUDINALI E TRASVERSALI	IN1010D26B9SL0200003A
CARPENTERIA PIANTE SEZIONI LONGITUDINALI E TRASVERSALI	IN1010D26B9SL0200004A
CARPENTERIA PIANTE SEZIONI LONGITUDINALI E TRASVERSALI	IN1010D26B9SL0200005A
CARPENTERIA PIANTE SEZIONI LONGITUDINALI E TRASVERSALI	IN1010D26B9SL0200006A
CARPENTERIA PIANTE SEZIONI LONGITUDINALI E TRASVERSALI	IN1010D26B9SL0200007A
FASI COSTRUTTIVE	IN1010D26B8SL0200001A
FASI COSTRUTTIVE	IN1010D26B8SL0200002A
FASI COSTRUTTIVE DI STRUTTURE IN METODO MILANO	IN1010D26BBSLO200003A
FASI COSTRUTTIVE DI STRUTTURE IN METODO MILANO	IN1010D26BBSLO200004A
PARTICOLARI, DETTAGLIO ZONE DI TRANSIZIONE E FINITURE	IN1010D26BZSL0200001A
PARTICOLARI FINITURE ROTATORIE	IN1010D26BZSL0200002A
RELAZIONE DI CALCOLO OPERE PROVVISORIALI	IN1010D26CLSL0200009A
OPERE PROVVISORIALI	IN1010D26BZSL0200003A
OPERE PROVVISORIALI	IN1010D26BZSL0200004A
OPERE PROVVISORIALI	IN1010D26BZSL0200005A
OPERE PROVVISORIALI	IN1010D26BZSL0200006A

### 3 CARATTERISTICHE MATERIALI

#### 3.1 Calcestruzzo

##### 3.1.1 Magrone

Classe di resistenza = C12/15

##### 3.1.2 Calcestruzzo per pali, soletta di fondazione, piedritti e soletta di copertura

$\gamma_c$  = peso specifico = 25.00 kN/m<sup>3</sup>

Classe di resistenza = C30/37

$R_{ck}$  = resistenza cubica = 37.00 N/mm<sup>2</sup>

$f_{ck}$  = resistenza cilindrica caratteristica = 0.83  $R_{ck}$  = 30.0 N/mm<sup>2</sup>

$f_{cm}$  = resistenza cilindrica media =  $f_{ck} + 8$  = 38.0 N/mm<sup>2</sup>

$f_{cd}$  = resistenza di calcolo a compressione =  $\alpha_{cc} * f_{ck} / \gamma_c$  = 0.85 \* 30/1.5 = 17.0 N/mm<sup>2</sup>

$f_{ctm}$  = resistenza a trazione media = 0.30 \*  $f_{ck}^{(2/3)}$  = 2.90 N/mm<sup>2</sup>

$f_{ctm}$  = resistenza a traz. per flessione media = 1.20 \*  $f_{ctm}$  = 3.63 N/mm<sup>2</sup>

$f_{ctk}$  = resistenza a traz. per flessione caratt. = 0.70 \*  $f_{ctm}$  = 2.12 N/mm<sup>2</sup>

$E_{cm}$  = modulo elast. tra 0 e 0.40  $f_{cm}$  = 22000 \*  $(f_{cm}/10)^{0.3}$  = 33345 N/mm<sup>2</sup>

$\sigma_c$  = Resistenza a compressione (Comb. Rara) = 0.6 \*  $f_{ck}$  = 18.0 N/mm<sup>2</sup>

$\sigma_c$  = Resistenza a compressione (Comb. Quasi Permanente) = 0.45 \*  $f_{ck}$  = 13.5 N/mm<sup>2</sup>

#### 3.2 Acciaio

### 3.2.1 Acciaio di armatura per c.a.

Tipo = B 450 C

$\gamma_a$  = peso specifico = 78.50 kN/m<sup>3</sup>

$f_{y\ nom}$  = tensione nominale di snervamento = 450 N/mm<sup>2</sup>

$f_{t\ nom}$  = tensione nominale di rottura = 540 N/mm<sup>2</sup>

$f_{y\ k\ min}$  = minima tensione caratteristica di snervamento = 450 N/mm<sup>2</sup>

$f_{t\ k\ min}$  = minima tensione caratteristica di rottura = 540 N/mm<sup>2</sup>

$(f_t/f_y)_{k\ min}$  = minimo rapporto tra i valori caratteristici = 1.15

$(f_t/f_y)_{k\ max}$  = massimo rapporto tra i valori caratteristici = 1.35

$(f_y/f_{y\ nom})_k$  = massimo rapporto tra i valori nominali = 1.25

$(A_{gt})_k$  = allungamento caratteristico sotto carico massimo = 7.5 %

$\varphi_{\ min}$  = minimo diametro consentito delle barre = 6 mm

$\varphi_{\ max}$  = massimo diametro consentito delle barre = 40 mm

E = modulo di elasticità dell'acciaio = 206000 N/mm<sup>2</sup>

$\alpha_T$  = coefficiente di dilatazione termica = 0.00001 °C<sup>-1</sup>



#### 4 DESCRIZIONE DELL'OPERA

Attualmente nella zona interessata dall'intervento è presente un tratto di linea storica a due binari e a sud di questa, il fascio di binari che raccorda la linea da Bologna con quella per Milano.

L'attuale sottopasso di via Carnia è in una zona più ad est e sottopassa i binari delle linee ferroviarie presenti tramite una serie di manufatti. Con la nuova configurazione del fascio di binari e la necessità di avere un collegamento diretto tra la tangenziale (a nord) e le aree industriali (a sud), è stato previsto la progettazione di un nuovo sottopasso che permetta quindi un collegamento più semplice e rapido.



**Figura 2 – Vista aerea dalla zona e localizzazione**



L'intervento è collocato in corrispondenza della progressiva chilometrica 153+150 della linea AV/AC. Lo scatolare a due canne di nuova costruzione verrà realizzato come elemento unico, in maniera tale da ottimizzare i costi, e presenterà cinque sezioni tipiche che distingueranno altrettanti tratti.

In corrispondenza dei binari della linea AV/AC è prevista l'installazione di barriere antirumore.

All'entrata e all'uscita del sottopasso sono previsti muri ad U progettati in modo da ridurre lo scavo e garantire la sicurezza della strada, e la cui altezza varia da 10,5 m a 4 m.

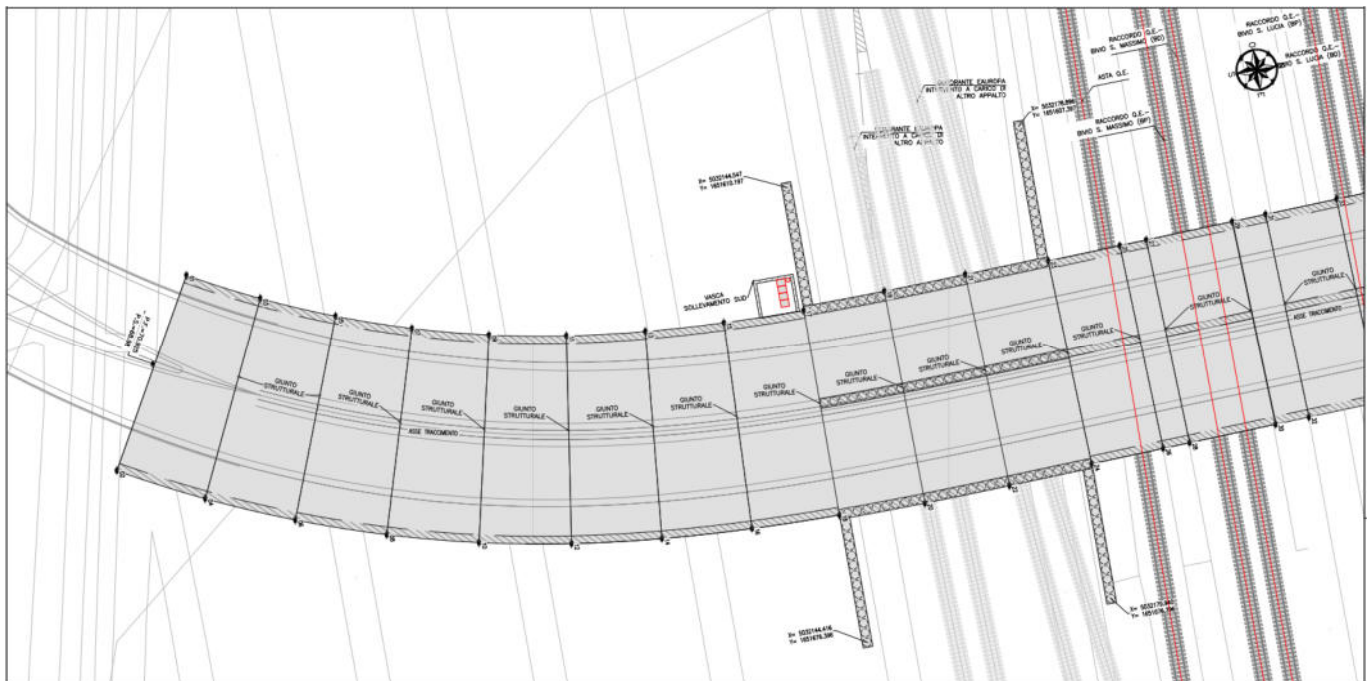
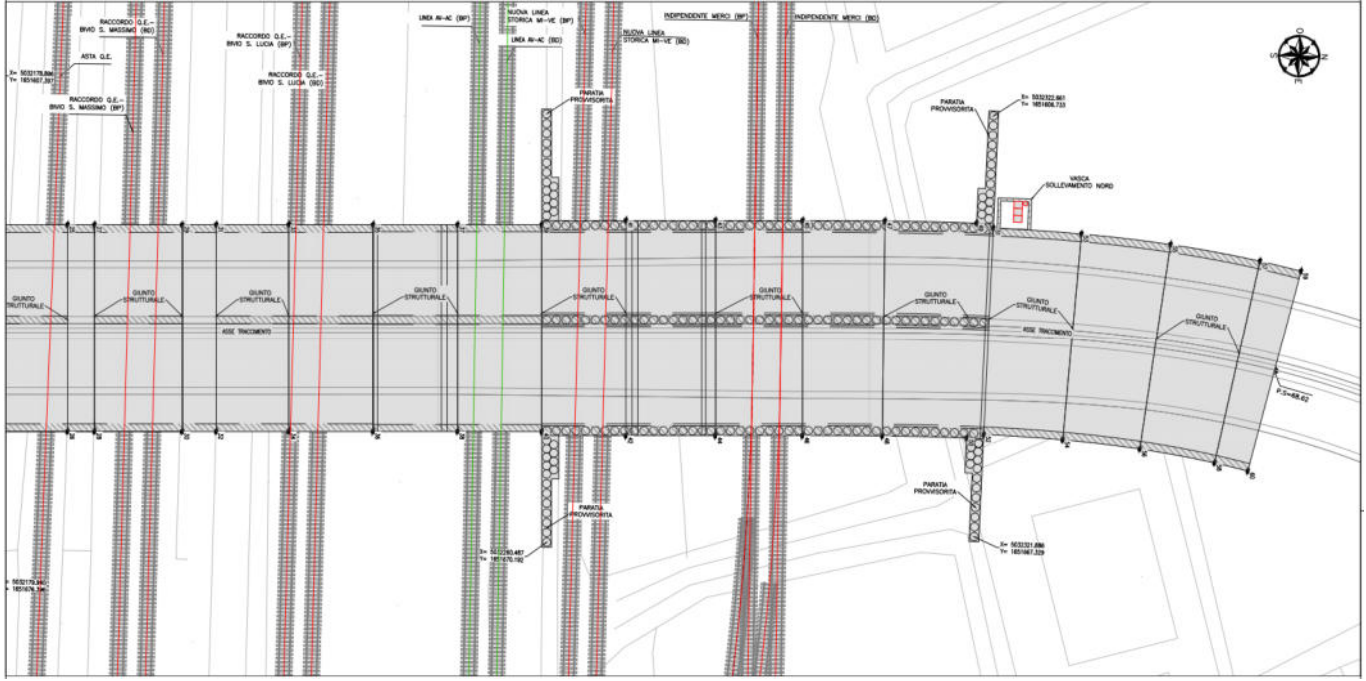


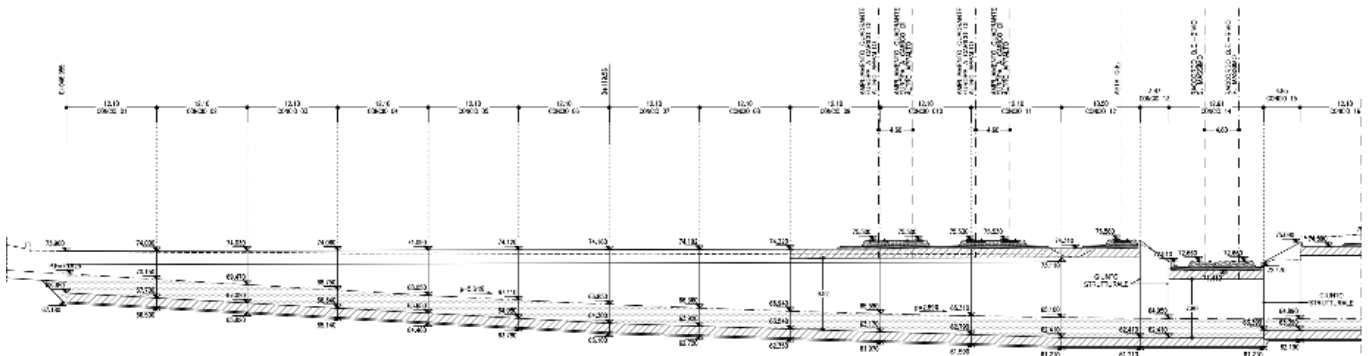
Figura 3 - Stralcio planimetrico (1/2)

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA  
TRATTO A SINGOLA FORNICE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN10	10	D26CL	SL 02 00 002	A	10 di 60



**Figura 4 - Stralcio planimetrico (2/2)**



**Figura 5 - Profilo Longitudinale (1/2)**

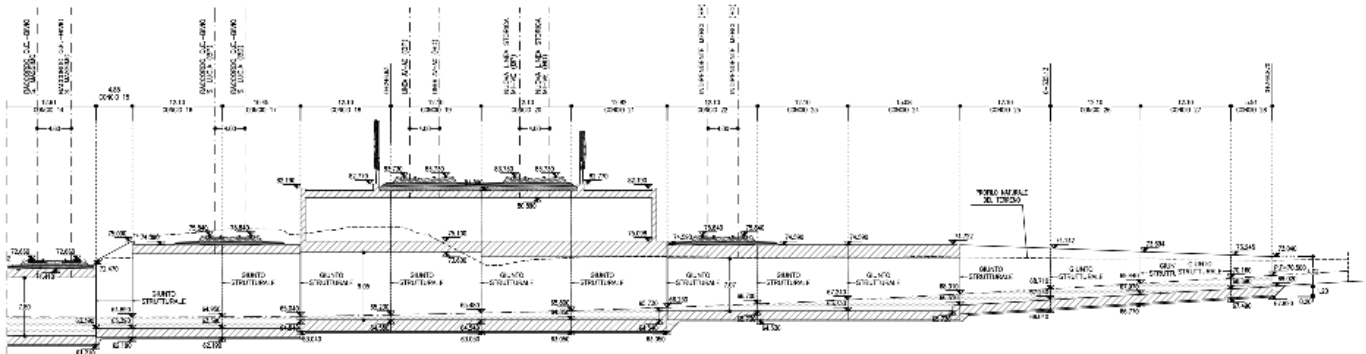


Figura 6 – Profilo Longitudinale (2/2)

La parte sud del sottopasso è sotto e la parte nord del sottopasso è vicino ai binari denominati "Brennero-Quadrante Europa". E questi saranno installati prima del progetto del Nodo di Verona Ovest: sarà necessario procedere, in queste zone, alla costruzione di pali e soletta superiore prima della realizzazione dei binari del QE, per poi procedere ai lavori con il Metodo Milano.

Questo rapporto contiene la struttura Metodo Milano nella parte sud. La sezione tipica della struttura può essere vista nella figura seguente.

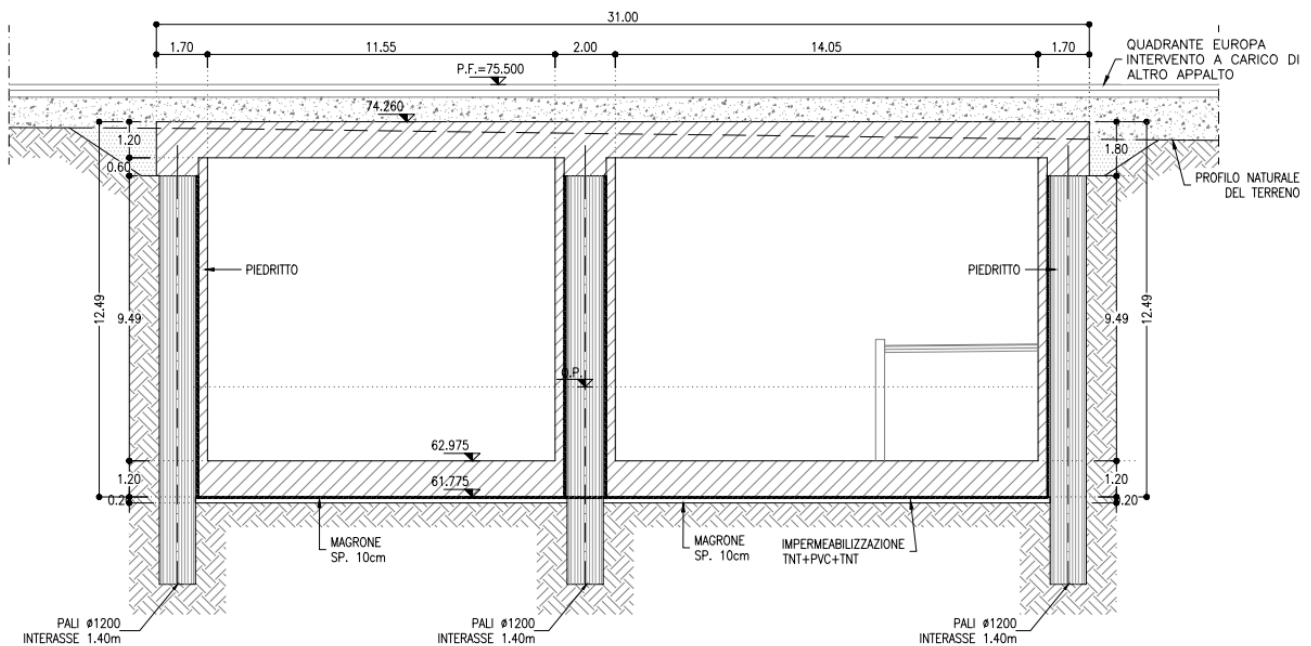


Figura 7 - Sezione Del Metodo Milano Box – Tratto a Singola Fornice (Parte sud)

## 5 INQUADRAMENTO GEOTECNICO

Per l'inquadramento geotecnico dell'opera si riporta l'estratto dell'elaborato Relazione Geotecnica da cui si riportano i dati geotecnici fondamentali di interesse.

Tabelle contenenti la stratigrafia di progetto per l'opera in esame e i relativi parametri geotecnici di calcolo:

**Tabella 1 Caratteristiche meccaniche del terreno**

Strato	Profondità da (m da p.c.)	Profondità a (m da p.c.)	Descrizione	Peso di volume $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Formazione	Angolo di resistenza al taglio $\phi'$ (°)	Coesione $c'$ (kPa)	Modulo elastico $E_{oc}$ (MPa)
1	0.00	5.00	Materiale rimaneggiato e/o di riporto antropico	19.00	MR	42.00	0.00	47.00
2	5.00	15.00	Ghiaia Poligenica	19.00	GP	40.00	0.00	70.00
3	15.00	Sotto	Ghiaia Poligenica	19.00	GP	38.00	0.00	80.00

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA TRATTO A SINGOLA FORNICE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IN10	10	D26CL	SL 02 00 002	A	13 di 60

## 6 DEFINIZIONE DELL'AZIONE SISMICA

Nel seguente paragrafo è riportata la valutazione dei parametri di pericolosità sismica necessari per la determinazione delle azioni sismiche di progetto dell'opera cui si riferisce il presente documento, in accordo a quanto specificato dal D.M. 11 Febbraio 2018 e relativa circolare applicativa.

Le opere in progetto per la Sottopasso Via Carnia, in un sito con le seguenti coordinate geografiche: Latitudine 45.42695; Longitudine 10.93887.

Per la galleria artificiale si definisce una vita nominale VN pari a 75 anni e una classe d'uso III a cui corrisponde il coefficiente Cu pari a 1,5 (§ 2.4.2, DM 11/02/2018). Di conseguenza il periodo di riferimento per la definizione dell'azione sismica risulta pari a VR = VN · Cu = 112,5 anni.

Con riferimento alla probabilità di superamento dell'azione sismica, PVR, attribuita allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV), nel periodo VR dell'opera in progetto, si determina il periodo di ritorno TR del sisma di progetto. Sulla base delle coordinate geografiche del sito e del tempo di ritorno del sisma di progetto, TR, sopra definito, si ricavano i parametri che caratterizzano il sisma di progetto relativo al sito di riferimento, rigido ed orizzontale :

- ag: accelerazione orizzontale massima
- F0: valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
- T\*C: periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Il periodo di ritorno si determina con l'espressione:

$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - P_{V_R})}$$

Per tenere conto dei fattori locali del sito, l'accelerazione orizzontale massima attesa al sito è valutata con la relazione (DM 11/02/2018):

$$a_{\max} = S_s \cdot S_T \cdot \left( \frac{a_g}{g} \right)$$

dove:

- ag è l'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.
- S<sub>s</sub> è il fattore di amplificazione stratigrafica del terreno, funzione della categoria del sottosuolo di fondazione e dei parametri sismici F0 e ag/g (Tabella 3.2.IV del D.M. 11/02/2018);

**Tab. 3.2.IV – Espressioni di  $S_s$  e di  $C_c$** 

Categoria sottosuolo	$S_s$	$C_c$
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_c^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_c^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_c^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_c^*)^{-0,40}$

-  $S_T$  è il fattore di amplificazione che tiene conto delle condizioni topografiche, il cui valore dipende dalla categoria topografica e dall'ubicazione dell'opera (Tabella 3.2.V del D.M. 11/02/2018).

**Tab. 3.2.V – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$** 

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	$S_T$
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1,4

La categoria di sottosuolo è stata valutata sulla base dei risultati della caratterizzazione geotecnica, in particolare sulla base della velocità delle onde di taglio ponderata sui primi 30 metri di profondità. Sulla base degli andamenti delle suddette grandezze con la profondità, con riferimento al documento "Relazione geotecnica e di calcolo" (Rif. [9]) cui si rimanda per maggiori approfondimenti, si individua come categoria di sottosuolo la classe sismica "B". I valori delle grandezze necessarie per la definizione dell'azione sismica per le opere d'imbocco sono riassunti nei paragrafi seguenti.



	Strutture di sostegno
Coordinate geografiche	Latitudine: 45.42695; Longitudine 10.93887
$T_R$	1068
$a_g/g$	0,210
$F_0$	2.461
Categoria di sottosuolo	B
$S_s$	1.193
Categoria topografica	T1
$S_T$	1,00
$a_{max}/g$	0.251

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC BRESCIA EST - VERONA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO OVEST</b>					
	RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA TRATTO A SINGOLA FORNICE	COMMESSA IN10	LOTTO 10	CODIFICA D26CL	DOCUMENTO SL 02 00 002	REV. A

## 7 CRITERI DI ANALISI E VERIFICA DELLE OPERE

Le azioni considerate per la verifica delle strutture di sostegno dell'imbocco sono le seguenti:

- **Azioni permanenti strutturali (G1):** peso proprio degli elementi strutturali;
- **Azioni permanenti non strutturali (G2):** spinta del terreno a monte e a valle dell'opera; carico distribuito sul piano campagna a monte della struttura di sostegno al fine di simulare il piano campagna non orizzontale
- **Azioni variabili (Q<sub>k</sub>):** carico variabile sul piano campagna atto a simulare la presenza di sovraccarichi variabili in fase costruttiva legato alle varie fasi realizzative
- **Azione sismica (E):** Accelerazione orizzontale e verticale come definita al Cap. 6

Sulla base della definizione dei carichi di cui sopra, in accordo a quanto prescritto dal DM 17/01/2018, sono state individuate le combinazioni di carico per le verifiche di stati limite ultimi e di esercizio in condizioni statiche e in condizioni sismiche.

- Combinazione fondamentale (SLU)
- Combinazione caratteristica (SLE), generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio irreversibili: il coefficiente di combinazione per il carico variabile Q<sub>1</sub> è pari a 1
- Combinazione frequente (SLE), generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio reversibili: il coefficiente di combinazione per il carico variabile Q<sub>1</sub> è pari a 0.8
- Combinazione frequente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti di lungo termine: il coefficiente di combinazione per il carico variabile Q<sub>1</sub> è pari a 0
- Combinazione sismica (SLV): il coefficiente di combinazione per il carico variabile Q<sub>1</sub> è assunto pari a 0.2.

### 7.1 Approcci progettuali e metodi di verifica

In accordo con il § 6.5.3 di NTC2018, le verifiche delle strutture di sostegno sono state condotte nei riguardi dei seguenti stati limite ultimi (SLU GEO e SLU STR e SLE):

- collasso del complesso opera-terreno;
- instabilità globale dell'insieme terreno-opera;
- raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali.
- controllo dello stato tensionale e fessurativo degli elementi strutturali

Come prescritto dal DM 17/01/2018 per le strutture in oggetto, è stato adottato l'Approccio 1 con le due combinazioni di coefficienti parziali (tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.5.I del DM 14/01/2008):

- Combinazione 1: A1 + M1 + R1
- Combinazione 2: A2 + M2 + R1.



LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA  
LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC BRESCIA EST - VERONA  
NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO OVEST

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA  
TRATTO A SINGOLA FORNICE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN10	10	D26CL	SL 02 00 002	A	17 di 60

Il dimensionamento geotecnico dell'opera è stato condotto con la verifica di stati limite ultimi GEO, applicando la Combinazione 2 (A2+M2+R1); per quanto riguarda le verifiche di stati limite ultimi STR l'analisi è stata condotta la Combinazione 1 (A1+M1+R1).

Per le verifiche di stabilità globale è stato applicato l'Approccio 1- Combinazione 2 (A2+M2+R2 – Tabb. 6.2.I, 6.2.II e 6.8.I del DM 17/01/2018).

Il corretto dimensionamento nei confronti degli SLU GEO assicura che gli spostamenti dell'opera siano compatibili con le esigenze di funzionalità della stessa.

Le verifiche in condizioni sismiche sono state condotte con riferimento allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV), con riferimento alla configurazione finale dell'opera di sostegno. Per le verifiche in condizioni sismiche i coefficienti parziali sulle azioni sono pari all'unità. Si è adottato il metodo pseudostatico, calcolando il coefficiente sismico orizzontale e verticale secondo le prescrizioni della normativa (DM 17/01/2008):

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

$$k_v = \pm 0.5 k_h$$

dove:

- $a_{max}$  è l'accelerazione orizzontale massima attesa al sito;
- $\beta_m$  coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito, a favore di sicurezza e in ipotesi di strutture rigide ed impedito di subire spostamenti relativi rispetto al terreno si assume  $\beta_m=1$ .

L'effetto del terremoto si ottiene applicando i valori di  $k_h$  e  $k_v$  al modello geotecnico nel software PLAXIS.

## 8 VERIFICA DELLA STRUTTURA “METODO MILANO TRATTO A SINGOLA FORNICE” DEL SOTTOPASSO SL02

Le verifiche statiche della paratia sono state condotte mediante il codice di calcolo Plaxis 2D. Le sezioni di calcolo implementate nel codice sono di seguito indicate con riferimento alla figura seguente:

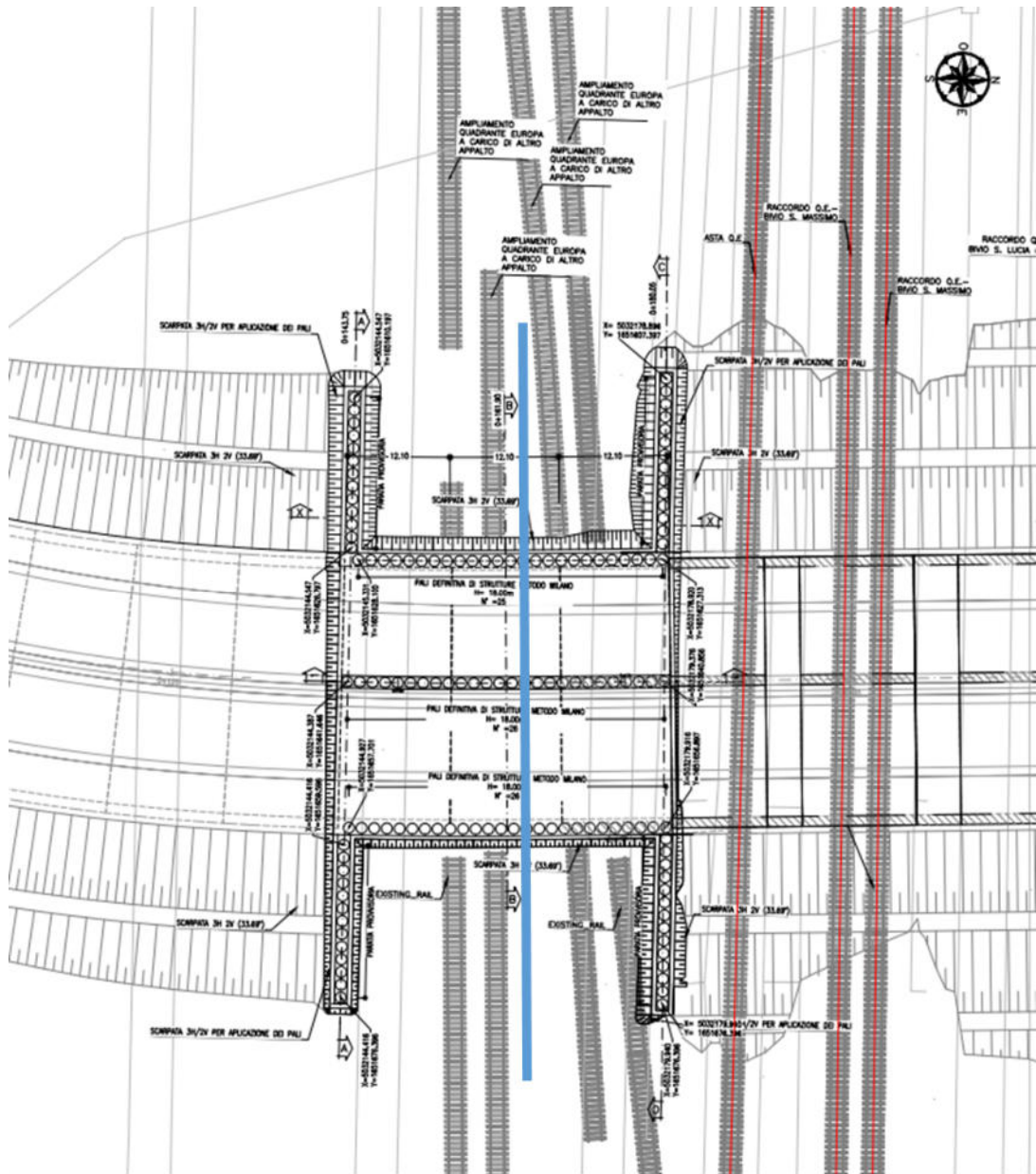


Figura 8 – Sezione di calcolo dalla vista in pianta

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA  
TRATTO A SINGOLA FORNICE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN10	10	D26CL	SL 02 00 002	A	19 di 60

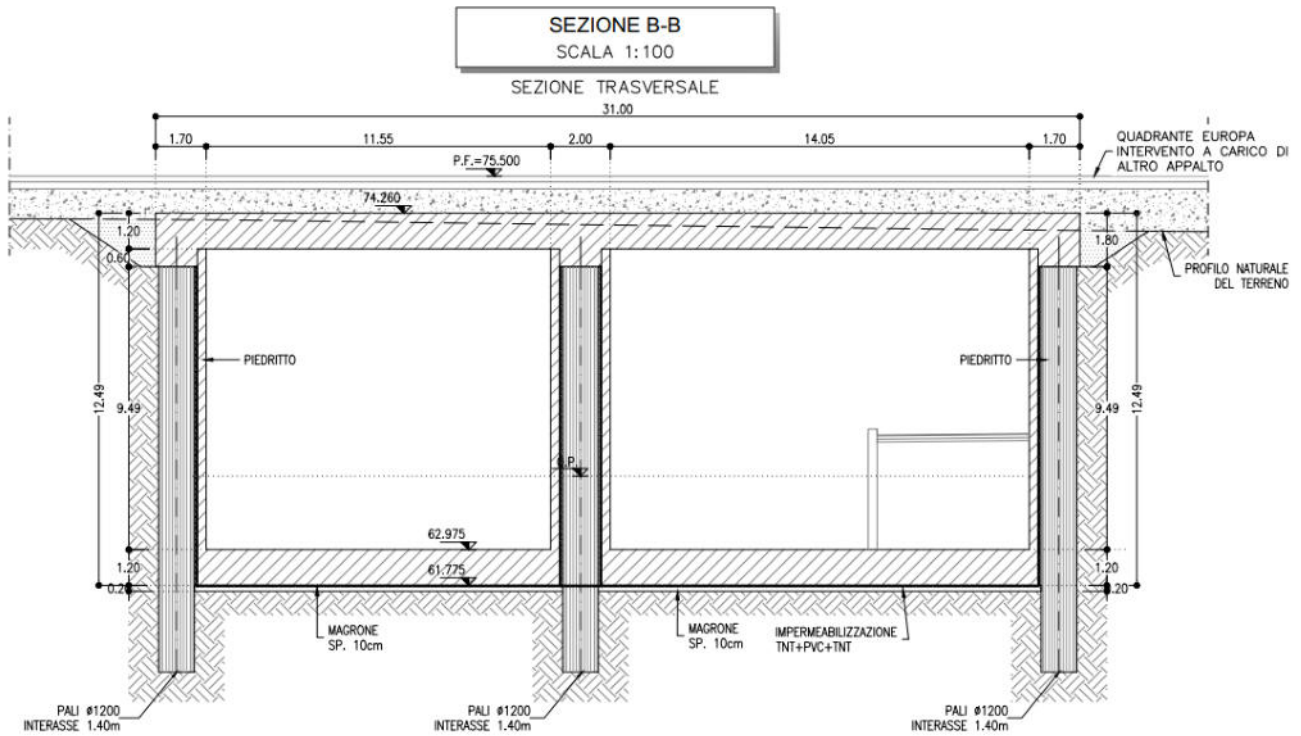


Figura 9 – Sezione di calcolo

### 8.1 Descrizione del modello di calcolo

Sono di seguito descritte le principali caratteristiche della struttura e del modello geotecnico per le analisi di verifica.

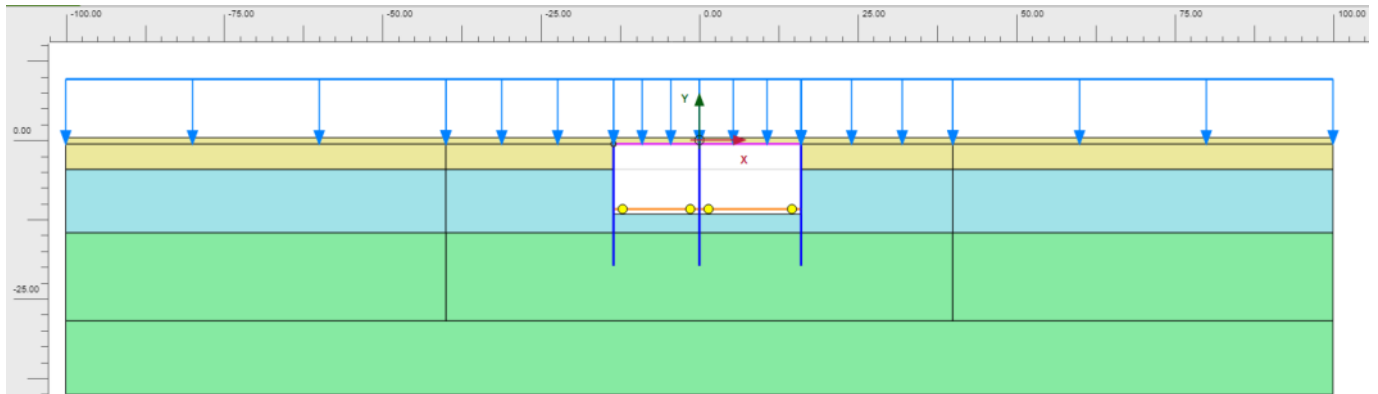


Figura 10 – Modello di calcolo: geometria, stratigrafia e carichi applicati

Nella di seguito si riportano i principali elementi geometrici della sezione di calcolo (Tabella 2).

Tabella 2 Caratteristiche geometriche della sezione di calcolo

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipologia struttura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pali Ø1200 mm ad interasse 1.4 m, calcestruzzo C30/37</li> <li>• Soletta superiore sp. 1.20m,</li> <li>• Soletta base sp. 1.20m,</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altezza totale di pali</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>H_{tot} = 18</math> m</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altezza di scavo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>H = 11.07</math>m (da estradosso soletta)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sovraccarichi permanenti sopra di strutture e superficie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ritombamento + carichi di mezzi ferroviario 74,70 kPa</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• assente</li> </ul>



**Tabella 3 Parametri geotecnici di calcolo**

<i>Strato</i>	<i>Profondità da (m da p.c.)</i>	<i>Profondità a (m da p.c.)</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Peso di volume <math>\gamma</math> [kN/m<sup>3</sup>]</i>	<i>Tipo di terreno</i>	<i>Angolo di resistenza al taglio <math>\phi'</math> (°)</i>	<i>C' (kPa)</i>	<i>Modulo elastico Eop (MPa)</i>
<b>1</b>	0.00	5.00	Materiale rimaneggiato e/o di riporto antropico	19.00	MR	42.00	0.00	47.00
<b>2</b>	5.00	15.00	Ghiaia Poligenica	19.00	GP	40.00	0.00	70.00
<b>3</b>	15.00	Sotto	Ghiaia Poligenica	19.00	GP	38.00	0.00	80.00

**Tabella 4 Parametri per il calcolo dell'azione sismica**

<i>Terreno</i>	<i>Condizione</i>	<i>Categoria sottosuolo</i>	<i>Categoria topografica</i>	<i>a<sub>g</sub>/g</i>	<i>S<sub>s</sub></i>	<i>S<sub>t</sub></i>	<i>a<sub>max</sub>/g</i>
		(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
MR-GP	SLV	B	T1	0,210	1,193	1,00	0,251

Ci sono 4 diversi elementi strutturali. queste sono pali, soletta superiore, soletta base sinistra e soletta base destra. Ogni materiale è assegnato come piastra sul Plaxis2D. Le rigidità utilizzate per gli elementi sono riassunte di seguito:

**Tabella 5 Parametri elementi della struttura per il calcolo**

<i>Elementi strutturali</i>	<b>Modulo Elastica E [Mpa]</b>	<b>Rigidità Assiale EA [kN/m]</b>	<b>Rigidità flessionale EI [kNm<sup>2</sup>/m]</b>	$\gamma_{\text{calcestruzzo}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	<b>w [kN/m/m]</b>
Pali	32000	25850819	2326573	25	20,20
Soletta Superiore	32000	38400000	4608000	25	30
Soletta Base	32000	38400000	4608000	25	30

## 8.2 Analisi dei carichi Ferroviari

I carichi verticali sono definiti per mezzo di modelli di carico, in particolare sono forniti due treni di carico distinti: il primo rappresentativo del traffico normale LM71, il secondo rappresentativo del traffico pesante SW2.

### Coefficiente di adattamento $\alpha$

I valori dei suddetti carichi relativi alla configurazione LM71 e SW2 dovranno essere moltiplicati per un coefficiente di adattamento, variabile in ragione della tipologia dell'Infrastruttura (ferrovia ordinaria, ferrovia leggera metropolitana), viene di seguito riportata la tabella con la variabilità del coefficiente in base al tipo di linea o categoria di linea.

Tipi di linea o categorie di linea STI	Valore minimo del fattore alfa ( $\alpha$ )
IV	1.1
V	1.0
VI	1.1
VII-P	0.83
VII-F, VII-M	0.91

Per completezza di informazioni viene di seguito riportata la tabella attinente alla categorie di linea STI per il sottosistema Infrastruttura del sistema ferroviario convenzionale:

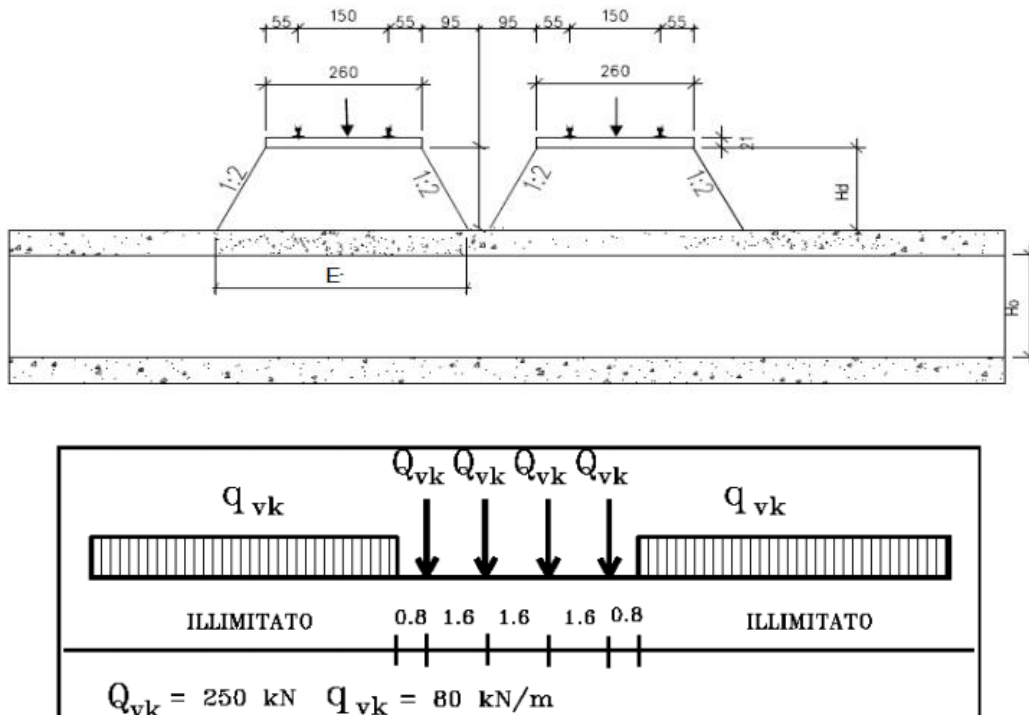


Fig. 5.2.1 - Modello di carico LM71

$H_d \approx 1.5\text{m}$

$L_{net} = 11.6\text{m}$

$\Phi 1 = 1.4$



**LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA**  
**LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC BRESCIA EST - VERONA**  
**NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO OVEST**

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA  
TRATTO A SINGOLA FORNICE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN10	10	D26CL	SL 02 00 002	A	23 di 60

$$\Phi 2 = [2.16 / (L_{clear}^{0.5} - 0.2)] + 0.73 = 1.40$$

diffondere il carico del treno =  $80 \times 1.4 \times 1.4 = 156.8 \text{ kN/m}$

carico del treno singolo =  $250 \times 1.4 \times 1.4 = 490 \text{ kN}$

$E = 4.1 \text{ m}$

$A = 4.1 \times 1.6 = 6.56 \text{ m}$

Carico LM71  $\rightarrow W_{trn}(\text{singolo}) = 490 / 6.56 = 74.7 \text{ kN/m}^2$

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC BRESCIA EST - VERONA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO OVEST</b>					
	RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA TRATTO A SINGOLA FORNICE	COMMESSA IN10	LOTTO 10	CODIFICA D26CL	DOCUMENTO SL 02 00 002	REV. A

### 8.3 Fasi di calcolo implementate nei modelli

L'analisi del modello galleria artificiale scatolare è stata organizzata secondo le fasi seguenti, per maggiori dettagli fare riferimento ai risultati del calcolo;

- Condizione geostatica
- Esecuzione della paratia di pali
- Attivazione della soletta superiore
- Scavo fino a -4.60 m dalla base della soletta sinistra
- Scavo fino a -11.07 m dalla base della soletta sinistra
- Attivazione del solettone di fondo sinistra
- Scavo fino a -4.60 m dalla base della soletta destra
- Scavo fino a -11.07 m dalla base della soletta destra
- Attivazione del solettone di fondo destra
- Ritombamento superiore (1m da estradosso soletta) e applicazione del carico variabile  $q=74.70$  kPa (mezzi ferroviere) per verifiche agli stati limite di esercizio (SLE)
- Verifiche stato limite di resistenza del terreno (GEO)
- Verifiche agli stati limite di esercizio (SLU)
- Verifiche Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) e applicazione delle forze sismiche sono assegnate come effetto pseudostatico

#### 8.4 Verifica del complesso opera-terreno

La verifica è finalizzata a garantire il corretto dimensionamento dell'opera con particolare riferimento alla profondità di infissione della paratia, sia in condizioni statiche (SLU) che sismiche (SLV). A tale scopo, nei prospetti che seguono, sono riportati gli output in termini di deformata dell'opera.

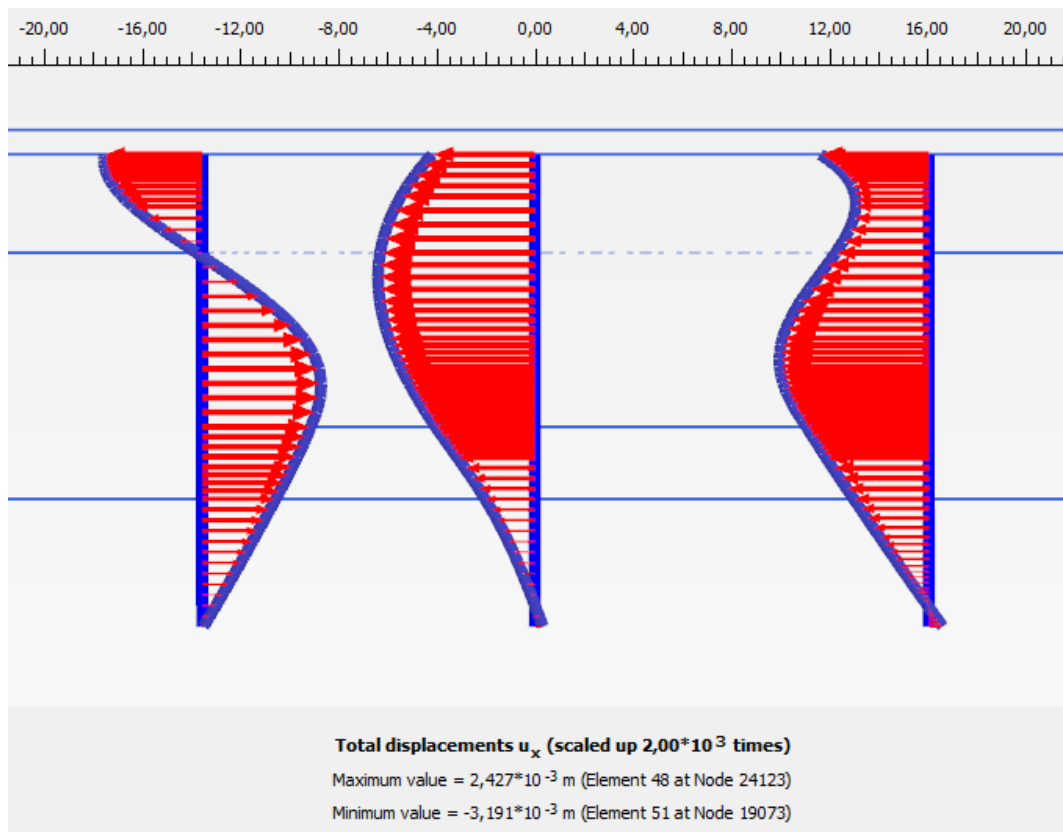


Figura 11 – Involuppo della deformata dell'opera (SLU) nei vari step di calcolo

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA  
 TRATTO A SINGOLA FORNICE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN10	10	D26CL	SL 02 00 002	A	26 di 60

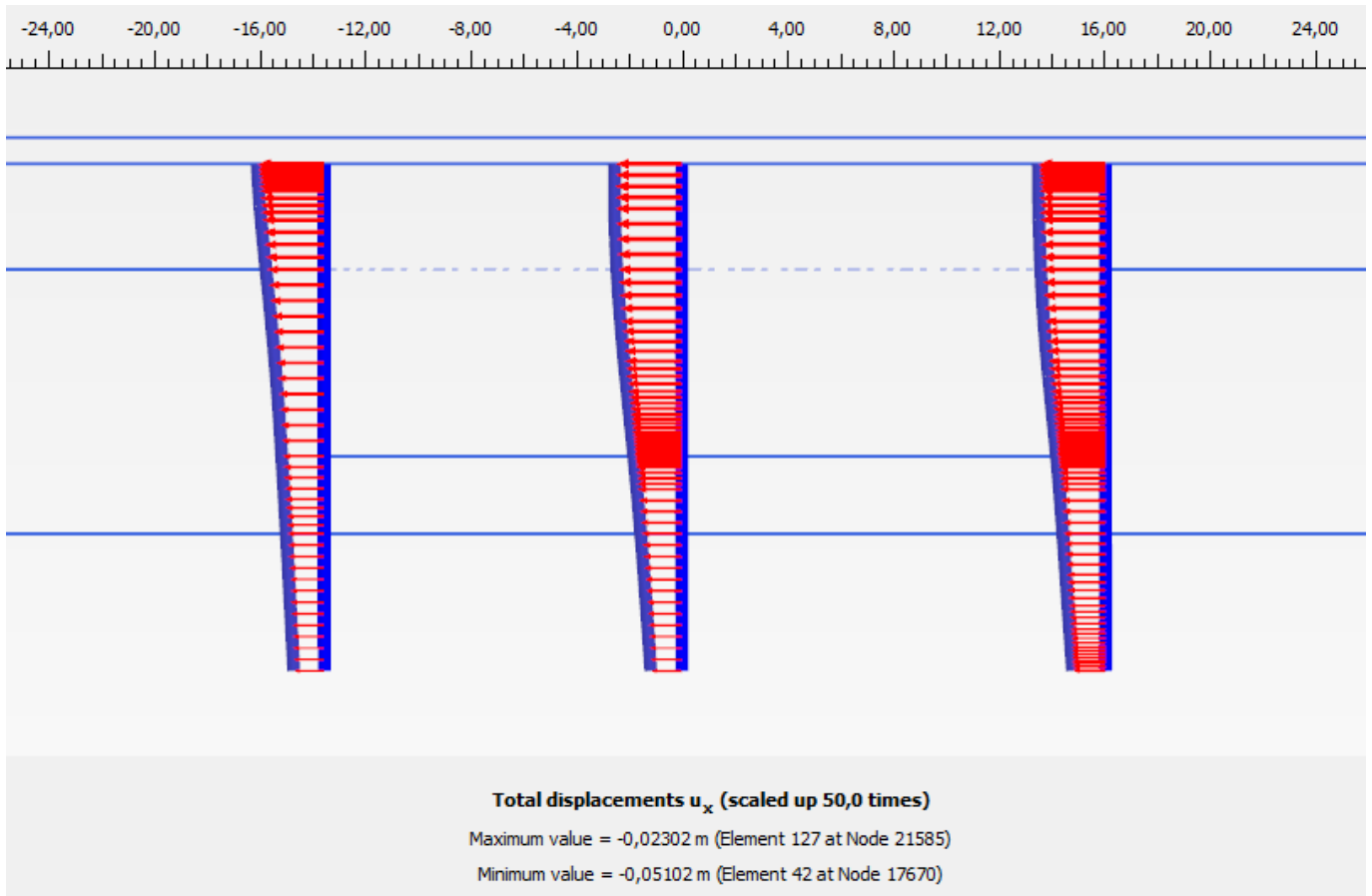


Figura 12 – Involuppo della deformata dell'opera (SLV(+)) nei vari step di calcolo



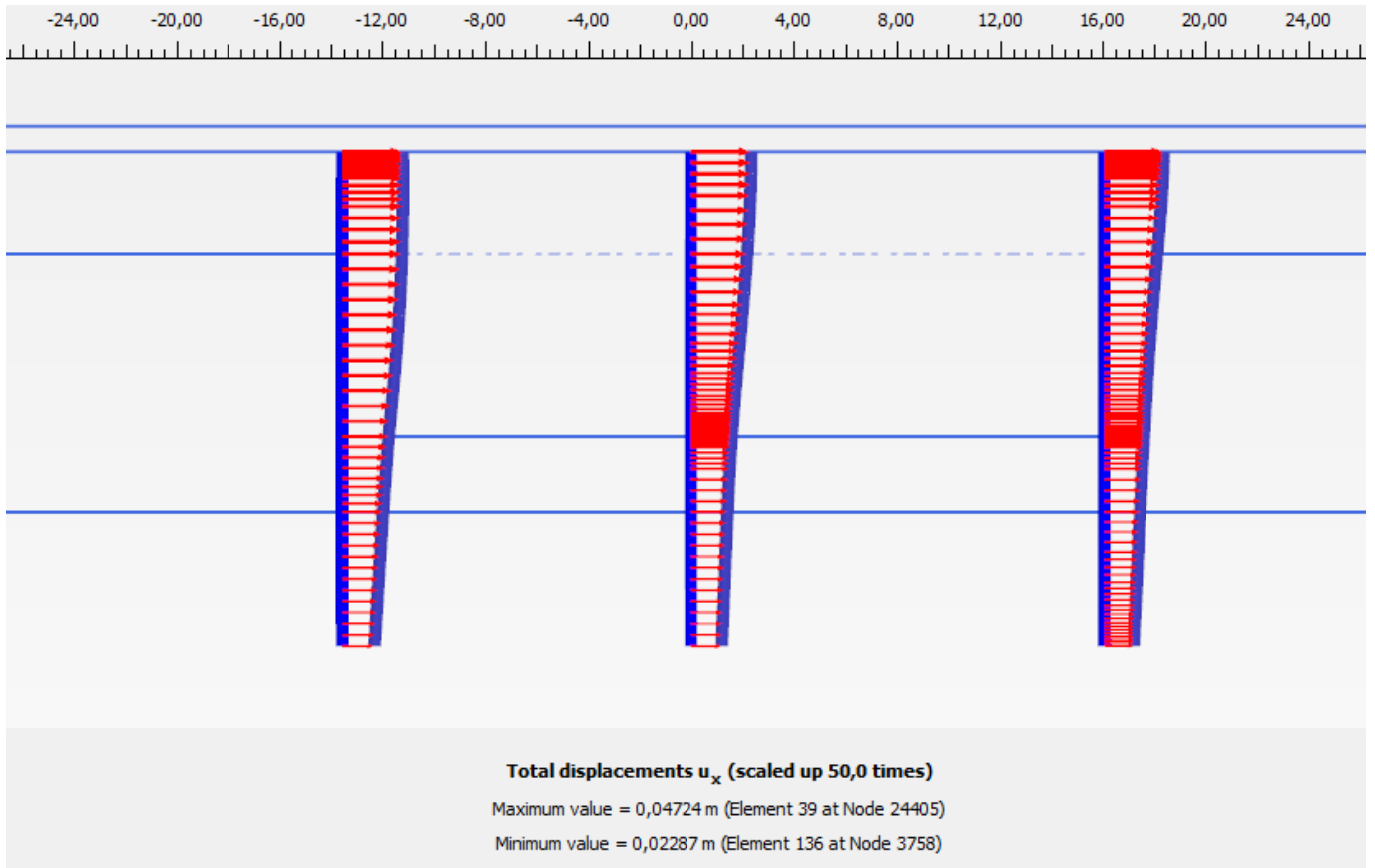


Figura 13 – Involuppo della deformata dell'opera (SLV(-)) nei vari step di calcolo

## 8.5 Verifiche strutturali dei Pali Scatolare

Nei prospetti che seguono, per le combinazioni STR statica e sismica, si riportano gli andamenti delle caratteristiche della sollecitazione sulla paratia di pali per tutte le fasi di calcolo ed i valori delle sollecitazioni massime, utilizzate per le verifiche strutturali.

Le sollecitazioni strutturali date nella seguente tabella sono valori massimi da 3 pali della struttura. I valori delle sollecitazioni strutturali lungo i pali sono variabili, mentre nella parte superiore del palo questi valori sono alti, nella parte inferiore sono bassi.

Pertanto, i pali sono divisi in 2 gabbie, al fine di ottimizzare l'incidenza del rinforzo. La gabbia-1 va dalla cima della pila a 10,5 m (della pila) e la gabbia-2 va da 10,5 m alla base della pila.

**Tabella 6 Gabbia 1 - Sollecitazioni SLU, SLE e SLV**

<i>Condizione</i> [-]	<i>Fase di calcolo</i> [-]	<i>Soll. Max.</i> [-]	<i>Quota</i> [m]	$M_{sd}$ [kNm/m]	$T_{sd}$ [kN/m]	$N_{sd}$ [kN/m]
SLU	Fondo Scavo	Momento	-1.80	1134	370	1042
	Fondo Scavo	Taglio	-1.80	1134	370	1042
SLE	Fondo Scavo	Momento	-1.80	1018	337	900
SLV	Sisma	Momento	-1.80	1272	462	567
	Sisma	Taglio	-1.80	1272	462	567

**Tabella 7 Gabbia 2 - Sollecitazioni SLU, SLE e SLV**

<i>Condizione</i> [-]	<i>Fase di calcolo</i> [-]	<i>Soll. Max.</i> [-]	<i>Quota</i> [m]	$M_{sd}$ [kNm/m]	$T_{sd}$ [kN/m]	$N_{sd}$ [kN/m]
SLU	Fondo Scavo	Momento	-12.3	96	81	1111
	Fondo Scavo	Taglio	-12.3	96	81	1111
SLE	Fondo Scavo	Momento	-12.3	91	91	1210
SLV	Sisma	Momento	-12.3	438	181	320
	Sisma	Taglio	-12.3	438	181	320

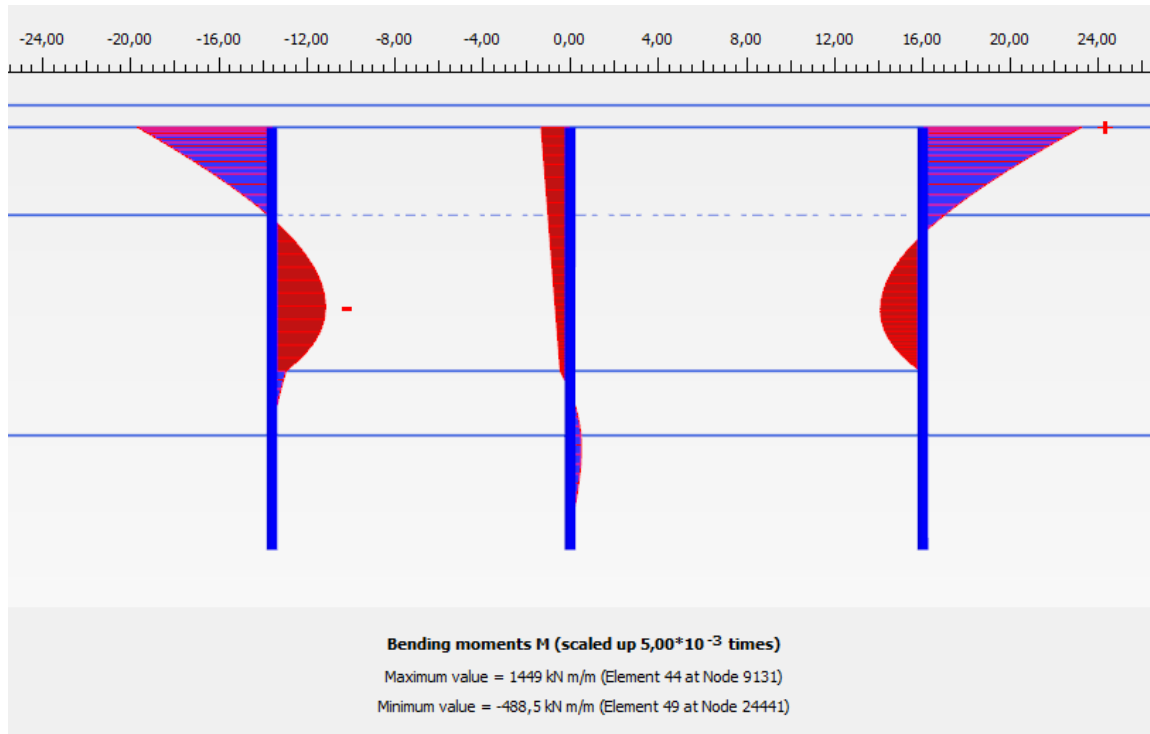


Figura 14: Momento flettente statico agente nei pali (SLE)

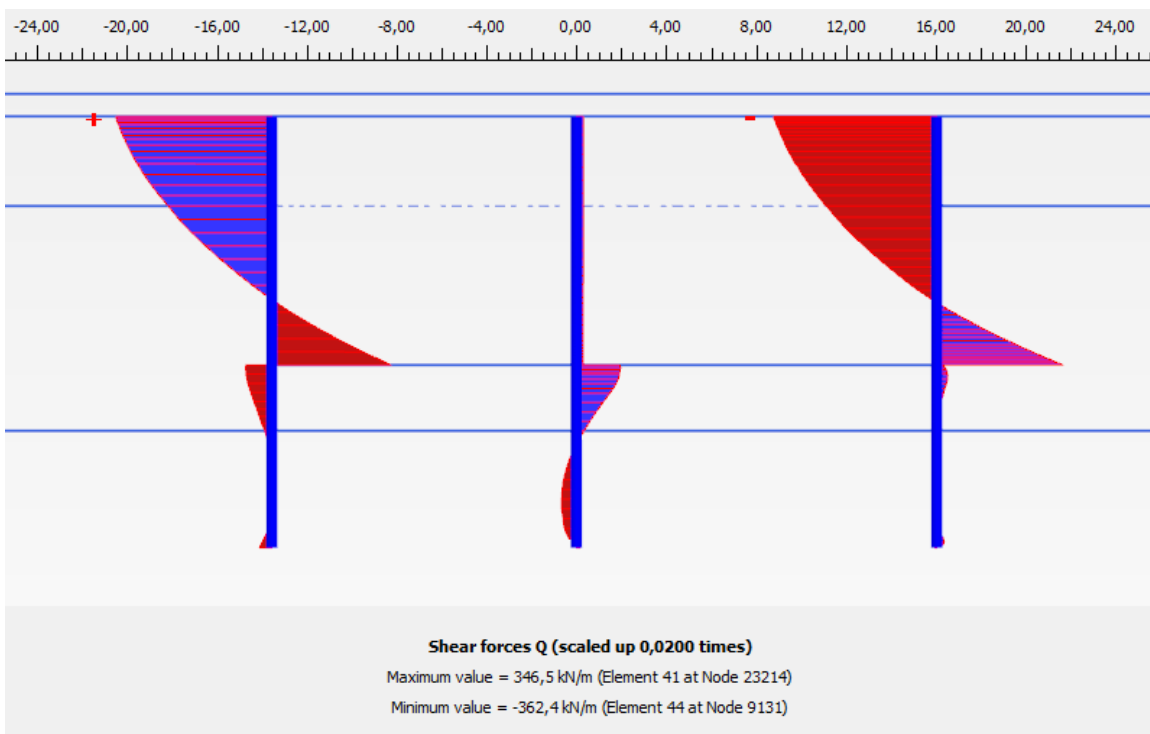
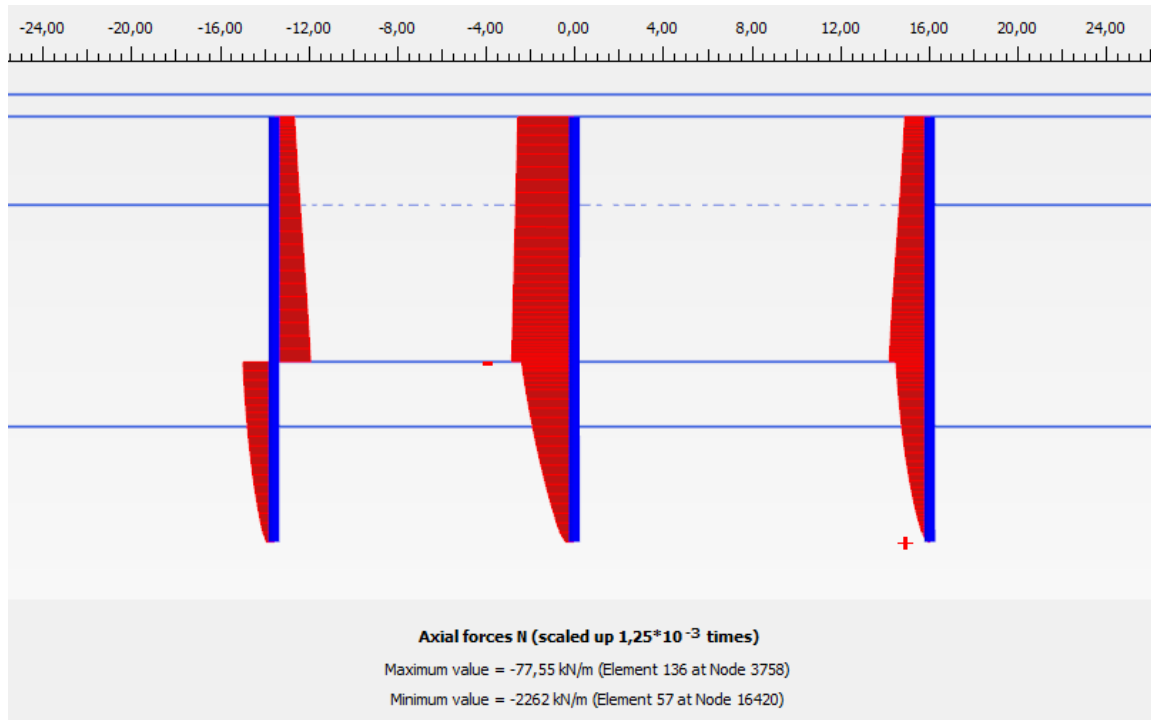


Figura 15: Taglio statico agente nei pali (SLE)

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA  
TRATTO A SINGOLA FORNICE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN10	10	D26CL	SL 02 00 002	A	30 di 60



*Figura 16: Sforzo normale statico agente nei pali (SLE)*

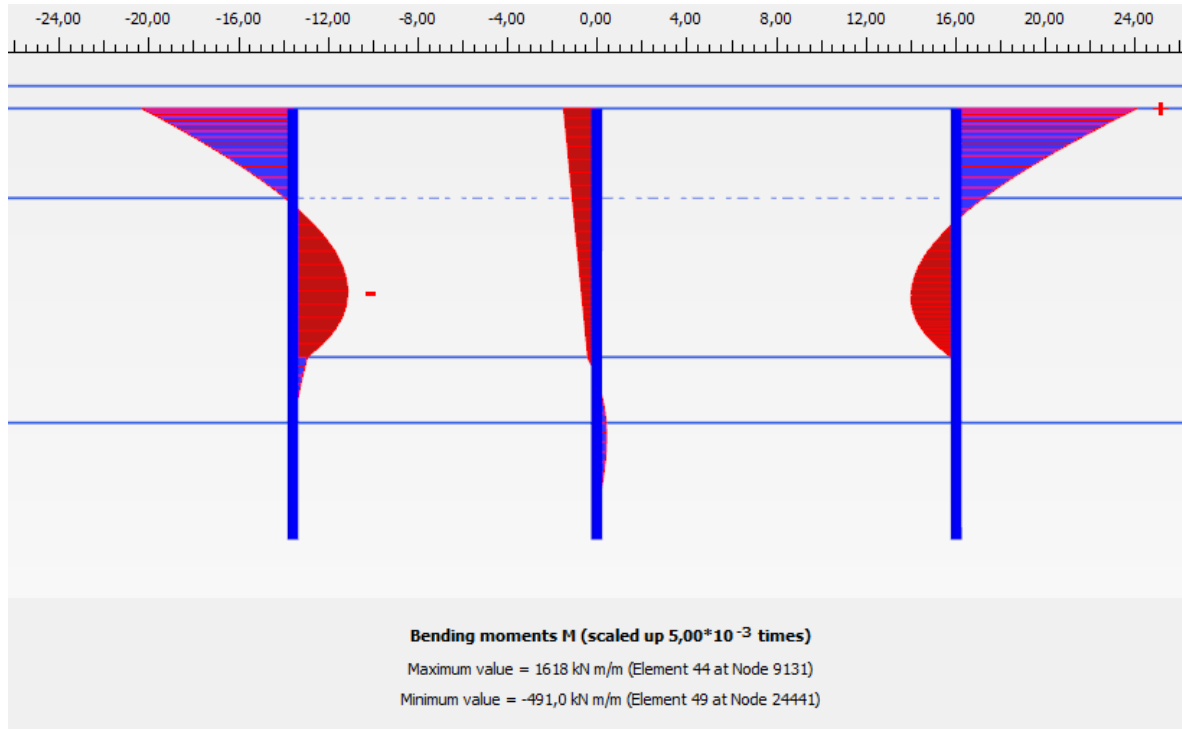


Figura 17: Momento flettente statico agente nei pali (SLU)

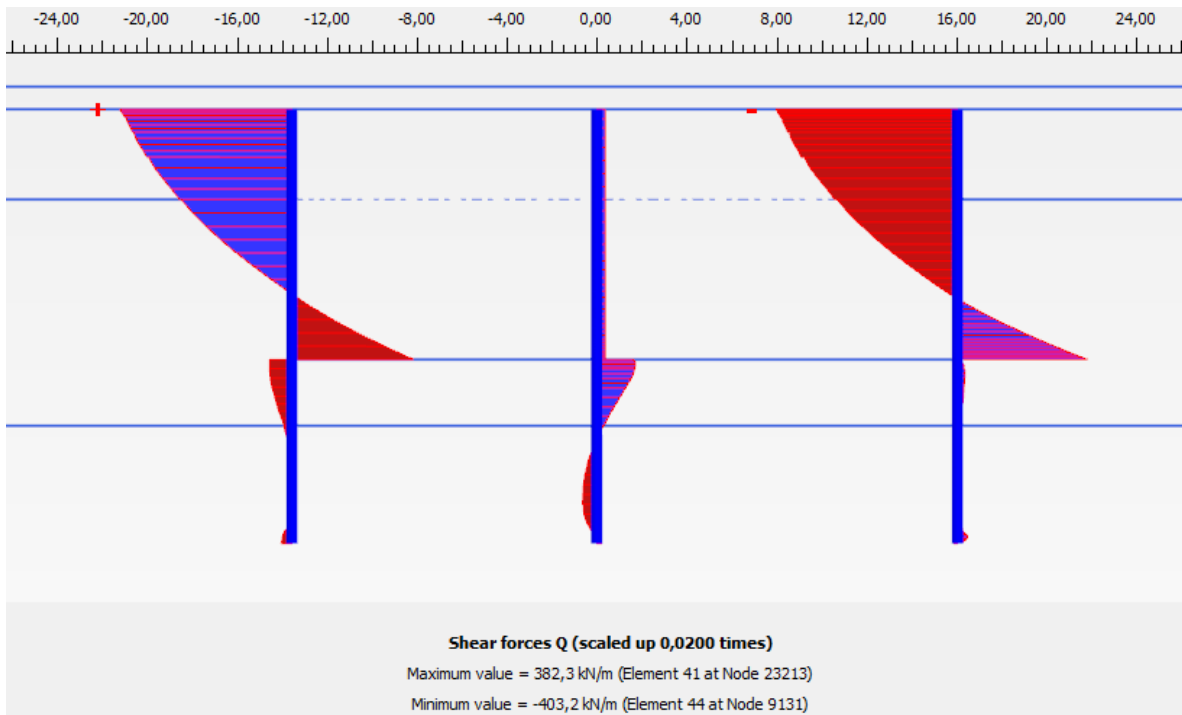


Figura 18: Taglio statico agente nei pali (SLU)

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA  
TRATTO A SINGOLA FORNICE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN10	10	D26CL	SL 02 00 002	A	32 di 60

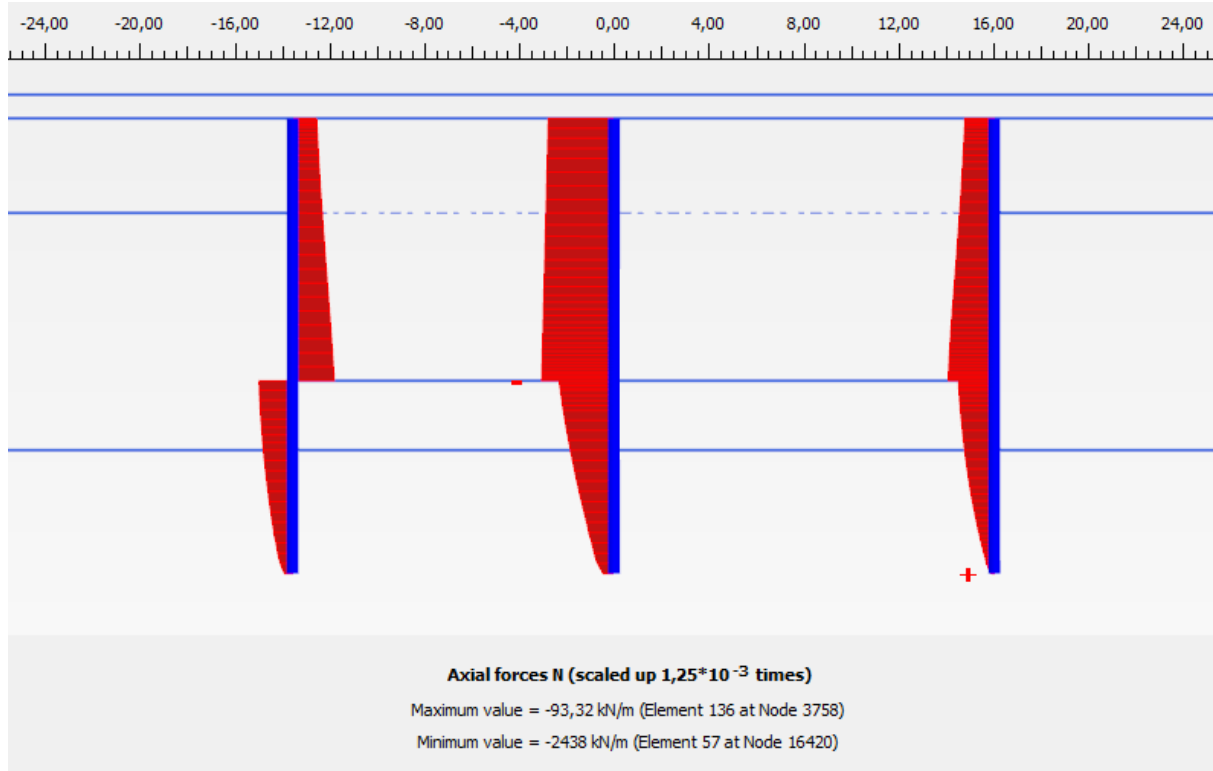


Figura 19: Sforzo normale statico agente nei pali (SLU)



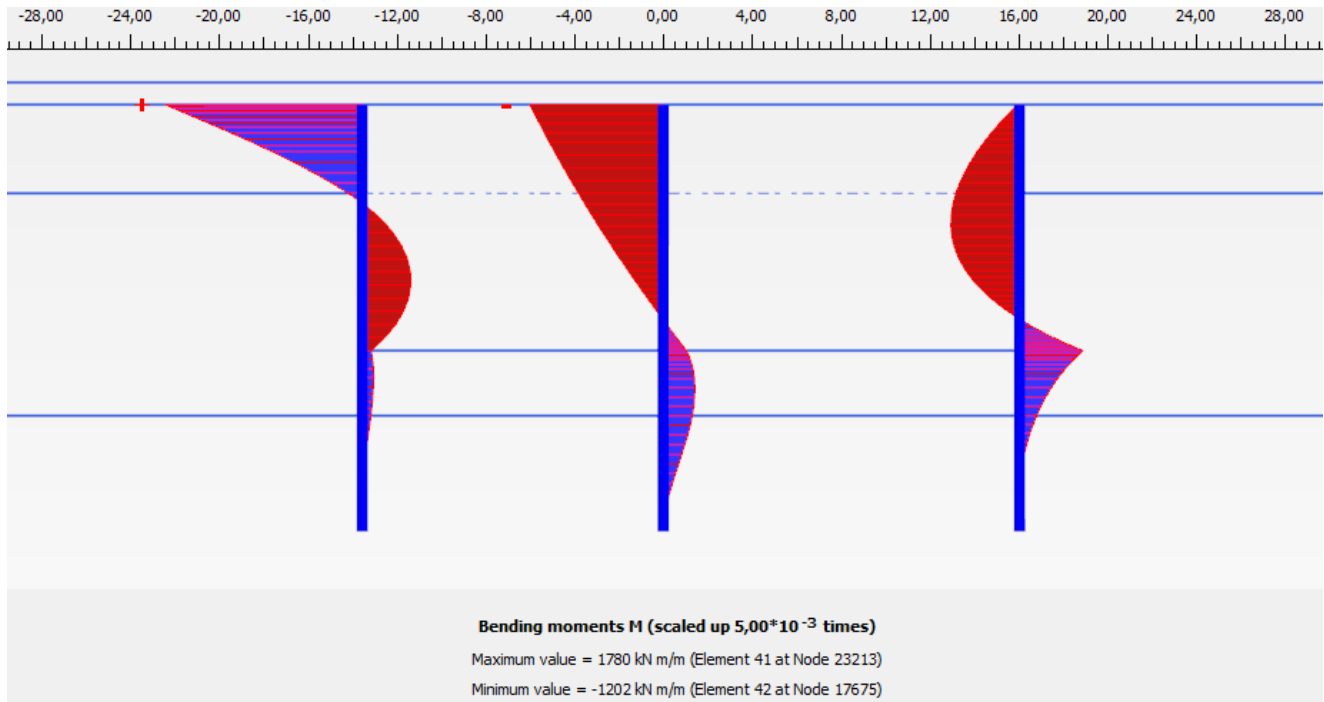


Figura 20: Momento flettente statico agente nei pali (SLV+)

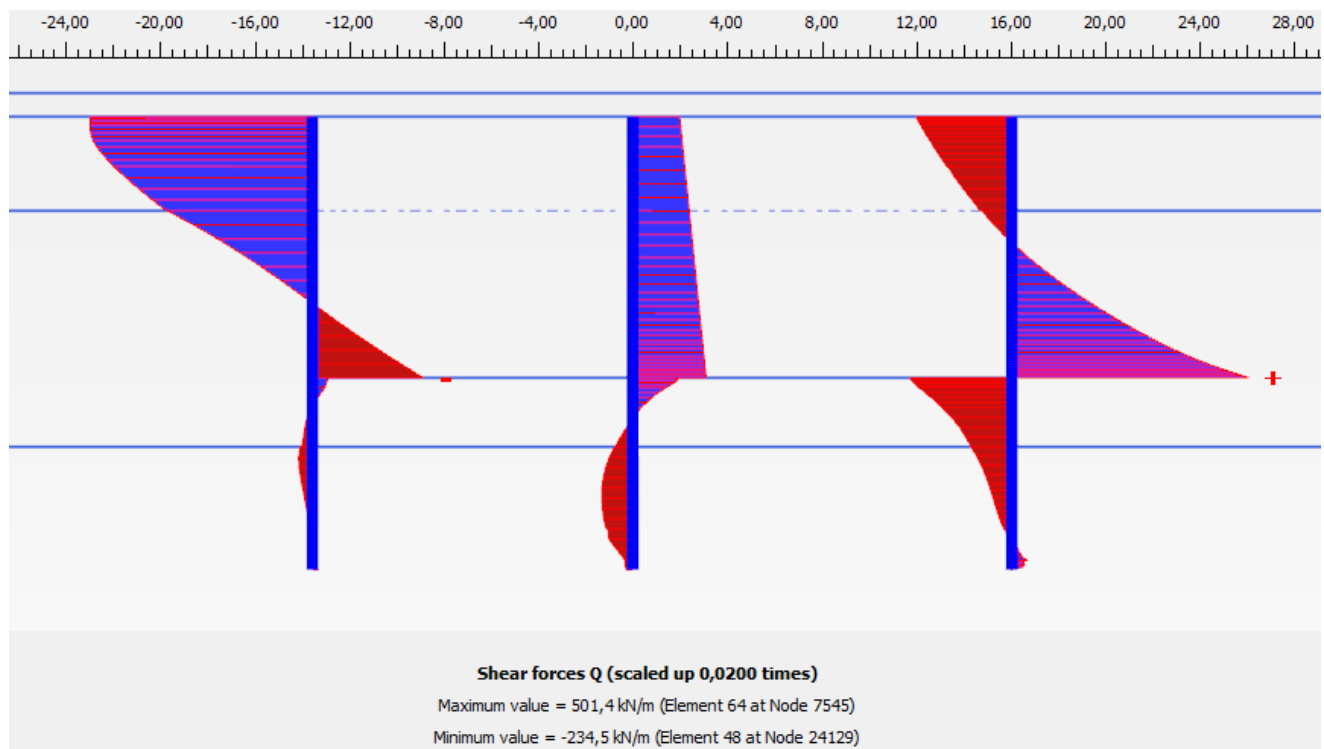
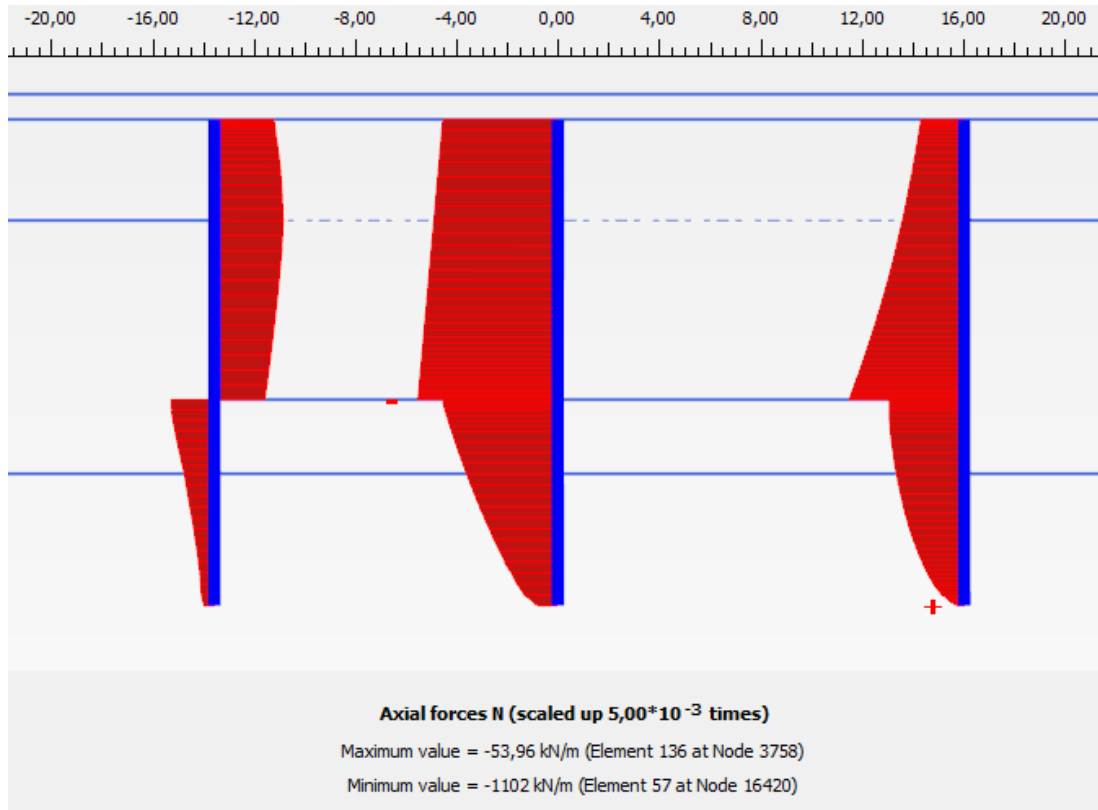


Figura 21: Taglio statico agente nei pali (SLV+)

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA  
TRATTO A SINGOLA FORNICE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN10	10	D26CL	SL 02 00 002	A	34 di 60



*Figura 22: Sforzo normale statico agente nei pali (SLV+)*

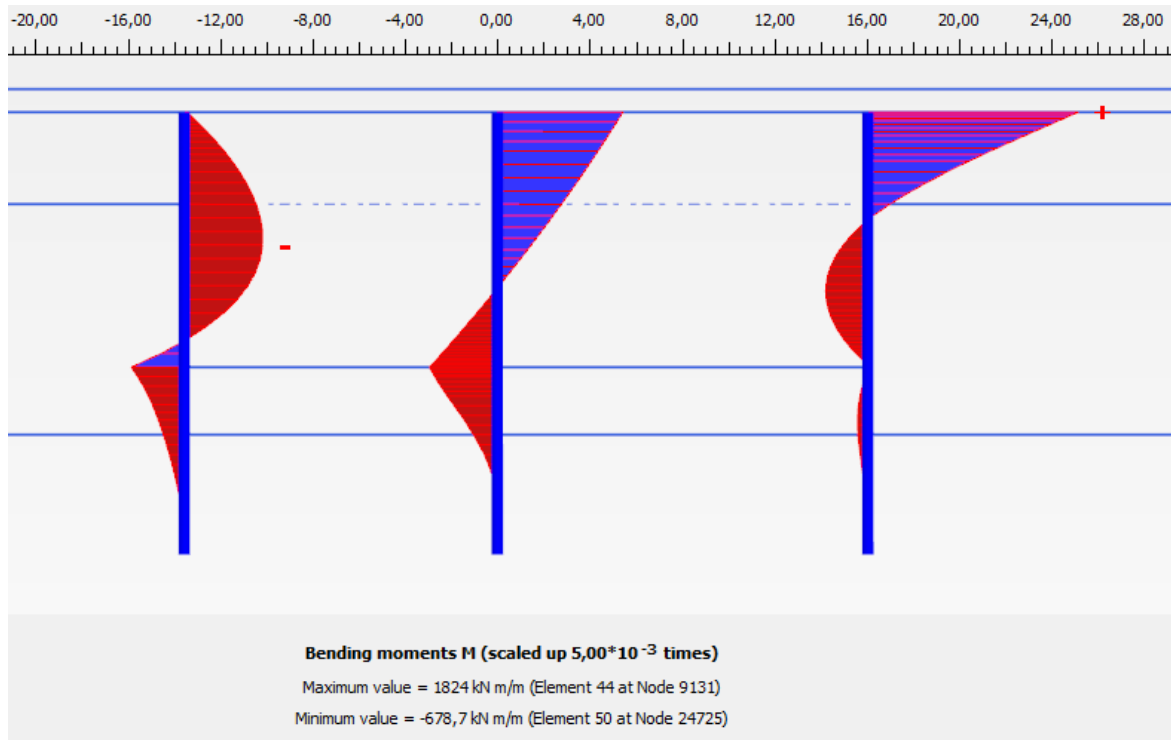


Figura 23: Momento flettente statico agente nei pali (SLV-)

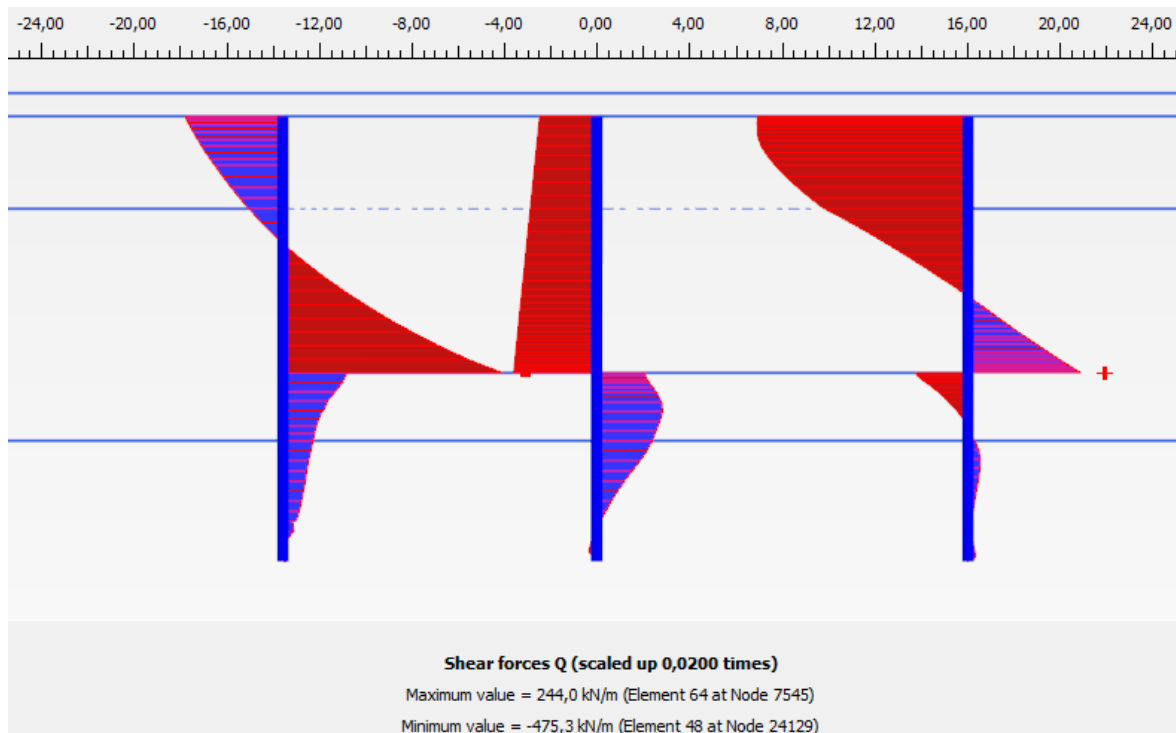


Figura 24: Taglio statico agente nei pali (SLV-)

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA  
TRATTO A SINGOLA FORNICE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN10	10	D26CL	SL 02 00 002	A	36 di 60

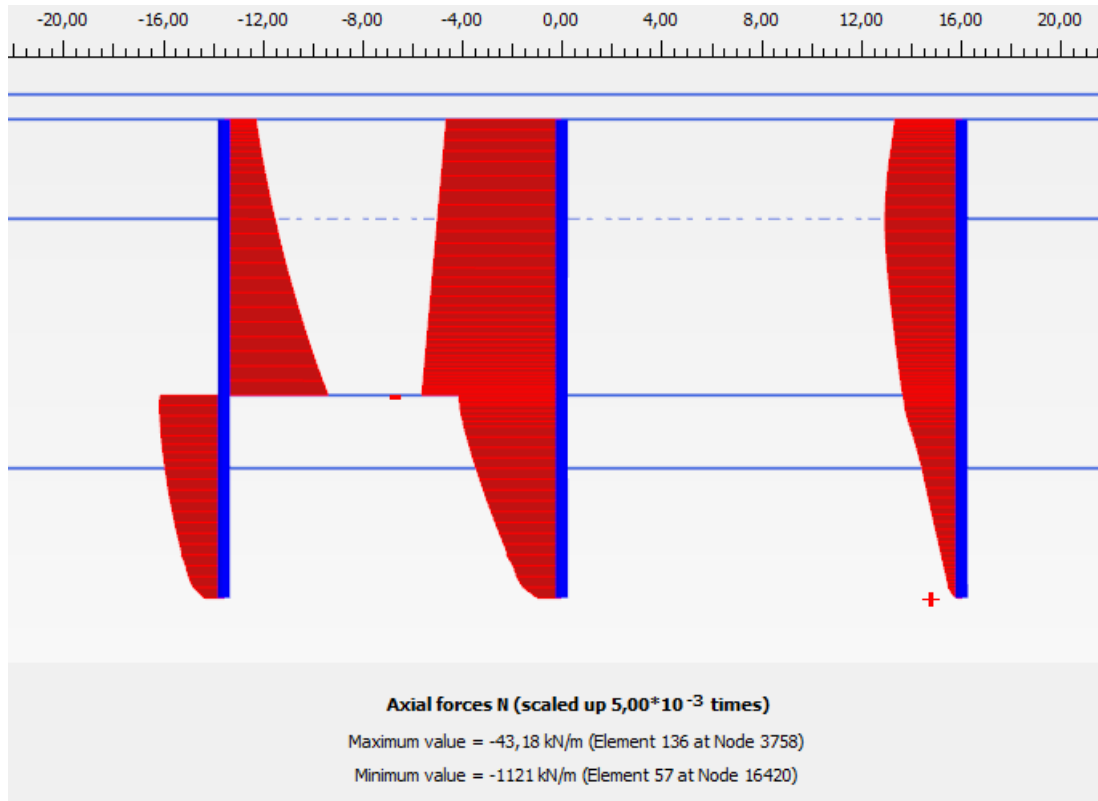


Figura 25: Sforzo normale statico agente nei pali (SLV-)

La tabella seguente mostra le sollecitazioni massime di progetto in valore assoluto risultanti dall'analisi, ottenute applicando il coefficiente parziale, fornito da NTC 2018 per il calcolo dello SLU. I valori moltiplicati per la distanza tra i pali (1,4m) per ottenere la sollecitazione agente sul singolo palo.

**Tabella 8 Gabbia 1 - Sollecitazioni SLU, SLE e SLV**

<i>Condizione</i> [-]	<i>Fase di calcolo</i> [-]	<i>Soll. Max.</i> [-]	<i>Quota</i> [m]	$M_{Sd}$ [kNm]	$T_{Sd}$ [kN]	$N_{Sd}$ [kN]
SLU	Fondo Scavo	Momento	-1.80	2063,88	673,4	1896,44
	Fondo Scavo	Taglio	-1.80	2063,88	673,4	1896,44
SLE	Fondo Scavo	Momento	-1.80	1425,2	471,8	1260
SLV	Sisma	Momento	-1.80	1780,8	646,8	793,8
	Sisma	Taglio	-1.80	1780,8	646,8	793,8

**Tabella 9 Gabbia 2 - Sollecitazioni SLU, SLE e SLV**

<i>Condizione</i> [-]	<i>Fase di calcolo</i> [-]	<i>Soll. Max.</i> [-]	<i>Quota</i> [m]	$M_{Sd}$ [kNm]	$T_{Sd}$ [kN]	$N_{Sd}$ [kN]
SLU	Fondo Scavo	Momento	-12.3	174,72	147,42	2022,02
	Fondo Scavo	Taglio	-12.3	174,72	147,42	2022,02
SLE	Fondo Scavo	Momento	-12.3	127,4	127,4	1694
SLV	Sisma	Momento	-12.3	613,2	253,4	448
	Sisma	Taglio	-12.3	613,2	253,4	448

Tabella 10: Gabbia 1: materiali strutturali e geometria di verifica

MATERIALI						GEOMETRIA				
Calcestruzzo			Acciaio			Sezione trasversale				
R <sub>ck</sub>	37	Mpa	f <sub>yk</sub>	450	Mpa	D	120	cm		
f <sub>ck</sub>	31	Mpa	E <sub>s</sub>	200000	Mpa	d	108,7	cm		
E <sub>cm</sub>	33000	Mpa	γ <sub>c</sub>	1.15	-	Armatura longitudinale				
γ <sub>c</sub>	1.5	-	f <sub>yd</sub>	391.3	Mpa	n <sub>barre</sub>	Φ	c	A <sub>sl</sub>	
α <sub>cc</sub>	0.85	-	ε <sub>uk</sub>	75	‰		mm	mm	cm <sup>2</sup>	
f <sub>cd</sub>	14.1	Mpa				20	26	60	106,19	
f <sub>ctm</sub>	2.6	MPa				20	26	112	106,19	
v	0.5	-	Armatura a taglio							
ε <sub>c2</sub>	2	‰				tipo	Φ	passo	c	
ε <sub>cu2</sub>	3.5	‰					mm	cm	mm	
α <sub>e</sub>	15.0	-				Spirale	14	15	60	
k <sub>t</sub>	0.6	-				Valori limite				
k <sub>1</sub>	0.8	-								
k <sub>2</sub>	0.5	-	0,45 f <sub>ck</sub>	13.8	Mpa					
k <sub>3</sub>	1.76	-	0,75 f <sub>yk</sub>	337.5	Mpa					
k <sub>4</sub>	0.425	-	W <sub>k,lim</sub>	0.2	mm					

Tabella 11 : Gabbia 2 - Verifica combinazione Mmax e MSLE

SLE			SLU/SLV		
M <sub>Ek</sub>	1425,20	[kNm]	M <sub>Ed</sub>	2063,88	[kNm]
N <sub>Ek</sub>	-900,00	[kN]	N <sub>Ed</sub>	-1354,60	[kN]
Quota asse neutro			V <sub>Ed</sub>	673,40	[kN]
y <sub>a.n.</sub>	48,09	[cm]	Presso-flessione		
Tensioni			M <sub>Rd</sub>	3977	[kNm]
σ <sub>c,max</sub>	-9,2	[MPa]	FS	1,93	-
σ <sub>s,min</sub>	-90,12	[MPa]	Taglio		
σ <sub>s,max</sub>	179,2	[MPa]	V <sub>Rd</sub>	498,0	[kN]
Fessurazione			Necessita di armatura a taglio		
ε <sub>sm</sub> - ε <sub>cm</sub>	0,64	[‰]	V <sub>Rsd</sub>	1705,5	[kN]
s <sub>r,max</sub>	17,2	[cm]	V <sub>Rcd</sub>	2576,8	[kN]
w <sub>k</sub>	0,110	[mm]	θ	21,8	°

Tabella 12 : Verifica combinazione Tmax

SLU/SLV		
$M_{Ed}$	<b>2063,88</b>	[kNm]
$N_{Ed}$	<b>0,0</b>	[kN]
$V_{Ed}$	<b>673,40</b>	[kN]
Presso-flessione		
$M_{Rd}$	<b>3581</b>	[kNm]
FS	1,74	-
Taglio		
$V_{Rd}$	498,0	[kN]
Necessita di armatura a taglio		
$V_{Rsd}$	1705,5	[kN]
$V_{Rcd}$	2576,8	[kN]
$\theta$	21,8	°

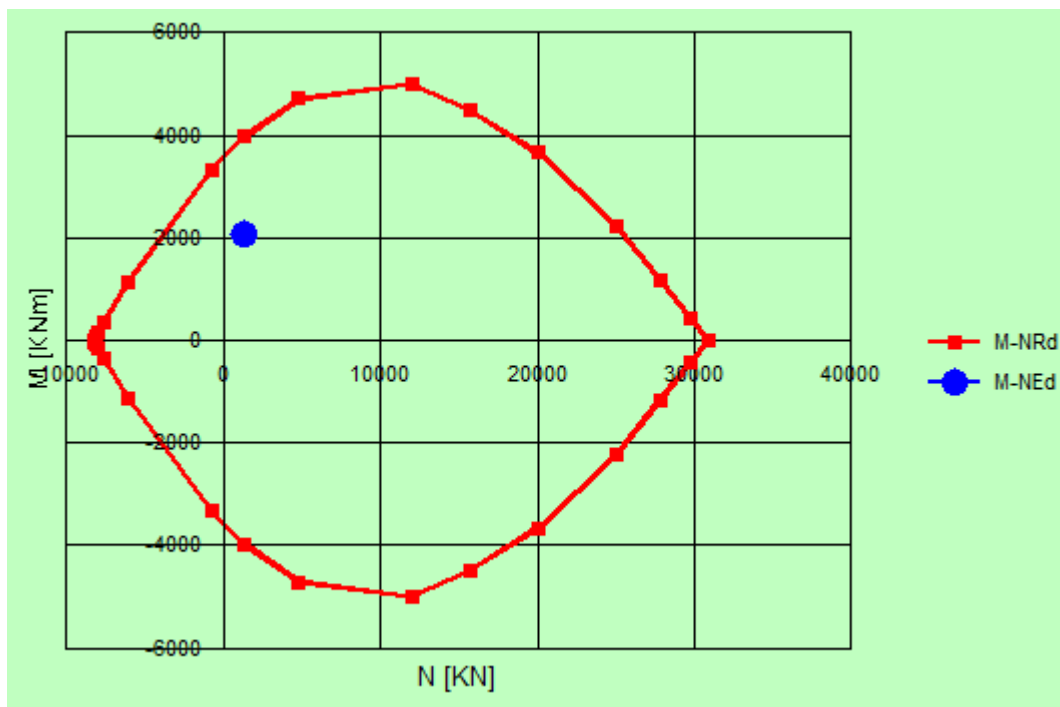


Tabella 13: Gabbia1 - Dominio di resistenza M - N

Tabella 14: Gabbia 2: materiali strutturali e geometria di verifica

MATERIALI						GEOMETRIA				
Calcestruzzo			Acciaio			Sezione trasversale				
$R_{ck}$	37	Mpa	$f_{yk}$	450	Mpa	D	120	cm		
$f_{ck}$	31	Mpa	$E_s$	200000	Mpa	d	110.6	cm		
$E_{cm}$	33000	Mpa	$\gamma_c$	1.15	-	Armatura longitudinale				
$\gamma_c$	1.5	-	$f_{yd}$	391.3	Mpa	$n_{barre}$	$\Phi$	c	$A_{sl}$	
$\alpha_{cc}$	0.85	-	$\epsilon_{uk}$	75	%		mm	mm	cm <sup>2</sup>	
$f_{cd}$	14.1	Mpa				20	26	67	106,19	
$f_{ctm}$	2.6	MPa				0	0	0	0	
$v$	0.5	-				Armatura a taglio				
$\epsilon_{c2}$	2	%				tipo	$\Phi$	passo	c	
$\epsilon_{cu2}$	3.5	%					mm	cm	mm	
$\alpha_e$	15.0	-				Spirale	14	30	60	
$k_t$	0.6	-				Valori limite				
$k_1$	0.8	-								
$k_2$	0.5	-	0,45 $f_{ck}$	13.8	Mpa					
$k_3$	1.76	-	0,75 $f_{yk}$	337.5	Mpa					
$k_4$	0.425	-	$W_{k,lim}$	0.2	mm					

Tabella 15: Gabbia 2 - Verifica combinazione Mmax e MSLE

SLE			SLU/SLV		
$M_{Ek}$	900.20	[kNm]	$M_{Ed}$	1129.31	[kNm]
$N_{Ek}$	-1497.00	[kN]	$N_{Ed}$	-2165.80	[kN]
$V_{Ed}$	13.81	[kN]			
Quota asse neutro			Presso-flessione		
$y_{a.n.}$	58.48	[cm]	$M_{Rd}$	3475	[kNm]
Tensioni			FS	3.08	-
$\sigma_{c,max}$	-6.7	[MPa]	Taglio		
$\sigma_{s,min}$	-83.37	[MPa]	$V_{Rd}$	600.7	[kN]
$\sigma_{s,max}$	88.56	[MPa]	Non necessita di armatura a taglio		
Fessurazione			$V_{Rsd}$	852.7	[kN]
$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$	0.27	[‰]	$V_{Rcd}$	2576.9	[kN]
$S_{r,max}$	29.2	[cm]	$\theta$	21.8	°
$w_k$	0.078	[mm]			



Tabella 16: Verifica combinazione Tmax

SLU/SLV		
$M_{Ed}$	<b>613,20</b>	[kNm]
$N_{Ed}$	<b>0,0</b>	[kN]
$V_{Ed}$	<b>253,40</b>	[kN]
Presso-flessione		
$M_{Rd}$	<b>1879</b>	[kNm]
FS	3,06	-
Taglio		
$V_{Rd}$	367,1	[kN]
Non necessita di armatura a taglio		
$V_{Rsd}$	852,7	[kN]
$V_{Rcd}$	2576,7	[kN]
$\theta$	21,8	°

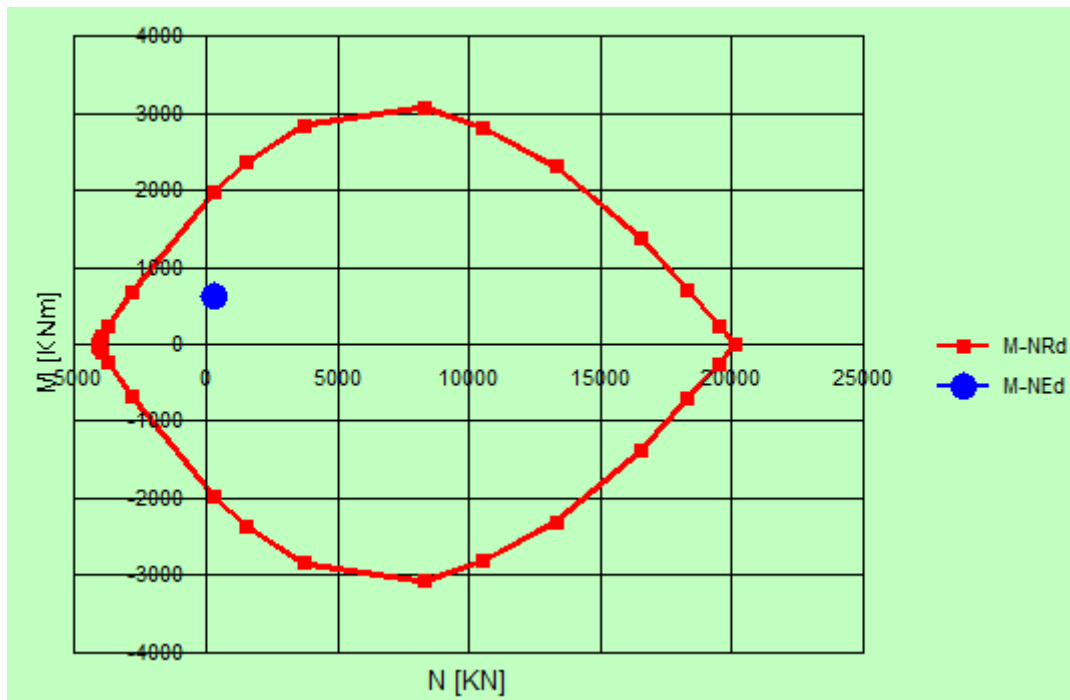


Figura 26: Gabbia 1 - Dominio di resistenza M - N

Le verifiche strutturali sono pertanto tutte soddisfatte. Per la sezione in esame l'incidenza è di  $190 \text{ kg/m}^3$ .

	<b>LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA</b> <b>LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC BRESCIA EST - VERONA</b> <b>NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO OVEST</b>					
	RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA TRATTO A SINGOLA FORNICE	COMMESSA IN10	LOTTO 10	CODIFICA D26CL	DOCUMENTO SL 02 00 002	REV. A

## 8.6 Verifiche strutturali delle Solette

La verifica strutturale del rivestimento definitivo prevede il confronto tra le sollecitazioni di calcolo, ottenute a partire dai risultati del modello numerico applicando i relativi coefficienti parziali, e le resistenze di calcolo che individuano il dominio resistente nel piano M,N.

Per la verifica a taglio, il valore di calcolo è ottenuto in accordo con la normativa vigente.

Le immagini seguenti sintetizzano le sollecitazioni ottenute nel rivestimento definitivo delle solette per la fase fianle , per la quale sono state condotte le verifiche, insieme ad una tabella riepilogativa riportante le sollecitazioni massime.

Di seguito sono riportate le verifiche strutturali condotte per i rivestimenti definitivi nelle fasi di analisi considerate più rappresentative. In ogni caso si sottolinea che le verifiche sono soddisfatte per tutte le fasi di calcolo.

Le combinazioni allo SLU sono ottenute moltiplicando le combinazioni derivanti dall'analisi per il coefficiente parziale  $\gamma_G = 1.3$

Il valore limite di apertura delle fessure è fissato al valore nominale  $w_2=0.3\text{mm}$  in funzione delle condizioni ambientali (classe di esposizione XC2), della sensibilità della armature alla corrosione (armatura poco sensibile) e della combinazione di azioni (quasi permanente).

Poiché il valore di calcolo di apertura delle fessure  $w_k$  non supera il valore limite  $w_2$ , la verifica di fessurazione risulta soddisfatta.

La massima tensione di compressione nel calcestruzzo  $\sigma_c$  e la tensione massima nell'acciaio  $\sigma_f$  calcolate rispettano le limitazioni indicate al paragrafo 10. Pertanto la verifica delle tensioni di esercizio è soddisfatta.

### 8.6.1.1 Verifiche della Soletta Superiore

Tabella 17- Sollecitazioni massime di progetto nel rivestimento definitivo derivanti dall'analisi numerica

	N <sub>sd</sub> (kN/m)	M <sub>sd</sub> (kNm/m)	V <sub>sd</sub> (kN/m)
SLU	-405	1976	1042
SLE	-365	1795	965
SLV	-400	1414	520

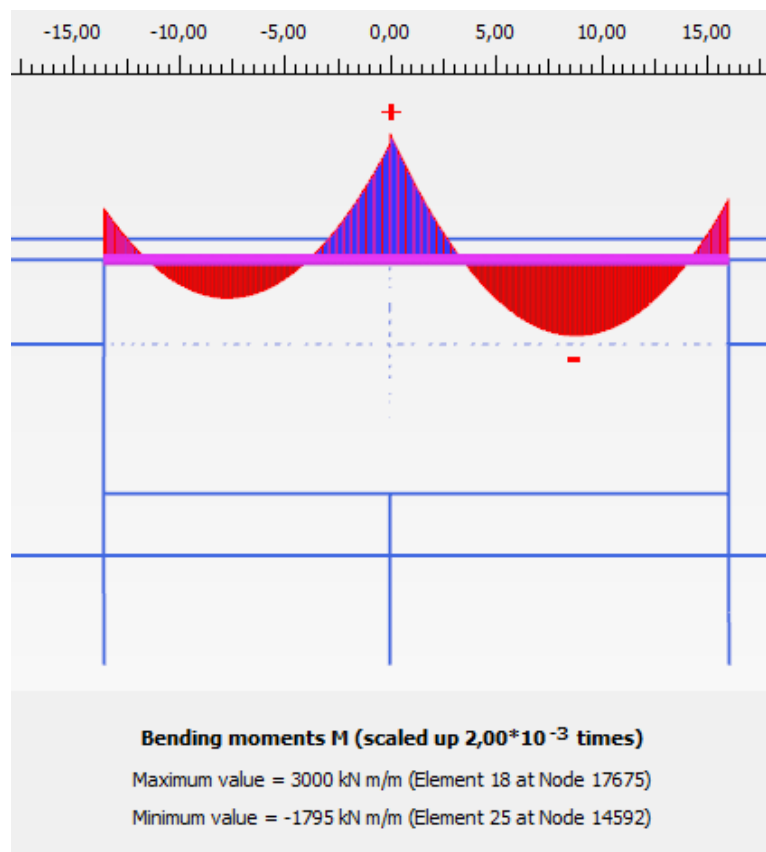


Figura 27: Andamento momento flettente (SLE)

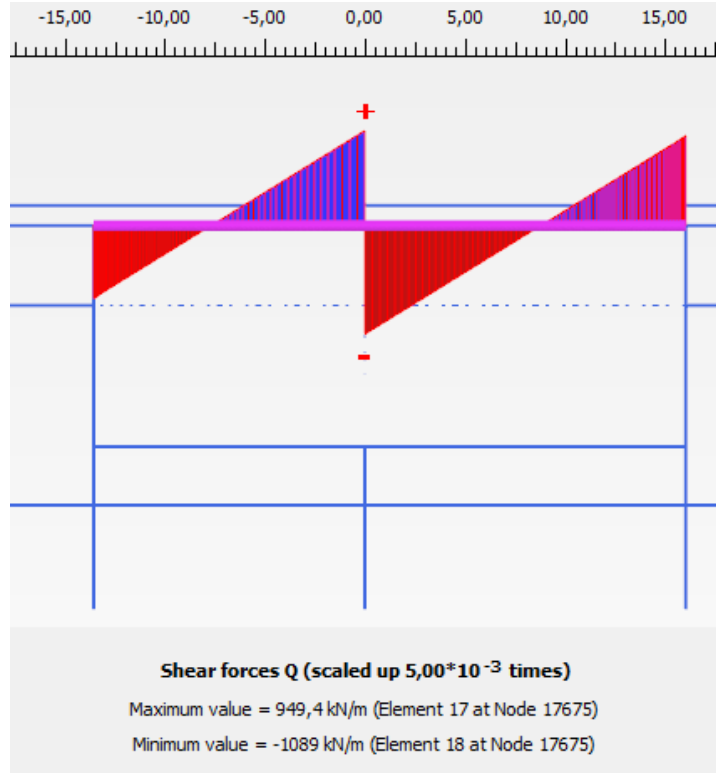


Figura 28: Andamento taglio (SLE)

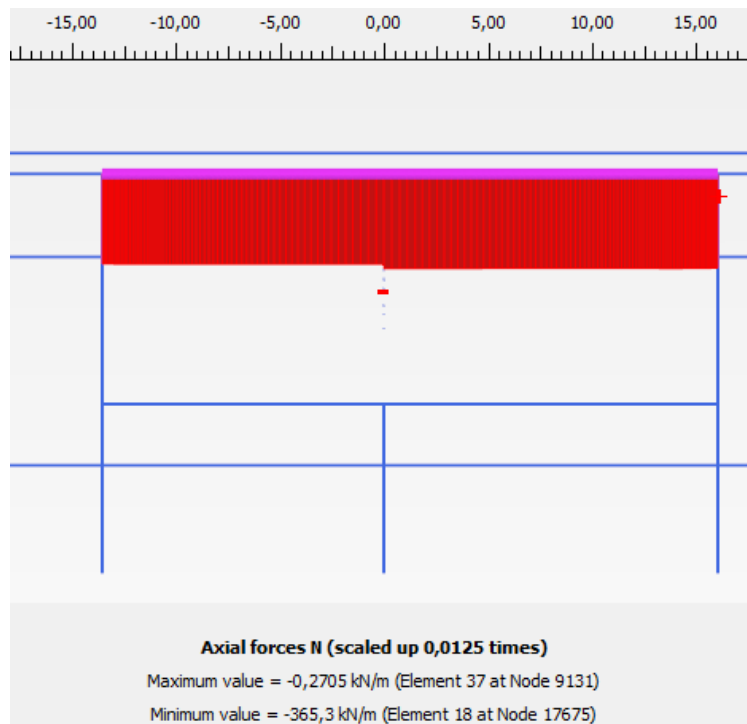
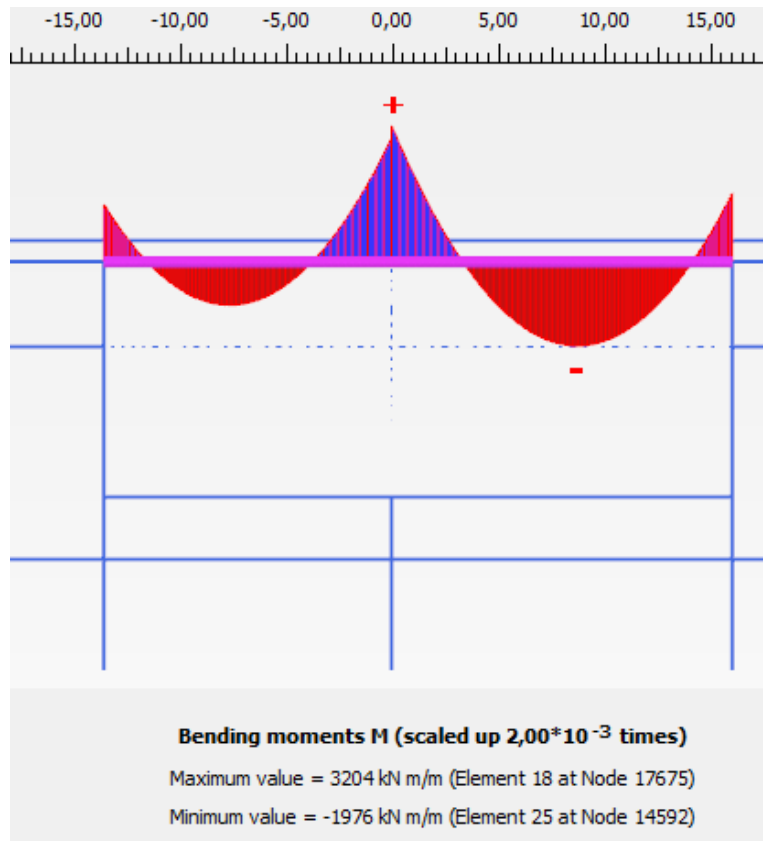


Figura 29: Andamento sforzo normale (SLE)

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA  
TRATTO A SINGOLA FORNICE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN10	10	D26CL	SL 02 00 002	A	45 di 60



*Figura 30: Andamento momento flettente (SLU)*

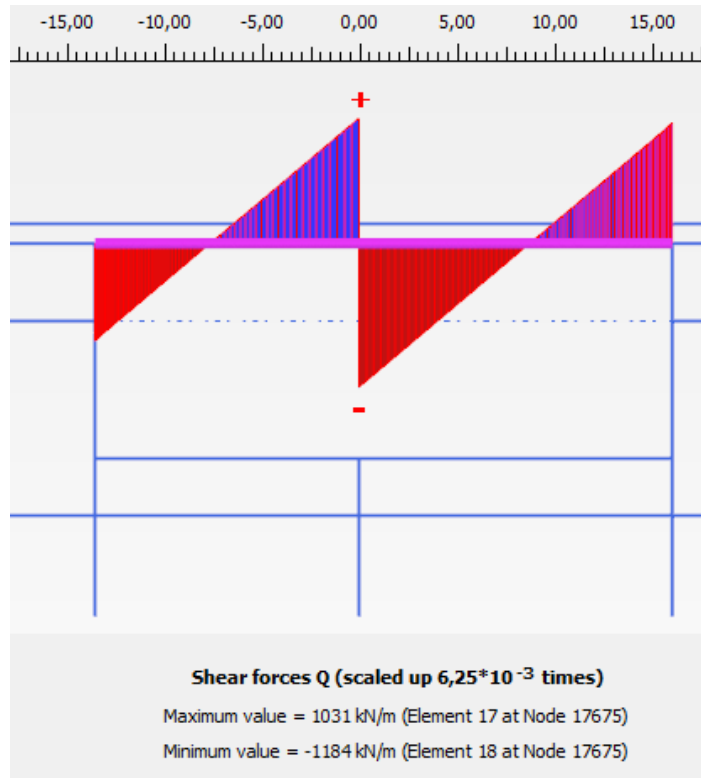


Figura 31: Andamento taglio (SLU)

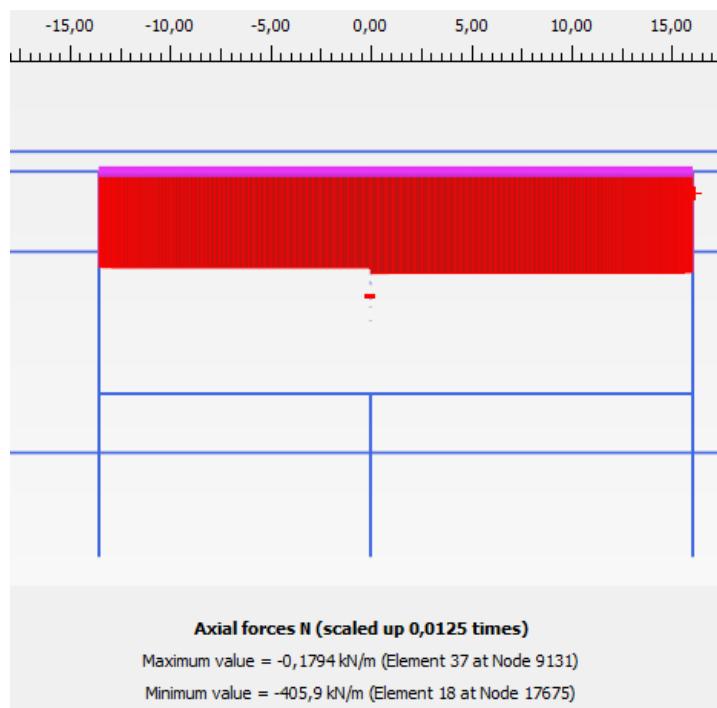


Figura 32: Andamento sforzo normale (SLU)

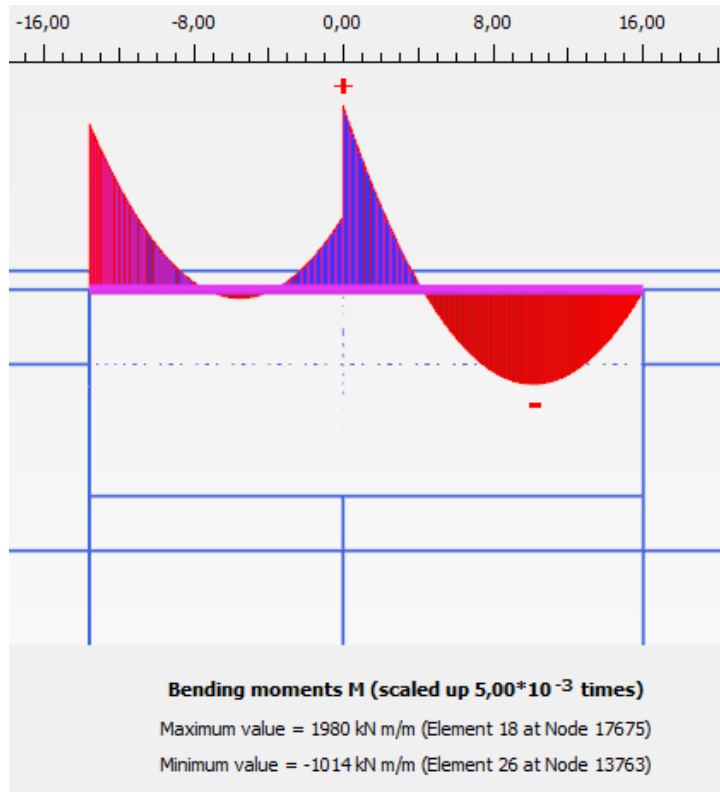


Figura 33: Andamento momento flettente (SLV+)

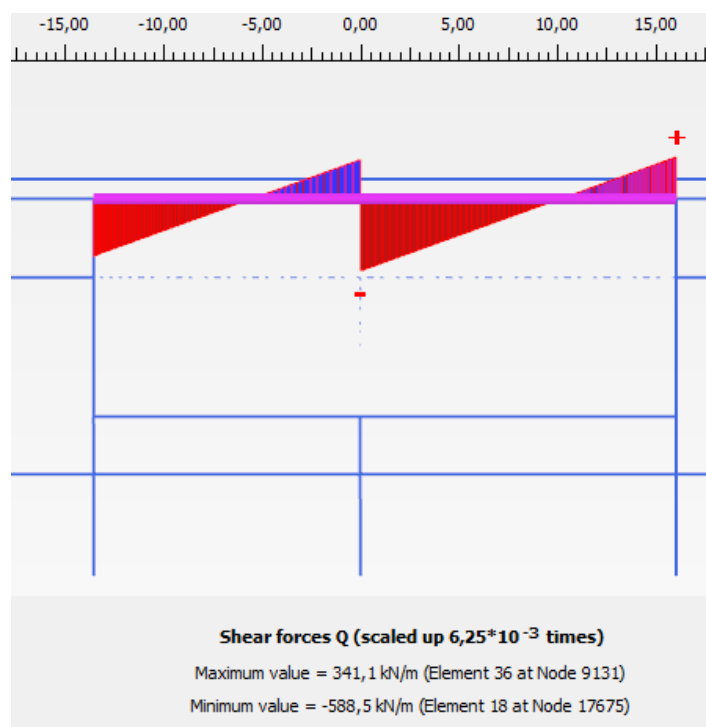
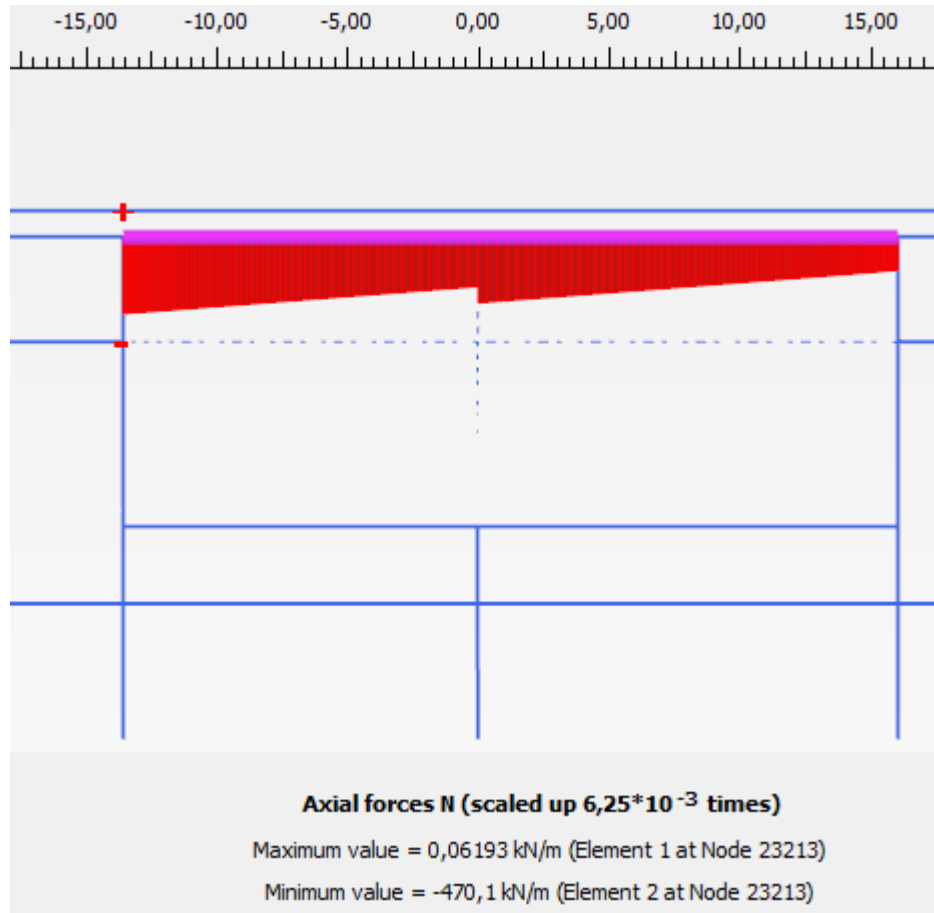


Figura 34: Andamento taglio (SLV+)

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA  
TRATTO A SINGOLA FORNICE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN10	10	D26CL	SL 02 00 002	A	48 di 60



*Figura 35: Andamento sforzo normale (SLV+)*



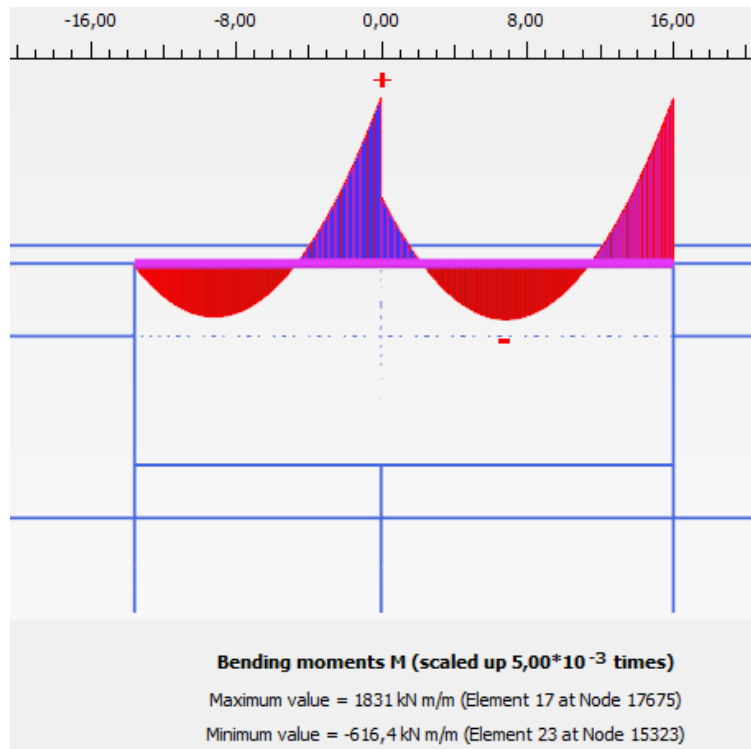


Figura 36: Andamento momento flettente (SLV-)

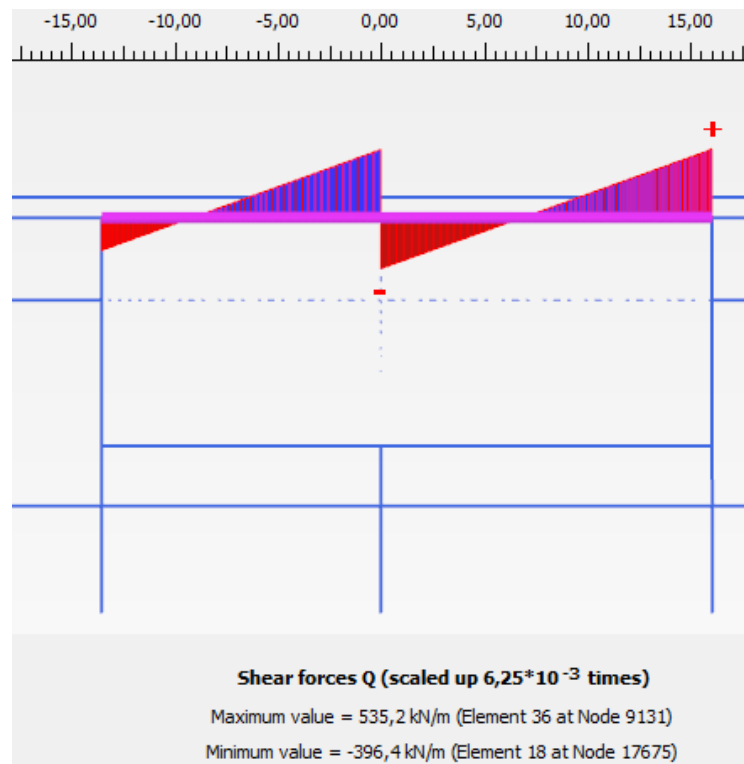


Figura 37: Andamento taglio (SLV-)

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA  
TRATTO A SINGOLA FORNICE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN10	10	D26CL	SL 02 00 002	A	50 di 60

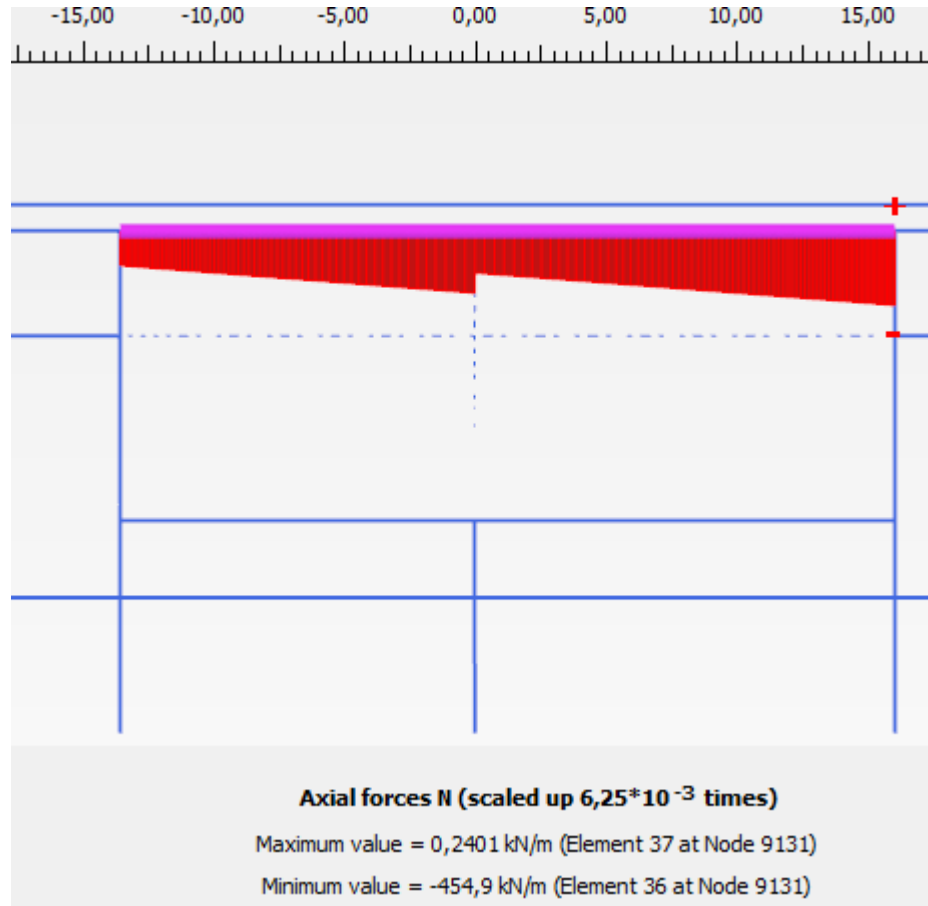


Figura 38: Andamento sforzo normale (SLV-)

### SOLETTA SUPERIORE

#### INPUT

##### SOLLECITAZIONI DI VERIFICA

Combinazione	N <sub>sd</sub> [kN]	M <sub>sd</sub> [kNm]	V <sub>sd</sub> [kN]
SLE Quasi Permanente	-365,0	1795,0	965
SLE Frequente	-365,0	1795,0	965
SLE Rara	-365,0	1795,0	965
SLU	-526,5	2568,8	1354,6
SLV	-400,0	1414,0	520,0

##### CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE IN C.A.

Geometria della sezione	
Base (ortogonale al Taglio)	B [cm] 100
Altezza (parallela al Taglio)	H [cm] 120
Altezza utile della sezione	d [cm] 115
Area di calcestruzzo	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ] 12000

Armatura longitudinale tesa		1° STRATO	2° STRATO	3° STRATO
Numero Barre	n	5,00	10,00	0
Diametro	φ [mm]	26	26	0
Posizione dal lembo esterno	c [cm]	5,0	5,0	0,0
Area strato	A <sub>s</sub> [cm <sup>2</sup> ]	26,55	53,09	0,00
Rapporto di armatura	ρ [%]	0,577%		

Armatura longitudinale compressa		1° STRATO	2° STRATO	3° STRATO
Numero Barre	n	5,0	10	0
Diametro	φ [mm]	26	26	0
Posizione dal lembo esterno	c' [cm]	5,0	5,0	0,0
Area strato	A <sub>s</sub> ' [cm <sup>2</sup> ]	26,55	53,09	0,00
Rapporto di armatura	ρ' [%]	0,693%		

Armatura trasversale		1° TIPO	2° TIPO	3° TIPO
Diametro	φ [mm]	12	0	0
Numero bracci	n <sub>bi</sub>	5	0	0
Passo	s <sub>w</sub> [cm]	30	0	0
Inclinazione	α [deg]	90	90	90
Area armatura a metro	A <sub>sw</sub> /s <sub>w</sub> [cm <sup>2</sup> /m]	18,85	0,00	0,00

##### CARATTERISTICHE REOLOGICHE DEI MATERIALI

Concrete	
Resistenza cubica a compressione	RCK 37
Resistenza cilindrica caratteristica a compressione	f <sub>ck</sub> [Mpa] 30,00
Resistenza cilindrica media a compressione	f <sub>cm</sub> [Mpa] 38,00
Resistenza media a trazione per flessione	f <sub>ctm</sub> [Mpa] 2,90
Resistenza caratteristica a trazione per flessione	f <sub>ctk</sub> [Mpa] 2,03
Resistenza di progetto a compressione	f <sub>cd</sub> [Mpa] 17,00
Resistenza di progetto delle bielle compresse	f <sub>cd</sub> ' [Mpa] 8,98
Acciaio	
Resistenza di progetto a snervamento	f <sub>yd</sub> [Mpa] 382,61

#### OUTPUT

##### VERIFICHE IN ESERCIZIO

Verifica Tensionale		σ limit
Calcestruzzo SLE Quasi Permanente	σ <sub>c</sub> [Mpa] = 6,43	13,500
Calcestruzzo SLE Rara	σ <sub>c</sub> [Mpa] = 6,43	18,000
Acciaio SLE Rara	σ <sub>s</sub> [Mpa] = 192,94	352,000
Verifica di fessurazione		w limit
Combinazione SLE Quasi permanente	w <sub>d</sub> [mm] = 0,816	0,200
Combinazione SLE Frequente	w <sub>d</sub> [mm] = 0,869	0,300

##### VERIFICA DI RESISTENZA A TAGLIO

Sollecitazioni di progetto		V <sub>sd</sub> [kN]	1354,6
Taglio sollecitante = max Taglio (SLU, SLV)		N <sub>sd</sub> [kN]	-526,5
Sforzo Normale concomitante al massimo taglio			

Verifica di resistenza in assenza di armatura specifica		V <sub>Rd1</sub> [kN]	1503,41
Resistenza di progetto senza armatura specifica		V <sub>Rd1</sub> /V <sub>sd</sub>	1,11
Coefficiente di sicurezza			

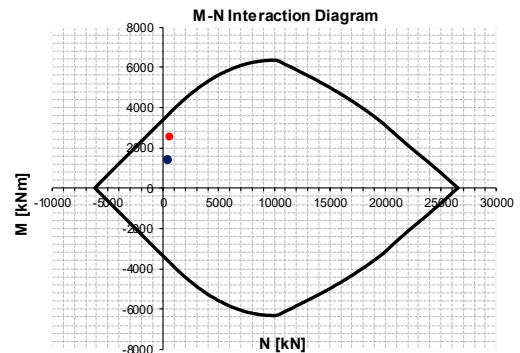
Verifica di resistenza dell'armatura specifica		cot(θ)	2,5
CoTan(θ) di progetto		V <sub>Rd1</sub> (θ) [kN]	3286
Resistenza a taglio delle bielle compresse in cls		V <sub>Rd2</sub> (θ) [kN]	1866
Resistenza a taglio dell'armatura		V <sub>Rd</sub> [kN]	1866
Resistenza a taglio di progetto		V <sub>Rd</sub> /V <sub>sd</sub>	1,38
Coefficiente di sicurezza			

##### VERIFICA DI RESISTENZA A PRESSO-FLESSIONE

Sollecitazioni di progetto		SLU	SLV
Momento sollecitante	M <sub>sd</sub> [kNm]	2568,8	1414,0
Sforzo Normale concomitante	N <sub>sd</sub> [kN]	-526,5	-400,0

Verifica di resistenza in termini di momento		SLU	SLV
Momento resistente	M <sub>Rd</sub> [kNm]	3657,2	3588,1
Coefficiente di sicurezza	M <sub>Rd</sub> /M <sub>sd</sub>	1,42	2,54

Verifica di resistenza in termini di sforzo normale		SLU	SLV
Sforzo normale resistente	N <sub>Rd</sub> [kN]	-	-
Coefficiente di sicurezza	N <sub>Rd</sub> /N <sub>sd</sub>	-	-



Le verifiche strutturali sono pertanto tutte soddisfatte. Per la sezione in esame l'incidenza è di 165 kg/m<sup>3</sup>.

### 8.6.1.2 Verifiche della Soletta Base

Tabella 18: Sollecitazioni massime di progetto nel rivestimento definitivo derivanti dall'analisi numerica

	N <sub>sd</sub> (kN/m)	M <sub>sd</sub> (kNm/m)	V <sub>sd</sub> (kN/m)
SLU	-281	905	347,5
SLE	-266	691	246
SLV	-716	860	324

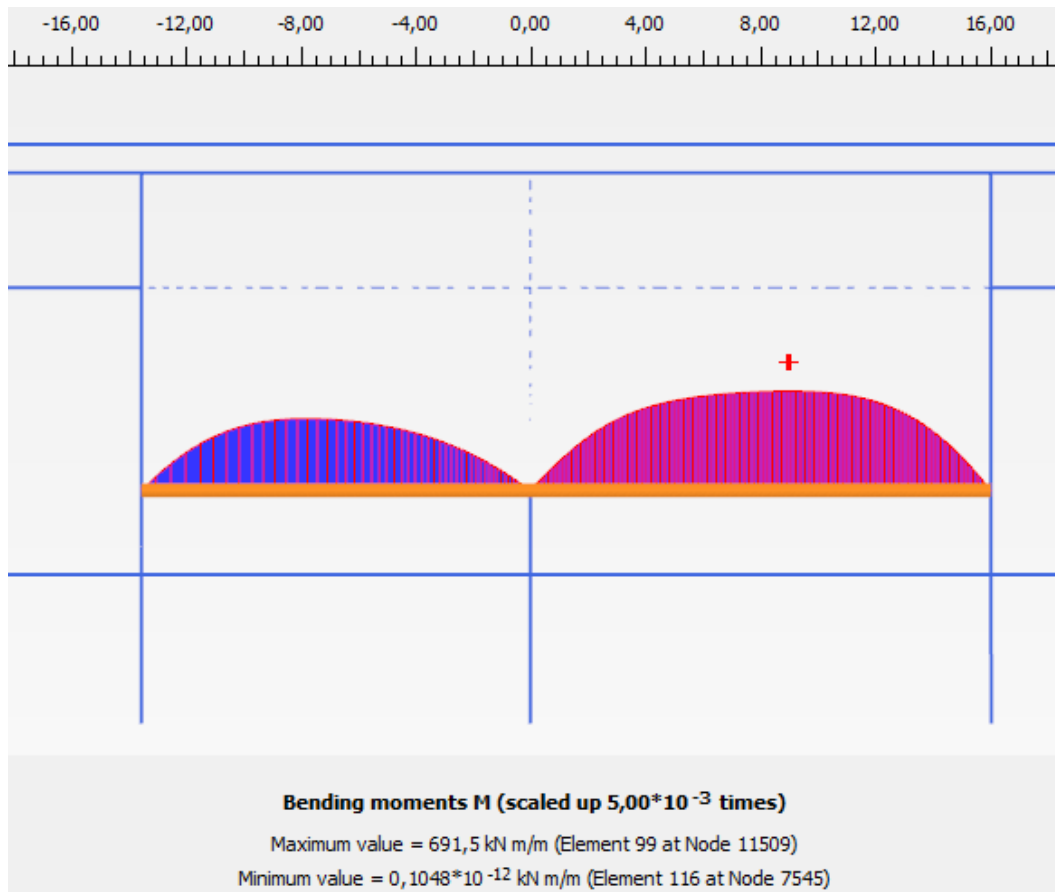
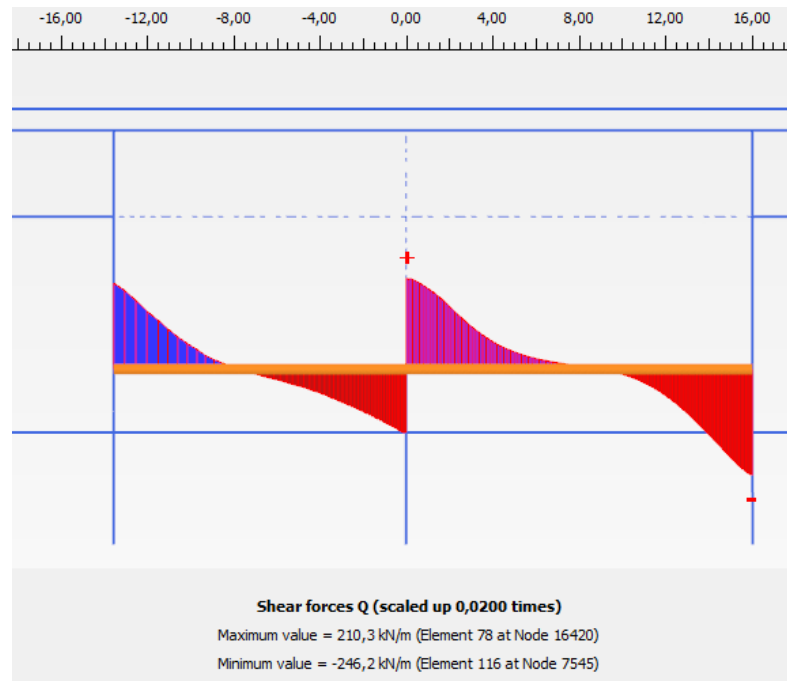
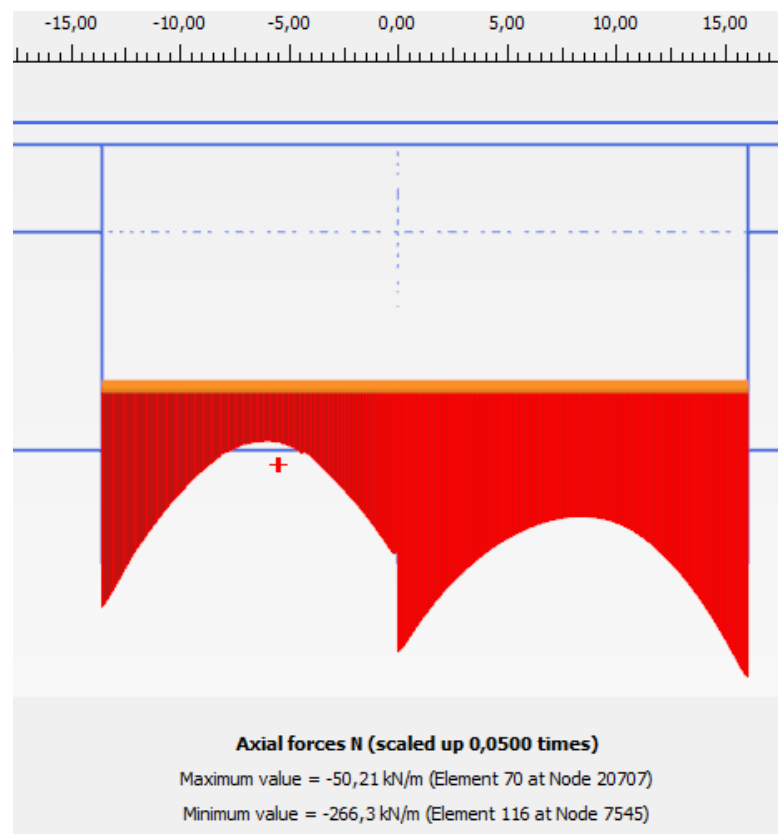


Figura 39: Andamento momento flettente (SLE)



*Figura 40: Andamento taglio (SLE)*



*Figura 41: Andamento sforzo normale (SLE)*

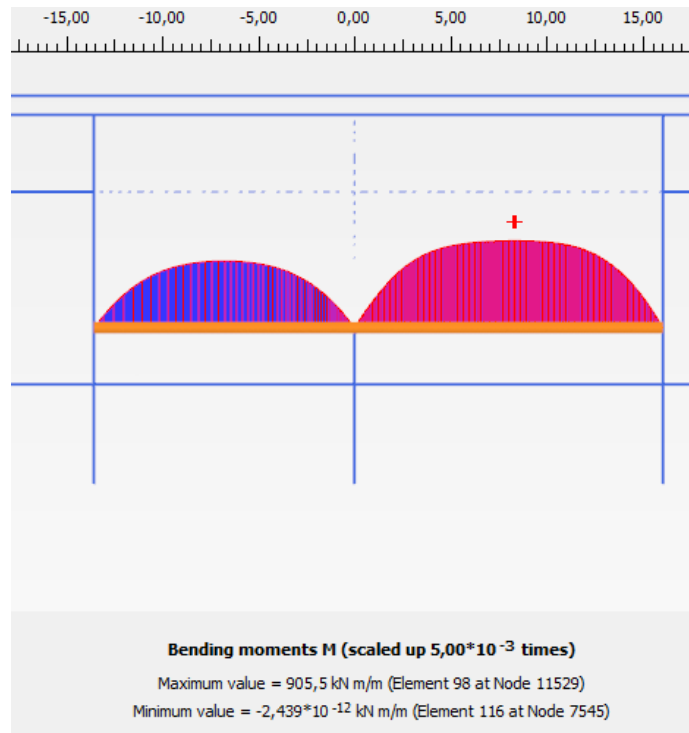


Figura 42: Andamento momento flettente (SLU)

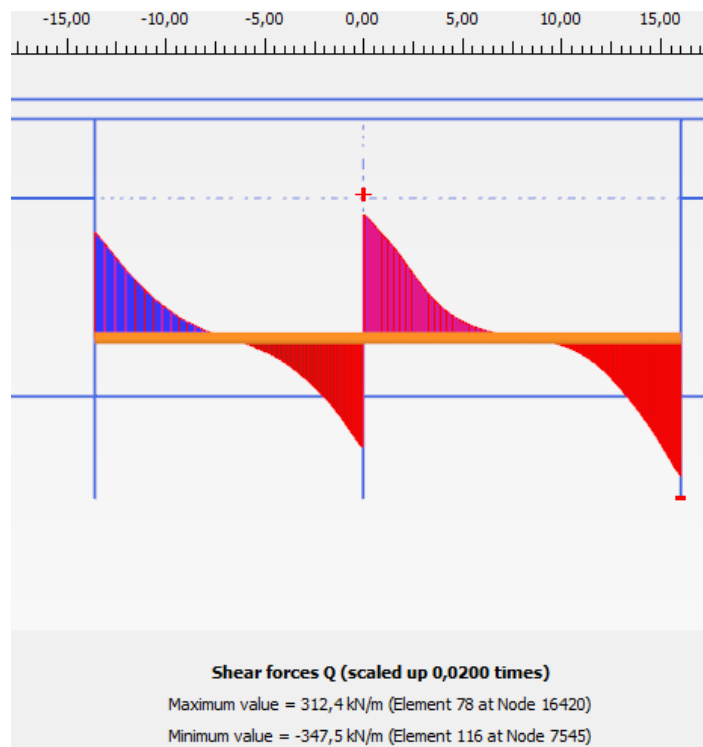


Figura 43: Andamento taglio (SLU)

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA  
TRATTO A SINGOLA FORNICE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN10	10	D26CL	SL 02 00 002	A	55 di 60

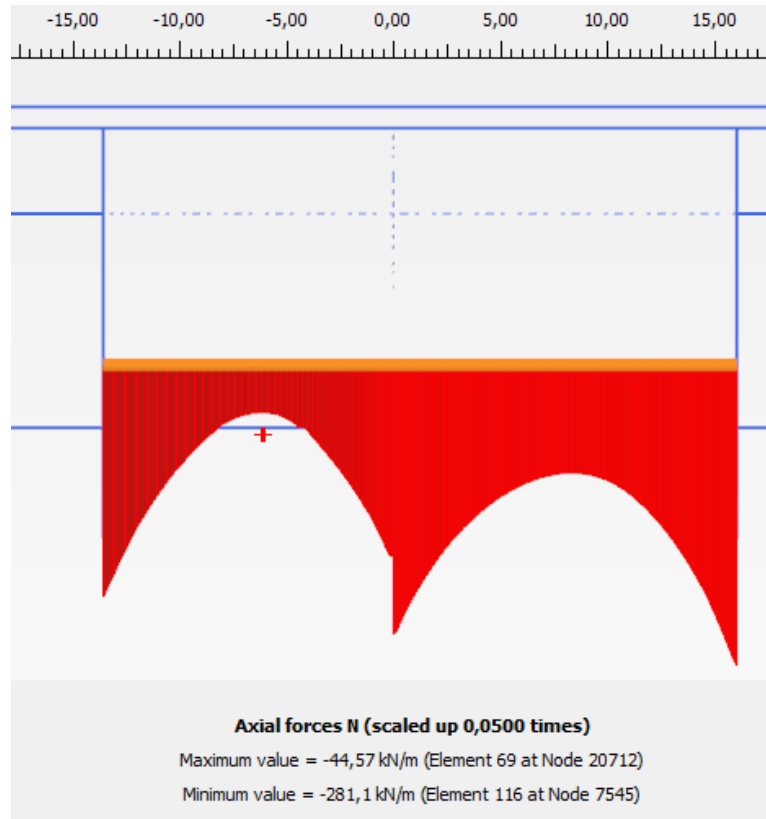


Figura 44: Andamento sforzo normale (SLU)

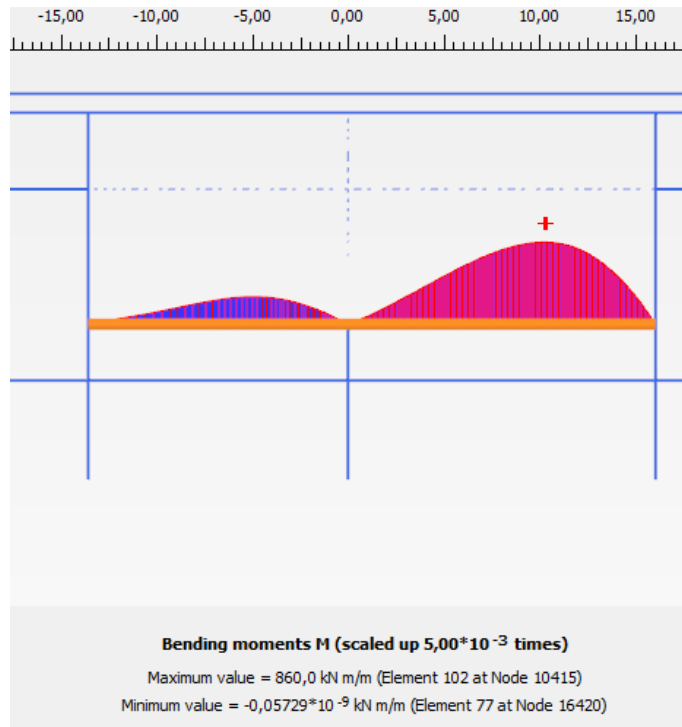


Figura 45: Andamento momento flettente (SLV+)

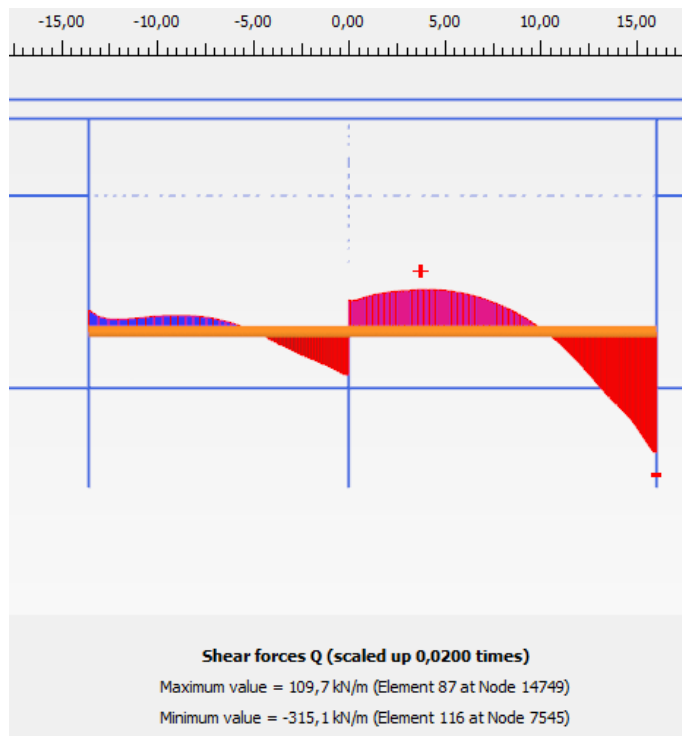


Figura 46: Andamento taglio (SLV+)



RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA  
TRATTO A SINGOLA FORNICE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN10	10	D26CL	SL 02 00 002	A	57 di 60

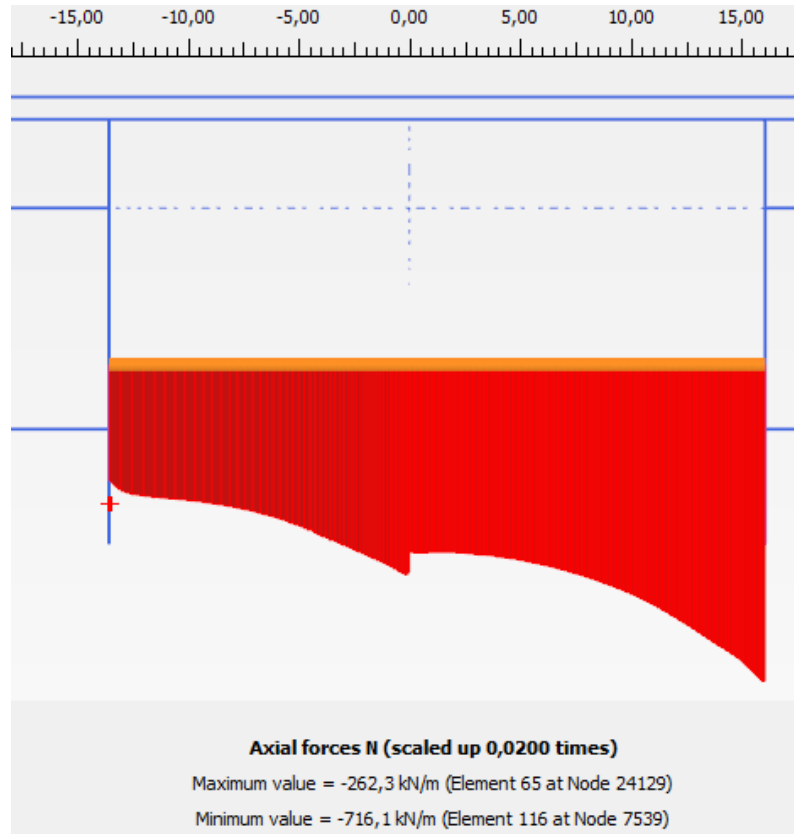


Figura 47: Andamento sforzo normale (SLV+)

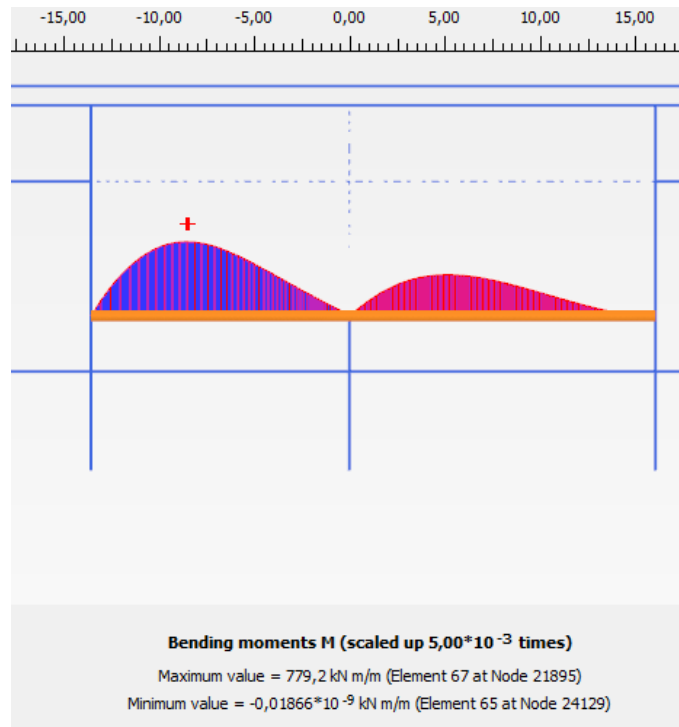


Figura 48: Andamento momento flettente (SLV-)

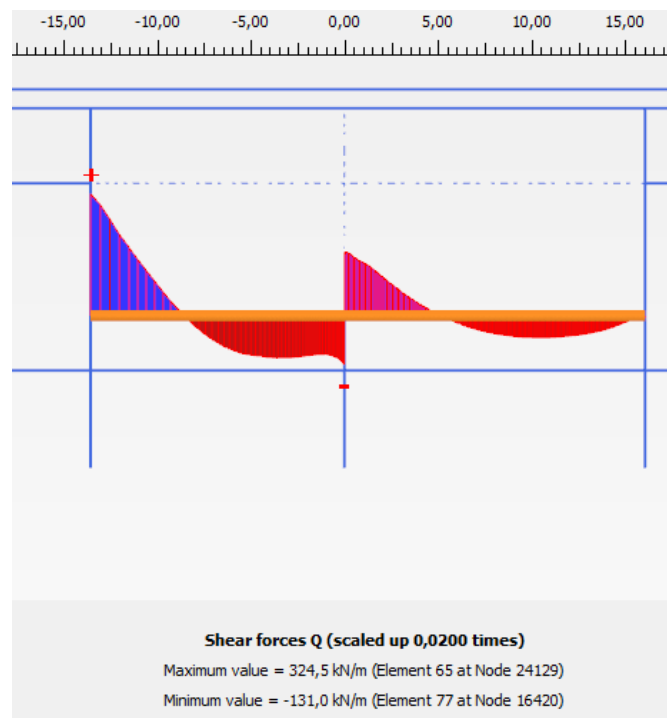


Figura 49: Andamento taglio (SLV-)

RELAZIONE DI CALCOLO SCATOLARI IN OPERA  
TRATTO A SINGOLA FORNICE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN10	10	D26CL	SL 02 00 002	A	59 di 60

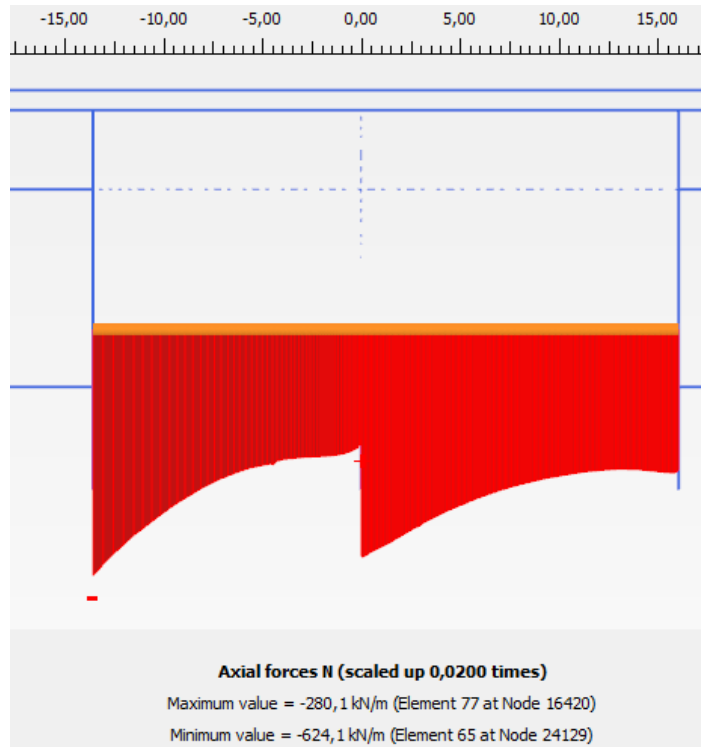
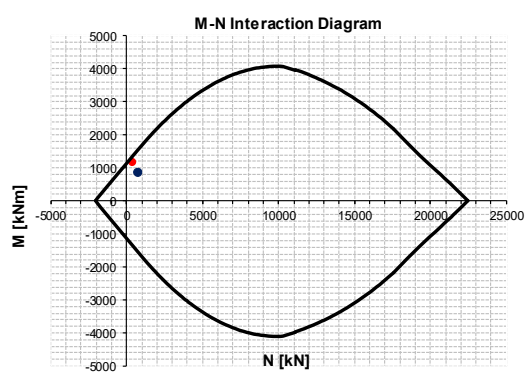


Figura 50: Andamento sforzo normale (SLV-)

### SOLETTA BASE

INPUT				OUTPUT			
<b>SOLECCITAZIONI DI VERIFICA</b>				<b>VERIFICHE IN ESERCIZIO</b>			
<b>Combinazione</b>	<b>N<sub>Sd</sub> [kN]</b>	<b>M<sub>Sd</sub> [kNm]</b>	<b>V<sub>Sd</sub> [kN]</b>	<b>Verifica Tensionale</b>	<b>σ limit</b>		
<i>SLE Quasi Permanente</i>	-266,0	691,0	246	<i>Calcestruzzo SLE Quasi Permanente</i>	σ <sub>c</sub> [Mpa] =	4,43	13,500
<i>SLE Frequente</i>	-266,0	691,0	246	<i>Calcestruzzo SLE Rara</i>	σ <sub>c</sub> [Mpa] =	4,43	18,000
<i>SLE Rara</i>	-266,0	691,0	246	<i>Acciaio SLE Rara</i>	σ <sub>s</sub> [Mpa] =	196,82	352,000
<i>SLU</i>	-365,3	1176,5	451,8	<b>Verifica di fessurazione</b>	<b>w limit</b>		
<i>SLV</i>	-716,0	860,0	324,0	<i>Combinazione SLE Quasi permanente</i>	w <sub>a</sub> [mm] =	0,000	0,200
				<i>Combinazione SLE Frequente</i>	w <sub>a</sub> [mm] =	0,000	0,300
<b>CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE IN C.A.</b>				<b>VERIFICA DI RESISTENZA A TAGLIO</b>			
<b>Geometria della sezione</b>				<b>Sollecitazioni di progetto</b>			
<i>Base (ortogonale al Taglio)</i>	B [cm]	100		<i>Taglio sollecitante = max Taglio(SLU,SLV)</i>	V <sub>Rd1</sub> [kN]	451,8	
<i>Altezza (parallela al Taglio)</i>	H [cm]	120		<i>Sforzo Normale concomitante al massimo taglio</i>	N <sub>Sd</sub> [kN]	-365,3	
<i>Altezza utile della sezione</i>	d [cm]	115		<b>Verifica di resistenza in assenza di armatura specifica</b>			
<i>Area di calcestruzzo</i>	A <sub>c</sub> [cm <sup>2</sup> ]	12000		<i>Resistenza di progetto senza armatura specifica</i>	V <sub>Rd1</sub> [kN]	1480,24	
				<i>Coefficiente di sicurezza</i>	V <sub>Rd1</sub> /V <sub>Sd</sub>	3,28	
<b>Armatura longitudinale tesa</b>	1° STRATO	2° STRATO	3° STRATO	<b>Verifica di resistenza dell'armatura specifica</b>			
<i>Numero Barre</i>	n	5,00	0,00	<i>CoTan(θ) di progetto</i>	cotan(θ)	2,5	
<i>Diametro</i>	φ [mm]	26	0	<i>Resistenza a taglio delle bielle compresse in cls</i>	V <sub>Rd2</sub> (θ) [kN]	3261	
<i>Posizione dal lembo esterno</i>	c [cm]	5,0	0,0	<i>Resistenza a taglio dell'armatura</i>	V <sub>Rd3</sub> (θ) [kN]	1866	
<i>Area strato</i>	As [cm <sup>2</sup> ]	26,55	0,00	<i>Resistenza a taglio di progetto</i>	V <sub>Rd</sub> [kN]	1866	
<i>Rapporto di armatura</i>	ρ [%]	0,192%		<i>Coefficiente di sicurezza</i>	V <sub>Rd</sub> /V <sub>Sd</sub>	4,13	
<b>Armatura longitudinale compressa</b>	1° STRATO	2° STRATO	3° STRATO	<b>VERIFICA DI RESISTENZA A PRESSO-FLESSIONE</b>			
<i>Numero Barre</i>	n	5,0	0	<b>Sollecitazioni di progetto</b>	SLU	SLV	
<i>Diametro</i>	φ [mm]	26	0	<i>Momento sollecitante</i>	M <sub>Sd</sub> [kNm]	1176,5	860,0
<i>Posizione dal lembo esterno</i>	c' [cm]	5,0	0,0	<i>Sforzo Normale concomitante</i>	N <sub>Sd</sub> [kN]	-365,3	-716,0
<i>Area strato</i>	As' [cm <sup>2</sup> ]	26,55	0,00	<b>Verifica di resistenza in termini di momento</b>	SLU	SLV	
<i>Rapporto di armatura</i>	ρ' [%]	0,231%		<i>Momento resistente</i>	M <sub>Rd1</sub> [kNm]	1338,3	1529,1
<b>Armatura trasversale</b>	1° TIPO	2° TIPO	3° TIPO	<i>Coefficiente di sicurezza</i>	M <sub>Rd1</sub> /M <sub>Sd</sub>	1,14	1,78
<i>Diametro</i>	φ [mm]	12	0	<b>Verifica di resistenza in termini di sforzo normale</b>	SLU	SLV	
<i>Numero bracci</i>	n <sub>bi</sub>	5	0	<i>Sforzo normale resistente</i>	N <sub>Rd</sub> [kN]	-	-
<i>Passo</i>	s <sub>w</sub> [cm]	30	0	<i>Coefficiente di sicurezza</i>	N <sub>Rd</sub> /N <sub>Sd</sub>	-	-
<i>Inclinazione</i>	α [deg]	90	90	<b>M-N Interaction Diagram</b>			
<i>Area armatura a metro</i>	A <sub>sw</sub> /s <sub>w</sub> [cm <sup>2</sup> /m]	18,85	0,00				
<b>CARATTERISTICHE REOLOGICHE DEI MATERIALI</b>							
<b>Concrete</b>							
<i>Resistenza cubica a compressione</i>	RCK	37					
<i>Resistenza cilindrica caratteristica a compressione</i>	f <sub>ck</sub> [Mpa]	30,00					
<i>Resistenza cilindrica media a compressione</i>	f <sub>cm</sub> [Mpa]	38,00					
<i>Resistenza media a trazione per flessione</i>	f <sub>ctm</sub> [Mpa]	2,90					
<i>Resistenza caratteristica a trazione per flessione</i>	f <sub>ctk</sub> [Mpa]	2,03					
<i>Resistenza di progetto a compressione</i>	f <sub>cd</sub> [Mpa]	17,00					
<i>Resistenza di progetto delle bielle compresse</i>	f <sub>cd</sub> [Mpa]	8,98					
<b>Acciaio</b>							
<i>Resistenza di progetto a snervamento</i>	f <sub>yd</sub> [Mpa]	382,61					

Le verifiche strutturali sono pertanto tutte soddisfatte. Per la sezione in esame l'incidenza è di 165 kg/m<sup>3</sup>.