



COMMITTENTE



PARCO OGLIO NORD
ENTE DI DIRITTO PUBBLICO
Piazza Garibaldi 15 - 25034 Orzinuovi (Bs)

PROGETTO DEFINITIVO

Realizzazione di una passerella ciclopedonale sul ponte che attraversa il fiume Oglio (come da progetto denominato "Greenway dell'Oglio - lotto 8) tra i comuni di Calcio e Urago d'Oglio

ELABORATO

07a

**RELAZIONE CALCOLO
DELLE STRUTTURE**

REVISIONE:	DATA:	DESCRIZIONE:
00	18/05/2023	Prima emissione elaborato - Progetto Definitivo

PROGETTISTI

MV Project srl
Via Europa 17 - 24030 Medolago (Bg)
Tel. +39 0356016841
email: info@mv-project.it
PEC: mvprojectsrll@pec.it
Ing. Nicola Marcandelli



Indice generale

1 OGGETTO.....	3
2 ALLEGATI.....	3
3 NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	3
4 ILLUSTRAZIONE SINTETICA DEL PROGETTO.....	4
5 CLASSE DI ESECUZIONE.....	7
6 PROPRIETA' DEI MATERIALI.....	8
7 AZIONI DI PROGETTO.....	10
7.1 AZIONI STATICHE.....	10
7.2 AZIONI SISMICHE.....	11
8 COMBINAZIONI DELLE AZIONI.....	13
8.1 AZIONI STATICHE.....	13
8.2 AZIONI SISMICHE.....	14
9 VERIFICHE STRUTTURALI.....	16
9.1 CODICE DI CALCOLO.....	16
9.2 GEOMETRIA GENERALE DEL MODELLO FEM.....	17
9.3 CRITERI DI PROGETTAZIONE.....	19
9.4 SCHEMI STATICI ADOTTATI.....	19
9.5 APPLICAZIONE DEI CARICHI.....	20
9.6 ILLUSTRAZIONE E GIUSTIFICAZIONE DEI CRITERI DI VERIFICA.....	21
9.7 GIUDIZIO MOTIVATO DI ACCETTABILITA' DEI RISULTATI.....	24
9.8 CARATTERISTICHE E AFFIDABILITA' DEL CODICE DI CALCOLO.....	24
9.9 CONTROLLI SVOLTI SUI RISULTATI.....	26
9.10 RISULTATI SALIENTI.....	28
9.10.1 AZIONI SOLLECITANTI INTERNE.....	28
9.10.2 MODI DI VIBRARE.....	31
9.10.3 MASSIMO SPOSTAMENTO VERTICALE DZ.....	33
9.10.4 MASSIMO SPOSTAMENTO ORIZZONTALE DX.....	34
9.10.5 MASSIMO SPOSTAMENTO ORIZZONTALE DY.....	36
9.10.6 REAZIONI VINCOLARI AGLI APPOGGI.....	38
9.10.7 TASSO DI UTILIZZAZIONE DELLE STRUTTURA.....	41



1 OGGETTO

L'oggetto della seguente relazione è il progetto della nuova passerella ciclopedonale sul Fiume Oglio posizionata a cavallo delle due Province Bergamo e Brescia all'interno dei Comuni Calcio (BG) e Urago d'Oglio (BS).

Il manufatto ha geometria definita secondo quanto fornito secondo i disegni strutturali allegati.

NOTA ALLA PRESENTE RELAZIONE:

Si rimanda alla successiva revisione per emissione Progetto Esecutivo l'integrazione della presente relazione nella quale verranno inseriti ed esplicitati:

- il calcolo pali di fondazione
- il calcolo portanza delle fondazioni
- le verifiche strutturali dei nodi principali
- il calcolo degli elementi degli stralli

Tali elementi strutturali risultano, alla data odierna, già progettati e definiti, come indicato negli elaborati del Progetto Definitivo allegati alla presente.

2 ALLEGATI

- Disegni Progetto Definitivo;
- Relazioni materiali;
- Fascicolo calcoli FEM;

3 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- DM 17/01/2018, Norme Tecniche per le Costruzioni.



4 ILLUSTRAZIONE SINTETICA DEL PROGETTO

La passerella di luce in asse tra gli appoggi 57,00 m per il superamento del fiume Oglio è costituita da:

1. Fondazioni costituite da travi in calcestruzzo armato in appoggio su coppie di pali diametro 168mm/sp.10 (aventi resistenza a compressione) infissi nel terreno e legati da una trave testa-palo in cemento armato;
2. Le antenne di attacco degli stralli, in acciaio S355J2 con trattamento "triplex", hanno una forma ad A e sono costituite da sezioni in tubolare a sezione circolare; le "gambe" hanno un diametro 406,4 mm/sp.20 e un'altezza 16,9 m dallo spiccatto di fondazione, il cavalletto una larghezza massima 5,45 m (presa all'attacco in fondazione), la trave di appoggio impalcato un'altezza di 4,55 m (presa dalla fondazione al tubolare circolare al di sotto dell'impalcato). Le 2 coppie di stralli, che collegano l'impalcato alle antenne, hanno un diametro di 65 mm, mentre i tiranti posteriori, che ancorano l'antenna al suolo, hanno anch'essi un diametro di 65 mm;
3. Impalcato con struttura portante in acciaio qualità cor-ten S355J2W è formato da travi portanti a sezione IPE600, travi secondarie IPE180 e controventi CNP80 a croce nel piano orizzontale. La sezione trasversale dell'impalcato ha una larghezza massima di 3220 mm, interasse travi 3000 mm. Le travi principali IPE600, trasversalmente, sono collegate a passo di circa 1,5 m dalle secondarie IPE180. Il corpo di collegamento tra l'impalcato e gli stralli è realizzato da una mensola in piatti di lamiera aventi sp. variabile (25-30 mm);
4. Parapetto in acciaio inox AISI304 (non satinato), costituito da piantone in doppio piatto (a sezione variabile) sp.10mm sagomato, protezione alta in tubolare a sezione circolare diam. 76,1mm/sp.3,2, passamano in tubolare a sezione circolare diam. 60,3mm/sp.3,2, doppio tubolare a sezione circolare diam. 42,4mm/sp.2,3 e diam. 33,7mm/sp.2. Rete inox a maglia quadrata nella porzione bassa del parapetto;
5. Pavimentazione in doghe materiale WPC per esterni, in appoggio su elementi di supporto a correre in alluminio (sezione tubolare 30x30xsp.2), i quali sono applicati su profili omega aventi sezione 150x80x40xsp.2;

La passerella si completa, in lato orografico destro e sinistro del fiume Oglio con appoggi in asse di luce 12,00 m e si compone da:

PRIME CAMPATE L=12m RISPETTIVAMENTE A DESTRA/SINISTRA DELLE ANTENNE

1. Fondazioni costituite da travi in calcestruzzo armato in appoggio su coppie di pali diametro 168mm/sp.10 (aventi resistenza a trazione) infissi nel terreno e legati da una trave testa-palo in cemento armato;



2. Struttura in elevazione costituita da un doppio palo a sezione circolare avente sezione 219 mm/sp.5, tralicciato nella direzione trasversale;
3. Impalcato con struttura portante in acciaio cor-ten S355J2W è formato da travi portanti a sezione IPE600, travi secondarie IPE180 e controventi CNP80 a croce nel piano orizzontale. La sezione trasversale dell'impalcato ha una larghezza massima di 3220 mm, interasse travi 3000 mm. Le travi principali IPE600, trasversalmente, sono collegate a passo di circa 1,5 m dalle secondarie IPE180;
4. Parapetto in acciaio inox AISI304 (non satinato), costituito da piantone in doppio piatto (a sezione variabile) sp.10mm sagomato, protezione alta in tubolare a sezione circolare diam. 76,1mm/sp.3,2, passamano in tubolare a sezione circolare diam. 60,3mm/sp.3,2, doppio tubolare a sezione circolare diam. 42,4mm/sp.2,3 e diam. 33,7mm/sp.2. Rete inox a maglia quadrata nella porzione bassa del parapetto;
5. Pavimentazione in doghe materiale WPC per esterni, in appoggio su elementi di supporto a correre in alluminio (sezione tubolare 30x30xsp.2), i quali sono applicati su profili omega aventi sezione 150x80x40xsp.2;

RESTANTI CAMPATE L=12m LATO CALCIO E LATO URAGO

1. Fondazioni costituite da travi in calcestruzzo armato aventi dimensioni in pianta 3m x 1,50m x H=0,60m;
2. Struttura in elevazione costituita da un doppio palo a sezione circolare avente sezione 219 mm/sp.5, tralicciato nella direzione trasversale;
3. Impalcato con struttura in tegoli a PiGreco prefabbricati, getto di completamento in cls alleggerito h=10 cm con rete elettrosaldata diametro 8mm – maglia 20x20, finitura pavimentazione in tappetino antiusura colorato sp.3 cm. Larghezza massima dell'impalcato pari a 3,22 m;
4. Parapetto in acciaio inox AISI304 (non satinato) fissato sui tegoli in c.a.p. mediante tasselli meccanici, costituito da piantone in doppio piatto (a sezione variabile) sp.10mm sagomato, protezione alta in tubolare a sezione circolare diam. 76,1mm/sp.3,2, passamano in tubolare a sezione circolare diam. 60,3mm/sp.3,2, doppio tubolare a sezione circolare diam. 42,4mm/sp.2,3 e diam. 33,7mm/sp.2. Rete inox a maglia quadrata nella porzione bassa del parapetto.

La pista ciclopedonale, nel punto di raccordo con la strada privata (traversa di ponente della S.S. Padana Superiore in comune di Calcio), è formata da rilevato opportunamente sagomato, con idonea pendenza e scarpate laterali, il tutto contenuto da un manufatto in cemento armato avente funzione di muro controterra e cordolo laterale di contenimento.

La pista ciclopedonale, nel punto di raccordo con il manufatto esistente in cemento armato sopra la Roggia Molina (in Comune di Urago), ha l'ultima campata a sbalzo in modo tale da evitare qualsiasi collegamento



strutturale (per questioni sismiche), pertanto l'ultimo tegolo a PiGreco prefabbricato aggetta di circa 2,5m. Sul manufatto esistente, attualmente perimetrato da un parapetto ligneo, al di sopra della roggia viene realizzata una soletta in calcestruzzo H=30cm, opportunamente spinata (fiorettata con ferri e sigillatura mediante resine epossidiche). Tale nuovo piano di camminamento è equipaggiato con parapetto avente le stesse caratteristiche e geometria di quello installato sulla passerella.



5 CLASSE DI ESECUZIONE

La struttura è progettata per essere inserita in classe EXC2:

Classi di importanza		CC1		CC2		CC3	
Categorie di servizio		SC1	SC2	SC1	SC2	SC1	SC2
Categorie di produzione	PC1	EXC1	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3 ^{a)}	EXC3 ^{a)}
	PC2	EXC2	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3 ^{a)}	EXC4

a) EXC4 dovrebbe essere applicato a strutture speciali o strutture con conseguenze estreme di cedimento strutturale, come richiesto dalle disposizioni nazionali.

con:

- classe di importanza: CC2
- categorie di servizi: SC1



6 PROPRIETA' DEI MATERIALI

Nella fase di calcolo si sono presi in considerazione i seguenti materiali:

➤ acciaio strutturale per travi e lamiere

- tipo: S355
- grado: J2 / J2W (cor-ten)
- coefficiente parziale di sicurezza acciaio $\gamma_{M0} = 1.05$
- resistenza caratteristica di snervamento a trazione $f_{yk} = 3550 \text{ kg/cm}^2$
- resistenza di calcolo a trazione $f_{yd} = 3380 \text{ kg/cm}^2$
- modulo di elasticità $E = 2100000 \text{ kg/cm}^2$

Tab. 4.2.I – Laminati a caldo con profili a sezione aperta piani e lunghi

Norme e qualità degli acciai	Spessore nominale "t" dell'elemento			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
	f_{yk} [N/mm ²]	f_{tk} [N/mm ²]	f_{yk} [N/mm ²]	f_{tk} [N/mm ²]
UNI EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	420	550
UNI EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
UNI EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
S460 Q/QL/QL1	460	570	440	580
UNI EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490

➤ saldature

- a cordone d'angolo: $b_{\text{sald}} > 0.7 t_{\text{min}}$
- a completa penetrazione (dove previste)

➤ bulloni, barre filettate, tasselli meccanici

- classe: 10.9

➤ acciaio barre Dywidag – stralli

- tipo: SAS 835/1035



➤ **calcestruzzo**

- classe di resistenza R_{ck} 350 – C28/35
- coefficiente parziale di sicurezza cls γ_c = 1.50
- coefficiente riduttivo resistenza di lunga durata α_{cc} = 0.85
- resistenza cilindrica caratteristica a compressione f_{ck} = 280 kg/cm²
- resistenza di calcolo a compressione f_{cd} = 158 kg/cm²

➤ **acciaio per barre armatura**

- tipo B450C
- coefficiente parziale di sicurezza acciaio γ_s = 1.15
- resistenza caratteristica di snervamento a trazione f_{yk} = 4500 kg/cm²
- modulo di elasticità E= 2100000 kg/cm²

Acciaio

Sigla	f _{yk}	f _{tk}	sig. adm
> B450C	450	540	255
B450A	450	540	255
Trefolo	1620	1800	1080
Aq50	270	500	180
liscio_1939	270	500	190
B500B	550	500	345
Viaduct	420	500	280

B450C

f_{yk} N/mm²
 f_{tk} N/mm²

γ_s

E_s/E_c

E_s N/mm²
 ϵ_{su} ‰
 f_{yd} N/mm²
 ϵ_{syd} ‰
 $\sigma_{s,adm}$ N/mm²

Calcestruzzo

Sigla	f _{ck}	R _{ck}
C20/25	20	25
C25/30	25	30
> C28/35	28	35
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55

C28/35

f_{ck} N/mm²
 R_{ck} N/mm²

γ_c ?

ϵ_{c2} ‰ ϵ_{cu} ‰

α_{cc} ? f_{cd} N/mm²

f_{cc}/f_{cd} ?

$\sigma_{c,adm}$ N/mm²

τ_{co} τ_{c1} N/mm²

f_{ctm} E_{cm} N/mm²



7 AZIONI DI PROGETTO

7.1 AZIONI STATICHE

L'analisi dei carichi ha preso in considerazione le seguenti tipologie di azioni:

- a. Permanenti strutturali G_1 : azioni che agiscono durante tutta la vita della costruzione, la cui variazione di intensità nel tempo è così piccola e lenta da poterle considerare con sufficiente approssimazione costanti nel tempo. Tali pesi **collaborano** strutturalmente con l'intera opera.

In questa categoria rientrano:

- Peso proprio acciaio $G_{11} = 7850 \text{ kg/m}^3$
- Peso proprio tegoli PiGreco $G_{12} = 320 \text{ kg/m}^2$

- b. Permanenti non strutturali G_2 : azioni che agiscono durante tutta la vita della costruzione, la cui variazione di intensità nel tempo è così piccola e lenta da poterle considerare con sufficiente approssimazione costanti nel tempo. Tali pesi **non collaborano** strutturalmente con l'intera opera.

In questa categoria rientrano:

- Peso piano camminamento (parte metallica) $G_{21} = 30 \text{ kg/m}^2$
- Peso parapetto $G_{22} = 40 \text{ kg/m}$
- Peso getto integrativo sopra i tegoli PiGreco $G_{23} = 200 \text{ kg/m}^2$

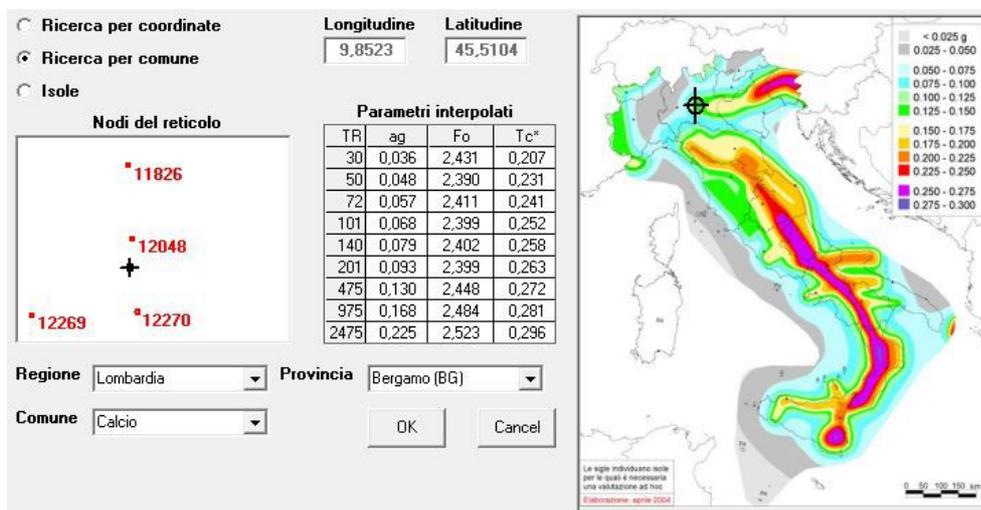
- c. Variabili Q_k : azioni che agiscono per un periodo di tempo breve rispetto alla vita utile di progetto della struttura. In questa categoria rientrano:

- Folla $Q_{11} = 500 \text{ kg/m}^2$
- Vento laterale $Q_{22} = 150 \text{ kg/m}^2$

7.2 AZIONI SISMICHE

Di seguito si riportano i parametri (Comune di Calcio) relativi alla caratterizzazione sismica dell'opera:

- Tipo di costruzione: 2 (opere ordinarie)
- Vita nominale: $V_N > 50$ anni
- Classe d'uso: II
- Coefficiente d'uso C_U : 1.0
- Periodo di riferimento per azione sismica: $V_R = 50$ anni
- Amplificazione topografica: $S_T = 1.0$
- Comune: Calcio
- Provincia: Bergamo
- Zona sismica: 3



Si ha:

- Periodo di riferimento per azione sismica: $V_R = 50$ anni
- stato limite: SLV
- Periodo di ritorno dell'azione sismica: $T_R = 475$ anni
- a_g/g : 0.130
- F_0 : 2.448
- T^*_C : 0.272

Di seguito si riportano i parametri (Comune di Urago) relativi alla caratterizzazione sismica dell'opera:

- Tipo di costruzione: 2 (opere ordinarie)
- Vita nominale: $V_N > 50$ anni
- Classe d'uso: II
- Coefficiente d'uso C_U : 1.0
- Periodo di riferimento per azione sismica: $V_R = 50$ anni
- Amplificazione topografica: $S_T = 1.0$
- Comune: Urago d'Oglio
- Provincia: Brescia
- Zona sismica: 3

Ricerca per coordinate
 Ricerca per comune
 Isole

Longitudine:
 Latitudine:

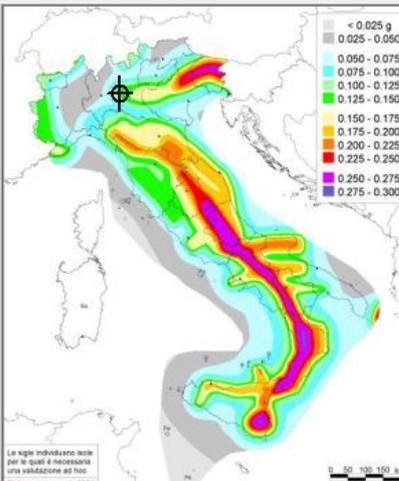
Parametri interpolati			
TR	ag	F ₀	T _c *
30	0.037	2.432	0.208
50	0.049	2.385	0.232
72	0.058	2.411	0.243
101	0.069	2.395	0.253
140	0.080	2.401	0.258
201	0.094	2.401	0.263
475	0.132	2.453	0.272
975	0.170	2.486	0.282
2475	0.228	2.521	0.298

Regione:
 Comune:

Provincia:

Nodi del reticolo





Si ha:

- Periodo di riferimento per azione sismica: $V_R = 50$ anni
- stato limite: SLV
- Periodo di ritorno dell'azione sismica: $T_R = 475$ anni
- a_g/g : 0.132
- F_0 : 2.453
- T^*_c : 0.272

Dal punto di vista del calcolo si assume il peggiore dei due scenari (Urago d'Oglio).

Inoltre come indicato all'interno della relazione geologica-geotecnica si assume un suolo di categoria C.



8 COMBINAZIONI DELLE AZIONI

8.1 AZIONI STATICHE

Secondo quanto previsto in DM 17/01/2018 le verifiche sono condotte con il metodo allo SLU secondo la seguente combinazione:

$$E_d = \sum_i \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \sum_i \gamma_{Qi} \psi_{0i} Q_{ki}$$

con:

- G_{kj} = valore caratteristico delle azioni permanenti
- Q_{k1} = valore caratteristico di una delle azioni variabili
- Q_{ki} = valore caratteristico delle altre azioni variabili
- γ_{Gj} = coefficiente parziale di sicurezza per le azioni permanenti
- γ_{Qi} = coefficiente parziale di sicurezza per le azioni variabili
- ψ_{0i} = valore di combinazione delle azioni variabili

I coefficienti utilizzati allo SLU per la valutazione dei carichi sono i seguenti:

- $\gamma_G = 1.30$
- $\gamma_Q = 1.50$
- ψ_0 = secondo quanto espresso in DM 17/01/2018

Di seguito le combinazioni e le azioni elementari considerate:



Combination Rules | Superposition Commands

- 100 : combinazione rara
- 104 : stati limite ultimi
- 106 : combinazione sismica

Combination Rule

Number: 100

Name: combinazione rara

Superposition Kind:

- ULS accidental combination
- ULS seismic combination
- SLS quasi-permanent combination
- SLS characteristic combination**
- SLS frequent combination

Type of resulting loadcases:

- ULS fundamental combination
- ULS accidental combination
- ULS seismic combination
- SLS quasi-permanent combination
- SLS characteristic combination**
- SLS frequent combination

Number of resulting loadcases:

fully automatic semi-automatic manually

Offset for loadcase number: 1100

Actions | Loadcases

Nr	Title	Action	Factor of dead weight	$\gamma-u$	$\gamma-f$	$\gamma-a$	ψ_0	ψ_1	ψ_2
1	PP	G Azioni Permanenti	1.00	1.30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	CALPESTIO + PARAPETTO	G_2 Permanenti non strutturali	0.00	1.50	0.80	1.00	1.00	1.00	1.00
3	FOLLA	Q_C Ambienti suscettibili d'affollamento	0.00	1.50	0.00	1.00	0.70	0.70	0.60
4	VENTO YY	W Azioni del Vento	0.00	1.50	0.00	1.00	0.60	0.20	0.00
5	PEDONALE	None	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

8.2 AZIONI SISMICHE

Secondo quanto riportato in DM 17/01/2018:

$$G_1 + G_2 + P + E + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj}$$

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



$$G_1 + G_2 + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj} .$$

I coefficienti ψ_{2j} sono i seguenti:

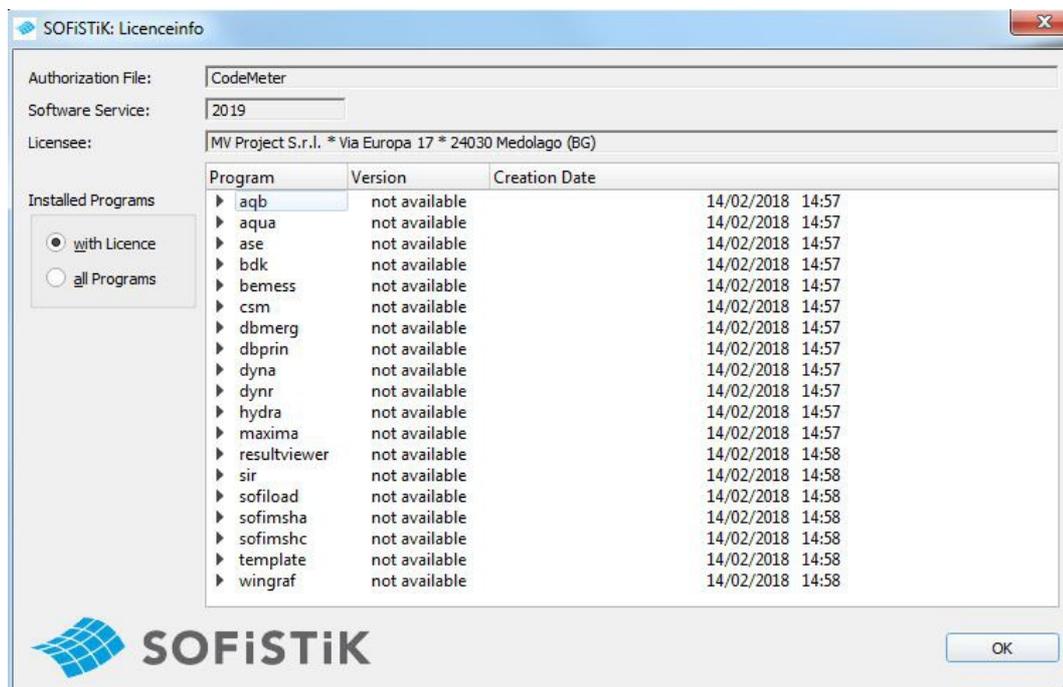
Categoria/Azione variabile	ψ_{0j}	ψ_{1j}	ψ_{2j}
Categoria A Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H Coperture	0,0	0,0	0,0
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0



9 VERIFICHE STRUTTURALI

9.1 CODICE DI CALCOLO

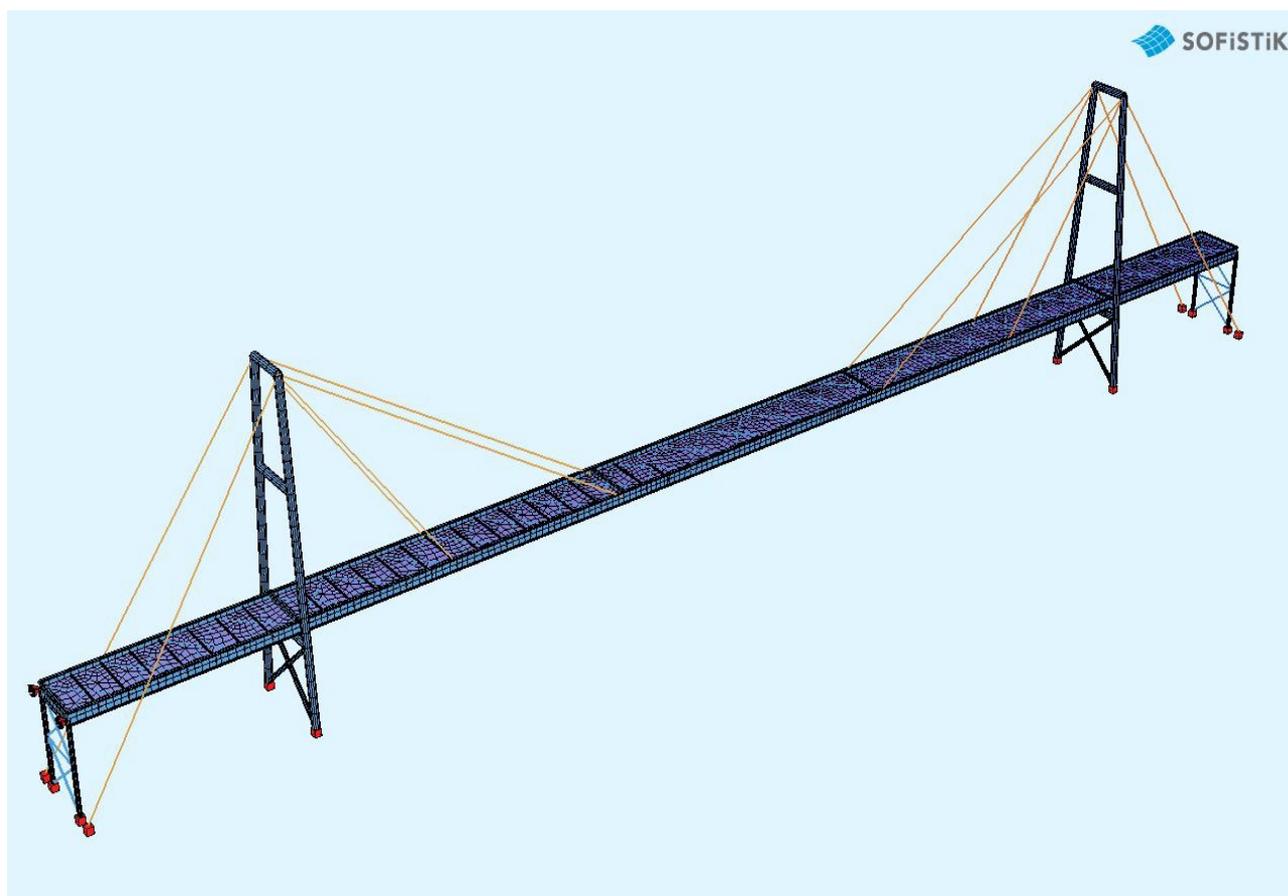
Le verifiche strutturali sono effettuate mediante modello FEM, realizzato con software SOFISTIK 2023 della cui licenza MV Project srl è regolare proprietaria (n° licenza 5731-001).



9.2 GEOMETRIA GENERALE DEL MODELLO FEM

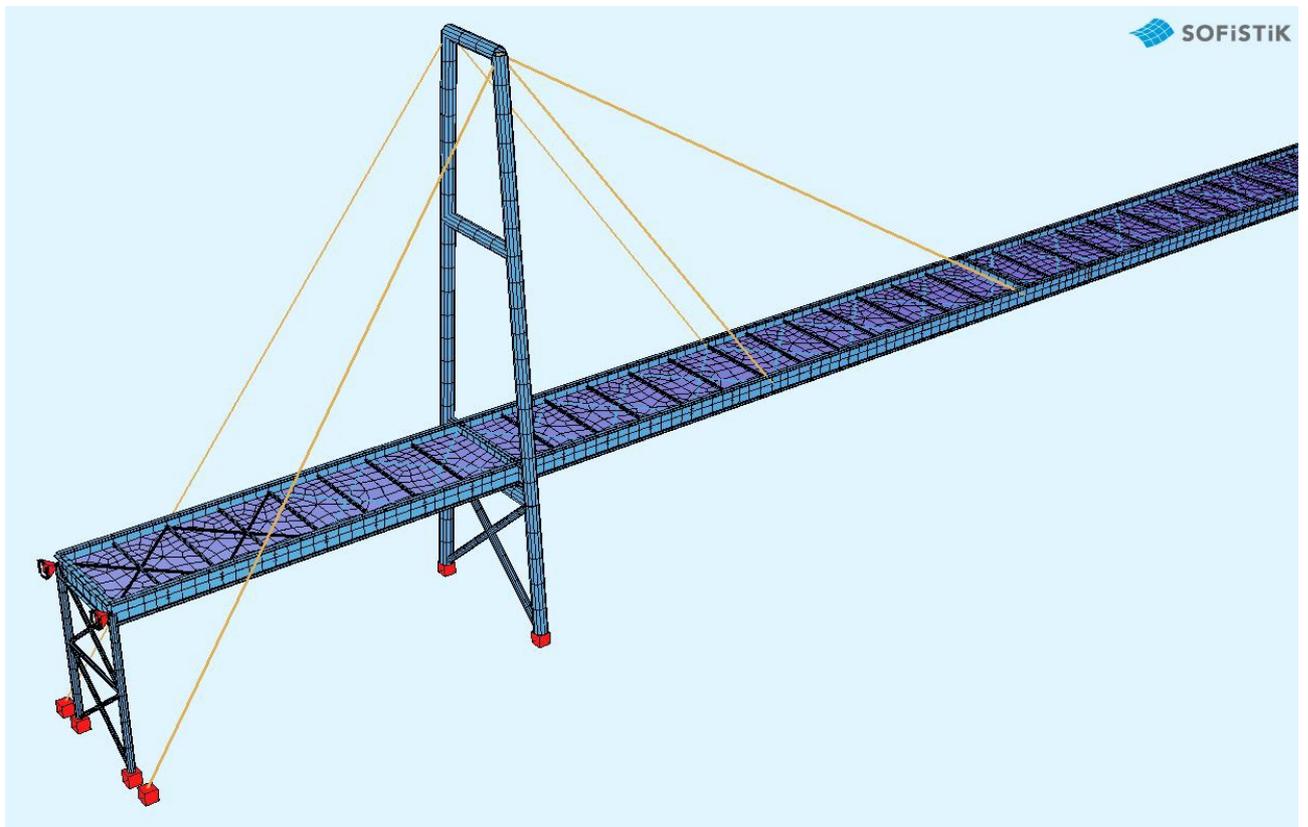
Di seguito si riporta il modello FEM realizzato per lo studio della struttura.

Il modello è realizzato mediante elementi beam opportunamente vincolati tra loro in funzione dei nodi strutturali previsti nei disegni di assieme generale.



Vista 3D modello FEM

Vista 3D modello FEM



Vista 3D modello FEM



9.3 CRITETI DI PROGETTAZIONE

Di seguito si riportano le ipotesi base adottate:

- | | |
|---|---|
| • classe di duttilità: | bassa |
| • fattore di struttura: | $q=1$ (spettro elastico imposto) |
| • stati limite indagati: | SLD e SLV |
| • giunti di separazione tra strutture contigue: | tra impalcato metallico e prefabbricato |
| • analisi sismica adottata: | dinamica lineare |
| • analisi lineare: | 1° ordine |
| • tipologia strutturale dir. trasversale: | funzionamento a controventi |
| • tipologia strutturale dir. longitudinale: | funzionamento a telaio / stralli |

9.4 SCHEMI STATICI ADOTTATI

Gli schemi statici prevedono:

- antenne: incastro a terra sui pali di fondazione;
- stralli: incastro a terra sui pali di fondazione;
- impalcato: in appoggio sui cavalletti.

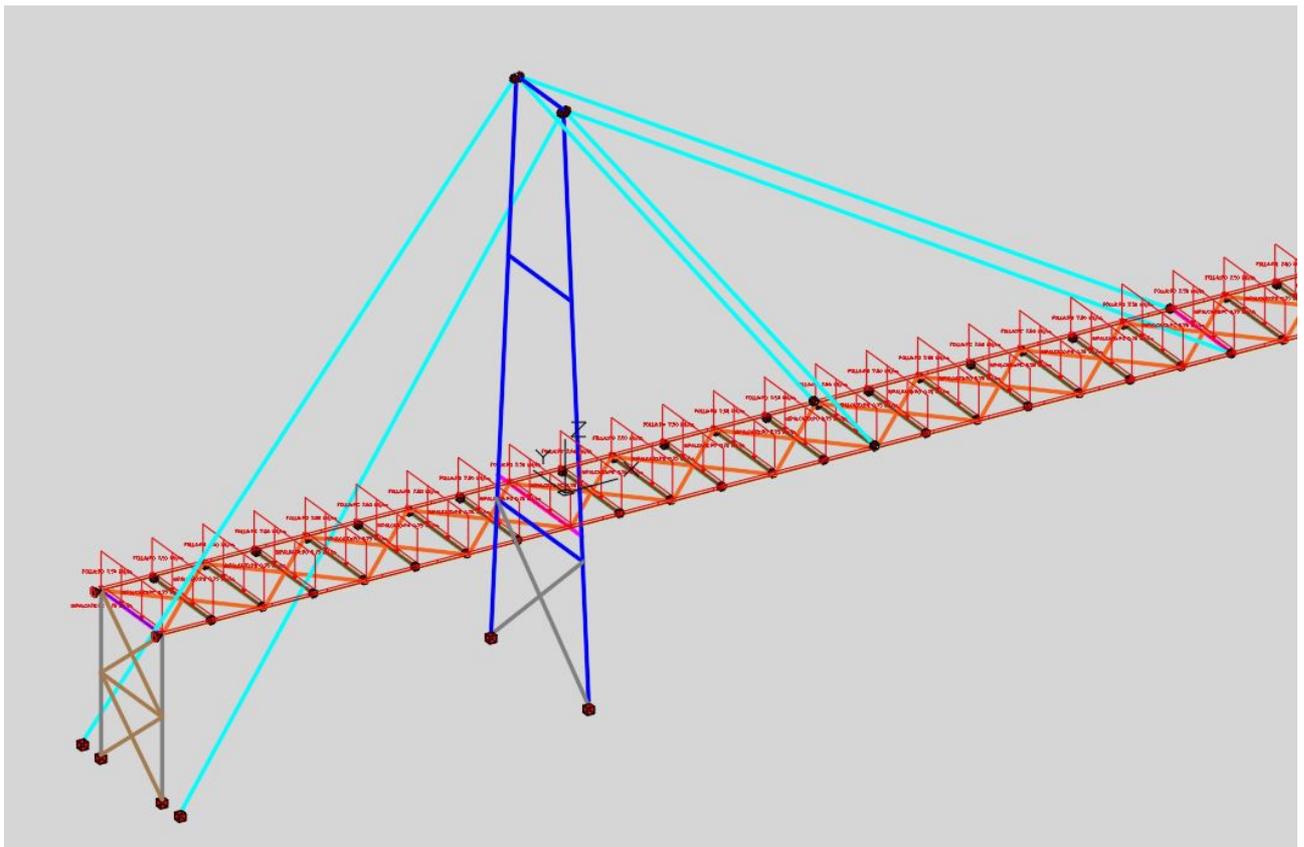
9.5 APPLICAZIONE DEI CARICHI

I carichi sono stati imposti mediante l'applicativo "linear load", ossia posizionati sulle aste di competenza in funzione delle rispettive aree o lunghezze di pertinenza.

Quindi, partendo dal valore q in termini di forza/metro quadro, si è moltiplicato per la lunghezza di pertinenza:

$$p_{\text{trave}} = q \times L$$

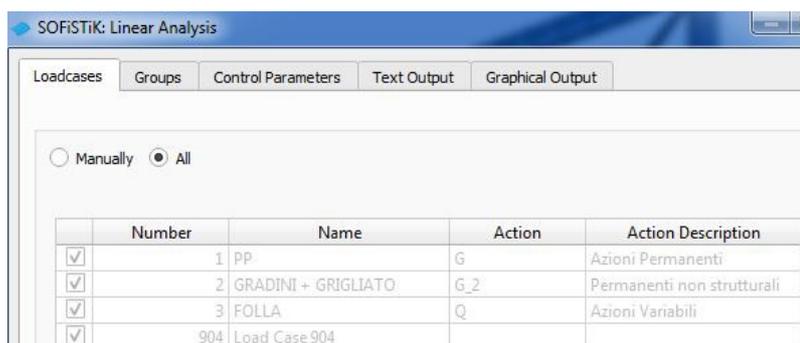
dove q = carichi di cui al § 7.1.



9.6 ILLUSTRAZIONE E GIUSTIFICAZIONE DEI CRITERI DI VERIFICA

I criteri di verifica scelti per l'analisi del presente manufatto sono:

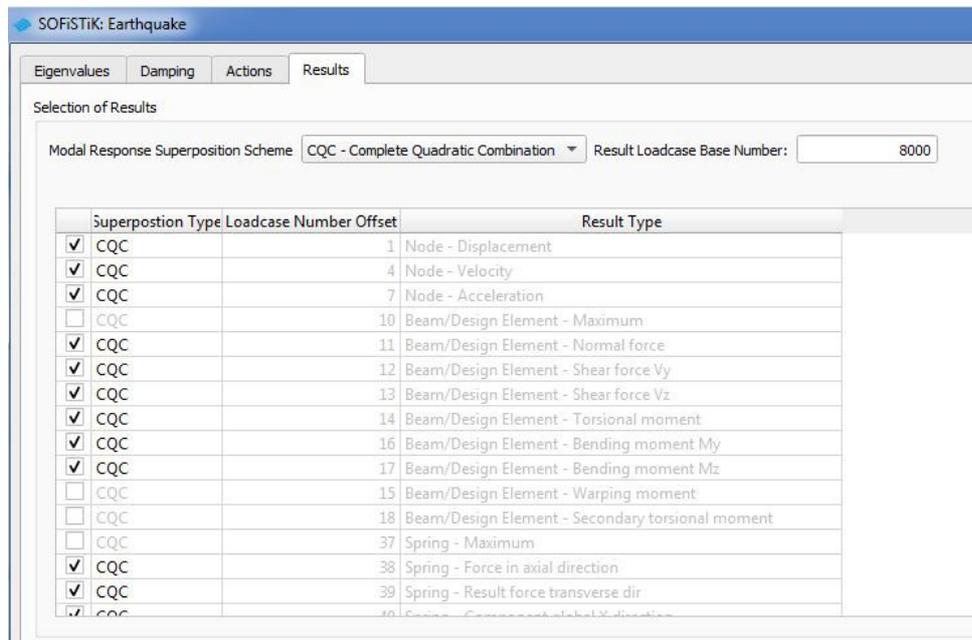
- analisi lineare mediante il solutore "Linear Analysis": i casi di carico elementari sono stati ognuno implementati e calcolati dal programma:



The screenshot shows the 'SOFiSTIK: Linear Analysis' dialog box with the 'Groups' tab selected. The 'All' radio button is chosen. A table lists the load cases to be analyzed:

	Number	Name	Action	Action Description
<input checked="" type="checkbox"/>	1	PP	G	Azioni Permanenti
<input checked="" type="checkbox"/>	2	GRADINI + GRIGLIATO	G_2	Permanenti non strutturali
<input checked="" type="checkbox"/>	3	FOLLA	Q	Azioni Variabili
<input checked="" type="checkbox"/>	904	Load Case 904		

- analisi dinamica modale, mediante il solutore "Earthquake", con restituzione dei risultati tramite combinazione CQC (non SRSS), maggiormente affidabile:



The screenshot shows the 'SOFiSTIK: Earthquake' dialog box with the 'Results' tab selected. The 'Modal Response Superposition Scheme' is set to 'CQC - Complete Quadratic Combination' and the 'Result Loadcase Base Number' is 8000. A table lists the results to be displayed:

	Superposition Type	Loadcase Number	Offset	Result Type
<input checked="" type="checkbox"/>	CQC		1	Node - Displacement
<input checked="" type="checkbox"/>	CQC		4	Node - Velocity
<input checked="" type="checkbox"/>	CQC		7	Node - Acceleration
<input type="checkbox"/>	CQC		10	Beam/Design Element - Maximum
<input checked="" type="checkbox"/>	CQC		11	Beam/Design Element - Normal force
<input checked="" type="checkbox"/>	CQC		12	Beam/Design Element - Shear force Vy
<input checked="" type="checkbox"/>	CQC		13	Beam/Design Element - Shear force Vz
<input checked="" type="checkbox"/>	CQC		14	Beam/Design Element - Torsional moment
<input checked="" type="checkbox"/>	CQC		16	Beam/Design Element - Bending moment My
<input checked="" type="checkbox"/>	CQC		17	Beam/Design Element - Bending moment Mz
<input type="checkbox"/>	CQC		15	Beam/Design Element - Warping moment
<input type="checkbox"/>	CQC		18	Beam/Design Element - Secondary torsional moment
<input type="checkbox"/>	CQC		37	Spring - Maximum
<input checked="" type="checkbox"/>	CQC		38	Spring - Force in axial direction
<input checked="" type="checkbox"/>	CQC		39	Spring - Result force transverse dir
<input checked="" type="checkbox"/>	CQC		40	Spring - Result force axial direction

- numero modi di vibrare considerati: 100
- masse partecipanti:



Eigenvalues

No.	LC	λ [rad ² /sec ²]	error [-]	ω [rad/sec]	f [Hz]	T [sec]	ξ [%]	Meff			participation		
								X[%]	Y[%]	Z[%]	X[%]	Y[%]	Z[%]
68	10068	3.9550E+03	-	62.889	10.009	0.100	5.000	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0
69	10069	3.9740E+03	-	63.039	10.033	0.100	5.000	0.7	0.1	0.1	0.7	0.1	0.0
70	10070	4.0644E+03	-	63.752	10.147	0.099	5.000	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
71	10071	4.2754E+03	-	65.386	10.407	0.096	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
72	10072	4.3314E+03	-	65.813	10.474	0.095	5.000	0.0	1.3	0.0	0.0	1.3	0.0
73	10073	4.5414E+03	-	67.390	10.725	0.093	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
74	10074	4.6354E+03	-	68.083	10.836	0.092	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
75	10075	4.6489E+03	-	68.183	10.852	0.092	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
76	10076	4.6818E+03	-	68.424	10.890	0.092	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
77	10077	4.8259E+03	-	69.469	11.056	0.090	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
78	10078	5.2907E+03	-	72.737	11.576	0.086	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
79	10079	5.3061E+03	-	72.843	11.593	0.086	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
80	10080	5.3304E+03	-	73.009	11.620	0.086	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
81	10081	5.5895E+03	-	74.763	11.899	0.084	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
82	10082	6.5552E+03	-	80.964	12.886	0.078	5.000	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0
83	10083	6.6906E+03	-	81.796	13.018	0.077	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
84	10084	7.1151E+03	-	84.351	13.425	0.074	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
85	10085	7.3818E+03	-	85.917	13.674	0.073	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
86	10086	7.6844E+03	-	87.661	13.952	0.072	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
87	10087	7.7155E+03	-	87.838	13.980	0.072	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
88	10088	7.9416E+03	-	89.115	14.183	0.071	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
89	10089	8.0391E+03	-	89.661	14.270	0.070	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
90	10090	8.2539E+03	-	90.851	14.459	0.069	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
91	10091	8.3566E+03	-	91.414	14.549	0.069	5.000	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
92	10092	8.3785E+03	-	91.534	14.568	0.069	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
93	10093	8.4215E+03	-	91.769	14.605	0.068	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
94	10094	8.4460E+03	-	91.902	14.627	0.068	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
95	10095	8.6373E+03	-	92.937	14.791	0.068	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
96	10096	8.9882E+03	-	94.806	15.089	0.066	5.000	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0
97	10097	9.6602E+03	-	98.286	15.643	0.064	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
98	10098	1.0386E+04	-	101.909	16.219	0.062	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
99	10099	1.0647E+04	-	103.186	16.423	0.061	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100	10100	1.0805E+04	-	103.947	16.544	0.060	5.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
							$\Sigma(\%)^2$	80.5	96.0	79.1	81.4	96.8	79.1

SOFISTIK AG - www.sofistik.de

- analisi dello stato tensionale delle aste, in termini di resistenza, mediante solutore “Steel - Resistance of Cross Sections”:

I criteri di verifica adottati sono ritenuti validi e di comprovato esito, in quanto:

- sono quelli ritenuti maggiormente indicati per questo tipo di verifiche;
- sono stati abbondantemente verificati e implementati nel software utilizzato da ormai parecchi anni e trovano un giusto riscontro nel comportamento delle strutture.



Design Code

Design according to: Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 17/01/2018

Design Method

Von Mises Yield Criterion

Recommendation of cross-sections

Flexural buckling (EN 1993-1-1, 6.3.1.1)

 Von Mises Yield Criterion = square root of yield criterion.

 Recommendation is possible only for standard sections and only within the same profile family.

Linear Summation of Forces and Moments (EN 1993-1-1, 6.2.1 (7), Eq. 6.2)

Total Interaction of Forces and Moments (EN 1993-1-1, 6.2.8-10, Eq. 6.41)

Nonlinear Stresses with Strain Hardening

Design Case

Design Case:

 Design Case - envelope of utilisation level.

Partial Safety Factors

Safety factor γ_{M0} :

 γ_{M0} is the partial safety factor for resistance of cross-sections acc. to EN 1993-1-1, 6.1.

Cross Section Classification

Classification with reduced output table

Classification with detailed output table

No Classification

 Classification of cross-sections is always done according to EN 1993-1-1, 5.5.2.

 Maximum c/t-ratios according to EN 1993-1-1, Table 5.2.



9.7 GIUDIZIO MOTIVATO DI ACCETTABILITA' DEI RISULTATI

I risultati forniti dal software sono ritenuti accettabili in quanto:

- confermano sostanzialmente i primi calcoli eseguiti “a mano” in fase di predimensionamento della struttura durante di gara di acquisizione della commessa, in cui si sono stimati i pesi e i profili e il conseguente peso da offrire al cliente. A mano, in termini sia di freccia che di tasso di lavoro, si sono ottenuti fundamentalmente gli stessi ordini di grandezza, ricorrendo a semplici ma efficaci e immediate formule note nella Scienza delle Costruzioni;
- facendo parecchie strutture metalliche, il sottoscritto ha potuto constatare che gli esiti sono in linea anche con manufatti simili progettati durante gli anni di attività.

9.8 CARATTERISTICHE E AFFIDABILITA' DEL CODICE DI CALCOLO

Nella pagina seguente si riporta l'autodichiarazione del developer del Software in merito alla affidabilità dello stesso:

DICHIARAZIONE DI AFFIDABILITA' DEL CODICE DI CALCOLO

- > Software utilizzato: SOFiSTiK FEA ver. 2023
- > Origine: Sofistik AG, Oberschleissheim, Germania. Fondata nel 1987.

> Solutori:

Il solutore ASE (Advance Solution Engine) calcola gli effetti statici e dinamici di carichi generici su qualsiasi tipo di struttura. Prima del calcolo la struttura viene divisa in singoli elementi interconnessi ai nodi (metodo agli Elementi Finiti) per poi essere analizzata. Gli elementi implementati sono: beam, cable, truss, spring, shell (triangolari o quadrilateri) e brick. Il programma gestisce strutture con vincoli esterni elastici o rigidi ed è possibile vincolare un'area (piastra), una linea (asta), un punto (nodo). Si possono utilizzare poi collegamenti rigidi o meno tra i vari elementi (kinematic coupling). Il solutore calcola gli effetti di carichi puntuali, ripartiti su una linea e su un'area, che possono essere anche indipendenti dalla mesh. La generazione di carichi da uno stato tensionale ottenuto da un caso di carico primario, permette il calcolo per fasi (fasi di costruzione/escavazione), il calcolo della ridistribuzione e degli effetti di viscosità e ritiro. Il calcolo non-lineare permette di tenere in considerazione il cedimento di particolari elementi come: cavi in compressione, sollevamento dei bordi delle platee, snervamento, rottura e attrito per gli elementi molla utilizzati anche nelle condizioni al contorno delle fondazioni. La non-linearità del materiale tiene conto inoltre dei fenomeni di snervamento e rottura anche negli elementi shell e brick. La non-linearità geometrica permette l'analisi degli effetti su cable, beam e shell secondo la teoria del 2° e 3° ordine.

Il solutore DYNA (DYnamic Analysis) viene utilizzato per l'analisi dinamica di strutture tridimensionali e permette il calcolo secondo il metodo degli spettri di risposta (per sisma e vento) e l'integrazione diretta delle equazioni del moto secondo il metodo time-step, con il possibile utilizzo di isolatori, smorzatori, treni di carico e vento.

> Metodo di calcolo:

Il metodo agli elementi finiti (FEM) è implementato in ASE come metodo degli spostamenti che si riassume come segue:

1. Determinazione delle matrici di rigidità degli elementi
2. Generazione della matrice di rigidità globale e soluzione del sistema di equazioni risultante
3. Applicazione dei carichi e calcolo dei rispettivi spostamenti
4. Calcolo delle tensioni negli elementi e delle reazioni nei nodi in funzione degli spostamenti calcolati

Sono disponibili diversi solutori di equazioni:

- Direct Skyline Solver (Gauss/Cholesky)
- Direct Sparse Solver (anche parallelo)
- Iterative Solver (Conjugate Gradients)

> Certificazione di qualità:

Tutte le funzionalità del programma ed ogni nuova caratteristica introdotta sono attentamente validate da un team di sviluppatori, tecnici e clienti esterni. Una serie di esempi di riferimento è perciò stata creata e documentata durante tutta la vita del software (più di 20 anni). Eventuali questioni sono affrontate con profonde discussioni con professionisti del settore, professori e dottori in materia, per la migliore interpretazione. SOFiSTiK è membro della German Association of Consultant Engineers (VBI) ed è coperta da un'assicurazione professionale.

Le funzionalità del programma sono molte così come le fonti di validazione:

- Esempi di controllo testati dai programmatori interni
- Esempi e manuali contenuti nel setup del programma che permettono di capire e comparare i diversi tipi di calcolo ed il comportamento del software
- Le sessioni annuali dei SOFiSTiK User Meeting (dal 1988) che mostrano i campi di utilizzo del programma con un background scientifico
- Esempi di controllo da enti esterni quali NAFEMS (The International Association for the Engineering Analysis Community) di cui Sofistik AG è membro e da cui sono stati presi numerosi esempi per confronto.
- Esempi di controllo sviluppati internamente (SOFiSTiK Software Quality Assurance SQA) confrontando i risultati, di analisi e verifiche, forniti dal software con soluzioni disponibili in letteratura.

Tale documentazione è scaricabile da:

<http://www.sofistik.de/documentation/2023/en/verification>



9.9 CONTROLLI SVOLTI SUI RISULTATI

I controlli svolti sui risultati sono principalmente i seguenti:

- verifiche in termini di deformabilità ai carichi verticali: si è controllato che il valore del rapporto freccia/luce rientri nei termini indicati dalla normativa:

Tabella 4.2.X Limiti di deformabilità per gli elementi di impalcato delle costruzioni ordinarie

Elementi strutturali	Limiti superiori per gli spostamenti verticali	
	$\frac{\delta_{max}}{L}$	$\frac{\delta_2}{L}$
Coperture in generale	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{250}$
Coperture praticabili	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{300}$
Solai in generale	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{300}$
Solai o coperture che reggono intonaco o altro materiale di finitura fragile o tramezzi non flessibili	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{350}$
Solai che supportano colonne	$\frac{1}{400}$	$\frac{1}{500}$
Nei casi in cui lo spostamento può compromettere l'aspetto dell'edificio	$\frac{1}{250}$	

In caso di specifiche esigenze tecniche e/o funzionali tali limiti devono essere opportunamente ridotti.

Tabella 4.2.XI Limiti di deformabilità per costruzioni ordinarie soggette ad azioni orizzontali

Tipologia dell'edificio	Limiti superiori per gli spostamenti orizzontali	
	$\frac{\delta}{h}$	$\frac{\Delta}{H}$
Edifici industriali monopiano senza carroponte	$\frac{1}{150}$	/
Altri edifici monopiano	$\frac{1}{300}$	/
Edifici multipiano	$\frac{1}{300}$	$\frac{1}{500}$

In caso di specifiche esigenze tecniche e/o funzionali tali limiti devono essere opportunamente ridotti.

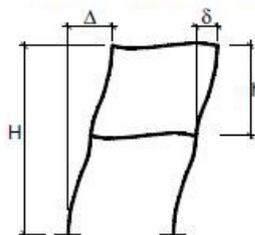


Figura 4.2.2 - Definizione degli spostamenti orizzontali per le verifiche in esercizio

- verifiche in termini di spostamento laterali degli elementi portanti principali. E' stata posta attenzione a che le distanze dall'edificio adiacente fossero rispettate;

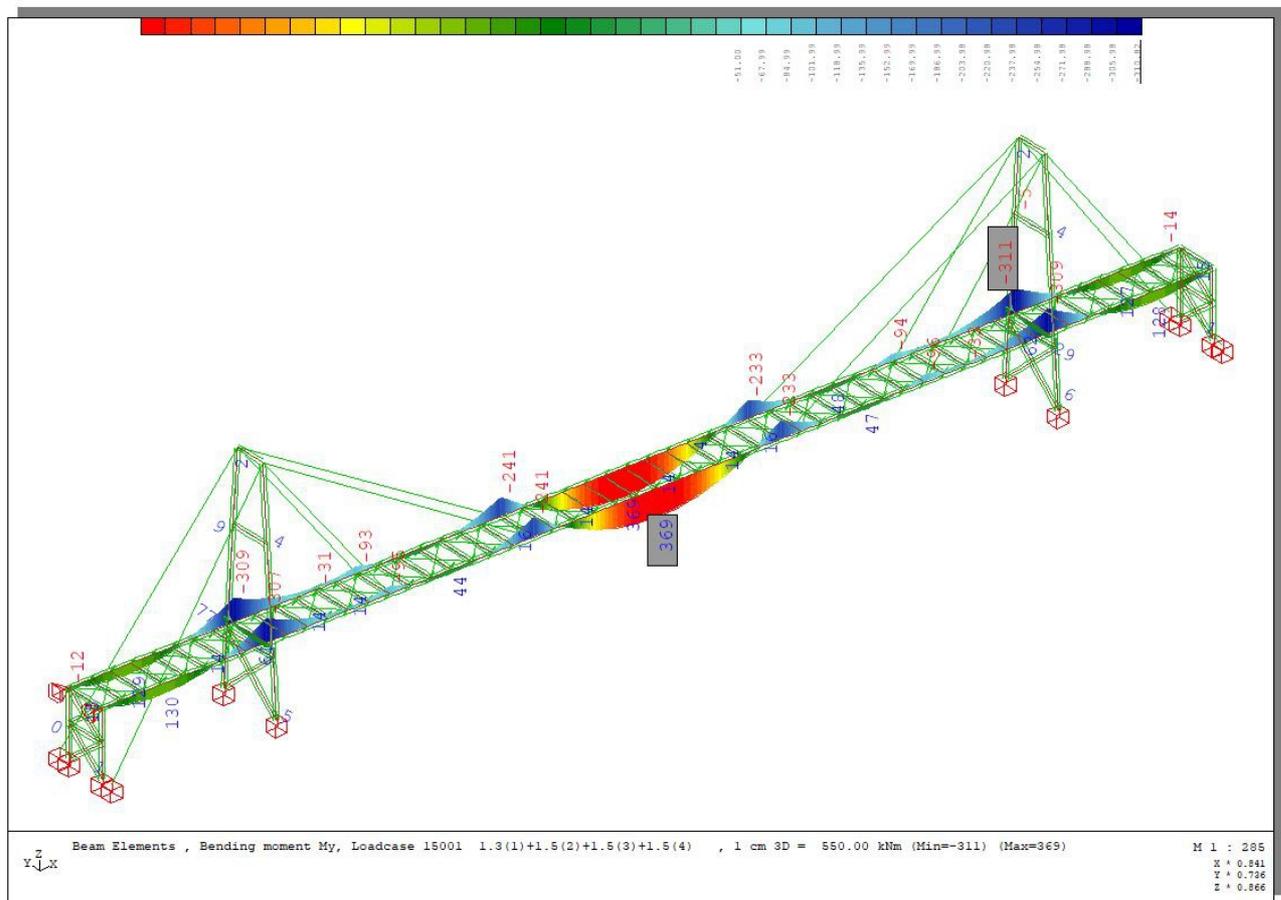


- verifiche in termini di resistenza delle sezioni, secondo le ben note formule di resistenza delle strutture in acciaio, ossia che globalmente a livello sezionale la massima sollecitazione sia inferiore alla resistenza. Tale verifica è sintetizzata in maniera esaustiva con la task di controllo “Utilization level” in cui è plottato il rapporto sollecitazione massima / resistenza nella sezione, tale indice deve essere inferiore all'unità.

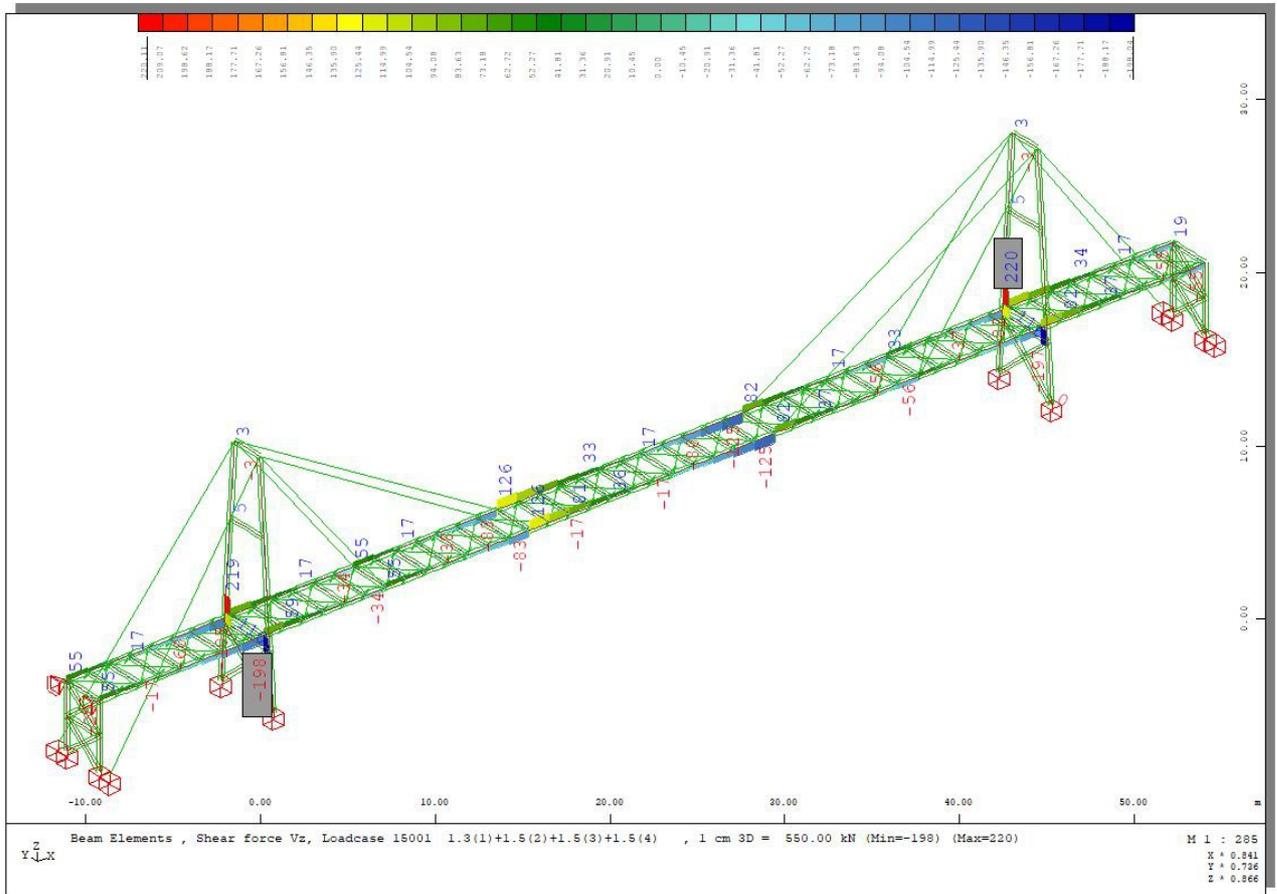
9.10 RISULTATI SALIENTI

9.10.1 AZIONI SOLLECITANTI INTERNE

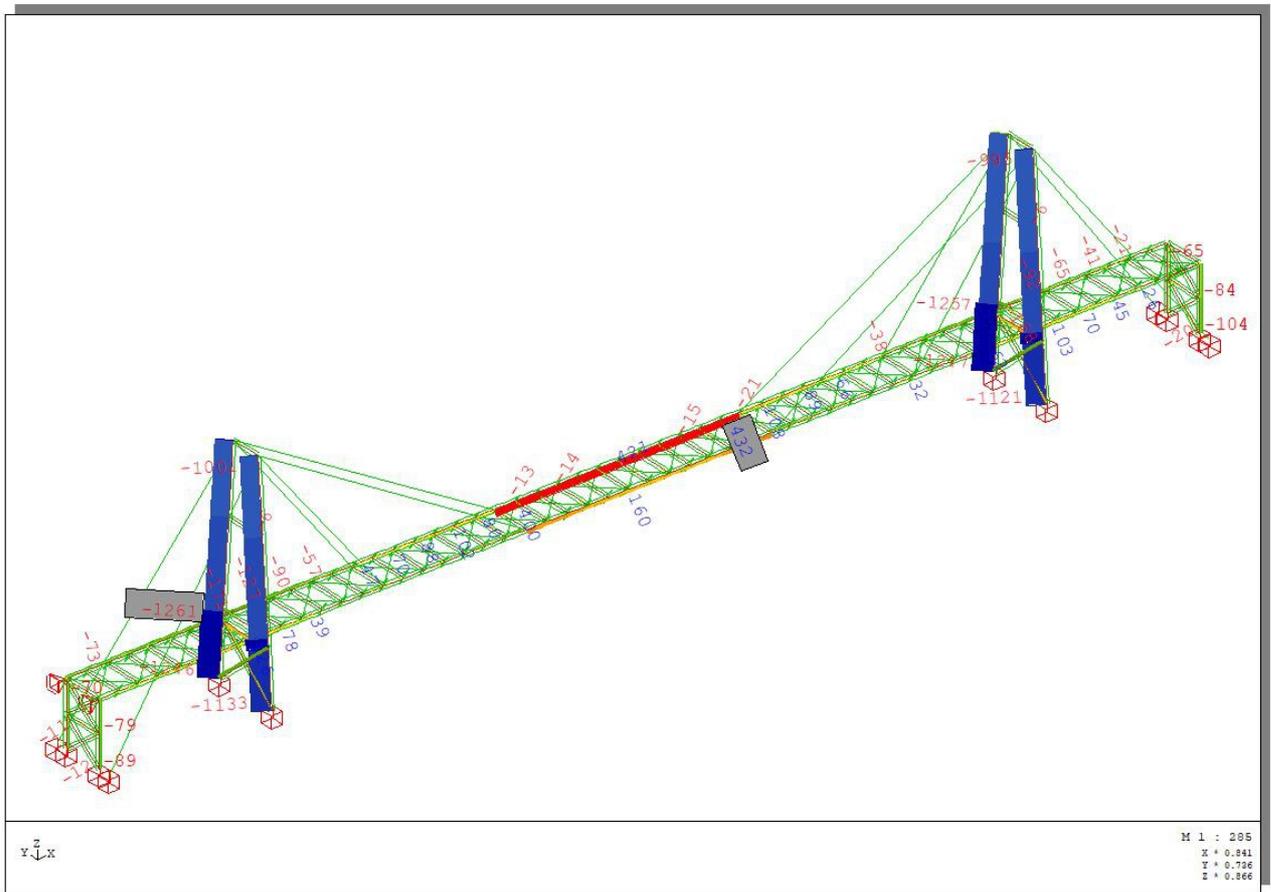
Di seguito le azioni interne presenti nel modello FEM per la combinazione fondamentale SLU:



Momento flettente [KNm] – combinazione SLU



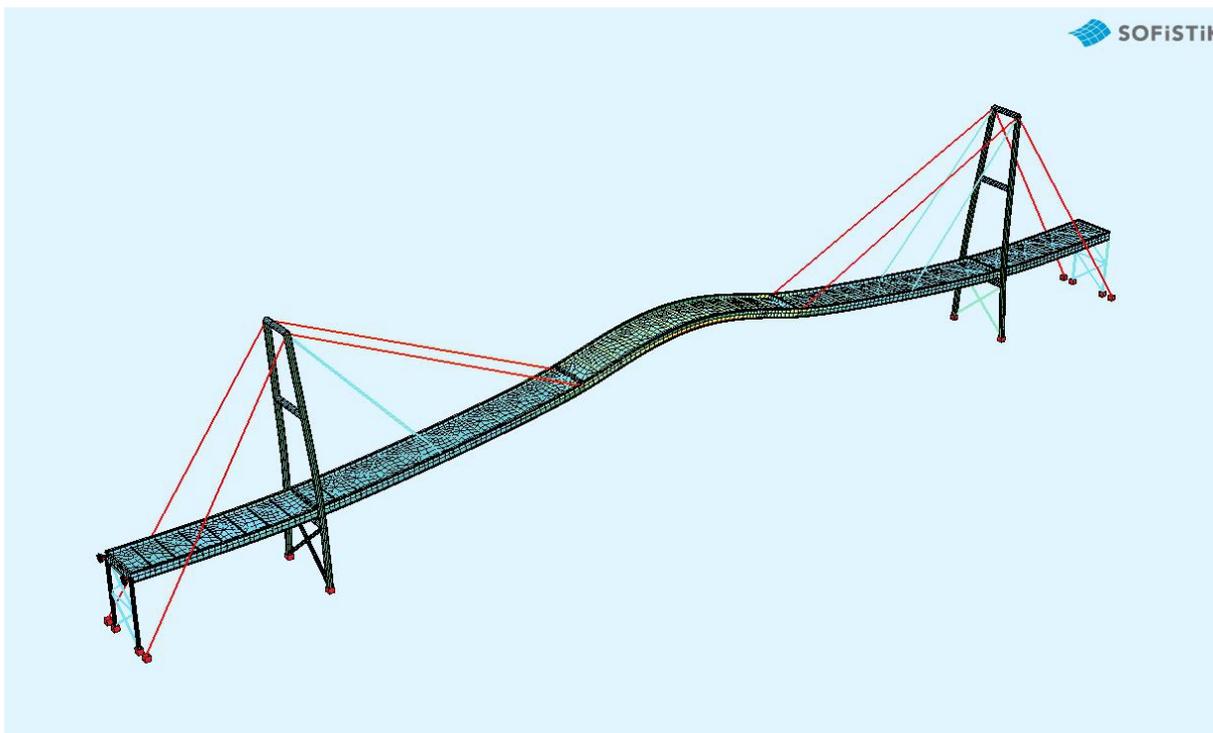
Taglio [KN] – combinazione SLU



Azione assiale [KN] – combinazione SLU

9.10.2 MODI DI VIBRARE

Di seguito la deformata per il primo modo di vibrare (massa eccitata 31%, frequenza 3,31 Hz, masse attivate = pesi propri + pesi G_2):



Deformata qualitativa – Primo modo di vibrare



Modal masses - activated mass

no	LC	frequency [Hertz]	effective modal mass			activated mass[%]	rotation around S		
			X[%]	Y[%]	Z[%]		phiX[%]	phiY[%]	phiZ[%]
1	2001	3.311	0.01	0.00	30.61	13.61482	0.00	0.00	0.00
2	2002	3.841	0.00	42.80	0.00	22.45351	0.21	0.00	0.00
3	2003	4.172	0.00	1.18	0.00	9.79425	5.50	0.00	0.00
4	2004	4.668	0.09	0.00	0.00	20.77205	0.00	4.85	0.00
5	2005	5.323	0.00	0.01	0.00	11.97567	0.17	0.00	30.83
6	2006	5.374	0.00	14.02	0.00	11.99406	72.73	0.00	0.07
7	2007	6.028	0.00	0.00	0.00	17.61626	0.00	0.00	0.24
8	2008	7.223	0.01	0.00	4.23	13.86855	0.00	0.00	0.00
9	2009	8.301	34.05	0.00	0.15	5.37532	0.00	0.44	0.00
		-----				-----			
		sum	34.16	58.00	34.98				

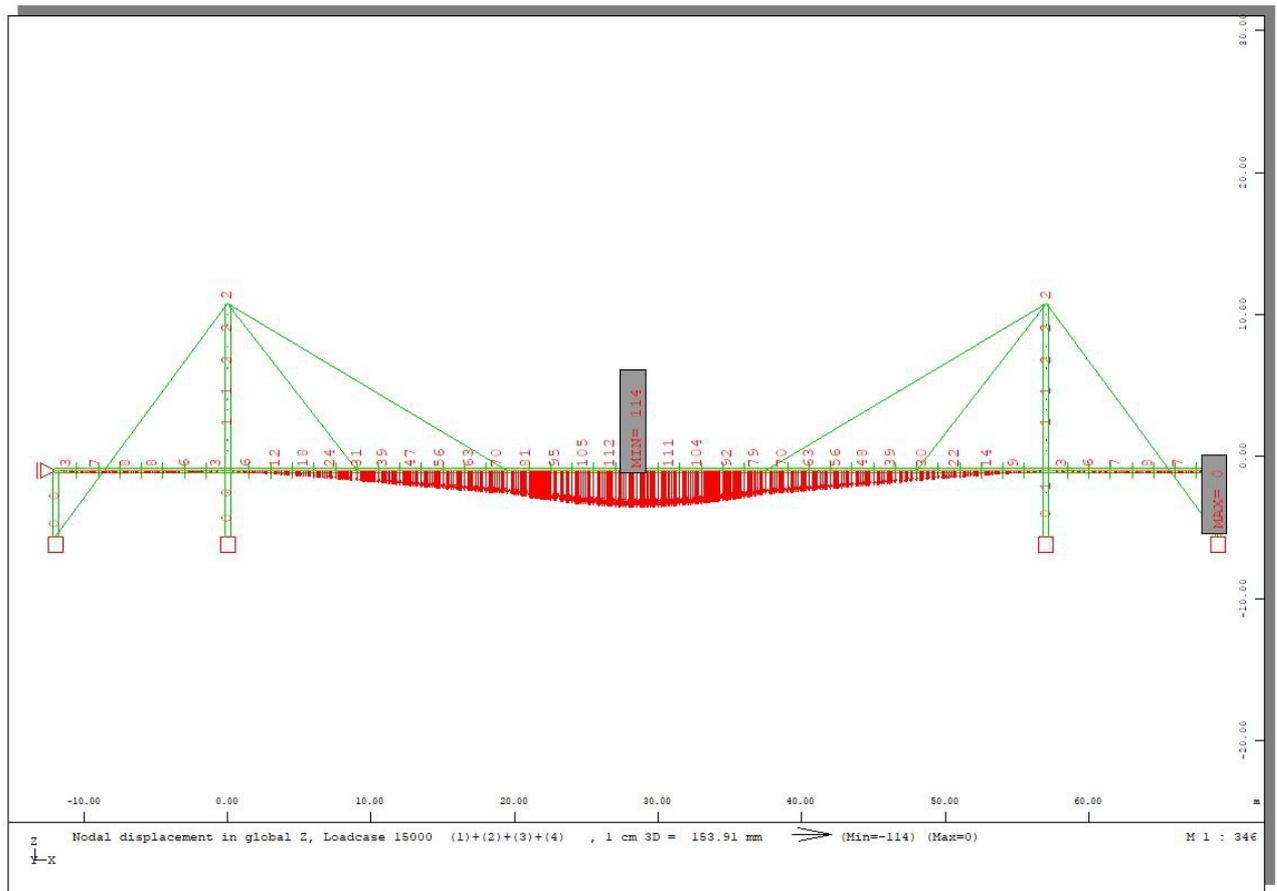
Eigenvalues

NOTA:

La prima frequenza di vibrazione della passerella, sottoposta a carico pedonale da Normativa (= NON folla compatta, per il calcolo vibrazionale) è invece di circa 3 Hz.

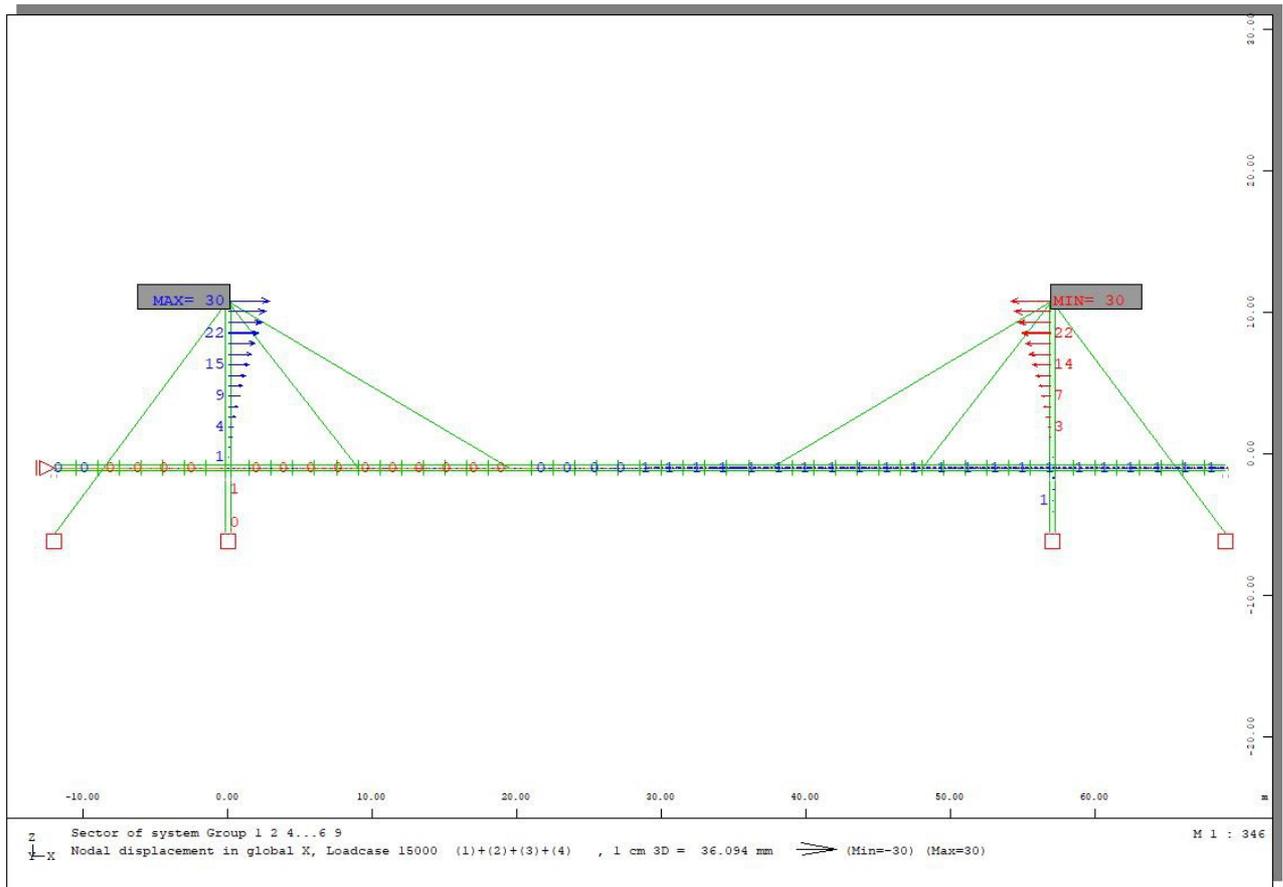
9.10.3 MASSIMO SPOSTAMENTO VERTICALE DZ

Come si può notare dal grafico riportato, il massimo spostamento verticale vale $d_z = -114$ mm, valore ritenuto accettabile ($= L/500$, con $L=57000$ mm).



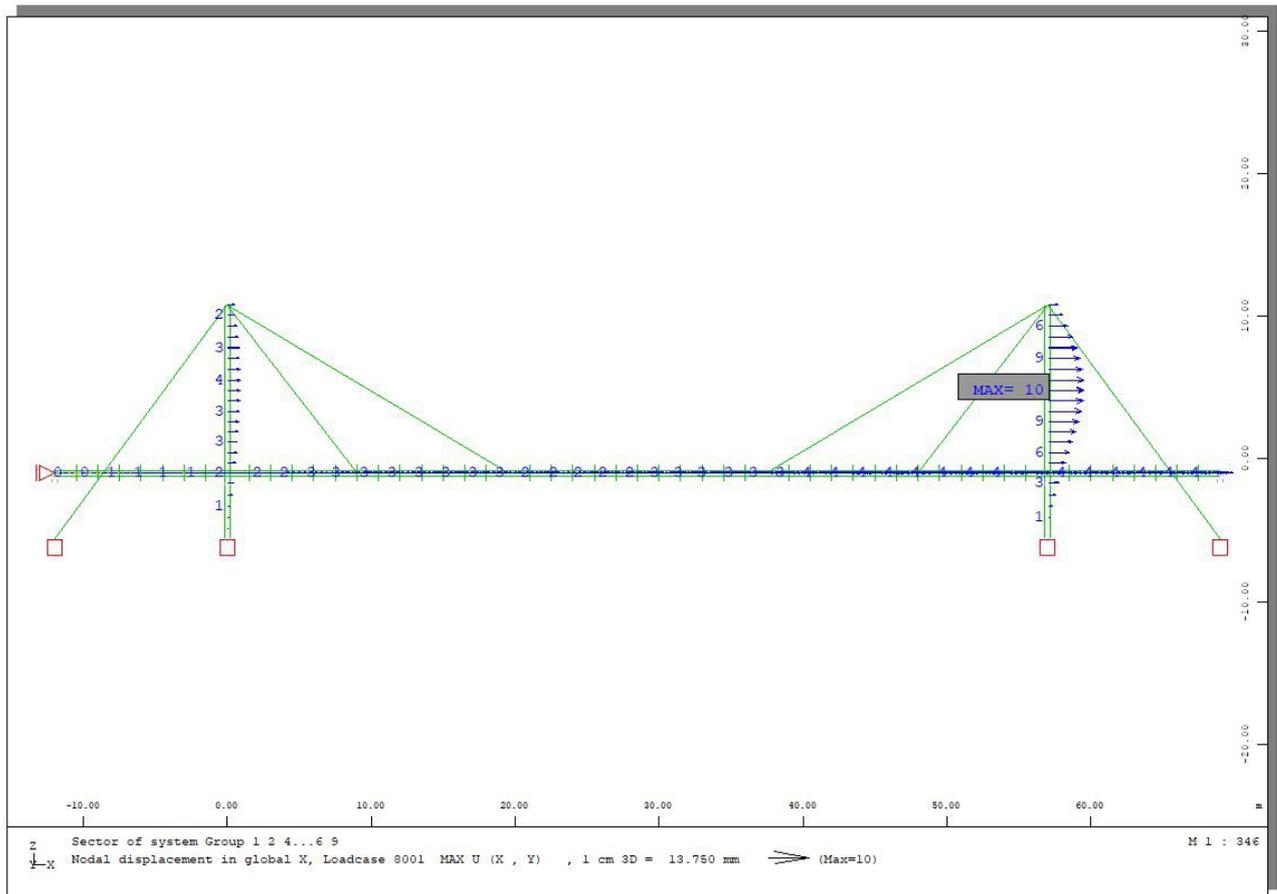
9.10.4 MASSIMO SPOSTAMENTO ORIZZONTALE DX

Come si può notare dal grafico riportato, il massimo spostamento orizzontale dovuto ai carichi gravitazionali vale $d_x=30$ mm. Si ritiene accettabile tale valore, pari a $H/550$ con $H=16500$ mm.



Spostamento orizzontale generato dai carichi gravitazionali

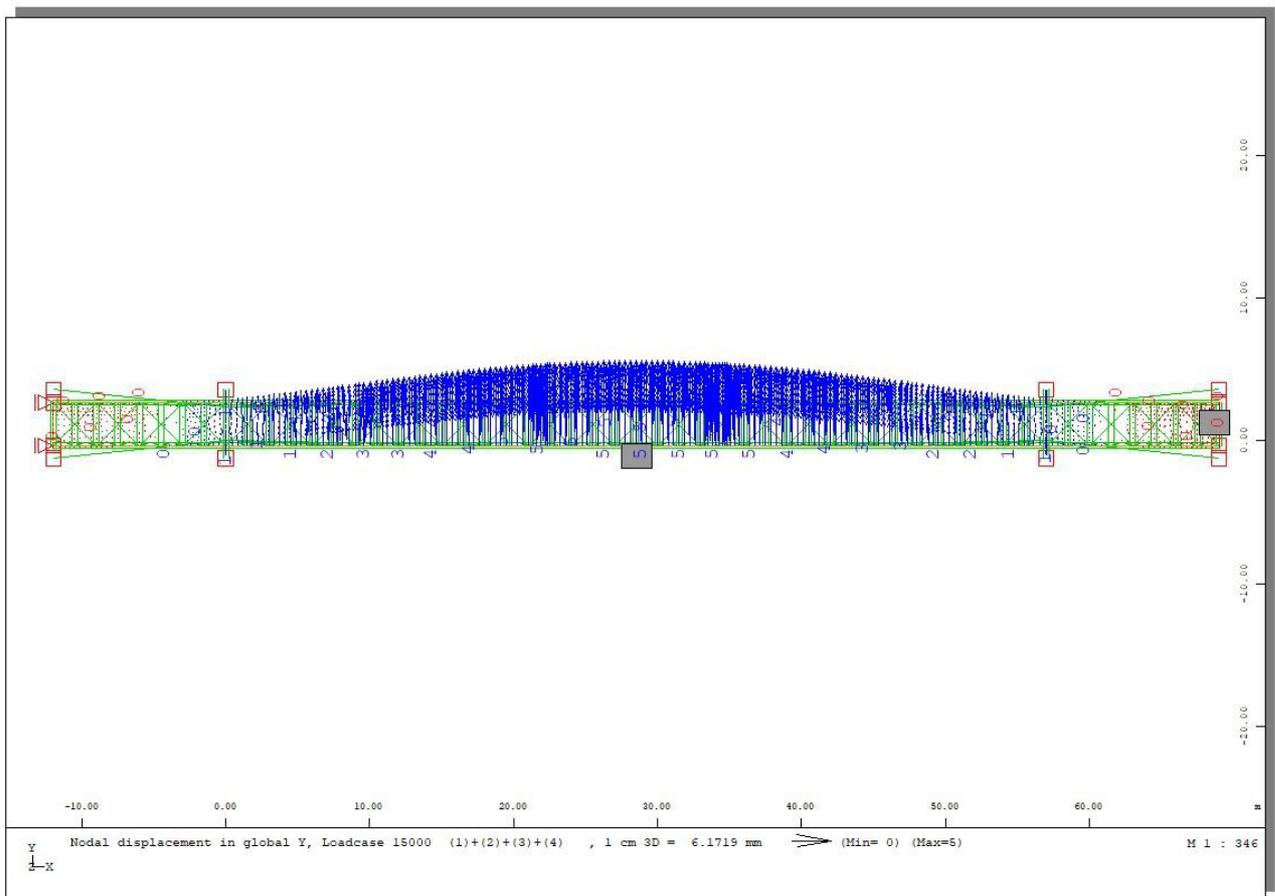
Come si può notare dal grafico riportato, il massimo spostamento orizzontale generato dal sisma vale $d_x=10$ mm. Si ritiene accettabile tale valore.



Spostamento orizzontale generato dal sisma

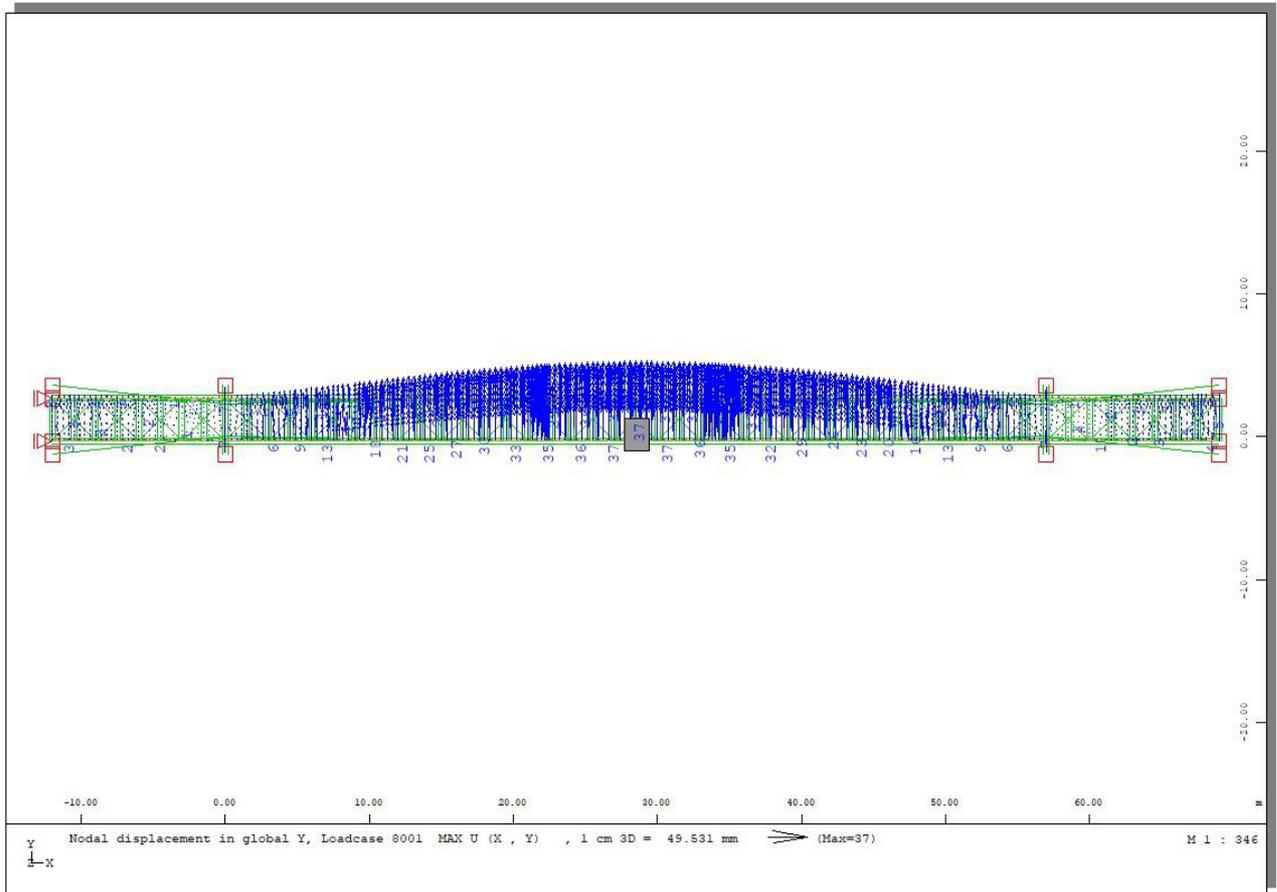
9.10.5 MASSIMO SPOSTAMENTO ORIZZONTALE DY

Come si può notare dal grafico riportato, il massimo spostamento orizzontale dovuto al vento vale $d_y=5$ mm. Si ritiene accettabile tale valore.



Spostamento orizzontale generato dal vento

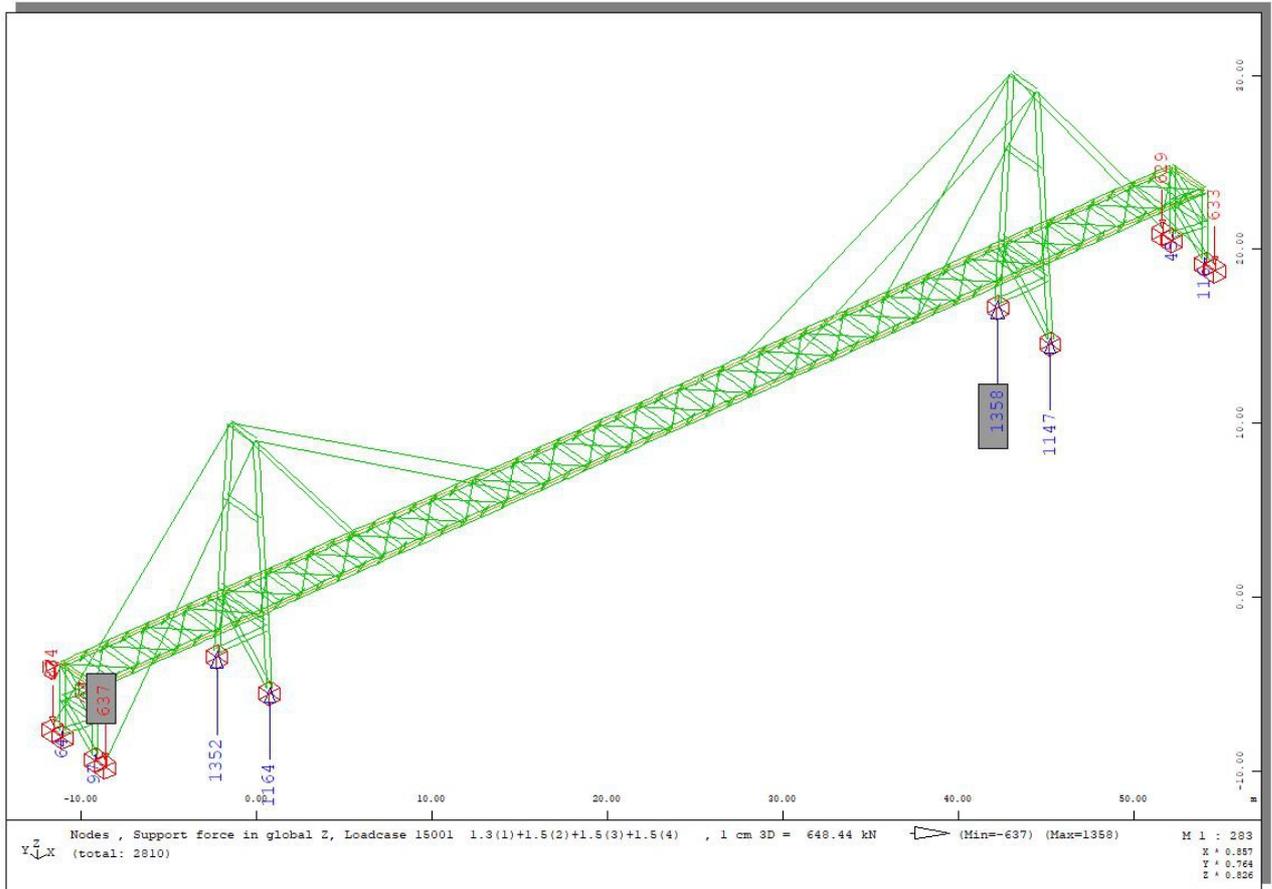
Come si può notare dal grafico riportato, il massimo spostamento orizzontale generato dal sisma vale $d_x=37$ mm. Si ritiene accettabile tale valore.



Spostamento orizzontale generato dal sisma

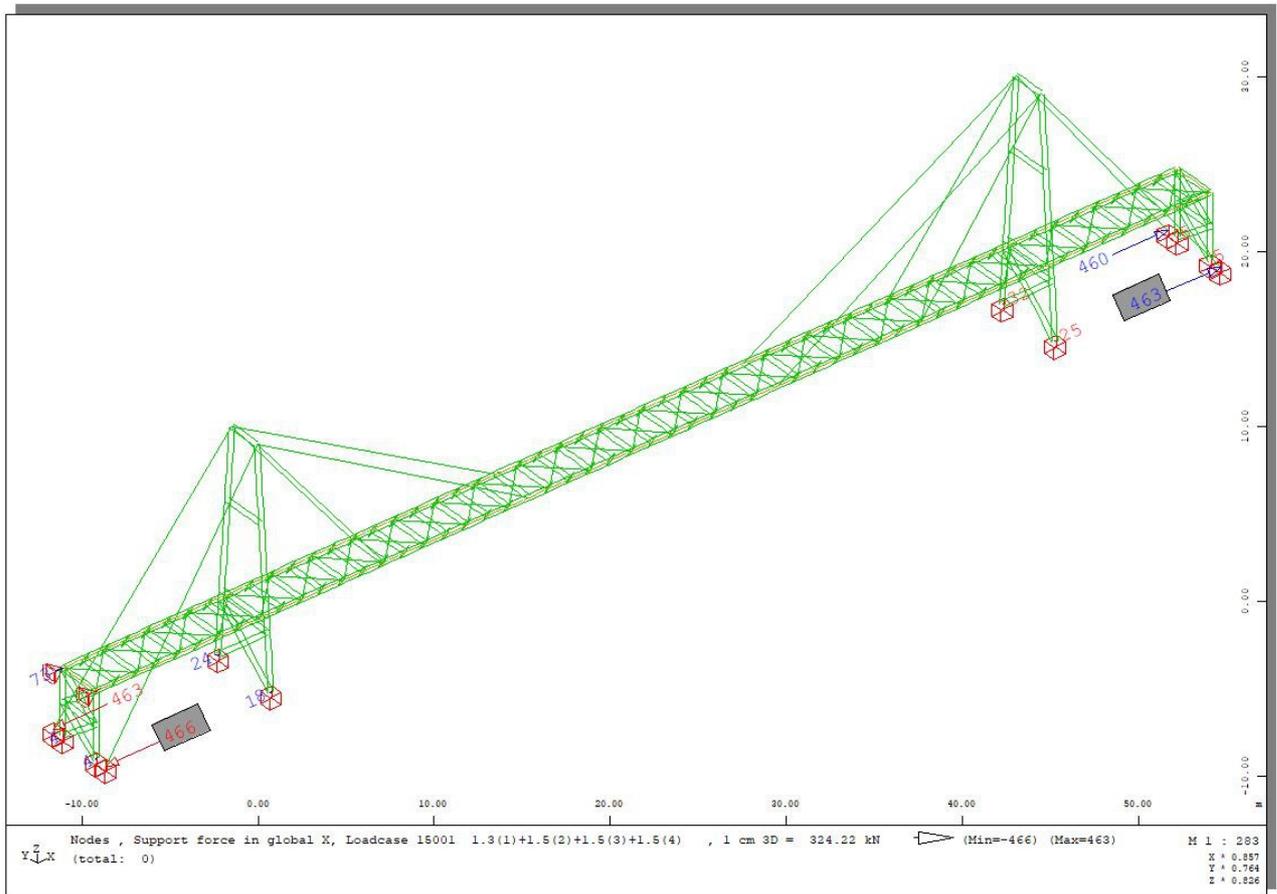
9.10.6 REAZIONI VINCOLARI AGLI APPOGGI

Di seguito si riportano i valori allo SLU della reazione vincolari in ZZ alla base degli appoggi:



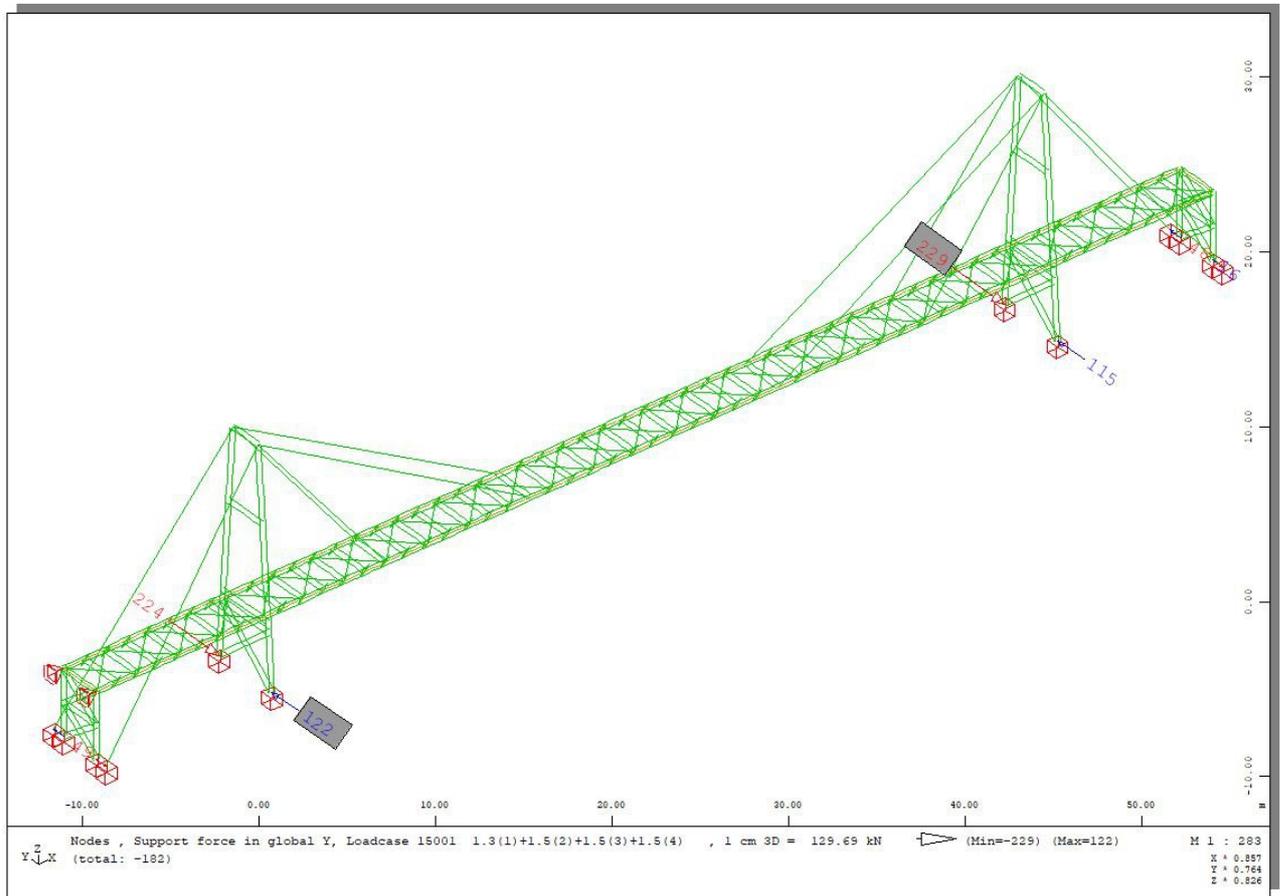
Reazione verticale asse ZZ [KN] – combinazione fondamentale carichi statici SLU

Di seguito si riportano i valori allo SLU della reazione vincolari in XX alla base degli appoggi:



Reazione verticale asse XX [KN] – combinazione fondamentale carichi statici SLU

Di seguito si riportano i valori allo SLU della reazione vincolari in YY alla base degli appoggi:



Reazione verticale asse YY [KN] – combinazione fondamentale carichi statici SLU

