



Città metropolitana
di Venezia

**Servizio tecnico per la valutazione preliminare ai sensi del capitolo 5 delle “Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti” di alcuni manufatti di competenza della Città’ Metropolitana di Venezia e redazione dell’eventuale progetto di fattibilità tecnica ed economica.
Area Nord. Codice CIG 9041138719**

VERIFICHE LIVELLO 4 – PONTE 05 – TORRE DI MOSTO – SP57 –
ID opera 60

Numero Ponte	05
Frazione/Località	Torre di Mosto
SP Numero	57
ID Opera	60
Longitudine	12,693
Latitudine	45,619

Codice Documento: 21173P2115A

	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO
A	MAGGIO 2025	EMISSIONE	SGN	SC	SC
B					
C					
D					
E					

INDICE

INDICE	1
1 PREMESSA	6
2 VALUTAZIONE ACCURATA DELL'OPERA DI LIVELLO 4	7
3 DESCRIZIONE DELL'OPERA.....	9
4 NORMATIVA DI RIFERIMENTO	14
5 DOCUMENTAZIONE PROGETTUALE A SUPPORTO	15
6 SINTESI DELLE ISPEZIONI PRECEDENTI.....	18
6.1 Spalle	19
6.2 Giunti	20
6.3 Travi principali su Impalcato.....	21
6.4 Soletta	22
6.5 Pavimentazione e parapetti.....	23
7 CAMPAGNA DELLE INDAGINI IN SITU	23
7.1 Indagini geometriche.....	25
7.2 Indagini sui materiali	33
7.3 Caratterizzazione sismica del sito	36
7.4 Livello di conoscenza assunto	37
8 MATERIALI	38
8.1 Informazioni da fonti storiche	38
8.2 Risultati delle indagini in situ	38
8.2.1 Calcestruzzo.....	38
8.2.2 Acciaio d'armatura	40
8.2.3 Acciaio da precompressione.....	41
9 ANALISI DEI CARICHI.....	42
9.1 Pesi permanenti strutturali – G1.....	42
9.2 Pesi permanenti non strutturali – G2 Barriere Laterali.....	42
9.3 Pesi permanenti non strutturali – G2 Pavimentazione stradale	44
9.4 Precompressione a cavi post-tesi	46
9.5 Azioni Variabili da vento e termiche	47
9.5.1.1 Azione variabile del vento – q5	47

9.5.1.2	Azioni derivanti da effetti di dilatazione e contrazione termica	48
9.6	Azioni Variabili da Traffico	49
9.6.1	Carichi per Verifica di Adeguatezza - NTC2018.....	49
9.6.1.1	Carichi Mobili.....	49
9.6.1.2	Azione di frenamento – q3	53
9.6.2	Carichi per Verifica di Operatività ($t_{ref}=30$ anni) - NTC2018.....	54
9.6.3	Carichi per Verifica di Transitabilità ($t_{ref}=5$ anni) - NTC2018.....	55
9.6.4	Carichi per Verifica di Transitabilità ($t_{ref}=5$ anni) – CdS – Mezzi pesanti (44t) ..	56
9.6.4.1	Carichi Mobili.....	56
9.6.5	Carichi per Verifica di Transitabilità ($t_{ref}=5$ anni) – CdS – Mezzi intermedi(26t)	59
9.6.5.1	Carichi Mobili.....	59
9.6.5.2	Azione di frenamento – q3	61
9.6.6	Carichi per Verifica di Transitabilità ($t_{ref}=5$ anni) – CdS – Mezzi leggeri (7.5t) .	62
9.6.6.1	Carichi Mobili.....	62
9.7	Azione Sismica	65
9.7.1	Vita nominale di progetto	65
9.7.2	Classe d'uso	65
9.7.3	Periodo di riferimento dell'azione sismica	65
9.7.4	Fattore di Comportamento	66
9.7.5	Spettri di risposta elastici e di Progetto	66
10	COMBINAZIONI DI CARICO.....	69
10.1	Coefficienti sui carichi da NTC18	69
10.2	Coefficienti sui carichi e materiali secondo Linee Guida.....	71
10.3	Nomenclatura dei carichi e le combinazioni per le Normative in esame	72
10.3.1	Combinazioni per Verifica di Adeguatezza - NTC2018.....	72
10.3.2	Combinazioni per Verifica di Operatività ($t_{ref}=30$ anni) - NTC2018	73
10.3.3	Combinazioni per Verifica di Transitabilità ($t_{ref}=5$ anni) - NTC2018.....	74
10.3.4	Combinazioni per Verifica di Transitabilità ($t_{ref}=5$ anni) – CdS – Mezzi pesanti (44t) 75	
10.3.5	Combinazioni per Verifica di Transitabilità ($t_{ref}=5$ anni) – CdS – Mezzi intermedi(26t) 76	
10.3.6	Combinazioni per Verifica di Transitabilità ($t_{ref}=5$ anni) – CdS – Mezzi leggeri (7.5t) 77	
11	MODELLAZIONE E CRITERI DI VERIFICA.....	78

11.1	Tipo di analisi svolta.....	78
11.2	Modello Tridimensionale mediante FEM	78
12	SOLLECITAZIONI.....	81
12.1	Sollecitazioni per Pesi Propri, Permanenti Portati e Precompressione	81
12.1.1	Peso Proprio Modellato.....	81
12.1.2	Peso permanente portato - pavimentazione.....	82
12.1.3	Precompressione.....	84
12.2	Sollecitazioni secondo NTC2018	85
12.2.1	Schema traffico Adeguatezza/Operatività NTC2018 - T1	85
12.2.2	Schema traffico Adeguatezza/Operatività NTC2018 - T2.....	86
12.2.3	Schema traffico Adeguatezza/Operatività NTC2018 – T3	87
12.3	Sollecitazioni secondo CdS - Mezzi pesanti 44 ton	88
12.3.1	Schema traffico Adeguatezza/Operatività CdS MP -T1	88
12.3.2	Schema traffico Adeguatezza/Operatività CdS MP -T2.....	89
12.3.3	Schema traffico Adeguatezza/Operatività CdS MP -T3.....	90
12.4	Sollecitazioni secondo CdS - Mezzi intermedi 26 ton	91
12.4.1	Schema traffico Adeguatezza/Operatività CdS MI -T1	91
12.4.2	Schema traffico Adeguatezza/Operatività CdS MI -T3	93
12.5	Sollecitazioni secondo CdS - Mezzi leggeri 7.5 ton	94
12.5.1	Schema traffico Adeguatezza/Operatività CdS ML -T1	94
12.5.2	Schema traffico Adeguatezza/Operatività CdS ML -T2	95
12.5.3	Schema traffico Adeguatezza/Operatività CdS ML -T3	96
13	VERIFICHE DI LIVELLO 4 – DEFINIZIONE DELLE SEZIONI DI VERIFICA, GEOMETRIA ED ARMATURE PRESENTI	97
13.1	Individuazione degli Elementi.....	97
14	VERIFICHE DI ADEGUATEZZA	99
14.1	Sollecitazioni di Calcolo	100
14.2	Resistenze delle Sezioni in Esame	104
14.2.1	Calcolo dei Momenti Resistenti.....	104
14.2.1.1	Impalcato	104
14.2.1.2	Sottostrutture	107
14.2.2	Calcolo dei Tagli Resistenti.....	110
14.2.2.1	Impalcato	110
14.2.2.2	Sottostrutture	115

14.3	Verifiche di Resistenza - Adeguatezza	117
15	VERIFICHE DI OPERATIVITA'	119
15.1	Sollecitazioni di Calcolo	120
15.2	Resistenze delle Sezioni in Esame	122
15.2.1	Calcolo dei Momenti Resistenti	122
15.2.1.1	Impalcato	122
15.2.2	Calcolo dei Tagli Resistenti	125
15.2.2.1	Impalcato	125
15.3	Verifiche di Resistenza - Operatività	130
16	VERIFICHE DI TRANSITABILITA' CdS – MEZZI PESANTI (44t)	131
16.1	Sollecitazioni di Calcolo	132
16.2	Resistenze delle Sezioni in Esame	134
16.3	Verifiche di Resistenza – Transitabilità da CdS – Mezzi pesanti (44t)	135
17	VERIFICHE DI TRANSITABILITA' CdS – MEZZI INTERMEDI (26t)	136
17.1	Sollecitazioni di Calcolo	137
17.2	Resistenze delle Sezioni in Esame	139
17.3	Verifiche di Resistenza – Transitabilità da CdS – Mezzi intermedi (26t)	140
18	CONCLUSIONI	140
18.1	Risultato della Verifica di Livello 4	140
	GIUDIZIO MOTIVATO E ACCETTABILITÀ DEI RISULTATI	144
	Confronto Reazioni Globali dovute a carico da traffico – NTC2018	145
	Percentuale di Massa Eccitata in condizioni dinamiche	150
	SOFTWARE DI CALCOLO, CONVENZIONI E DEFINIZIONI	151
	Metodo di calcolo	151
	Descrizione del software	151
	Tipi di analisi	152
	L'analisi statica lineare	152
	L'analisi dinamica	153
	La risposta allo spettro e le tecniche di combinazione	154
	L'analisi non lineare in controllo di forze	155
	L'analisi non lineare in controllo di spostamento (Path-Following)	156
	Convenzioni di segno	157
	Sistema di riferimento	157

Carichi 157

Carichi distribuiti..... 157

Spostamenti e rotazioni..... 157

Reazioni vincolari 157

Elementi Beam..... 158

Elementi Shell e plate..... 158

Tensioni e deformazioni (stress/strain)..... 158

1 PREMESSA

Oggetto della presente relazione è la **valutazione accurata dell'opera, di Livello 4**, condotta secondo quanto riportato nelle "Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti" pubblicate il 01/07/2022 dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.

L'opera oggetto di valutazione è il ponte in Provincia di Venezia avente i seguenti identificativi:

Frazione/Località	Torre di Mosto
SP Numero	57
SP Denominazione	PONTE AL km 2+320 DELLA S.P. 57
ID Opera	60
Denominazione Ponte (Attraversamento di)	Canale Parada
Anno di Costruzione	1979
Longitudine	12,639
Latitudine	45,619

Conformemente a quanto prescritto dalle "LINEE GUIDA PER LA CLASSIFICAZIONE E GESTIONE DEL RISCHIO, LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA ED IL MONITORAGGIO DEI PONTI ESISTENTI" a seguito della valutazione preliminare dell'opera di Livello 3 è emersa la necessità di procedere ad approfondimenti mediante l'esecuzione di verifiche accurate di Livello 4 di cui al presente elaborato.

Il fine ultimo delle attuali analisi è la verifica del carico ammissibile per il transito sul ponte.

2 VALUTAZIONE ACCURATA DELL'OPERA DI LIVELLO 4

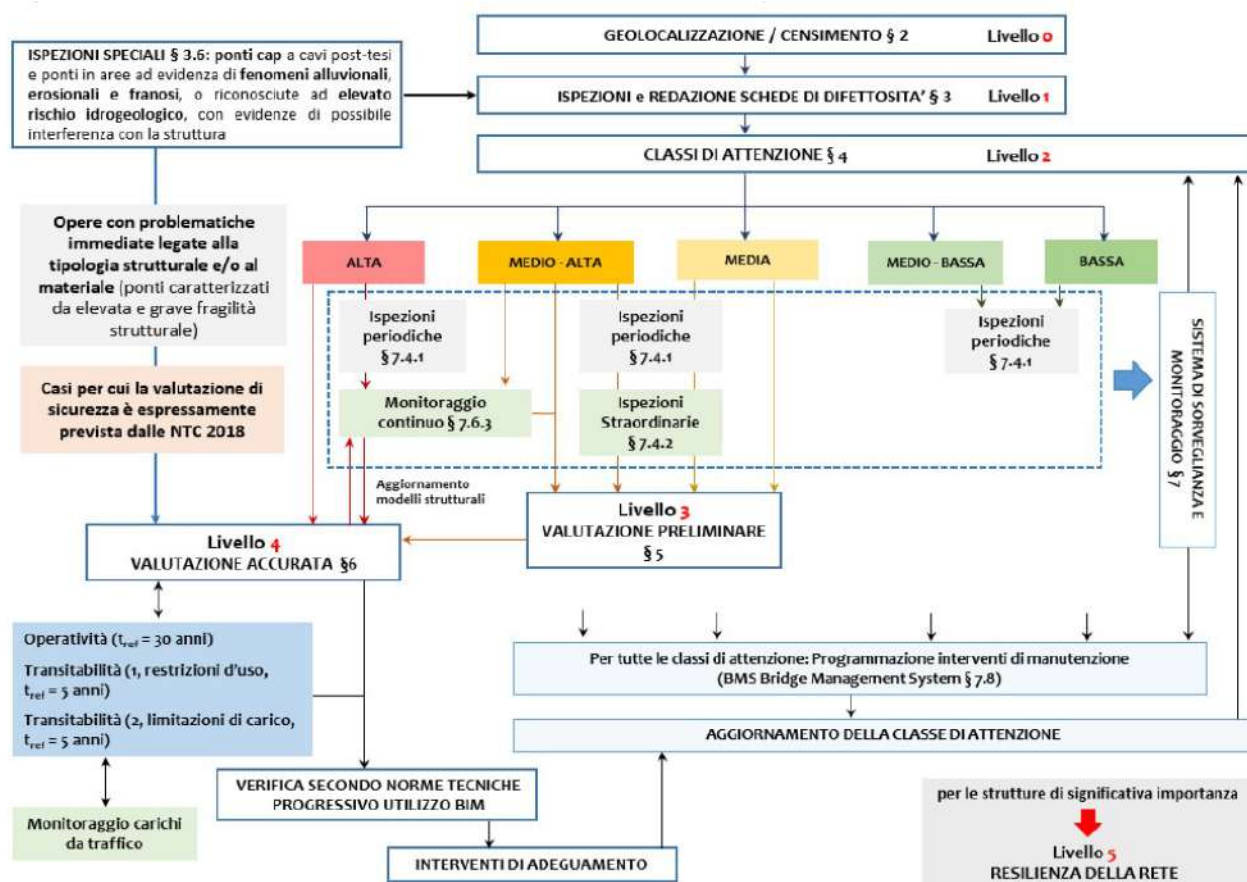


FIGURA 2-1: QUADRO ESPLICATIVO DELLA VALUTAZIONE DELL'OPERA SECONDO LE ATTUALI LINEE GUIDA PONTI

La valutazione di Livello 4 si è resa necessaria a seguito dei risultati ottenuti dalle verifiche preliminari di Livello 3.

Le attuali Linee Guida forniscono le seguenti definizioni in termini di verifica dei manufatti esistenti:

- 1) **ADEGUATO**, un ponte esistente per cui siano soddisfatte le verifiche eseguite secondo le Norme Tecniche utilizzando i carichi e i fattori parziali in esse previsti. La sola variazione in diminuzione ammessa è quella del fattore parziale relativo ai carichi permanenti, qualora se ne verifichino le ipotesi come previsto nel § 8.5.5 delle Norme Tecniche.
- 2) **OPERATIVO**, un ponte per cui siano soddisfatte le verifiche eseguite utilizzando i principi esposti nelle Norme Tecniche ma facendo riferimento nella valutazione dei fattori parziali relativi ai carichi e ai materiali ad un tempo di riferimento ridotto. Il valore del tempo di riferimento, t_{ref} , convenzionalmente assunto a livello indicativo nelle presenti Linee Guida è pari a 30 anni. Nel calcolo del fattore parziale relativo ai carichi permanenti è ovviamente ancora possibile prevedere la diminuzione come previsto nel § 8.5.5 delle Norme Tecniche, qualora se ne verifichino le ipotesi. Occorre, quindi, segnalare il ponte e gli esiti delle verifiche in banche dati istituzionali regionali e nazionali.
- 3) **TRANSITABILE**, un ponte per cui siano soddisfatte le verifiche eseguite su un orizzonte temporale ridotto, entro il quale si progettino e realizzino lavori di adeguamento o operatività, adottando i provvedimenti: (a) "limitazione dei carichi consentiti" o (b) "restrizione d'uso del ponte". La programmazione temporale dettagliata (crono programma) dei lavori occorre sia nota e trasferita a banche dati istituzionali regionali e nazionali. Nella valutazione dei fattori parziali relativi ai carichi e ai materiali si adotta quindi un tempo di riferimento ridotto che nelle presenti Linee Guida è assunto non maggiore di $t_{ref} = 5$ anni. Nel calcolo del fattore parziale relativo ai carichi permanenti è ovviamente ancora possibile prevedere la diminuzione come previsto nel § 8.5.5 delle Norme Tecniche, qualora se ne verifichino le ipotesi.

Per tutti i livelli di analisi, le valutazioni sono condotte coerentemente con l'approccio agli stati limite con l'uso dei coefficienti parziali previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni. Il livello di sicurezza

è quantificato, assumendo per ogni livello di analisi il tempo di riferimento e i carichi da traffico previsti per esso, attraverso i parametri di verifica ζ_E e ζ_V ,i definiti nel capitolo 8.3 delle Norme Tecniche.

La valutazione di livello 4 si è concentrata sulle travi principali d'impalcato, sulla soletta d'impalcato e sulle spalle componenti le sottostrutture.

3 DESCRIZIONE DELL'OPERA

Di seguito si riporta un estratto aereo fotografico che evidenzia l'ubicazione dell'opera nel contesto territoriale nel quale è inserita:

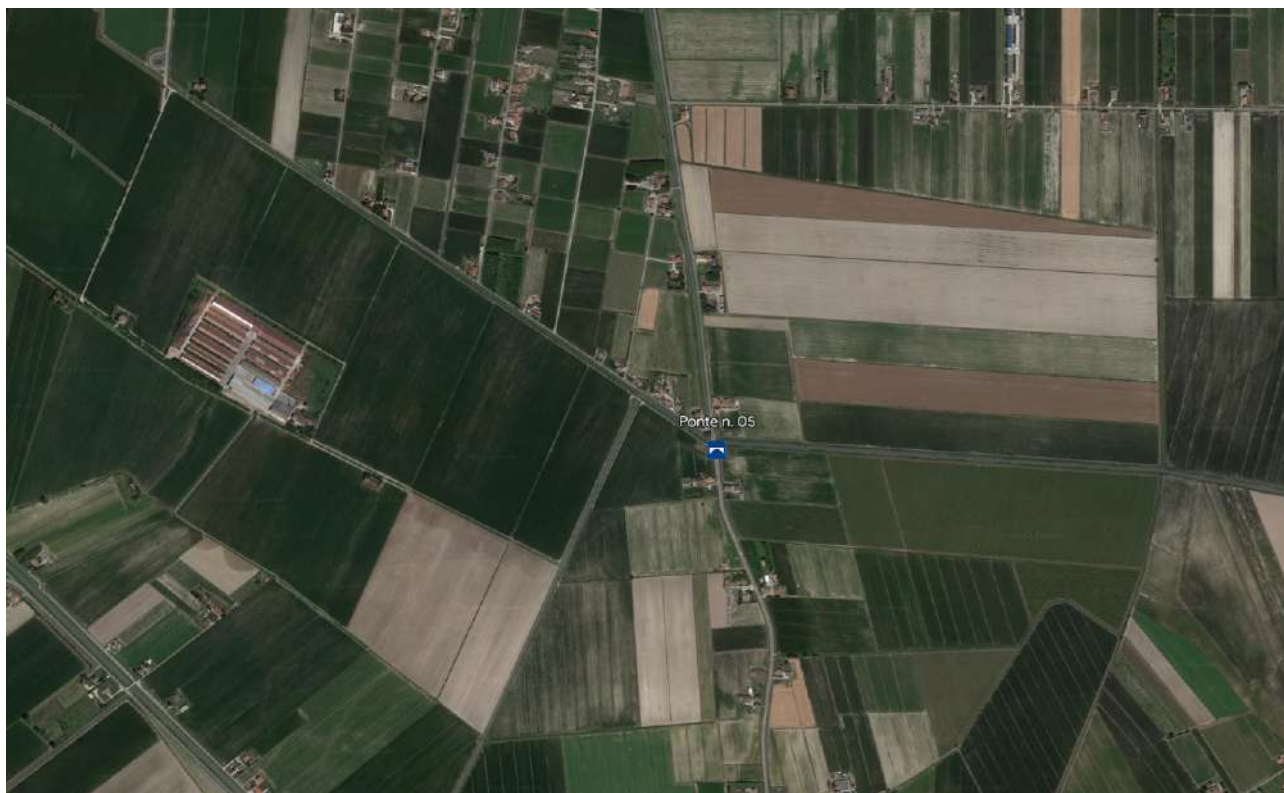


FIGURA 3-1: ORTOFOTO DI INQUADRAMENTO



CLIENTE: CITTA' METROPOLITANA
DI VENEZIA

PONTI ESISTENTI – AREA NORD CIG 9041138719
Verifiche livello 4 – Ponte 05 – Torre di Mosto
– SP57 – ID Opera 60

ELAB.: 21173P2115A

Rev. A - Pag. 9 di 159

FIGURA 3-2: VISTA PROSPETTO MANUFATTO



FIGURA 3-3: PARAPETTI MANUFATTO



FIGURA 3-4: VISTA INTRADOSSO IMPALCATO



FIGURA 3-5: VISTA PIANO CARRABILE DEL MANUFATTO

Il ponte in esame presenta dunque le seguenti caratteristiche tecniche e dimensionali:

Tipologia costruttiva Impalcato	Calcestruzzo armato precompresso
Tipologia costruttiva pile e spalle	Calcestruzzo armato
Numero Campate	1
Luce campate (1, 2, 3, ecc.) [m]	18.80
Schema statico impalcato	Semplice Appoggio
Larghezza complessiva impalcato [m]	~11.50
Larghezza carrabile [m]	~10.80

L'opera si compone di n. 1 campata in semplice appoggio su spalle in calcestruzzo armato, sulle quali poggiano le travi principali costituite da elementi prefabbricati con forma a "T" e soprastante soletta in c.a. dello spessore di 20 cm, gettata in opera. Le travi principali, in numero pari ad 8, presentano un'altezza pari a circa 1 metro e sono disposte ad interasse costante pari a circa 1,4 metri.

Le spalle, formate da travi contro terra, poggiano su pali di fondazione, da come si evince dai progetti dell'epoca.

Sez. A-A

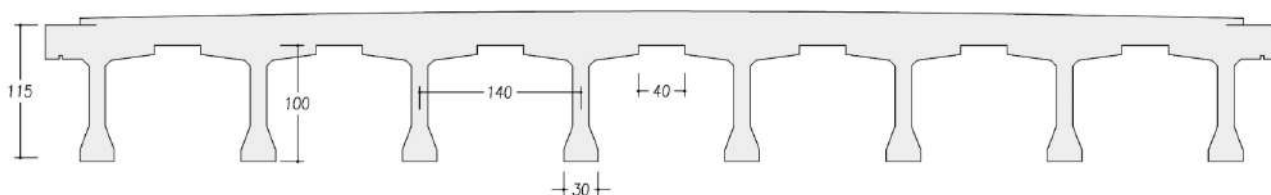


FIGURA 3-6: SEZIONE TRASVERSALE DELL'IMPALCATO

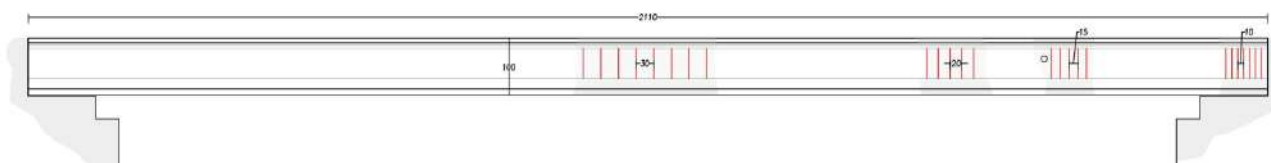


FIGURA 3-7: SEZIONE LONGITUDINALE DELL'IMPALCATO

4 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Si elencano le Normative di riferimento per l'analisi dei carichi e le verifiche delle singole componenti strutturali:

- D.M. del 17-01-2018 "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni" [NTC18];
- CIRCOLARE n.7 del 21-01-2019 "Istruzioni per l'applicazione dello "Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»" di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018" [CIR7];
- UNI EN1991-2 "Azioni sulle strutture: carichi da traffico su ponti" [EC1-2];
- UNI EN1991-1-5 "Azioni sulle strutture: azioni in generale-azioni termiche" [EC1-1-5];
- UNI EN1992-1-1 "Progettazione delle strutture in calcestruzzo: regole generali e regole per gli edifici" [EC2-1];
- UNI EN1993-1-1 "Progettazione delle strutture in acciaio: regole generali e regole per gli edifici" [EC3-1];
- UNI EN1993-1-5 "Progettazione delle strutture in acciaio: elementi strutturali a lastra" [EC3-1-5];
- UNI EN1993-1-8 "Progettazione delle strutture in acciaio: progettazione dei collegamenti" [EC3-1-8];
- UNI EN1993-1-9 "Progettazione delle strutture in acciaio: fatica" [EC3-1-9];
- UNI EN1993-2 "Progettazione delle strutture in acciaio: Ponti di acciaio" [EC3-1-8];
- UNI EN1994-1-1 "Progettazione delle strutture in composte acciaio-calcestruzzo: progettazione dei collegamenti" [EC4-1-1];
- D.M. del 05/11/2001 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade".

5 DOCUMENTAZIONE PROGETTUALE A SUPPORTO

Per il ponte oggetto di analisi si sono reperiti elaborati grafici storici risalenti all'epoca della costruzione, ma si sono rivelati poco attendibili in quanto, ad eccezione della luce del manufatto, la sua larghezza e la forma delle spalle, che sono rappresentati correttamente, sono invece errate la rappresentazione delle travi d'impalcato, il numero di travi, la loro altezza oltre alla rappresentazione di traversi che invece non sono risultati presenti da sopralluogo in situ.

Si è fatto dunque riferimento ai documenti di ispezione redatti in epoca recente:

- "Ispezione visiva primaria – PONTE AL km 2+320 DELLA S.P. 57 – Città Metropolitana di Venezia" redatto dalla ditta 4 EMME Service S.p.a. nel giugno 2019;
- "Relazione di ispezione" redatto dalla ditta Franchetti-Bridge diagnostics and predictive maintenance nel Novembre 2022.
- "Indagini diagnostiche – Ponte Torre di Mosto sulla S.P.57" redatto dalla ditta Geoconsult nell'agosto 2024

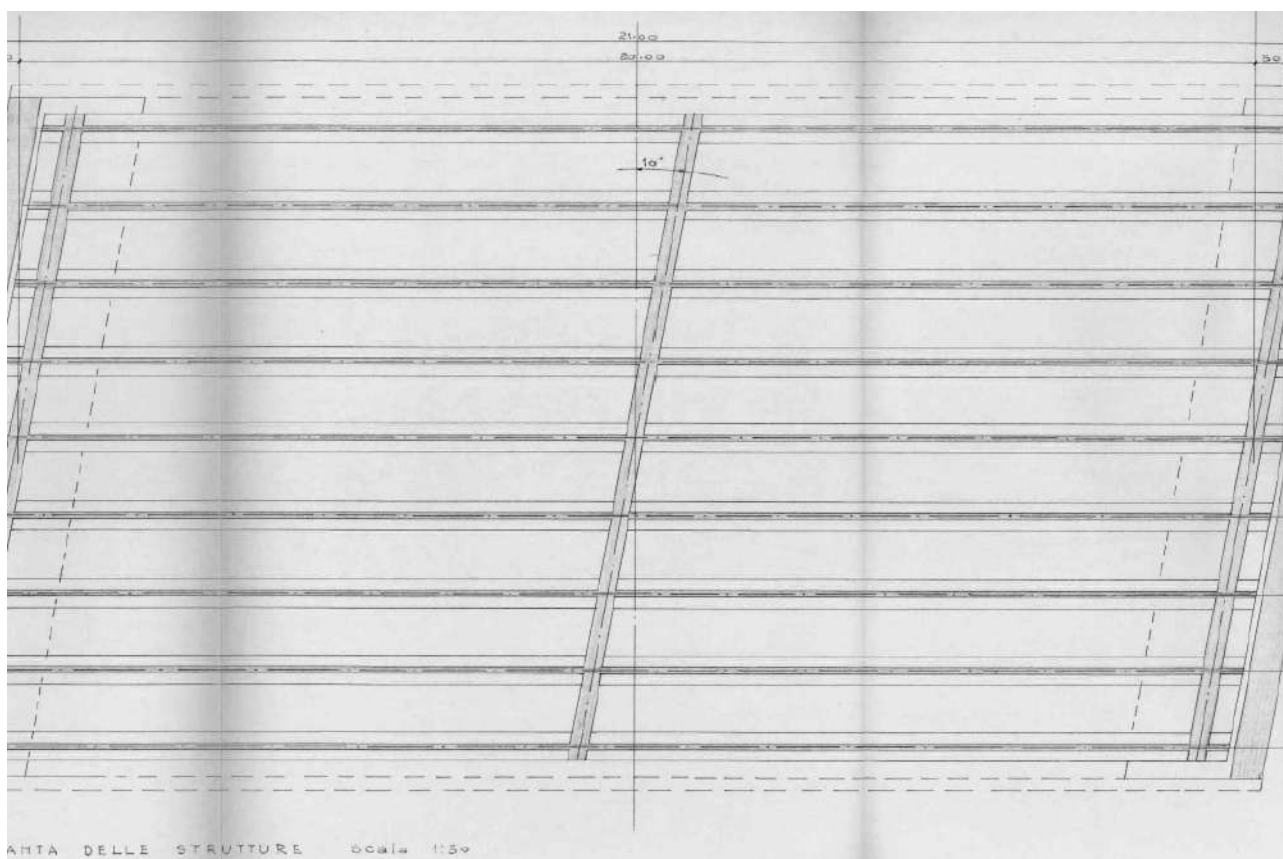


FIGURA 5-1: IMPALCATO ERRATO PRESENTE NEI PROGETTI DELL'EPOCA

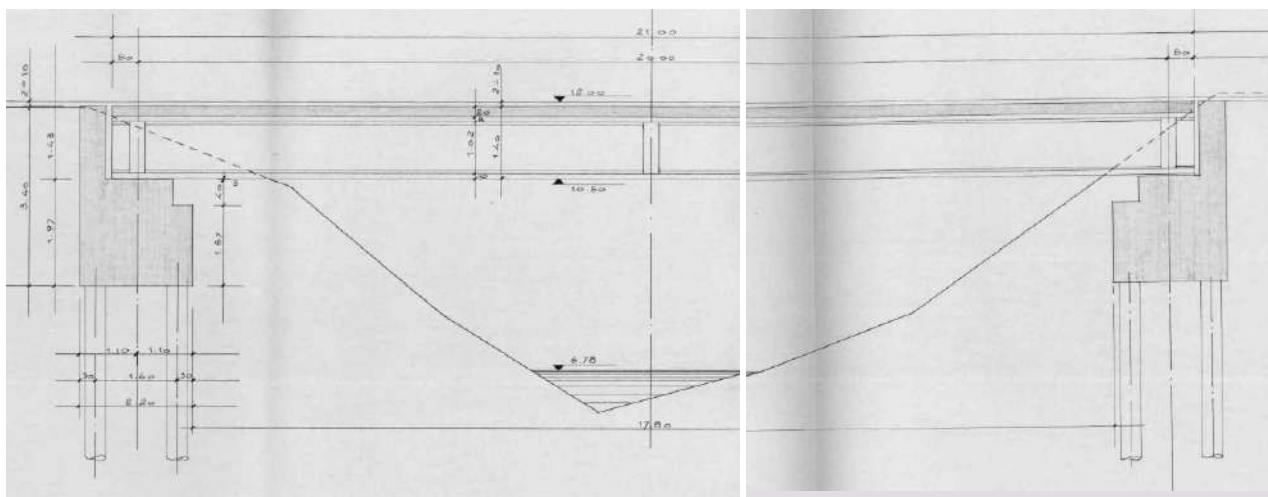
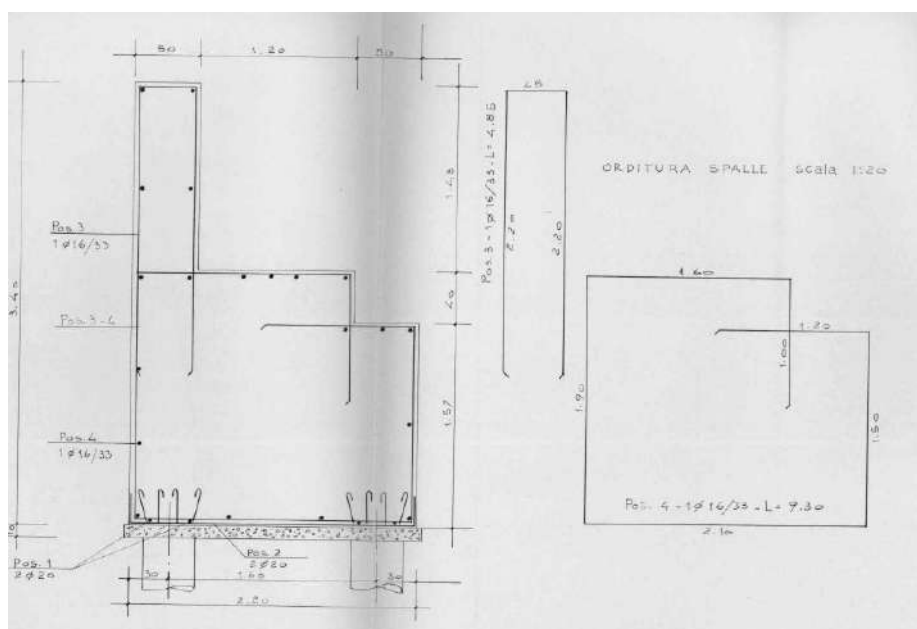


FIGURA 5-2: PROSPETTO LONGITUDINALE PLAUSIBILMENTE CORRETTO PRESENTE NEI PROGETTI DELL'EPOCA
(AD ECCEZIONE DEI TRAVERSI)



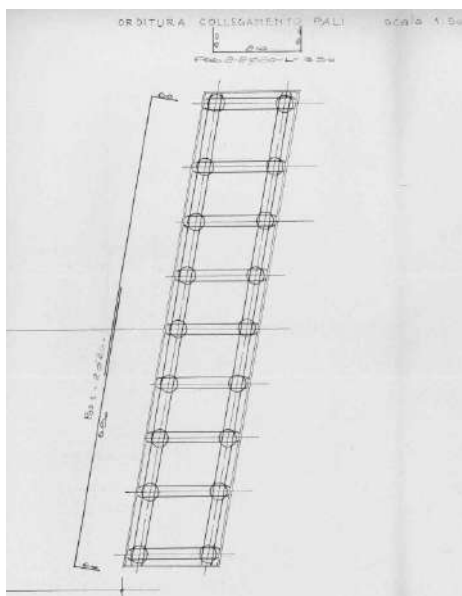


FIGURA 5-3: SPALLE PLAUSIBILMENTE CORRETTE PRESENTE NEI PROGETTI DELL'EPOCA

6 SINTESI DELLE ISPEZIONI PRECEDENTI

Dalle verifiche di Livello 1 eseguite nell'anno 2022, e dal report di ispezione effettuato nell'anno 2019, si sono riscontrate molteplici criticità in termini di degrado e cattiva conservazione del manufatto in esame.

Si riportano di seguito i punti più significativi; per la trattazione completa si faccia riferimento alla documentazione di cui sopra.

6.1 Spalle



Foto 1: in ampie zone su entrambe le spalle sono presenti delle macchie di umidità.



Foto 2: in zone estese di entrambe le spalle, specialmente verso i bordi laterali, il calcestruzzo risulta dilavato.



Foto 3: in alcuni punti sulla parte superiore della spalla di valle si riscontra il distacco del copriferro.



Foto 4: ove presente distacco del copriferro sulla spalla di valle, le armature affioranti sono corrose con riduzione della sezione resistente.



Foto 5: sotto tutta la spalla di valle e al centro di quella di monte si rileva lo scalzamento degli elementi per una profondità di circa 50 cm.



Foto 6: entrambi i muri paraghiaia sono umidi e dilavati, inoltre quello di valle in corrispondenza della testata della I trave da sinistra appare leggermente danneggiato.

6.2 Giunti



Foto 7: su entrambi i giunti si rileva la deformazione del tampone.



Foto 8: le scossaline di entrambe i giunti risultano schiacciate.

6.3 Travi principali su Impalcato



Foto 9: in poche zone all'intradosso delle travi sono presenti delle macchie di umidità.



Foto 10: nella zona degli appoggi di tutte le travi è visibile il dilavamento del calcestruzzo per percolamento di acqua dalle sovrastrutture.



Foto 11: in alcuni punti agli appoggi delle travi, sugli spigoli inferiori, il copriferro è in procinto di distacco.



Foto 12: in rari punti sugli spigoli del bulbo inferiore delle travi si notano stiffe scoperte e ossidate.



Foto 13: le piattabande di alcune travi presentano ferri di armatura in vista in corrispondenza delle testate.

6.4 Soletta



Foto 14: tutta la superficie delle facciate laterali della soletta appare dilavata.



Foto 15: sulla facciata laterale destra della soletta in corrispondenza delle estremità di monte e valle si riscontra il distacco del copriferro.



Foto 16: dove è avvenuto il distacco del copriferro sulla facciata laterale destra della soletta, le armature affioranti sono ossidate.



Foto 17: la soletta tra le travi è rivestita da assi in legno.

6.5 Pavimentazione e parapetti



Foto 18: in corrispondenza della spalla di monte è presente un dislivello tra rilevato ed impalcato.

7 CAMPAGNA DELLE INDAGINI IN SITU

Le prove in situ eseguite contestualmente alla presente analisi sono state affidate alla ditta "Geoconsult" e condotte nel mese di agosto 2024.

Le prove eseguite hanno avuto carattere distruttivo (carotaggi e prelievi di barre di armatura) e sono state compendiate da altre di caratteristiche totalmente non distruttive (prove sclerometriche, ultrasoniche, SonReb), oltre ad indagini di carattere geometrico ed endoscopico.

In relazione agli scopi della campagna diagnostica sono state eseguite le seguenti prove al fine di raggiungere un livello di conoscenza LC2.

Di seguito l'elenco delle indagini effettuate:

- Rilievo geometrico dimensionale di impalcato e spalle
- 3 carotaggi Ø94 mm e successive prove di compressione in laboratorio
- 2 prelievi di barre d'armatura e successive prove di trazione in laboratorio (uno su fondino diametro 12mm, uno su fondino diametro 10mm)
- 3 prove di carbonatazione su provini in c.a.
- 3 endoscopie per il rilievo dello spessore di asfalto sulla carreggiata stradale
- Rilievo delle armature di travi, pulvino/spalle, soletta
- Indagine sclerometrica, per la determinazione dell'indice di rimbalzo sulle travi prefabbricate
- Indagine ultrasonica
- Prova SonReb

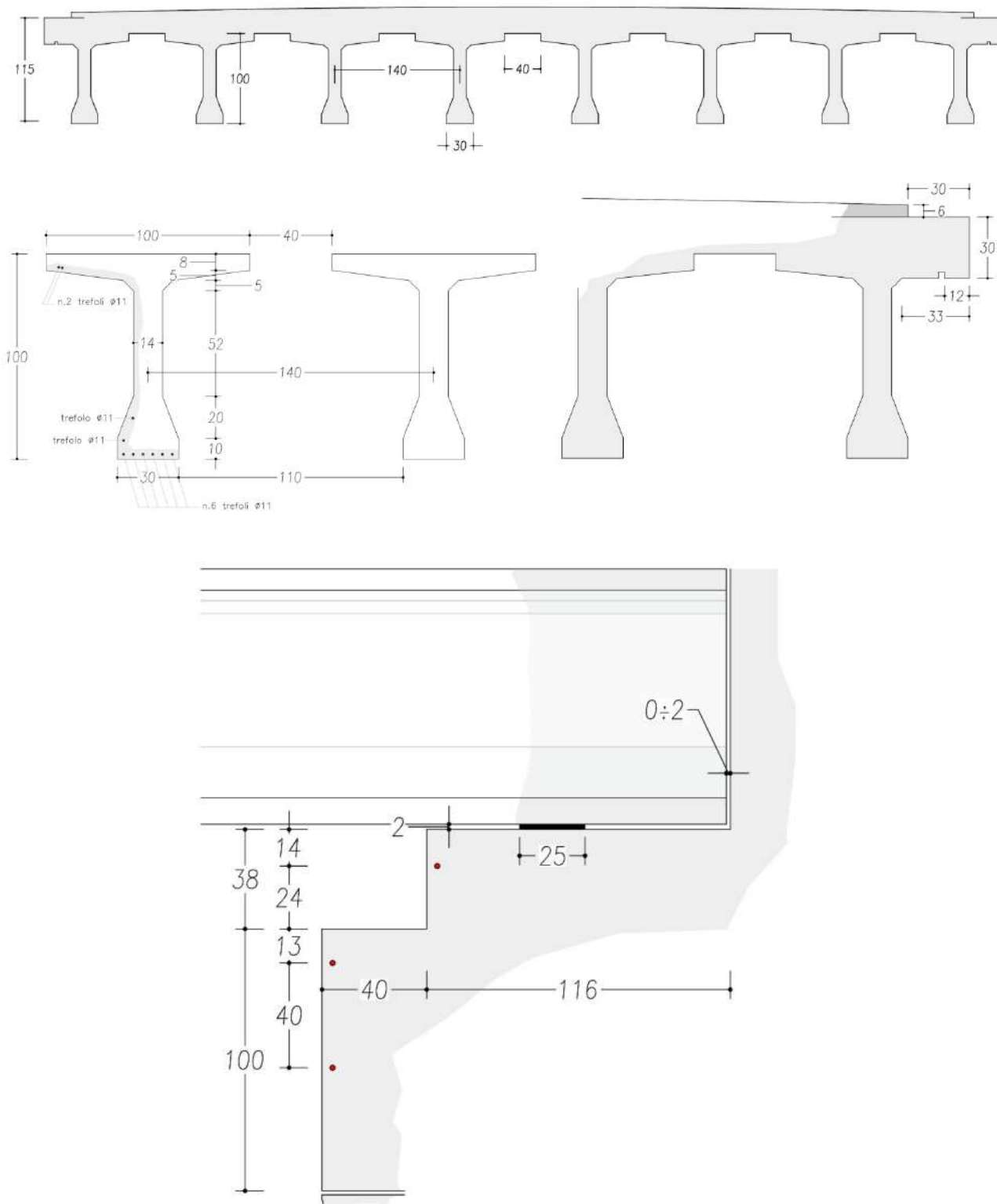
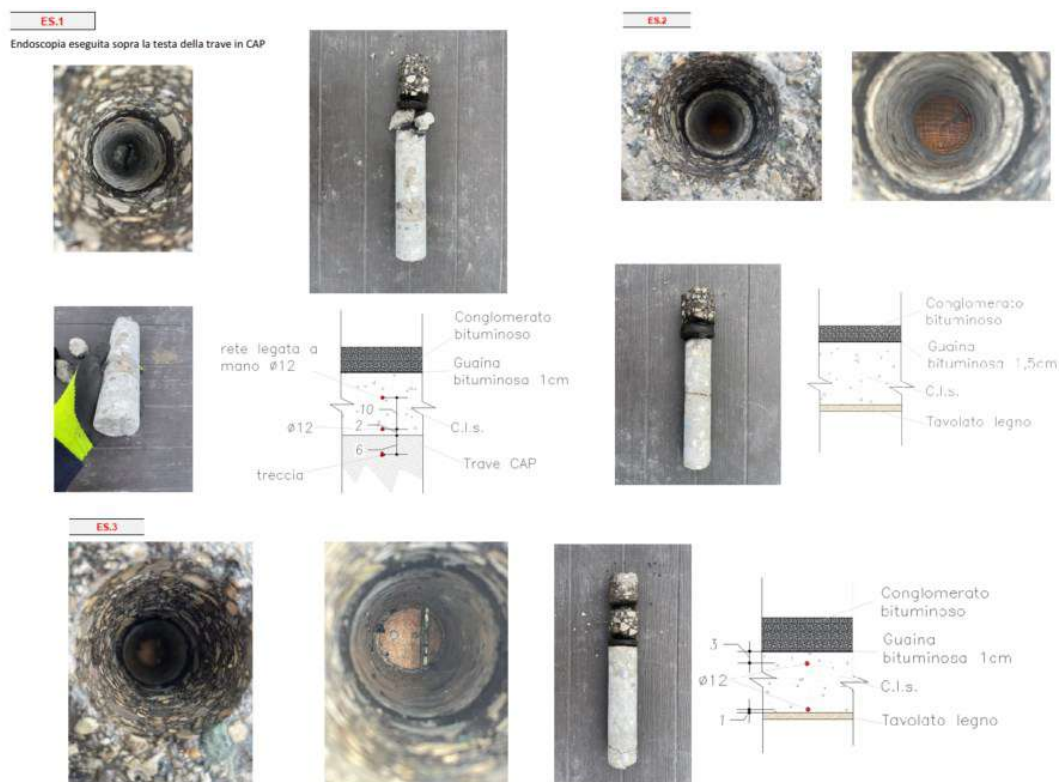


FIGURA 7-2: SEZIONI RILEVATE

Rilievi pacchetti stradali



Elemento: IMPALCATO		
Strato	Descrizione	Spessore [cm]
1	Conglomerato bituminoso	7,0
2	Guaina catramata	1,0
3	Soletta in calcestruzzo armato	20,0
4	Trave in CAP	/
Spessore totale:		28,0 cm

Elemento: IMPALCATO		
Strato	Descrizione	Spessore [cm]
1	Conglomerato bituminoso	5,0
2	Guaina catramata	1,5
3	Soletta in calcestruzzo armato	20,0
4	Tavola in legno	/
Spessore totale:		26,5 cm

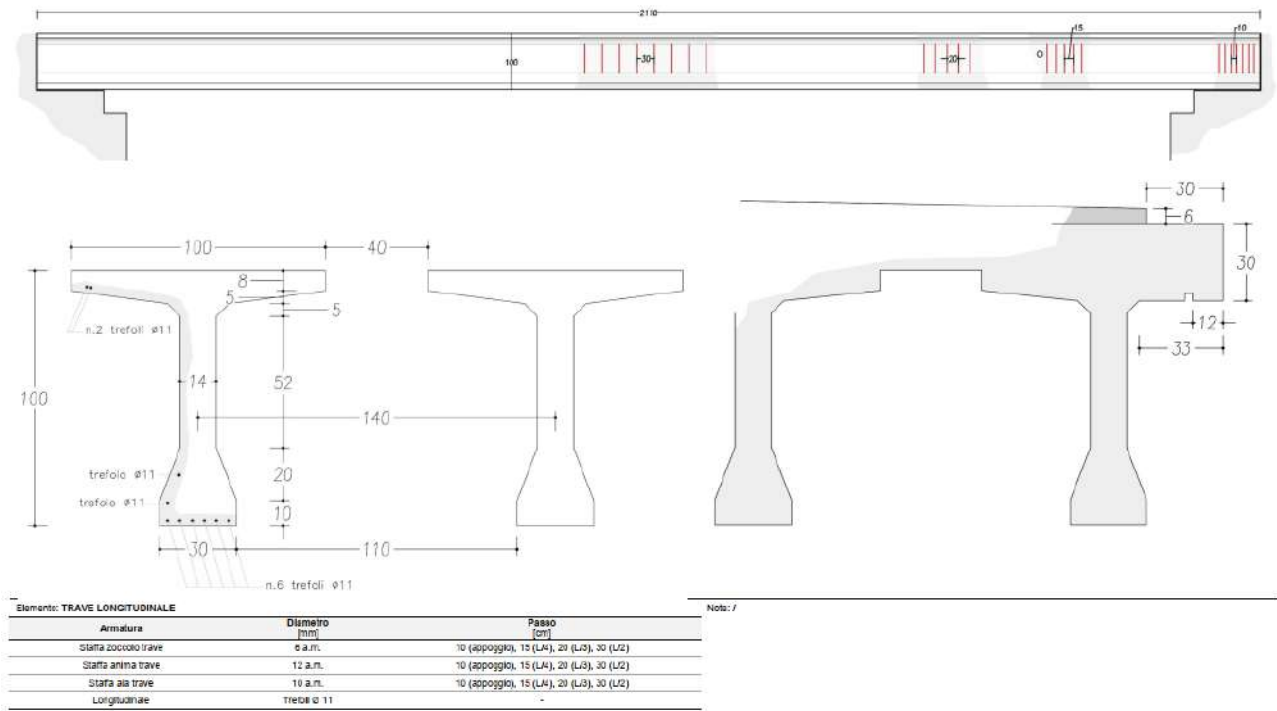
Elemento: IMPALCATO		
Strato	Descrizione	Spessore [cm]
1	Conglomerato bituminoso	9,0
2	Guaina catramata	1,0
3	Soletta in calcestruzzo armato	18,0
4	Tavola in legno	/
Spessore totale:		28,0 cm

Rilievi pacometrici

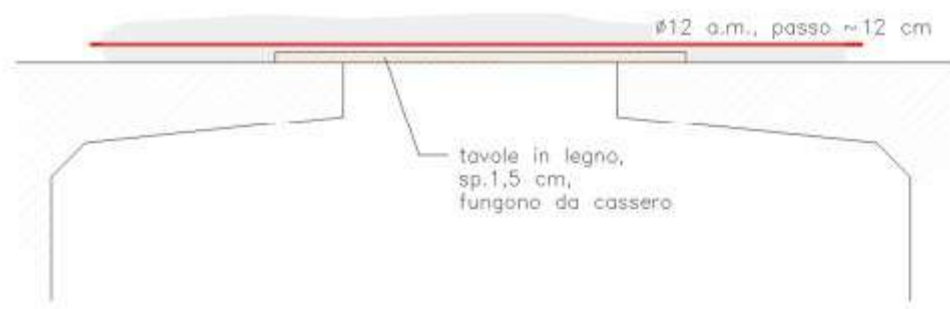
Il presente paragrafo è un riassunto di indagini che si trovano in forma estesa nell'elaborato "L07R04_788_ID60 Ponte Torre di Mosto sulla S.P.57" redatto dalla ditta Geoconsult nell'agosto 2024.

TRAVI IMPALCATO

Di seguito il rilievo delle armature condotto sulle travate precomprese di lunghezza 21,10m.

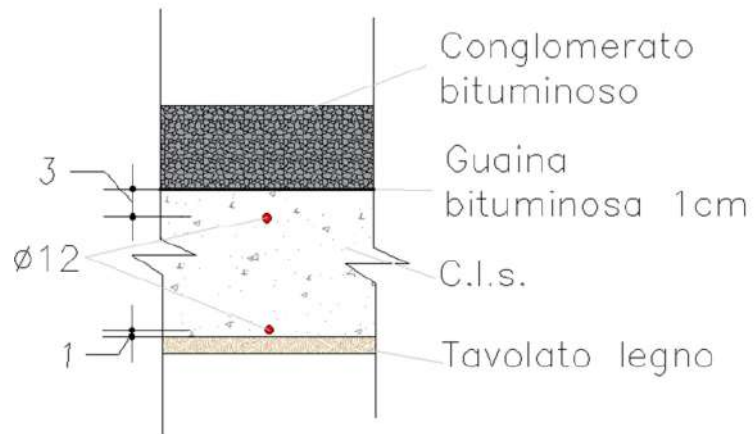


SOLETTE

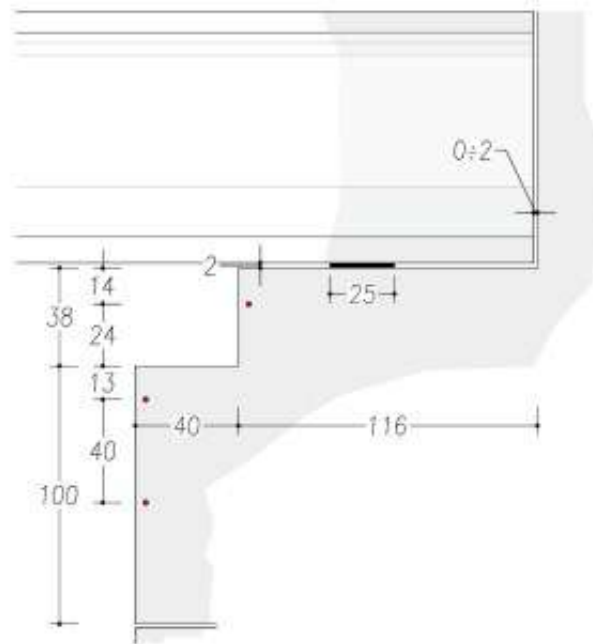


Elemento: SOLETTA			Note: - Ferri longitudinali non rilevabili per questioni di geometria che non permettono di rilevare con lo strumento la loro eventuale presenza.
Armatura	Diametro [mm]	Passo [cm]	
Trasversale	12 a.m.	Variable, 8+15	
Longitudinale	-	-	

Come rilevato dalle prove endoscopiche, la soletta è composta da un doppio layer di armature, superiore ed inferiore, diametro 12mm:



SPALLE



Elemento: SPALLA NORD

Armatura	Diametro (mm)	Passo (cm)
Staffe	10 a.m.	Variable, 20÷25
Longitudinale	20 a.m.	-

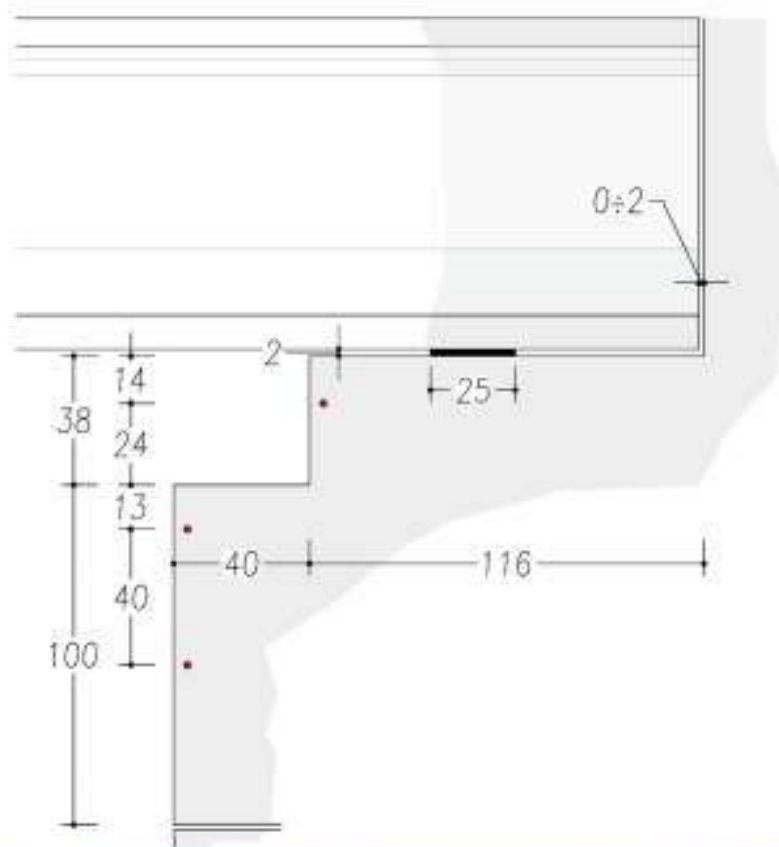
Note: /

CLIENTE: CITTA' METROPOLITANA
DI VENEZIA

ELAB.: 21173P2115A

PONTI ESISTENTI – AREA NORD CIG 9041138719
Verifiche livello 4 – Ponte 05 – Torre di Mosto
– SP57 – ID Opera 60

Rev. A - Pag. 31 di 159



Elemento: SPALLA SUD

Note: /

Armatura	Diametro [mm]	Passo [cm]
Staffe	10 a.m.	Variable, 20+25
Longitudinale	20 a.m.	-

CLIENTE: CITTA' METROPOLITANA
DI VENEZIA

PONTI ESISTENTI – AREA NORD CIG 9041138719
Verifiche livello 4 – Ponte 05 – Torre di Mosto
– SP57 – ID Opera 60

ELAB.: 21173P2115A

Rev. A - Pag. 32 di 159

7.2 Indagini sui materiali

Da tali prove in situ sono state indagate le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo e delle barre d'armatura dei vari elementi del ponte.

Si riportano di seguito i risultati delle prove di laboratorio:

RICHIESTA DEL: 06/09/2024	VERBALE ACCETTAZIONE N°: 1358/2024	DEL: 06/09/2024
MATERIALE CONSEGNATO DA:	Orlando Giovanni (Laboratorio Autorizzato Geoconsult S.r.l.)	
MATERIALE TESTATO:	N° 3 provini cilindrici in calcestruzzo Ø94 mm, prelevati in situ N° 2 tondi in acciaio per c.a. prelevati in situ, di cui: • N° 1 Ø 12 mm • N° 1 Ø 10 mm	

CALCESTRUZZO

BARRE D'ARMATURA

CERTIFICATO DI PROVA N°: 1491/2024	DEL: 13/09/2024	Pagina 3 di 3
------------------------------------	-----------------	---------------

PROVA DI TRAZIONE E PIEGA DEI TONDI IN ACCIAIO PER C.A.

IDENTIFICAZIONE DEI PROVINI	VERBALE DI PRELIEVO	ZONA/FORNITURA DI PRELIEVO
A1	ACC-01	Staffa trave longitudinale
A2	ACC-01	Ferro verticale spalla

RIFERIMENTI	Legge n° 1086 del 05/11/1971	D.M. 17/01/2018	Circ. n° 7 del 21/01/2019
-------------	------------------------------	-----------------	---------------------------

SPECIFICHE DI PROVA	Normativa di riferimento	UNI EN ISO 6892-1:2020 UNI EN ISO 15630-1:2019	Istruzione di lavoro	IDL-19 IDL-33
--------------------------------	--------------------------	---	----------------------	--------------------------------

APPARECCHIATURA DI PROVA			
Tipologia	Matricola	Data di taratura	Certificato di taratura
Macchina di prova a trazione Galdabini Mod. QUASAR 250	VE4H/01	30/01/2024	LAT091 2024 - 054

[illegible]

Note:

¹⁾ A_{max} : allungamento percentuale totale alla forza massima;

²¹ Esito: SC=senza formazione di cricche, CC=con formazione di cricche.

CLIENTE: CITTA' METROPOLITANA
DI VENEZIA

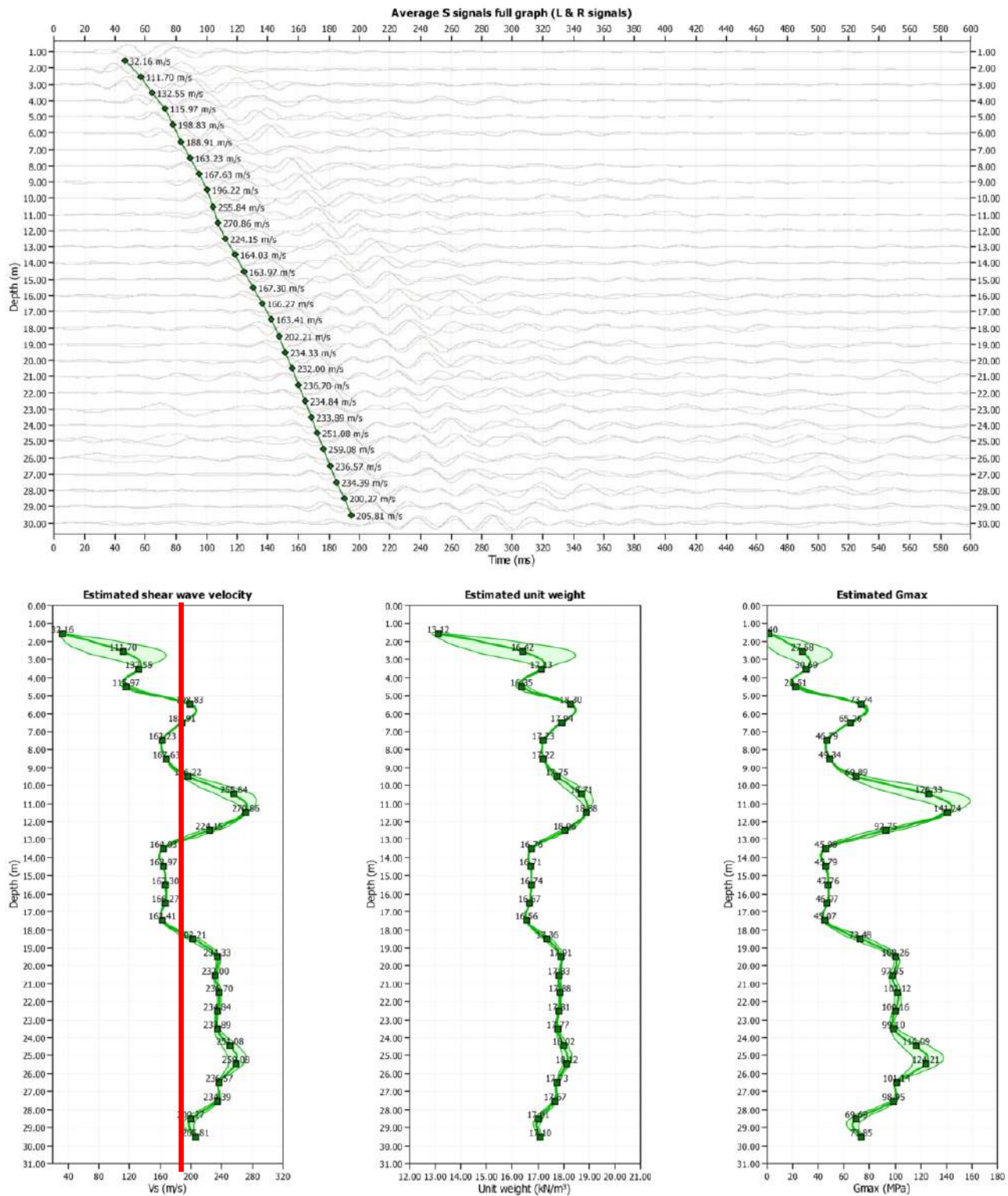
PONTI ESISTENTI – AREA NORD CIG 9041138719
Verifiche livello 4 – Ponte 05 – Torre di Mosto
– SP57 – ID Opera 60

ELAB.: 21173P2115A

Rev. A - Pag. 35 di 159

7.3 Caratterizzazione sismica del sito

Secondo indagini HVSR condotte sul sito in oggetto si sono rilevate le seguenti caratteristiche dinamiche del suolo:



CLIENTE: CITTA' METROPOLITANA
DI VENEZIA

PONTI ESISTENTI – AREA NORD CIG 9041138719
Verifiche livello 4 – Ponte 05 – Torre di Mosto
– SP57 – ID Opera 60

ELAB.: 21173P2115A

Rev. A - Pag. 36 di 159

Categoria di sottosuolo: C

Come visibile nel grafico riportato precedentemente, con un valore medio della velocità equivalente indicativamente pari a 185 m/s, la categoria di sottosuolo è pari a "C".

SP57-ID060

Pick points information

1st Calculation point

Signal depth: 1.010 m

Time: 43.60 ms

2nd Calculation point

Signal depth: 30.010 m

Time: 199.70 ms

 Calculate

Estimated Vs: 184.76 m/s

Delta t: 156.10 ms

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

7.4 Livello di conoscenza assunto

Per i materiali e geometrie esistenti, dalle prove effettuate e dalla documentazione a disposizione, si ritiene di aver raggiunto un livello di conoscenza pari ad LC2, e dunque di poter applicare un fattore di confidenza FC pari a 1.20.

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

(*) A meno delle ulteriori precisazioni già fornite nel § C8.5.4.

8 MATERIALI

8.1 Informazioni da fonti storiche

Dalla documentazione dell'epoca non è stato possibile dedurre alcuna informazione diretta in merito ai materiali adottati.

8.2 Risultati delle indagini in situ

8.2.1 Calcestruzzo

Le caratteristiche dei materiali vengono distinte tra verifiche di Adeguatezza ed Operatività/Transitabilità dal momento che varia il coefficiente di sicurezza del materiale; una miglior definizione di tali coefficienti verrà esplicitata al paragrafo 10.2 del presente elaborato.

Calcestruzzo - ADEGUATEZZA		
Livello di conoscenza	LC	2
Fattore di Confidenza	FC	1,2
Coefficiente Parziale di sicurezza - γ_c	1,5	[-]
Resistenza a compressione MEDIA da prove - f_{cm}	35,80	[MPa]
Resistenza a compressione CARATTERISTICA da prove - $f_{ck, is}$	29,00	[MPa]
$f_d = \min \left(\frac{f_m}{FC \cdot \gamma_M} ; \frac{f_k}{FC} \right)$		
fcd,1 = $f_{cm}/(FC \cdot \gamma_M)$	19,89	[MPa]
fcd,2 = $f_{ck, is}/FC$	24,17	[MPa]
Resistenza di calcolo a compressione del calcestruzzo - f_{cd}	19,89	[MPa]
Peso Specifico	25	[kN/m ³]
Resistenza a compressione equivalente - R_{ck}	43	[MPa]
Modulo elastico istantaneo - E_{cm}	32575	[MPa]

Calcestruzzo - OPERATIVITA'=TRANSITABILITA'		
Livello di conoscenza	LC	2
Fattore di Confidenza	FC	1,2
Coefficiente Parziale di sicurezza - γ_c	1,26	[-]
Resistenza a compressione MEDIA da prove - f_{cm}	35,80	[MPa]
Resistenza a compressione CARATTERISTICA da prove - $f_{ck, is}$	29,00	[MPa]
$f_d = \min \left(\frac{f_m}{FC \cdot \gamma_M} ; \frac{f_k}{FC} \right)$		
fcd,1 = fcm/(FC*gamma)	23,68	[MPa]
fcd,2 = fck,is/FC	24,17	[MPa]
Resistenza di calcolo a compressione del calcestruzzo - f_{cd}	23,68	[MPa]
Peso Specifico	25	[kN/m ³]
Resistenza a compressione equivalente - R_{ck}	43	[MPa]
Modulo elastico istantaneo - E_{cm}	32575	[MPa]

8.2.2 Acciaio d'armatura

Le caratteristiche dei materiali vengono distinte tra verifiche di Adeguatezza ed Operatività/Transitabilità dal momento che varia il coefficiente di sicurezza del materiale; una miglior definizione di tali coefficienti verrà esplicitata al paragrafo 10.2 del presente elaborato.

Acciaio per barre d'armatura - ADEGUATEZZA		
Livello di conoscenza	LC	2
Fattore di Confidenza	FC	1,2
Coefficiente Parziale di sicurezza - γ_s	1,15	[-]
Resistenza a snervamento MEDIA da prove - f_{ym}	455,15	[MPa]
Resistenza a snervamento CARATTERISTICA da prove - $f_{yk, is}$	383,58	[MPa]
$f_d = \min \left(\frac{f_m}{FC \cdot \gamma_M}; \frac{f_k}{FC} \right)$		
$f_{yd,1} = f_{cm}/(FC \cdot \gamma_M)$	329,82	[MPa]
$f_{yd,2} = f_{k, is}/FC$	319,65	[MPa]
Resistenza di calcolo a snervamento dell'acciaio - f_{yd}	319,65	[MPa]
Peso Specifico	78,5	[kN/m ³]
Tensione caratteristica di snervamento equivalente - f_{yk}	368	[MPa]
Modulo elastico istantaneo - E_s	210000	[MPa]

Acciaio per barre d'armatura - OPERATIVITA'=TRANSITABILITA'		
Livello di conoscenza	LC	2
Fattore di Confidenza	FC	1,2
Coefficiente Parziale di sicurezza - γ_s	1,1	[-]
Resistenza a snervamento MEDIA da prove - f_{ym}	455,15	[MPa]
Resistenza a snervamento CARATTERISTICA da prove - $f_{yk, is}$	383,58	[MPa]
$f_d = \min \left(\frac{f_m}{FC \cdot \gamma_M}; \frac{f_k}{FC} \right)$		
$f_{yd,1} = f_{cm}/(FC \cdot \gamma_M)$	344,81	[MPa]
$f_{yd,2} = f_{k, is}/FC$	319,65	[MPa]
Resistenza di calcolo a snervamento dell'acciaio - f_{yd}	319,65	[MPa]
Peso Specifico	78,5	[kN/m ³]
Tensione caratteristica di snervamento equivalente - f_{yk}	352	[MPa]
Modulo elastico istantaneo - E_s	210000	[MPa]

8.2.3 Acciaio da precompressione

I trefoli costituenti l'armatura longitudinale delle travate precomprese non sono stati oggetto di indagine, e dunque le caratteristiche meccaniche degli stessi non sono note.

In accordo con il DM 30 maggio 1972 "Norme Tecniche alle quali devono uniformarsi le costruzioni in conglomerato cementizio, normale e precompresso ed a struttura metallica", nonché il DM 16 giugno 1976 "Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche", la resistenza a rottura e la tensione all' 1% è dedotta dai cataloghi del produttore.

Si debbono controllare, secondo le modalità e le prescrizioni indicate nei paragrafi 2.3 e 2.4, le grandezze qui di seguito elencate.

$\varnothing$	di diametro;
A	area della sezione;
R_{sk}	tensione di rottura;
$R_{sk}(S)$	tensione di snervamento (per le barre);
$R_{sk}(0,1)$	tensione allo 0,1% (per fili, trecce);
$R_{sk}(0,2)$	tensione allo 0,2% (per fili, trecce);
$R_{sk}(1)$	tensione all'1% sotto carico (per trefoli);
l'aggiunta dell'indice k indica il valore caratteristico	
l	allungamento a rottura;
E_{sk}	modulo elastico apparente;
N	numero dei piegamenti nella prova di piegamento alternato (per fili);
$\alpha (180^\circ)$	piegamento a 180° (per fili e barre) (designazione convenzionale);
L	limite di fatica;
r	rilassamento;
—	diagramma sforzi deformazioni.

I valori delle grandezze:

$$R_{sk}, R_{sk}(0,1), R_{sk}(0,2), R_{sk}(1), R_{sk}(S)$$

ed eventualmente delle:

$$L, r$$

debbono fare oggetto di garanzia da parte del produttore e figurare in opportuno catalogo.

Considerato il periodo di realizzazione del manufatto, si è assunto un acciaio da precompressione con $R_{sk} > 1750 \text{ Mpa}$ e $R_{sk(1)} > 1550 \text{ MPa}$

9 ANALISI DEI CARICHI

9.1 Pesì permanenti strutturali – G1

Per i pesi calcolati in automatico dal programma di calcolo FEM si utilizza il peso specifico del calcestruzzo armato, pari a $\gamma_{ca} = 25 \text{ kN/m}^3$.

Si riporta di seguito l'analisi dei carichi per le diverse parti componenti la struttura portante dell'impalcato.

Impalcato					
Tipologia di carico	Elementi	Peso Totale [kg]	Spessore [m]	Lineare [kg/m]	Distribuito [kg/m ²]
Permanente strutturale (G1)	Peso Travi - 8 x VAR (100/14/30) x 100		-	670	
	Peso soletta - s medio=20 cm		0,2	-	500,0

9.2 Pesì permanenti non strutturali – G2 Barriere Lateralì

Le barriere laterali sono costituite da elementi in acciaio correnti lungo tutto lo sviluppo dell'impalcato. Il peso di tali manufatti viene stimato in 100 kg/m.



FIGURA 9-1: GUARDRAIL ESISTENTE

9.3 Pesi permanenti non strutturali – G2 Pavimentazione stradale

Le indagini hanno interessato anche la misurazione del pacchetto stradale con lo scopo di accertare lo spessore effettivo della pavimentazione stradale presente allo stato attuale.

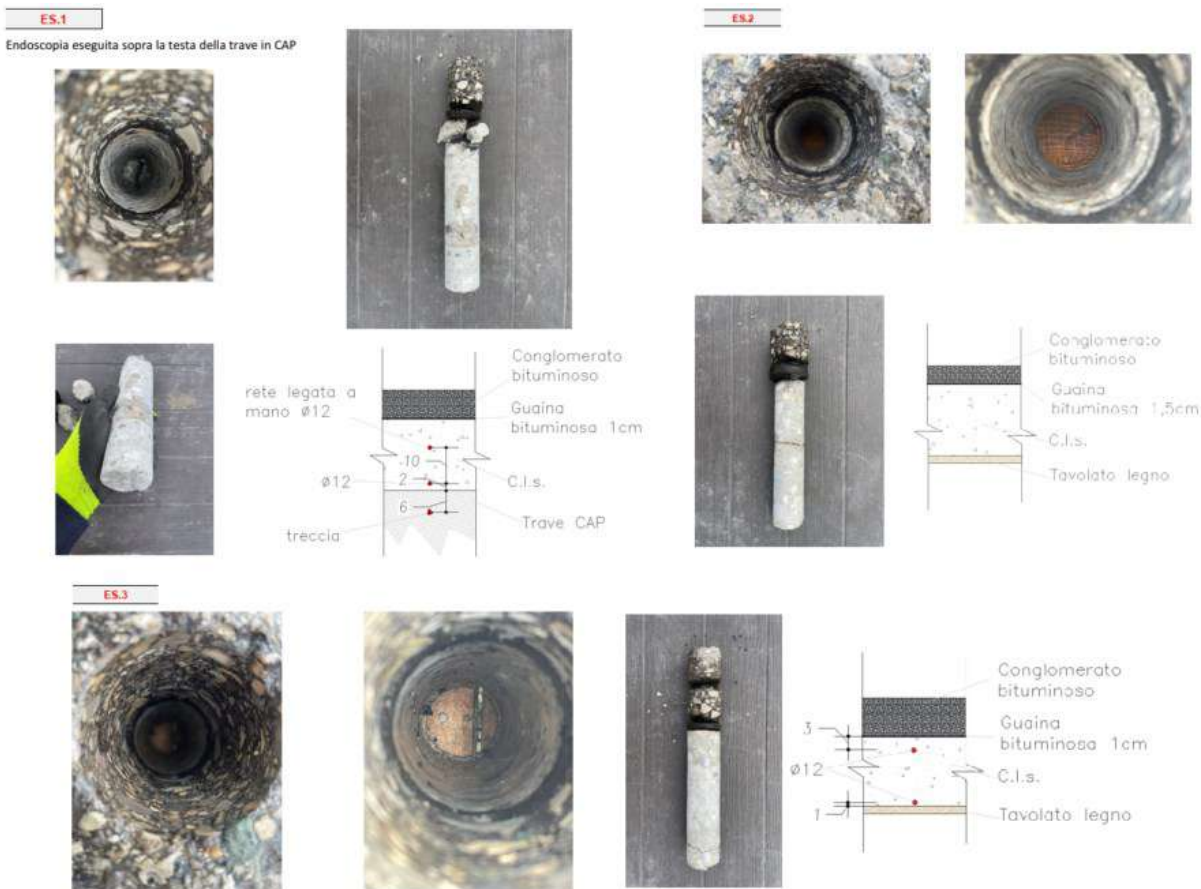


FIGURA 9-2: INDIVIDUAZIONE DEI PUNTI DI INDAGINE

Elemento: IMPALCATO		
Strato	Descrizione	Spessore [cm]
1	Conglomerato bituminoso	7,0

Elemento: IMPALCATO		
Strato	Descrizione	Spessore [cm]
1	Conglomerato bituminoso	5,0

Elemento: IMPALCATO		
Strato	Descrizione	Spessore [cm]
1	Conglomerato bituminoso	9,0

Tenendo in considerazione che le indagini endoscopiche non hanno indagato la parte centrale di carreggiata, il dato rilevato costituisce una stima dello spessore medio presente. A favore di sicurezza si considera:

Impalcato					
Tipologia di carico	Elementi	Peso Totale [kg]	Spessore [m]	Lineare [kg/m]	Distribuito [kg/m ²]
Permanente non strutt (G2)	Pavimentazione - s=10 cm	*	-	-	200,0

* indagini pacchetto eseguite sempre nello stesso punto della sezione trasversale quindi impossibile determinare il reale spessore medio

9.4 Precompressione a cavi post-tesi

Dalla campagna di indagini condotta in situ è emerso che ciascuna delle n.8 travi costituenti la campata centrale del manufatto è caratterizzata dalla presenza di trefoli diametro 11mm.

Il materiale e la resistenza di tale armatura da precompressione non sono noti; per tale ragione si considerano le caratteristiche dei materiali tipici dell'epoca di costruzione. Si assume un acciaio da precompressione con $R_{ak} > 1750 \text{ Mpa}$ e $R_{ak(1)} > 1550 \text{ Mpa}$.

Non essendo inoltre nota la precompressione attualmente agente, si considera, a favore di sicurezza, una tensione agente negli stessi pari a 800 Mpa. Tale valore, già comprensivo di tutti gli effetti di perdite istantanee ed a lungo termine, è un valore cautelativo ma comunque ben rappresentativo delle strutture di questa tipologia.

Si riportano di seguito la posizione delle guaine (sezione in mezzeria) e le principali caratteristiche:

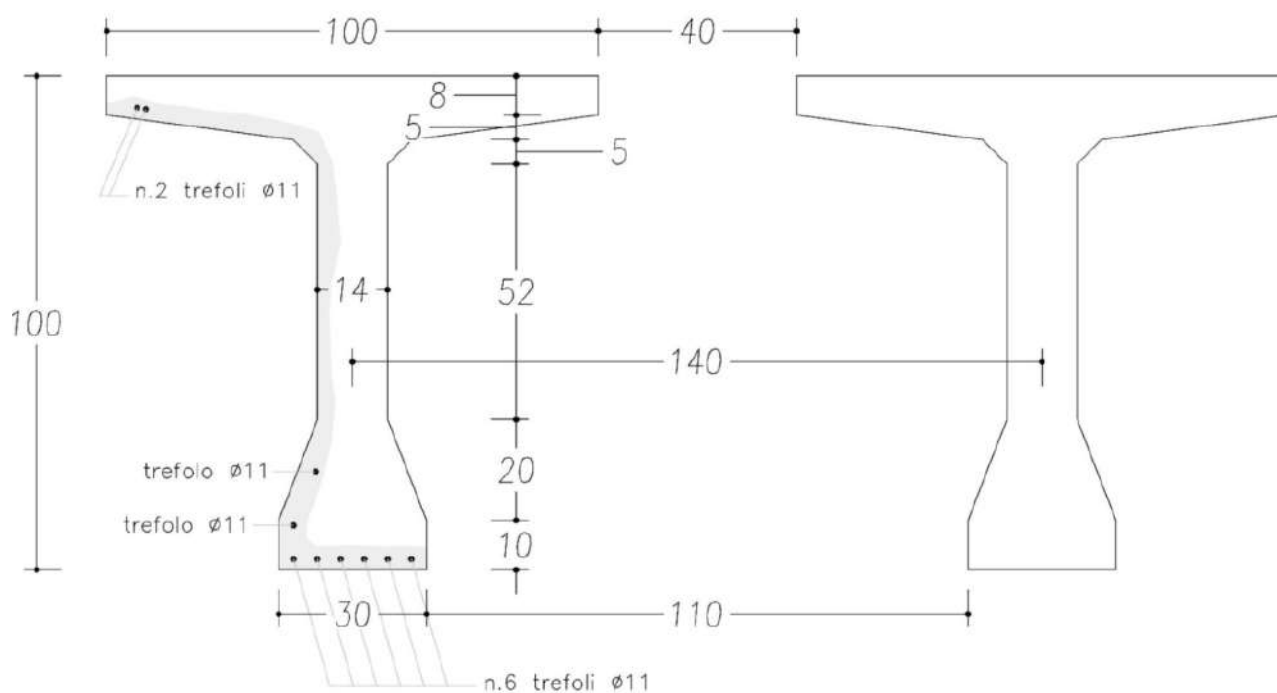


FIGURA 9-3: SEZIONE IN CAMPATA CON TREFOLI DA PRECOMPRESSIONE

$$A_{\text{trefolo}} = 5,50^2 \times 3,14 = 95,03 \text{ mm}^2$$

$$n^{\circ}_{\text{trefoli}} = 14$$

$$A_p = 95,03 \times 14 = 1330,42 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_p = 800 \text{ MPa}$$

$$N_b = 1330,42 \times 800 = 1064 \text{ kN}$$

9.5 Azioni Variabili da vento e termiche

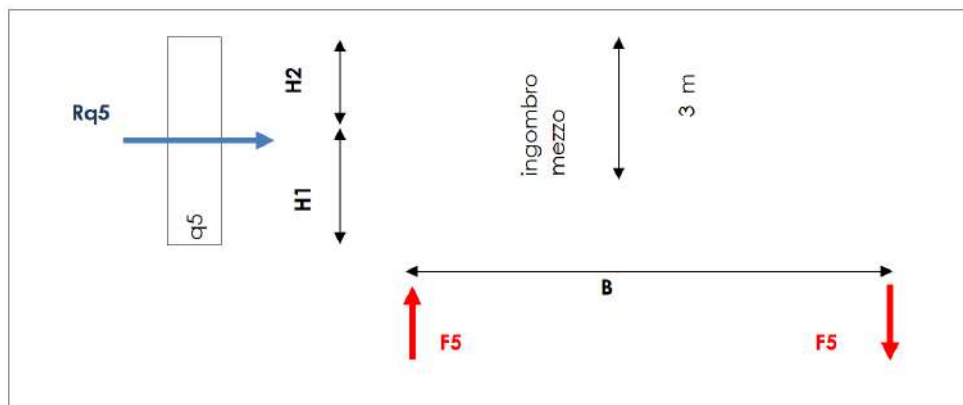
9.5.1.1 Azione variabile del vento – q5

Le azioni del vento sono valutate considerando la pressione cinetica di riferimento da applicarsi alla sagoma trasversale del ponte tenendo conto dell'ingombro dei carichi da traffico presenti (3.0 m da piano stradale).

Si considera il seguente periodo di ritorno (nel caso in cui le verifiche lo richiedessero):

TR = 50 anni (cr = 1.0) → verifiche secondo NTC18.

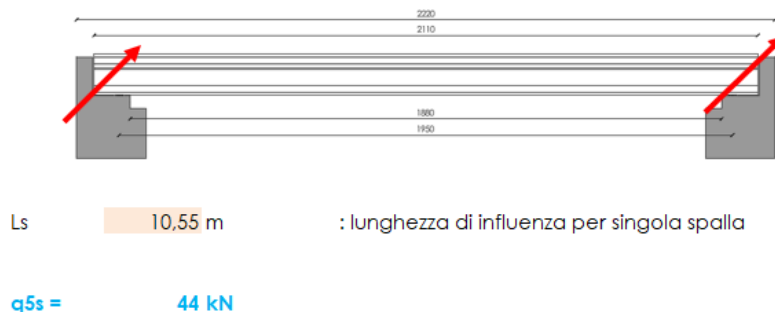
Considerando una velocità di riferimento (con TR = 50 anni) pari a $v_{b,0} = 25$ m/s (zona 1), si ottiene:
 $q_r = 0.5 \cdot \rho \cdot v_r^2 = 0.391$ kN/m² ($\rho = 1.25$ kg/m³)



CALCOLO FORZE GENERATE DA CARICO VENTO

q5	1,00 kPa/m	: carico vento
H1	1,2 m	: altezza impalcato
H2	3 m	
B	9,8 m	: larghezza impalcato
Rq5	4,2 kN/m	: risultante delle forze vento orizzontali
b,Rq5	1,5 m	: braccio di Rq5 rispetto al baricentro impalcato
MRq5	6,3 kNm/m	: momento torcente generato da Rq5
F5	0,64 kN/m	: forze equivalenti al momento torcente MRq5

CALCOLO FORZE ORIZZONTALI DA VENTO SU SPALLE E PILE



Forza che verrà utilizzata prevalentemente per determinare le sollecitazioni su pile e spalle.

9.5.1.2 Azioni derivanti da effetti di dilatazione e contrazione termica

L'impalcato è costituito da travi in semplice appoggio, pertanto prive di interazioni dal punto di vista termico.

9.6 Azioni Variabili da Traffico

Si illustrano di seguito le azioni variabili da traffico, partendo da quelle utilizzate per le verifiche di adeguatezza per poi passare ad operatività, transitabilità da NTC e transitabilità da Codice della Strada.

9.6.1 Carichi per Verifica di Adeguatezza - NTC2018

9.6.1.1 Carichi Mobili

La normativa attualmente vigente NTC 2018 definisce il numero delle corsie convenzionali in base alla larghezza della carreggiata e successivamente su ogni corsia vengono applicati le tipologie di carico definite dalla norma. Le tipologie di carico vengono analizzate singolarmente e combinate opportunamente al fine di ricercare le massime (o minime) sollecitazioni sulle membrature.

Vista la larghezza carrabile attualmente disponibile, è possibile pertanto posizionare fino a tre corsie convenzionali di traffico e nel caso in esame si ha:

- Larghezza della superficie carrabile: $w = 10.80 \text{ m}$
- Numero di corsie convenzionali: $nl = 3$
- Larghezza di una corsia convenzionale: $L_c = 3 \text{ m}$
- Larghezza della zona rimanente: $L_r = 1.80 \text{ m}$

Si riporta graficamente lo schema di carico adottato:

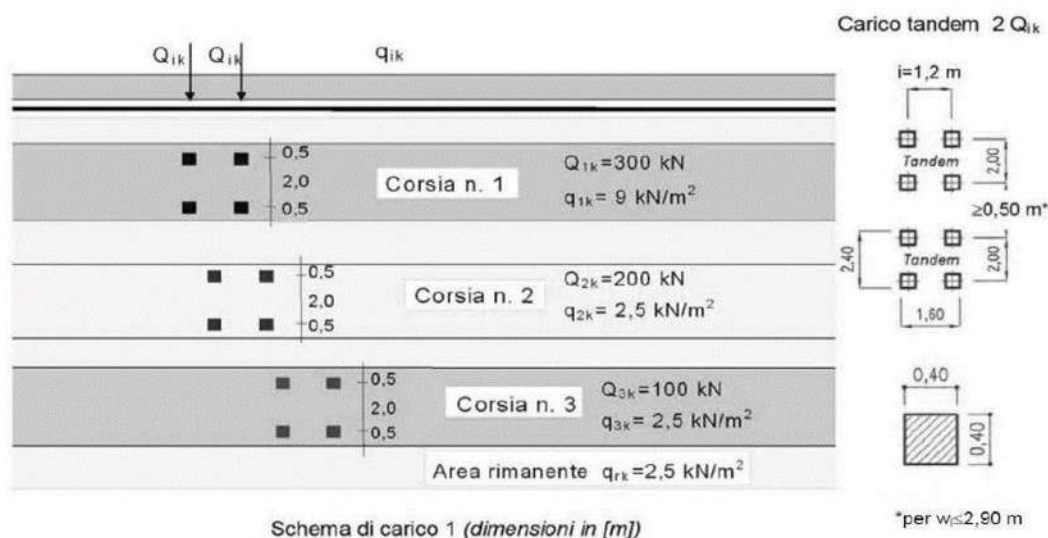


FIGURA 9-4: SCHEMI DI CARICO DA NTC 2018

Tab. 5.1.II - Intensità dei carichi Q_{ik} e q_{ik} per le diverse corsie

Posizione	Carico asse Q_{ik} [kN]	q_{ik} [kN/m ²]
Corsia Numero 1	300	9,00
Corsia Numero 2	200	2,50
Corsia Numero 3	100	2,50
Altre corsie	0,00	2,50

Figura 9-5: Carichi convenzionali secondo NTC18

Le condizioni di carico adottate sono volte a massimizzare i seguenti meccanismi:

SCHEMA NTC18 - T1 *Traffico: Massimizzazione M+ campata*

SCHEMA NTC18 - T2 *Traffico: Massimizzazione V appoggio e Carico Verticale Spalla*

SCHEMA NTC18 - T3 *Traffico: Massimizzazione M/V soletta*

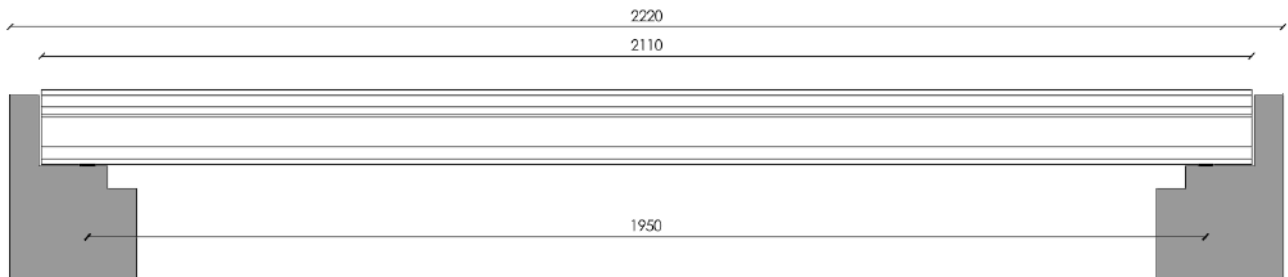


FIGURA 9-6: L'IMPALCATO - SEZIONE LONGITUDINALE

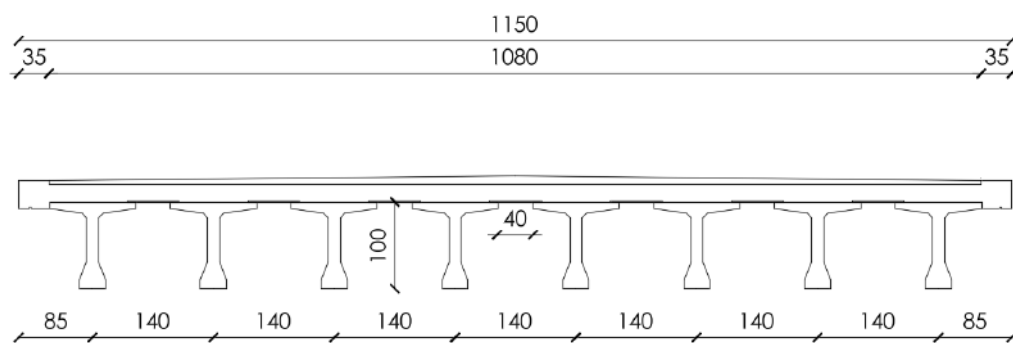


FIGURA 9-7: L'IMPALCATO - SEZIONE TRASVERSALE

Le posizioni ed il numero di corsie relative ai carichi mobili al fine di ottenere le massime sollecitazioni sono riportate nelle figure seguenti.

SCHEMA NTC18 - T1 Massimizzazione M+ campata

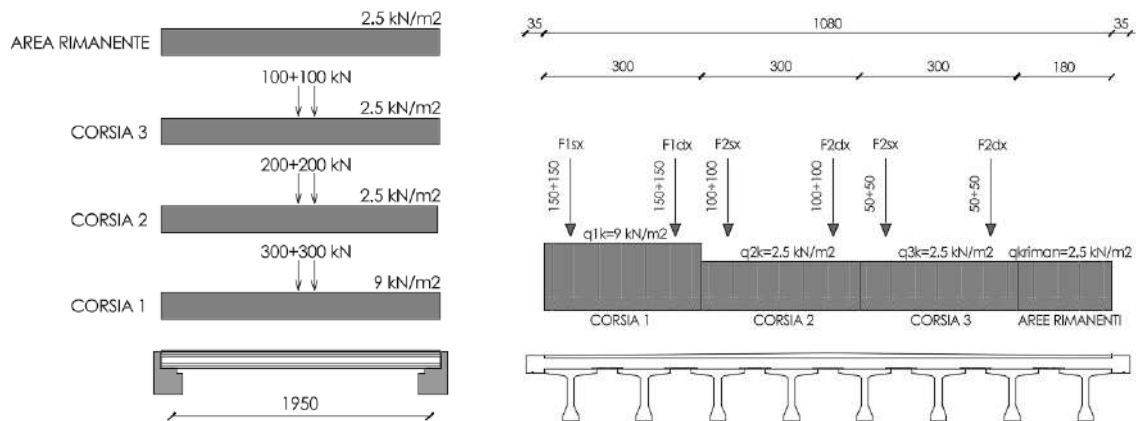


FIGURA 9-8: SEZIONE LONGITUDINALE (SX) E SEZIONE TRASVERSALE CAMPATA (DX)

SCHEMA NTC18 - T2 Massimizzazione V appoggio e Carico Verticale Spalla

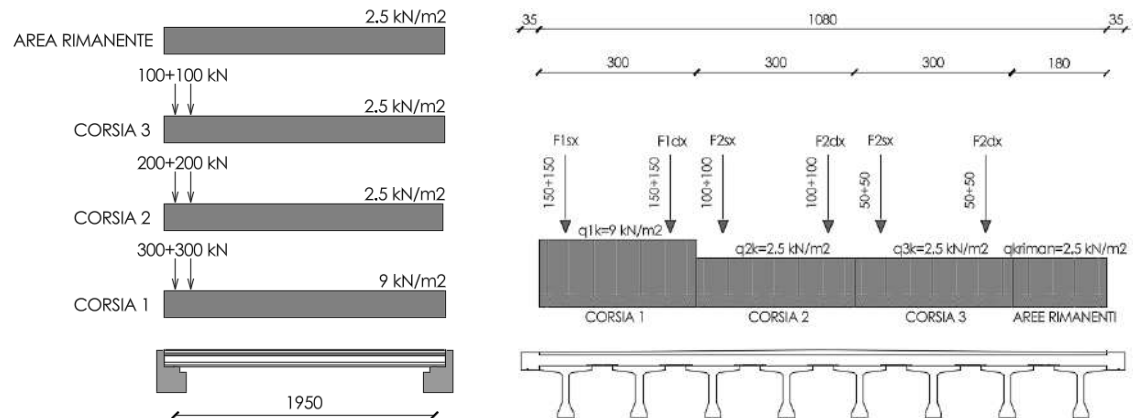


figura 9-9: sezione longitudinale (sx) e sezione trasversale campata (dx)

SCHEMA NTC18 – T3 Massimizzazione M/V soletta

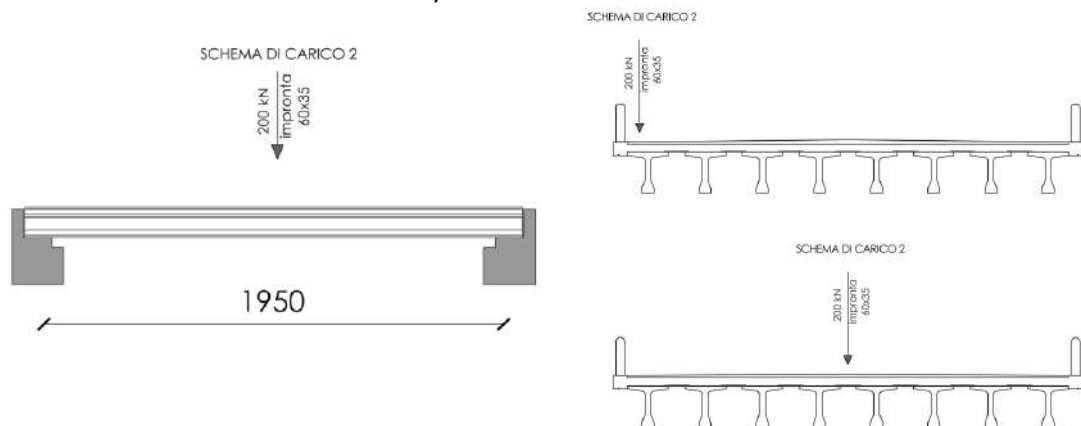


FIGURA 9-10: SEZIONE LONGITUDINALE (SX) E SEZIONI TRASVERSALI CAMPATA (DX)

9.6.1.2 Azione di frenamento – q3

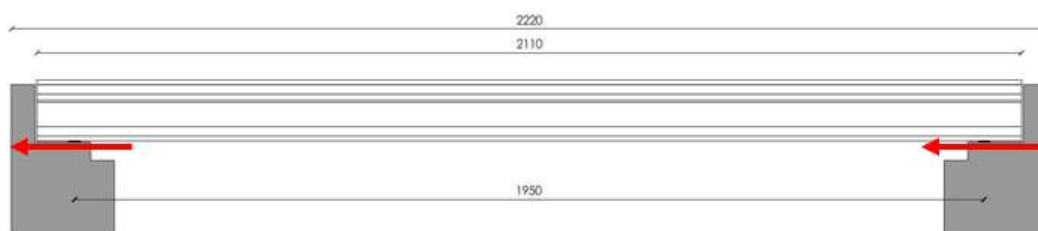
CALCOLO CARICO FRENATA PER SPALLE - q3s

La forza di frenamento o di accelerazione q_3 è funzione del carico verticale totale agente sulla corsia convenzionale n. 1 ed è uguale a

$$180 \text{ kN} \leq q_3 = 0,6 (2Q_{1k}) + 0,10q_{1k} \cdot w_1 \cdot L \leq 900 \text{ kN} \quad [5.1.4]$$

essendo w_1 la larghezza della corsia e L la lunghezza della zona caricata. La forza, applicata a livello della pavimentazione ed agente lungo l'asse della corsia, è assunta uniformemente distribuita sulla lunghezza caricata e include gli effetti di interazione.

COMBINAZIONE CONSIDERATA



Q1k	300 kN		
q1k	9 kN/m ²	q3,tot =	417 kN
L	21,1 m	q3s,spalla =	208 kN
w1	3 m		

Forza che verrà utilizzata prevalentemente per determinare le sollecitazioni sulle spalle.

9.6.2 Carichi per Verifica di Operatività ($t_{ref}=30$ anni) - NTC2018

Le distribuzioni dei carichi da traffico previste per le verifiche di Operatività sono i medesimi già trattati per le verifiche di Adeguatezza; l'unica differenza tra i livelli si trova a livello di coefficienti adottati nelle combinazioni di carico, i quali saranno opportunamente trattati al capitolo 10 del presente elaborato.

Si riporta di seguito quanto contenuto al §6.1.5.2 delle "Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti".

Qualora il livello di sicurezza per azioni non sismiche secondo le norme attuali sia insoddisfacente, nell'ottica di una programmazione degli interventi necessari in relazione all'insieme delle opere d'arte gestite, è possibile mantenere l'operatività del ponte anche al fine di garantire la corretta gestione della rete stradale e minimizzare i disagi al territorio. A tal proposito, è possibile assumere nella verifica di sicurezza un tempo di riferimento t_{ref} pari a 30 anni, durante il quale si assicura comunque il livello di sicurezza minimo per la salvaguardia della vita umana. Nella valutazione della sicurezza si assumono i carichi di riferimento previsti dalle Norme Tecniche e i fattori parziali valutati per il tempo di riferimento assunto, considerando la possibile riduzione dei fattori parziali relativi ai carichi permanenti funzione della riduzione delle incertezze ottenuta grazie all'approfondimento della conoscenza, come previsto al § 8.5.5 delle Norme Tecniche. La valutazione dello stato di degrado e la pianificazione degli interventi di ripristino sono parte integrante e sostanziale della valutazione.

Occorre segnalare il ponte e gli esiti delle verifiche in banche dati istituzionali regionali e nazionali. Al termine del tempo di riferimento, nel caso in cui non si sia provveduto all'adeguamento, occorre valutare e adottare idonei provvedimenti, compresa l'eventuale messa fuori servizio, ove necessaria.

9.6.3 Carichi per Verifica di Transitabilità ($t_{ref}=5$ anni) - NTC2018

Si riporta di seguito quanto contenuto al §6.1.5.3 delle "Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti".

Qualora dalla valutazione del livello di sicurezza statico secondo le norme attuali emergano situazioni critiche tali da rendere necessaria in tempi brevi la progettazione di interventi strutturali finalizzati a raggiungere livelli di sicurezza accettabili, è comunque possibile, al fine garantire una minima transitabilità sul ponte, nel periodo necessario alla progettazione e realizzazione degli interventi, adottare provvedimenti di limitazione d'uso o di limitazione dei carichi.

Nel caso di limitazione d'uso, è possibile consentire il passaggio dei mezzi su un'unica corsia invece di due o provvedimenti simili, verificando nel complesso comportamento flessio-torsionale del ponte e delle parti laterali, quale sia la posizione più favorevole nei confronti della sicurezza per il passaggio. In tal caso è possibile assumere nella verifica di sicurezza e quindi dei fattori parziali, un tempo di riferimento t_{ref} pari a 5 anni, durante il quale occorre comunque assicurare il livello di sicurezza minimo allo stato limite ultimo.

Eseguire le verifiche con carichi di Transitabilità da NTC comporterebbe la necessità di mettere in atto sistemi e presidi tali da ridurre il numero di corsie di calcolo secondo le Norme Tecniche.

Il manufatto oggetto di verifica presenta una larghezza della carreggiata pari a 10,80m, maggiore di 6 metri, ossia la larghezza minima necessaria a consentire il passaggio di n. 2 corsie di marcia fisiche. Il restringimento della carreggiata consisterebbe nella posa di idoneo sistema di barriere (fisse o mobili), tali da permettere lo scorrimento del flusso di traffico nella parte centrale dell'impalcato, minimizzando in questo modo le sollecitazioni flessio-torsionali dello stesso.

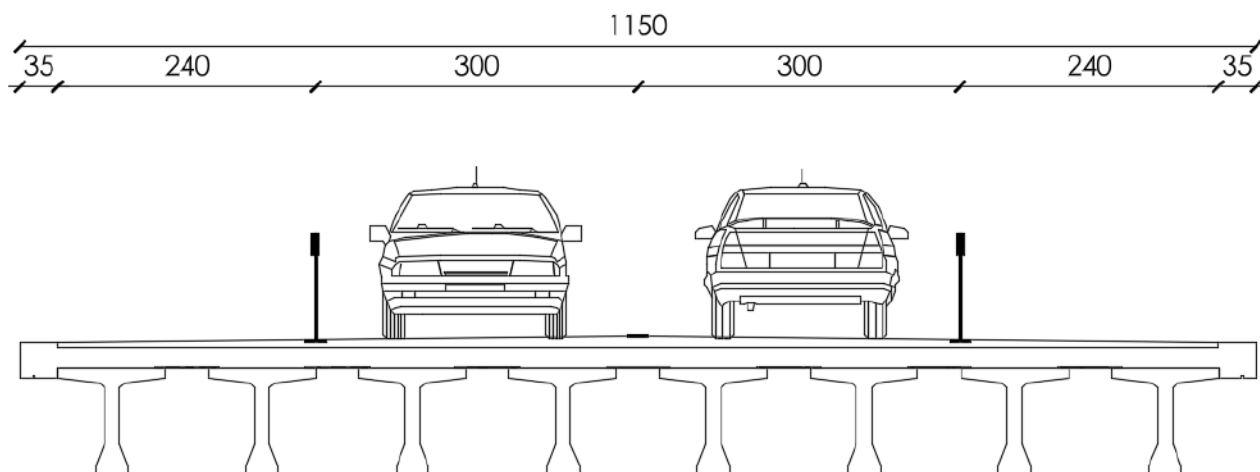


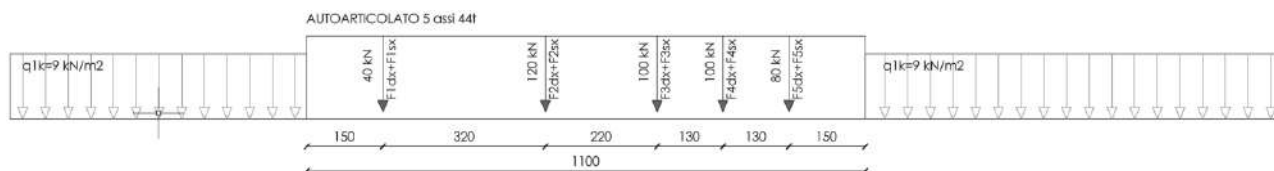
FIGURA 9-11: SEZIONE TRASVERSALE – LIMITAZIONE D'USO

Tale soluzione, tuttavia, non è stata riportata nel presente report di calcolo in quanto la geometria dell'impalcato stesso rilevata in situ (a differenza di quanto contenuto nelle tavole di progetto originali) non presenta traversi. La mancanza degli stessi fa sì che le sollecitazioni provenienti dalla soletta vengano trasmesse in corrispondenza delle travi adiacenti al carico stesso, senza una reale distribuzione del carico "alla Courbon". La limitazione d'uso del ponte non porterebbe dunque nessun beneficio.

9.6.4 Carichi per Verifica di Transitabilità ($t_{ref}=5$ anni) – CdS – Mezzi pesanti (44t)

9.6.4.1 Carichi Mobili

Le Linee Guida danno una definizione di Mezzi pesanti (44t) mediante la seguente stilata di carichi.



Tale schema si estende a tutte le corsie aperte, assumendo una larghezza della corsia pari a 3.0 metri, coerentemente con le Norme tecniche attualmente vigenti. Inoltre, nel caso che non vi siano delimitazioni fisiche insuperabili, esse si estendono alle corsie di emergenza ed alle eventuali corsie di accesso.

Come precisato nelle "Istruzioni Operative per l'applicazione delle Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti", i carichi si distribuiscono in direzione trasversale come previsto dalle NTC, occupando le corsie convenzionali disponibili e disponendo un carico di 2.5 kN/mq nella parte rimanente.

Le condizioni di carico adottate sono volte a massimizzare i seguenti meccanismi:

SCHEMA NTC18 - T1 *Traffico: Massimizzazione M+ campata*

SCHEMA NTC18 - T2 *Traffico: Massimizzazione V appoggio e Carico Verticale Spalla*

SCHEMA NTC18 - T3 *Traffico: Massimizzazione M/V soletta*

Le posizioni ed il numero di corsie relative ai carichi mobili al fine di ottenere le massime sollecitazioni sono riportate nelle figure seguenti.

SCHEMA NTC18 - T1 Massimizzazione M+ campata

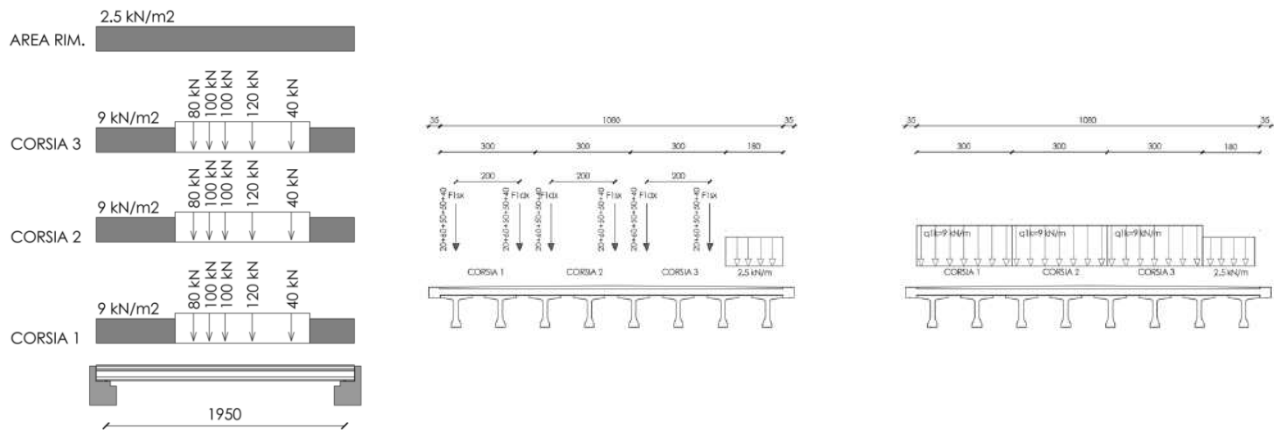


FIGURA 9-12: SEZIONE LONGITUDINALE (SX) E SEZIONE TRASVERSALE CAMPATA (DX)

SCHEMA NTC18 - T2 Massimizzazione V appoggio e Carico Verticale Spalla

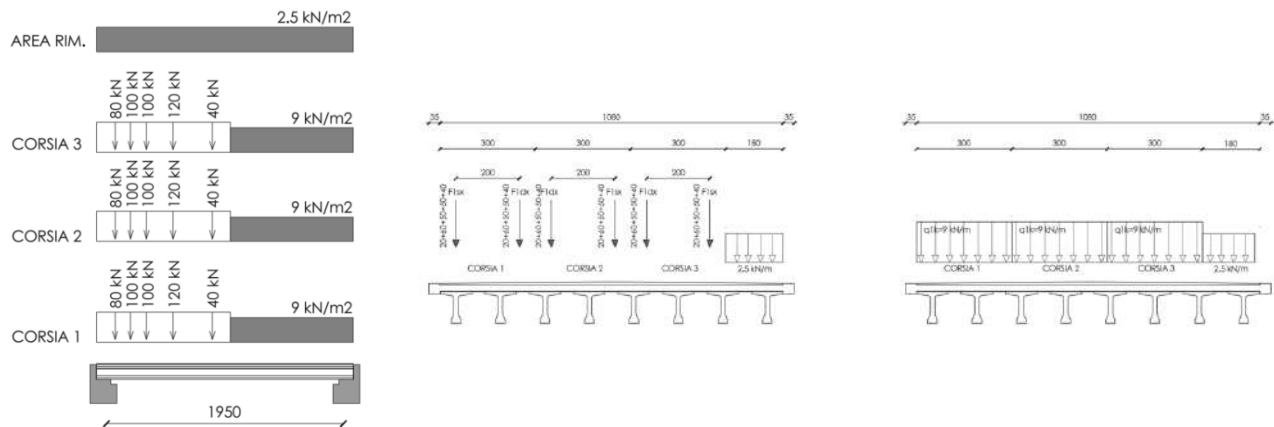


figura 9-13: sezione longitudinale (sx) e sezione trasversale campata (dx)

SCHEMA NTC18 – T3 Massimizzazione M/V soletta

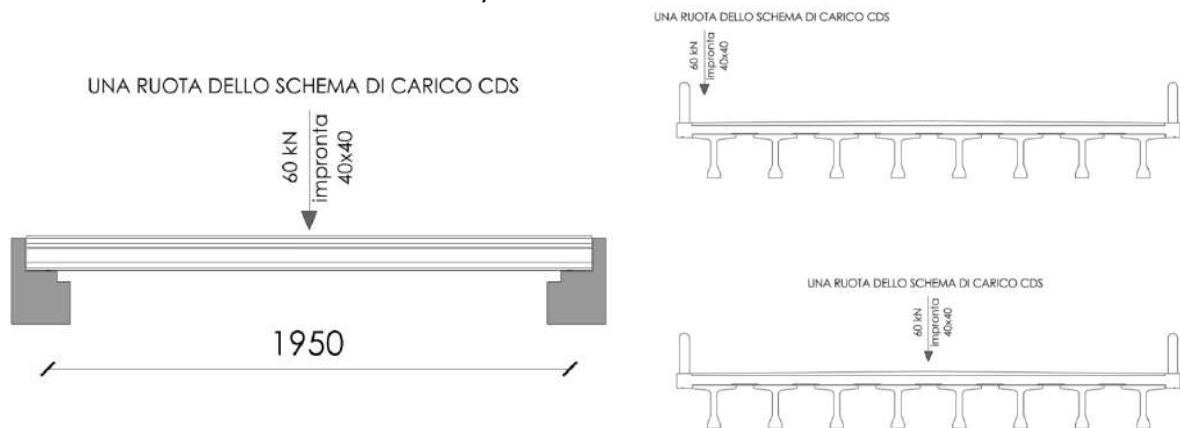


FIGURA 9-14: SEZIONE LONGITUDINALE (SX) E SEZIONI TRASVERSALI CAMPATA (DX)

Azione di frenamento – q3

CALCOLO CARICO FRENATA PER SPALLE - q3s

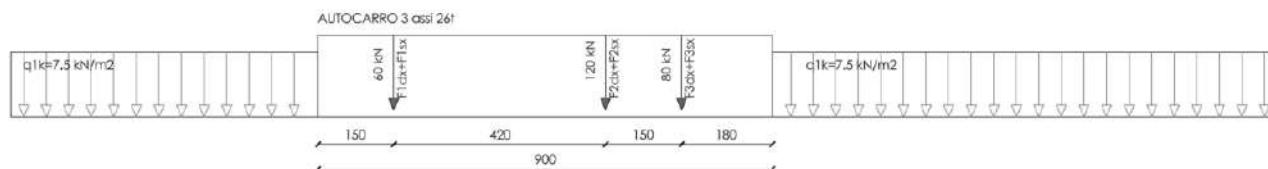
Le relative azioni di frenamento o accelerazione si ottengono, analogamente a quanto previsto dalle NTC, con la seguente espressione: $0,6 \times [\Sigma \text{ carichi assi CdS}] + 0.10 \times [\text{carico distribuito CdS}] \times [\text{lunghezza caricata}]$				
COMBINAZIONE CONSIDERATA				
				
Q1K	440 kN			
q1k	9 kN/m2	q3,tot =	291	kN
L	10,1 m	q3s,spalla =	146	kN
w1	3 m			

Forza che verrà utilizzata prevalentemente per determinare le sollecitazioni su pile e spalle.

9.6.5 Carichi per Verifica di Transitabilità ($t_{ref}=5$ anni) – CdS – Mezzi intermedi(26t)

9.6.5.1 Carichi Mobili

Le Linee Guida danno una definizione di Mezzi intermedi (26t) mediante la seguente stilata di carichi.



Tale schema si estende a tutte le corsie aperte, assumendo una larghezza della corsia pari a 3.0 metri, coerentemente con le Norme tecniche attualmente vigenti. Inoltre, nel caso che non vi siano delimitazioni fisiche insuperabili, esse si estendono alle corsie di emergenza ed alle eventuali corsie di accesso.

Come precisato nelle "Istruzioni Operative per l'applicazione delle Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti", i carichi si distribuiscono in direzione trasversale come previsto dalle NTC, occupando le corsie convenzionali disponibili e disponendo un carico di 2.5kN/mq nella parte rimanente.

Le condizioni di carico adottate sono volte a massimizzare i seguenti meccanismi:

SCHEMA NTC18 - T1 *Traffico: Massimizzazione M+ campata*

SCHEMA NTC18 - T2 *Traffico: Massimizzazione V appoggio e Carico Verticale Spalla*

SCHEMA NTC18 – T3 *Traffico: Massimizzazione M/V soletta*

Le posizioni ed il numero di corsie relative ai carichi mobili al fine di ottenere le massime sollecitazioni sono riportate nelle figure seguenti.

SCHEMA NTC18 - T1 Massimizzazione M+ campata

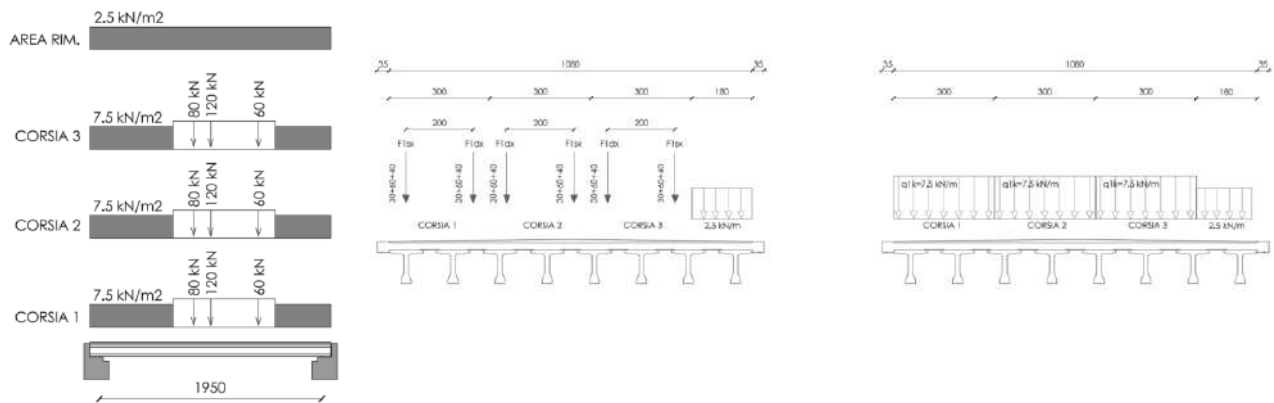


FIGURA 9-15: SEZIONE LONGITUDINALE (SX) E SEZIONE TRASVERSALE CAMPATA (DX)

SCHEMA NTC18 - T2 Massimizzazione V appoggio e Carico Verticale Spalla

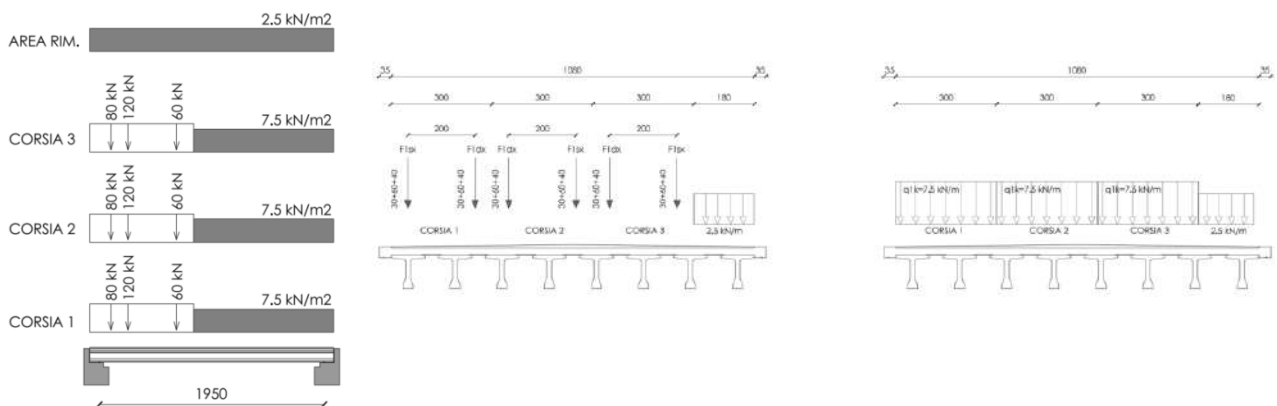


figura 9-16: sezione longitudinale (sx) e sezione trasversale campata (dx)

SCHEMA NTC18 – T3 Massimizzazione M/V soletta

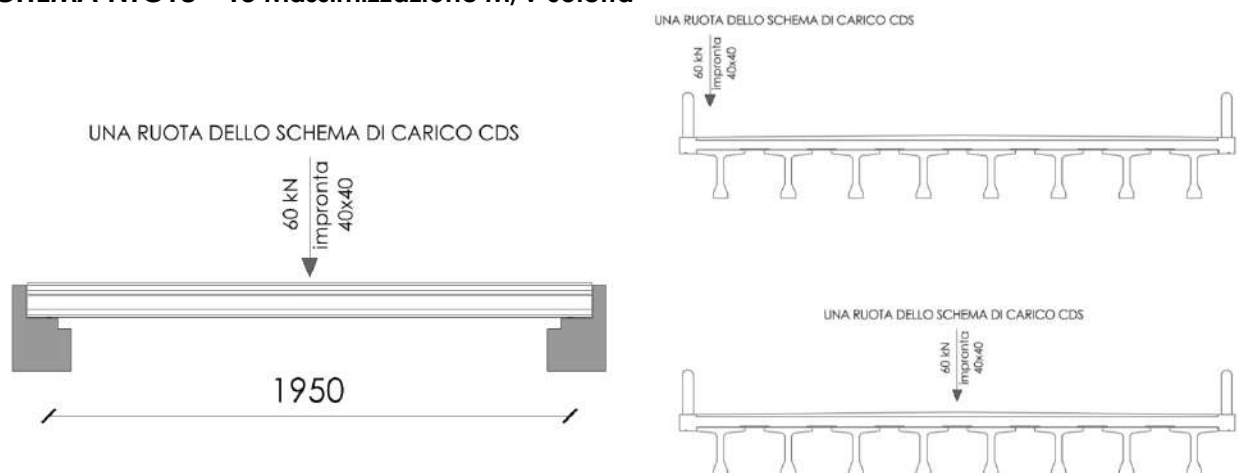


FIGURA 9-17: SEZIONE LONGITUDINALE (SX) E SEZIONI TRASVERSALI CAMPATA (DX)

CLIENTE: CITTA' METROPOLITANA
DI VENEZIA

PONTI ESISTENTI – AREA NORD CIG 9041138719
Verifiche livello 4 – Ponte 05 – Torre di Mosto
– SP57 – ID Opera 60

ELAB.: 21173P2115A

Rev. A - Pag. 60 di 159

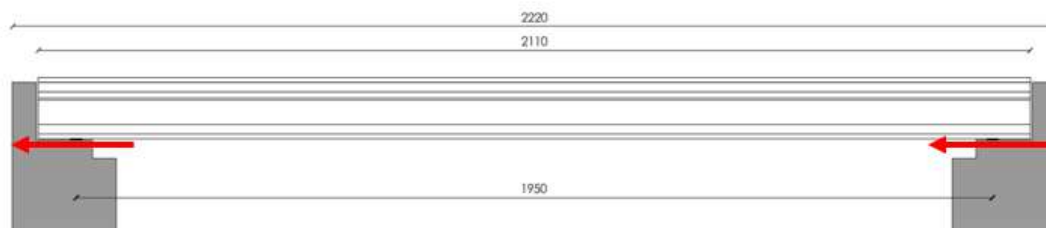
9.6.5.2 Azione di frenamento – q3

CALCOLO CARICO FRENATA PER SPALLE - q3s

Le relative azioni di frenamento o accelerazione si ottengono, analogamente a quanto previsto dalle NTC, con la seguente espressione:

$$0,6 \times [\Sigma \text{ carichi assi CdS}] + 0,10 \times [\text{carico distribuito CdS}] \times [\text{lunghezza caricata}]$$

COMBINAZIONE CONSIDERATA



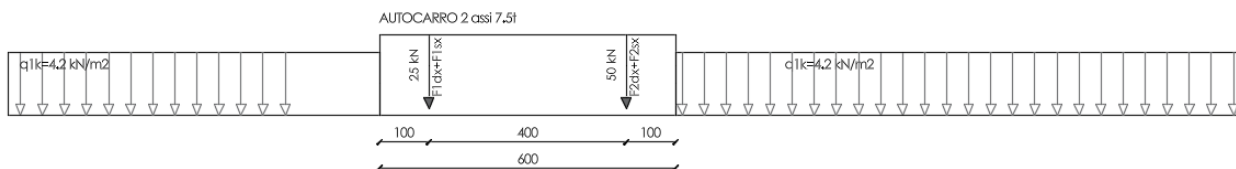
Q1K	260 kN			
q1k	7,5 kN/m ²	q3,tot =	183	kN
L	12,1 m	q3s,spalla =	92	kN
wl	3 m			

Forza che verrà utilizzata prevalentemente per determinare le sollecitazioni su pile e spalle.

9.6.6 Carichi per Verifica di Transitabilità ($t_{ref}=5$ anni) – CdS – Mezzi leggeri (7.5t)

9.6.6.1 Carichi Mobili

Le Linee Guida danno una definizione di Mezzi Leggeri (7.5t) mediante la seguente stilata di carichi.



Tale schema si estende a tutte le corsie aperte, assumendo una larghezza della corsia pari a 3.0 metri, coerentemente con le Norme tecniche attualmente vigenti. Inoltre, nel caso che non vi siano delimitazioni fisiche insuperabili, esse si estendono alle corsie di emergenza ed alle eventuali corsie di accesso.

Come precisato nelle "Istruzioni Operative per l'applicazione delle Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti", i carichi si distribuiscono in direzione trasversale come previsto dalle NTC, occupando le corsie convenzionali disponibili e disponendo un carico di 2.5kN/mq nella parte rimanente.

Le condizioni di carico adottate sono volte a massimizzare i seguenti meccanismi:

SCHEMA NTC18 - T1 Traffico: Massimizzazione M+ campata

SCHEMA NTC18 - T2 Traffico: Massimizzazione V appoggio e Carico Verticale Spalla

SCHEMA NTC18 - T3 Traffico: Massimizzazione M/V soletta

Le posizioni ed il numero di corsie relative ai carichi mobili al fine di ottenere le massime sollecitazioni sono riportate nelle figure seguenti.

SCHEMA NTC18 - T1 Massimizzazione M+ campata

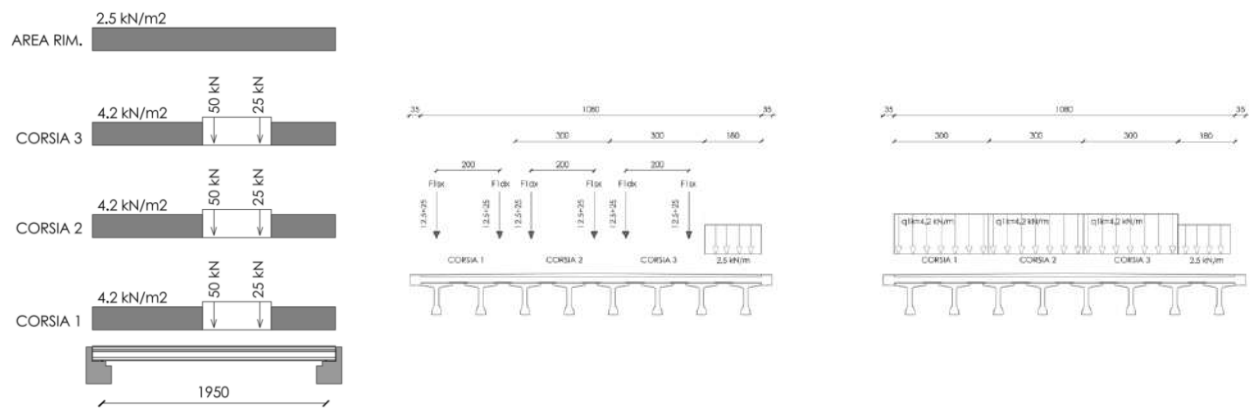


FIGURA 9-18: SEZIONE LONGITUDINALE (SX) E SEZIONE TRASVERSALE CAMPATA (DX)

SCHEMA NTC18 - T2 Massimizzazione V appoggio e Carico Verticale Spalla

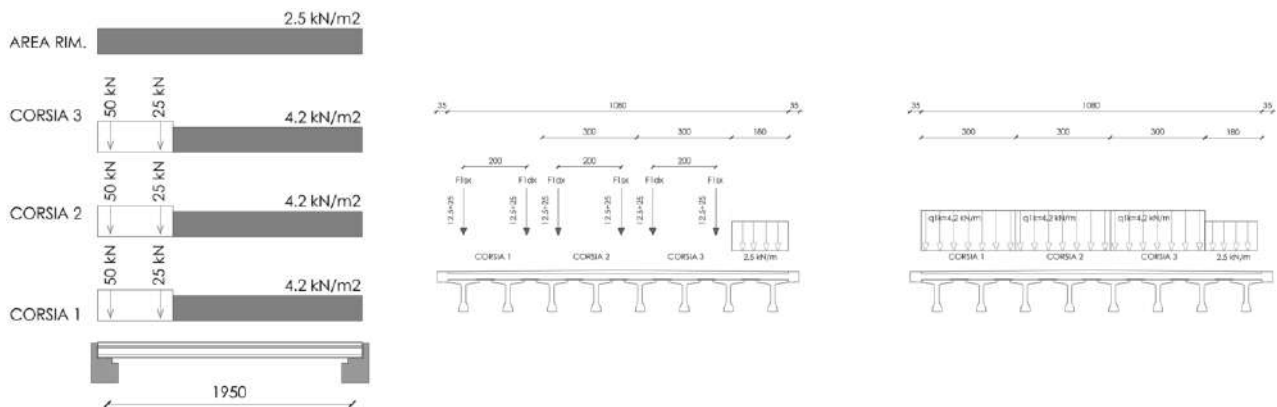


figura 9-19: sezione longitudinale (sx) e sezione trasversale campata (dx)

SCHEMA NTC18 – T3 Massimizzazione M/V soletta

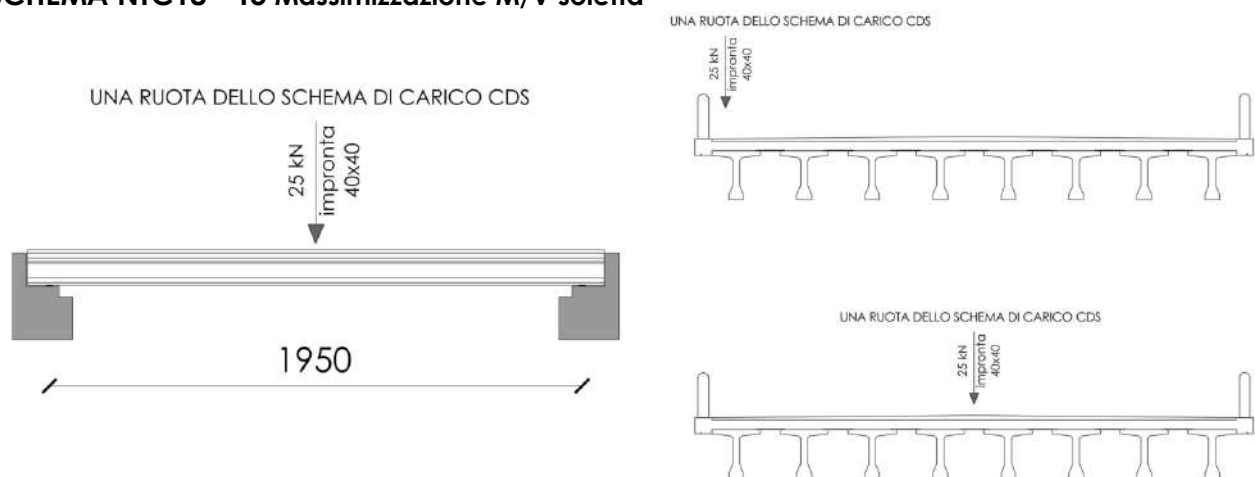


FIGURA 9-20: SEZIONE LONGITUDINALE (SX) E SEZIONI TRASVERSALI CAMPATA (DX)

CLIENTE: CITTA' METROPOLITANA
DI VENEZIA

PONTI ESISTENTI – AREA NORD CIG 9041138719
Verifiche livello 4 – Ponte 05 – Torre di Mosto
– SP57 – ID Opera 60

ELAB.: 21173P2115A

Rev. A - Pag. 63 di 159

Azione di frenamento – q3

CALCOLO CARICO FRENATA PER SPALLE - q3s

Le relative azioni di frenamento o accelerazione si ottengono, analogamente a quanto previsto dalle NTC, con la seguente espressione:

$$0,6 \times [\Sigma \text{ carichi assi CdS}] + 0.10 \times [\text{carico distribuito CdS}] \times [\text{lunghezza caricata}]$$

COMBINAZIONE CONSIDERATA

The diagram shows a side view of a bridge deck with three lanes. The total width is 2220. The width of the two outer lanes is 2110. The width of the central lane is 1950. Red arrows pointing outwards from the centerline represent the braking force q3. The arrows are positioned at the edges of the deck, with a distance of 1950 between the centerlines of the two outer lanes.

Q1k	75 kN	q3,tot =	183	kN
q1k	4,2 kN/m2	q3s,spalla =	64	kN
L	15,1 m		32	kN
w1	3 m			

Forza che verrà utilizzata prevalentemente per determinare le sollecitazioni su pile e spalle.

9.7 Azione Sismica

Come riportato al capitolo 7.3, la categoria di sottosuolo assunta è **C**

9.7.1 Vita nominale di progetto

Secondo il D.M. 17/01/18 la struttura rientra nella tipologia di costruzione n. 2 con livelli di prestazione ordinari. Tali costruzioni hanno una vita nominale di progetto **VN = 50 anni**.

Tabella 2.4.I – Vita nominale V_N per diversi tipi di opere

	Tipi di costruzione	Vita Nominale V_N (in anni)
1	Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva	≤ 10
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	≥ 50
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	≥ 100

9.7.2 Classe d'uso

Trattandosi di una costruzione in cui si prevedono affollamenti significativi, l'edificio rientra nella **IV classe d'uso (CU = 2)**.

<i>Classe I:</i>	Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.
<i>Classe II:</i>	Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in <i>Classe d'uso III</i> o in <i>Classe d'uso IV</i> , reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.
<i>Classe III:</i>	Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in <i>Classe d'uso IV</i> . Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.
<i>Classe IV:</i>	Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

9.7.3 Periodo di riferimento dell'azione sismica

Secondo quanto prescritto dalle NTC, la vita di riferimento viene calcolata come prodotto della vita nominale (VN) e del coefficiente d'uso (CU), legato alla classe d'uso.

$$VR = VN \cdot CU = 50 \cdot 2 = 100 \text{ anni.}$$

Noti tutti i dati necessari per la definizione della pericolosità sismica, ivi comprese anche le probabilità di superamento, è possibile determinare i periodi di ritorno per gli stati limite di riferimento, utilizzando l'espressione seguente:

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

Di seguito si riportano le probabilità di superamento per gli stati limite di esercizio e ultimi.

Stati Limite	P _{VR} : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V _R	
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

9.7.4 Fattore di Comportamento

Si adotta per la struttura in esame un comportamento non dissipativo con **fattore di comportamento pari a q=1.5**.

9.7.5 Spettri di risposta elastici e di Progetto

Si riportano gli spettri elastici in accelerazione, i quali tengono conto, oltre che della località, anche della tipologia di terreno e delle caratteristiche topografiche del sito, ma per essere applicati alla struttura saranno trasformati in spettri di progetto, i quali terranno conto della tipologia strutturale, del fattore di struttura, della regolarità in pianta ed in altezza.

Si riportano nel seguito gli spettri impiegati:

9.7.5.1.1.1	Categoria Suolo	9.7.5.1.1.2	C
9.7.5.1.1.3	Categoria Topografica	9.7.5.1.1.4	T1
9.7.5.1.1.5	Classe d'Uso	9.7.5.1.1.6	IV
9.7.5.1.1.7	Vita Nominale - V _n	9.7.5.1.1.8	50 anni
9.7.5.1.1.9	Periodo di Riferimento – V _r	9.7.5.1.1.10	100 anni
9.7.5.1.1.11	Classe di Duttilità della Struttura	9.7.5.1.1.12	Non dissipativa
9.7.5.1.1.13	Fattore di Comportamento (SLV) *	9.7.5.1.1.14	1,5
		9.7.5.1.1.15	

STATO LIMITE	T _R [anni]	α _g [g]	F ₀ [-]	T _C [*] [s]
SLO	60	0,038	2,559	0,262
SLD	101	0,047	2,513	0,307
SLV	949	0,107	2,623	0,398
SLC	1950	0,134	2,652	0,428

FASE 3. DETERMINAZIONE DELL'AZIONE DI PROGETTO

Stato Limite

Stato Limite considerato
SLV
info

Risposta sismica locale

Categoria di sottosuolo
C
info

Categoria topografica
T1
info

$S_s =$
1,500

$C_e =$
1,423
info

$h/H =$
0,000

$S_T =$
1,000
info

(h=quota sito, H=altezza rilievo topografico)

Compon. orizzontale

☒ Spettro di progetto elastico (SLE)

Smorzamento ξ (%)
5

$\eta =$
1,000
info

☐ Spettro di progetto inelastico (SLU)

Fattore α_s
1,5

Regol. in altezza
si
info

Compon. verticale

Spettro di progetto

Fattore α
1,5

$\eta =$
0,667
info

Elaborazioni

Grafici spettri di risposta

Parametri e punti spettri di risposta

— Spettro di progetto - componente orizzontale

— Spettro di progetto - componente verticale

— Spettro elastico di riferimento (Cat. A-T1, $\xi = 5\%$)

Spettri di risposta

INTRO

FASE 1

FASE 2

FASE 3

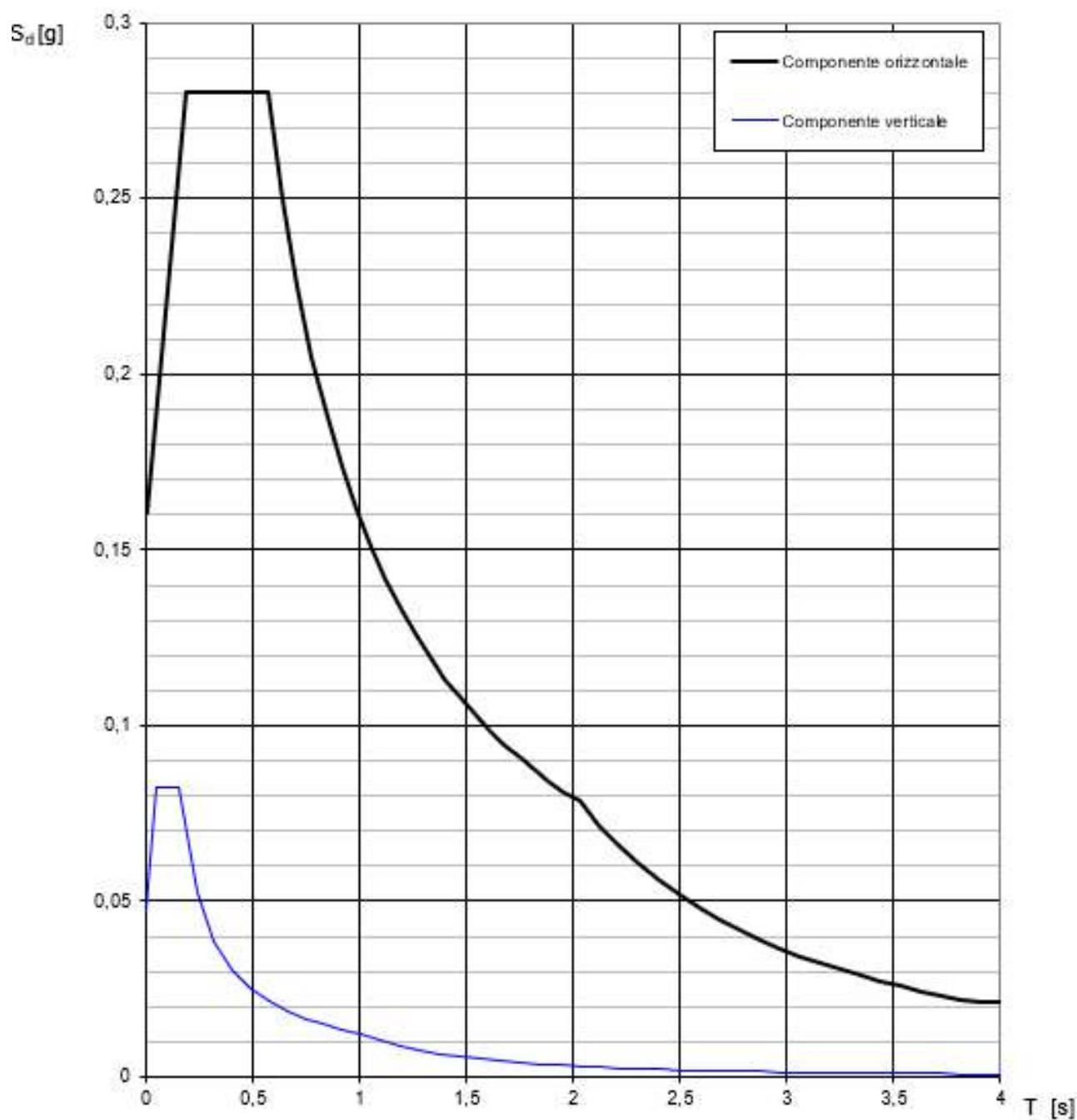
CLIENTE: CITTA' METROPOLITANA
 DI VENEZIA

PONTI ESISTENTI – AREA NORD CIG 9041138719
 Verifiche livello 4 – Ponte 05 – Torre di Mosto
 – SP57 – ID Opera 60

ELAB.: 21173P2115A

Rev. A - Pag. 67 di 159

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



10 COMBINAZIONI DI CARICO

Il metodo utilizzato per la verifica degli elementi strutturali è il metodo semiprobabilistico agli stati limite, secondo quanto espresso nelle NTC18 al §2.5.3.

Combinazione agli SLU:

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Combinazione rara agli SLE:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Combinazione frequente agli SLE:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Combinazione quasi permanente agli SLE:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Combinazione per azione sismica:

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$

10.1 Coefficienti sui carichi da NTC18

I coefficienti di combinazione sono espressi al cap. 5 delle NTC18 e riportati nelle seguenti tabelle:

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

		Coefficiente	EQU ^①	A1	A2
Azioni permanenti g_1 e g_3	favorevoli	γ_{G1} e γ_{G3}	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,10	1,35	1,00
Azioni permanenti non strutturali ^② g_2	favorevoli	γ_{G2}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Azioni variabili da traffico	favorevoli	γ_Q	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,35	1,35	1,15
Azioni variabili	favorevoli	γ_{Q8}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Distorsioni e presollecitazioni di progetto	favorevoli	γ_{d1}	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,00 ^③	1,00 ^④	1,00
Ritiro e viscosità, Cedimenti vincolari	favorevoli	$\gamma_{d2}, \gamma_{d3}, \gamma_{d4}$	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,20	1,20	1,00

^① Equilibrio che non coinvolga i parametri di deformabilità e resistenza del terreno; altrimenti si applicano i valori della colonna A2.

^② Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali o di una parte di essi (ad esempio carichi permanenti portati), sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

^③ 1,30 per instabilità in strutture con precompressione esterna

^④ 1,20 per effetti locali.

Tab. 5.1.VI - Coefficienti ψ per le azioni variabili per ponti stradali e pedonali

Azioni	Gruppo di azioni (Tab. 5.1.IV)	Coefficiente ψ_0 di combi- nazione	Coefficiente ψ_1 (valori frequentissimi)	Coefficiente ψ_2 (valori quasi permanenti)
Azioni da traffico (Tab. 5.1.IV)	Schema 1 (carichi tandem)	0,75	0,75	0,0
	Schemi 1, 5 e 6 (carichi distribuiti)	0,40	0,40	0,0
	Schemi 3 e 4 (carichi concentrati)	0,40	0,40	0,0
	Schema 2	0,0	0,75	0,0
	2	0,0	0,0	0,0
	3	0,0	0,0	0,0
	4 (folla)	--	0,75	0,0
	5	0,0	0,0	0,0
Vento	a ponte scarico SLU e SLE	0,6	0,2	0,0
	in esecuzione	0,8	0,0	0,0
	a ponte carico SLU e SLE	0,6	0,0	0,0
Neve	SLU e SLE	0,0	0,0	0,0
	in esecuzione	0,8	0,6	0,5
Temperatura	SLU e SLE	0,6	0,6	0,5

Per le opere di luce maggiore di 300 m è possibile modificare i coefficienti indicati in tabella previa autorizzazione del Servizio tecnico centrale del Consiglio superiore dei lavori pubblici, sentito lo stesso Consiglio.

10.2 Coefficienti sui carichi e materiali secondo Linee Guida

Le linee guida definiscono una serie di coefficienti che hanno dipendenza con la tipologia di controllo effettuato relativamente ai carichi permanenti e permanenti non strutturali, e dipendenza dalla tipologia di controllo dei mezzi che hanno accesso al transito sul manufatto relativamente ai carichi da traffico per le verifiche di transitabilità.

Per il caso in esame si ritiene, a seguito di opportune valutazioni, di adottare i seguenti criteri:

CARICHI:

Operatività e Transitabilità NTC

CONTROLLO ACCURATO:	carichi permanenti ($\gamma_G=1.16$)
CONTROLLO STANDARD:	carichi permanenti portati ($\gamma_G=1.26$)
TRAFFICO:	carichi da traffico secondo NTC ($\gamma_q=1.2$)

Transitabilità da Codice della Strada

CONTROLLO ACCURATO:	carichi permanenti ($\gamma_G=1.16$)
CONTROLLO STANDARD:	carichi permanenti portati ($\gamma_G=1.26$)
CdS LIVELLO 1:	carichi da traffico per verifiche transitabilità da CdS ($\gamma_{CdS}=1.6$)

COEFFICIENTI RIDUTTIVI PER I MATERIALI

Operatività e Transitabilità

CALCESTRUZZO:	$\gamma_c=1.26$
BARRE D'ARMATURA:	$\gamma_c=1.1$

10.3 Nomenclatura dei carichi e le combinazioni per le Normative in esame

Si riportano di seguito la nomenclatura dei carichi e le combinazioni per le Normative in esame.

10.3.1 Combinazioni per Verifica di Adeguatezza - NTC2018

CONDIZIONI ELEMENTARI DI CARICO

G	DL	Peso proprio delle strutture modellate
	DL non mod	Peso propri delle strutture non modellate
	G2 manto	Finiture del piano stradale
	G2 barriera	Peso proprio cordoli e barriera stradale
Q	NTC18-q5 orizz	Carichi da vento verticali agenti sull'impalcato
	NTC18-q5 vertic	Carichi da vento orizzontali agenti sull'impalcato
q1 Traffico	NTC18-q3	Carichi da accelerazione/frenata
	NTC18-T1	Traffico: Massimizzazione M+ campata
	NTC18-T2	Traffico: Massimizzazione V appoggio e Carico Verticale Spalla
	NTC18-T3	Traffico: Massimizzazione M/V soletta

		DL	G2	T1 (UDL)	T1 (tandem)	T2 (UDL)	T2 (tandem)	T3	q3	q5
		coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.
SLU	1	1,25	1,35	1,35	1,35	0	0	0	0	0
	2	1,25	1,35	0	0	1,35	1,35	0	0	0
	3	1,25	1,35	0	0	0	0	1,35	0	0
	4	1,25	1,35	0	0	0,54	1,0125	0	0	1,5
	5	1,25	1,35	0	0	0,54	1,0125	0	1,35	0

		DL	G2	EX	EY
		coeff.	coeff.		
SLV	1	1	1	1	0,3
	2	1	1	1	-0,3
	3	1	1	-1	0,3
	4	1	1	-1	-0,3
	5	1	1	0,3	1
	6	1	1	-0,3	1
	7	1	1	0,3	-1
	8	1	1	-0,3	-1

10.3.2 Combinazioni per Verifica di Operatività ($t_{ref}=30$ anni) - NTC2018

CONDIZIONI ELEMENTARI DI CARICO

G	DL	<i>Peso proprio delle strutture modellate</i>
	DL non mod	<i>Peso propri delle strutture non modellate</i>
	G2 manto	<i>Finiture del piano stradale</i>
	G2 barriera	<i>Peso proprio cordoli e barriera stradale</i>
Q	NTC18-q5 orizz	<i>Carichi da vento verticali agenti sull'impalcato</i>
	NTC18-q5 vertic	<i>Carichi da vento orizzontali agenti sull'impalcato</i>
	NTC18-q3	<i>Carichi da accelerazione/frenata</i>
q1 Traffico	NTC18-T1	<i>Traffico: Massimizzazione M+ campata</i>
	NTC18-T2	<i>Traffico: Massimizzazione V appoggio e Carico Verticale Spalla</i>
	NTC18-T3	<i>Traffico: Massimizzazione M/V soletta</i>

		DL	G2	T1 (UDL)	T1 (tandem)	T2 (UDL)	T2 (tandem)	T3 (UDL)	q3	q5
		coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.
SLU	1	1,16	1,26	1,2	1,2	0	0	0	0	0
SLU	2	1,16	1,26	0	0	1,2	1,2	0	0	0
SLU	3	1,16	1,26	0	0	0	0	1,2	0	0
SLU	4	1,16	1,26	0	0	0,48	0,9	0	0	1,5
SLU	5	1,16	1,26	0	0	0,48	0,9	0	1,2	0

10.3.3 Combinazioni per Verifica di Transitabilità ($t_{ref}=5$ anni) - NTC2018

CONDIZIONI ELEMENTARI DI CARICO

G	DL	Peso proprio delle strutture modellate
	DL non mod	Peso propri delle strutture non modellate
	G2 manto	Finiture del piano stradale
	G2 barriera	Peso proprio cordoli e barriera stradale
Q	NTC18-q5 orizz	Carichi da vento verticali agenti sull'impalcato
	NTC18-q5 vertic	Carichi da vento orizzontali agenti sull'impalcato
	NTC18-q3	Carichi da accelerazione/frenata
q1 Traffico	NTC18-T1	Traffico: Massimizzazione M+ campata
	NTC18-T2	Traffico: Massimizzazione V appoggio e Carico Verticale Spalla
	NTC18-T3	Traffico: Massimizzazione M/V soletta

		DL	G2	T1 (UDL)	T1 (tandem)	T2 (UDL)	T2 (tandem)	T3	q3	q5
		coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.
SLU	1	1,16	1,26	1,2	1,2	0	0	0	0	0
	2	1,16	1,26	0	0	1,2	1,2	0	0	0
	3	1,16	1,26	0	0	0	0	1,2	0	0
	4	1,16	1,26	0	0	0,48	0,9	0	0	1,26
	5	1,16	1,26	0	0	0,48	0,9	0	1,2	0

10.3.4 Combinazioni per Verifica di Transitabilità ($t_{ref}=5$ anni) – CdS – Mezzi pesanti (44t)

CONDIZIONI ELEMENTARI DI CARICO

G	DL	<i>Peso proprio delle strutture modellate</i>
	DL non mod	<i>Peso propri delle strutture non modellate</i>
	G2 manto	<i>Finiture del piano stradale</i>
	G2 barriera	<i>Peso proprio cordoli e barriera stradale</i>
Q	NTC18-q5 orizz	<i>Carichi da vento verticali agenti sull'impalcato</i>
	NTC18-q5 vertic	<i>Carichi da vento orizzontali agenti sull'impalcato</i>
q1 Traffico	CdS MP-q3	<i>Carichi da accelerazione/frenata</i>
	CdS MP-T1	<i>Traffico: Massimizzazione M+ campata</i>
	CdS MP-T2	<i>Traffico: Massimizzazione V appoggio e Carico Verticale Spalla</i>
	CdS MP-T3	<i>Traffico: Massimizzazione M/V soletta</i>

		DL	G2	T1 (UDL)	T1 (tandem)	T2 (UDL)	T2 (tandem)	T3	q3	q5
		coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.
SLU	1	1,16	1,26	1,6	1,6	0	0	0	0	0
SLU	2	1,16	1,26	0	0	1,6	1,6	0	0	0
SLU	3	1,16	1,26	0	0	0	0	1,6	0	0
SLU	4	1,16	1,26	0	0	0,64	1,2	0	0	1,26
SLU	5	1,16	1,26	0	0	0,64	1,2	0	1,6	0

10.3.5 Combinazioni per Verifica di Transitabilità ($t_{ref}=5$ anni) – CdS – Mezzi intermedi(26t)

CONDIZIONI ELEMENTARI DI CARICO

G	DL	<i>Peso proprio delle strutture modellate</i>
	DL non mod	<i>Peso propri delle strutture non modellate</i>
	G2 manto	<i>Finiture del piano stradale</i>
	G2 barriera	<i>Peso proprio cordoli e barriera stradale</i>
Q	NTC18-q5 orizz	<i>Carichi da vento verticali agenti sull'impalcato</i>
	NTC18-q5 vertic	<i>Carichi da vento orizzontali agenti sull'impalcato</i>
q1 Traffico	CdS MI-q3	<i>Carichi da accelerazione/frenata</i>
	CdS MI-T1	<i>Traffico: Massimizzazione M+ campata</i>
	CdS MI-T2	<i>Traffico: Massimizzazione V appoggio e Carico Verticale Spalla</i>
	CdS MI-T3	<i>Traffico: Massimizzazione M/V soletta</i>

		DL	G2	T1 (UDL)	T1 (landem)	T2 (UDL)	T2 (landem)	T3	q3	q5
		coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.
SLU	1	1,16	1,26	1,6	1,6	0	0	0	0	0
SLU	2	1,16	1,26	0	0	1,6	1,6	0	0	0
SLU	3	1,16	1,26	0	0	0	0	1,6	0	0
SLU	4	1,16	1,26	0	0	0,64	1,2	0	0	1,26
SLU	5	1,16	1,26	0	0	0,64	1,2	0	1,6	0

10.3.6 Combinazioni per Verifica di Transitabilità ($t_{ref}=5$ anni) – CdS – Mezzi leggeri (7.5t)

CONDIZIONI ELEMENTARI DI CARICO

G	DL	Peso proprio delle strutture modellate
	DL non mod	Peso propri delle strutture non modellate
	G2 manto	Finiture del piano stradale
	G2 barriera	Peso proprio cordoli e barriera stradale
Q	NTC18-q5 orizz	Carichi da vento verticali agenti sull'impalcato
	NTC18-q5 vertic	Carichi da vento orizzontali agenti sull'impalcato
q1 Traffico	CdS ML-q3	Carichi da accelerazione/frenata
	CdS ML-T1	Traffico: Massimizzazione M+ campata
	CdS ML-T2	Traffico: Massimizzazione V appoggio e Carico Verticale Spalla
	CdS ML-T3	Traffico: Massimizzazione M/V soletta

		DL	G2	T1 (UDL)	T1 (tandem)	T2 (UDL)	T2 (tandem)	T3	q3	q5
		coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.	coeff.
SLU	1	1,16	1,26	1,6	1,6	0	0	0	0	0
	2	1,16	1,26	0	0	1,6	1,6	0	0	0
	3	1,16	1,26	0	0	0	0	1,6	0	0
	4	1,16	1,26	0	0	0,64	1,2	0	0	1,26
	5	1,16	1,26	0	0	0,64	1,2	0	1,6	0

11 MODELLAZIONE E CRITERI DI VERIFICA

11.1 Tipo di analisi svolta

Le analisi sono svolte sia per gli impalcati sia per le spalle. Il presente studio verifica la resistenza della struttura ai carichi statici dovuti al traffico veicolare ed al sisma.

Le analisi strutturali utilizzate per lo studio dell'opera sono di tipo elastiche lineari statiche e dinamiche spettrali a spettro di risposta (fino ad eccitare almeno l'85% della massa in entrambe le direzioni orizzontali).

Per quanto riguarda le analisi sismiche, in accordo a §C8.8 di CNTC18 e §7.9 di NTC18, si utilizza in prima istanza un'analisi lineare dinamica a spettro di risposta con un fattore di comportamento pari a $q = 1.5$ in entrambe le direzioni longitudinale e trasversale.

I metodi di verifica saranno condotti in accordo a §7.9 di NTC18.

11.2 Modello Tridimensionale mediante FEM

L'impalcato è modellato a graticcio, con travi principali modellate a beam mediante sezione a "T", tenendo quindi conto dell'effetto della soletta superiore nella rigidezza dell'elemento. Nella direzione trasversale sono stati modellati elementi di larghezza pari ad 1 metro, i quali approssimano l'effetto di ripartizione trasversale dato dalla soletta soprastante; a questi ultimi è stato conferito un materiale con massa nulla, in quanto il loro peso è già conteggiato all'interno della trave principale modellata a "T".

Le spalle sono modellate con geometria aderente a quanto riportato nei progetti dell'epoca, mediante elementi di tipo plate sia per il muro frontale sia per il paraghiaia. I vincoli alla base delle stesse sono schematizzati mediante cerniere, in corrispondenza di ciascun palo di fondazione.

Non essendo stati riscontrati specifici vincoli di appoggio (ma solamente cuscinetti in neoprene), le travi principali sono state semplicemente connesse alle spalle mediante vincoli rigidi in grado di bloccare le traslazioni ma mantenere libere le rotazioni in quanto, come già approfondito nei paragrafi precedenti, ogni trave dipendente schema statico in semplice appoggio.

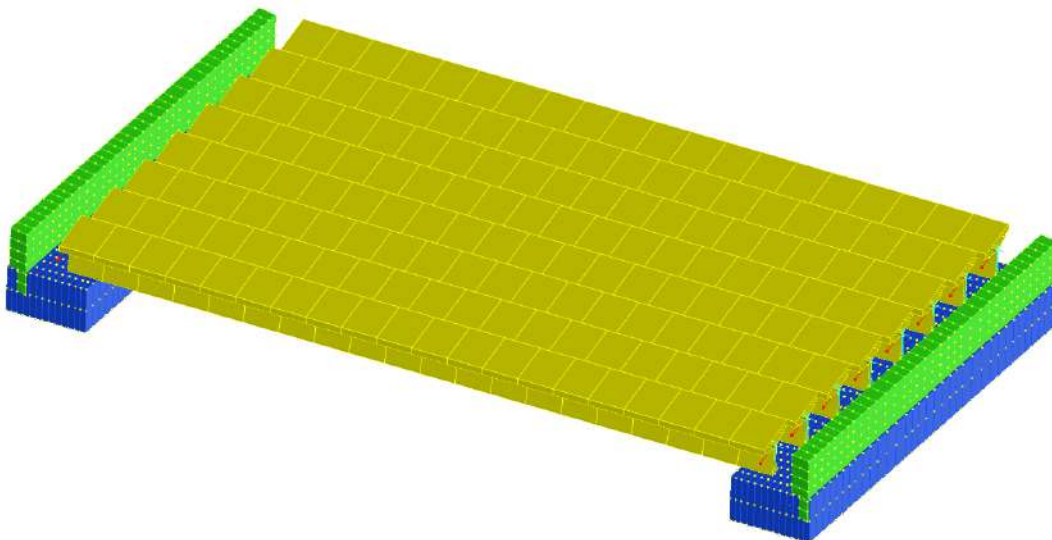


FIGURA 11-1: MODELLO FEM TRIDIMENSIONALE– VISTA SUPERIORE

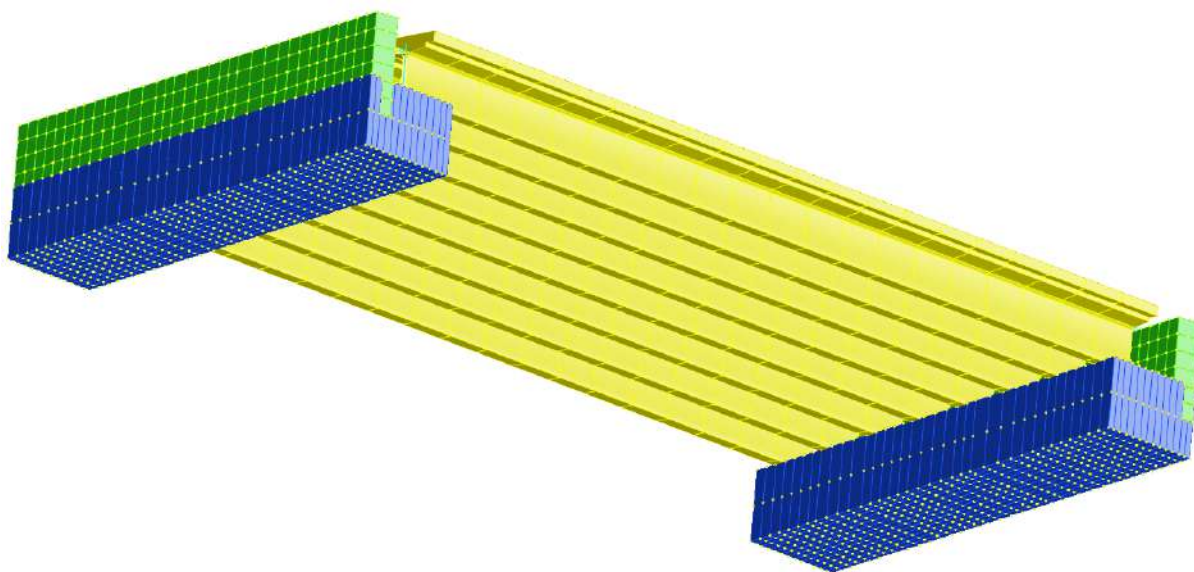


FIGURA 11-2: MODELLO FEM TRIDIMENSIONALE– VISTA INFERIORE

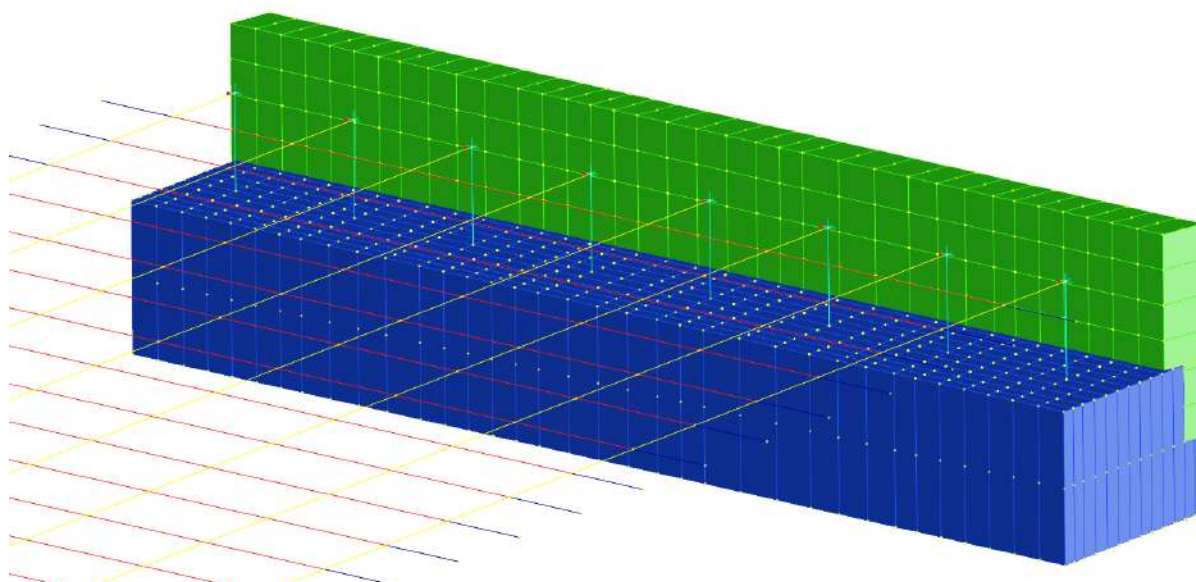


FIGURA 11-3: MODELLO FEM TRIDIMENSIONALE– VISTA ELEMENTI SPALLE

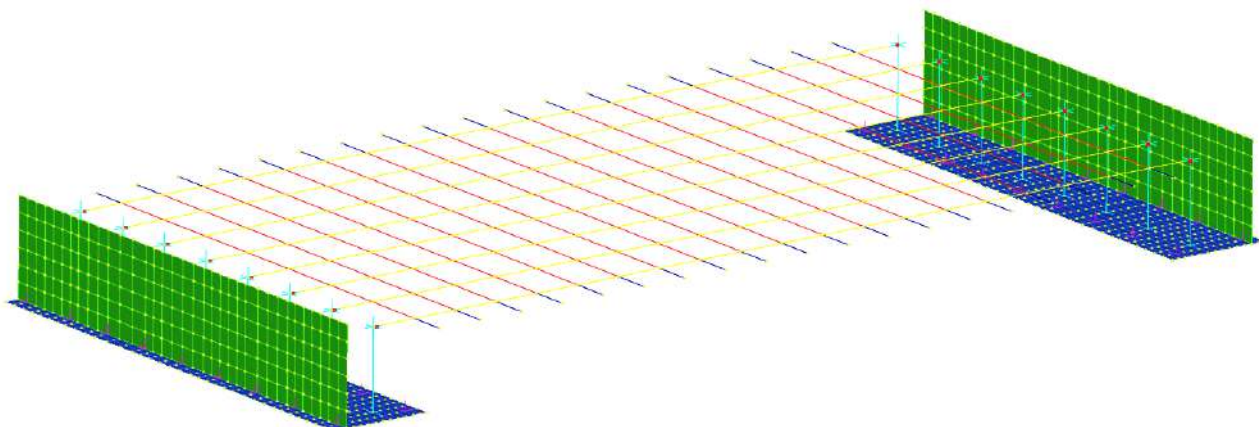


FIGURA 11-4: MODELLO FEM TRIDIMENSIONALE— MODELLO WIREFRAME

12 SOLLECITAZIONI

12.1 Sollecitazioni per Pesi Propri, Permanenti Portati e Precompressione

12.1.1 Peso Proprio Modellato

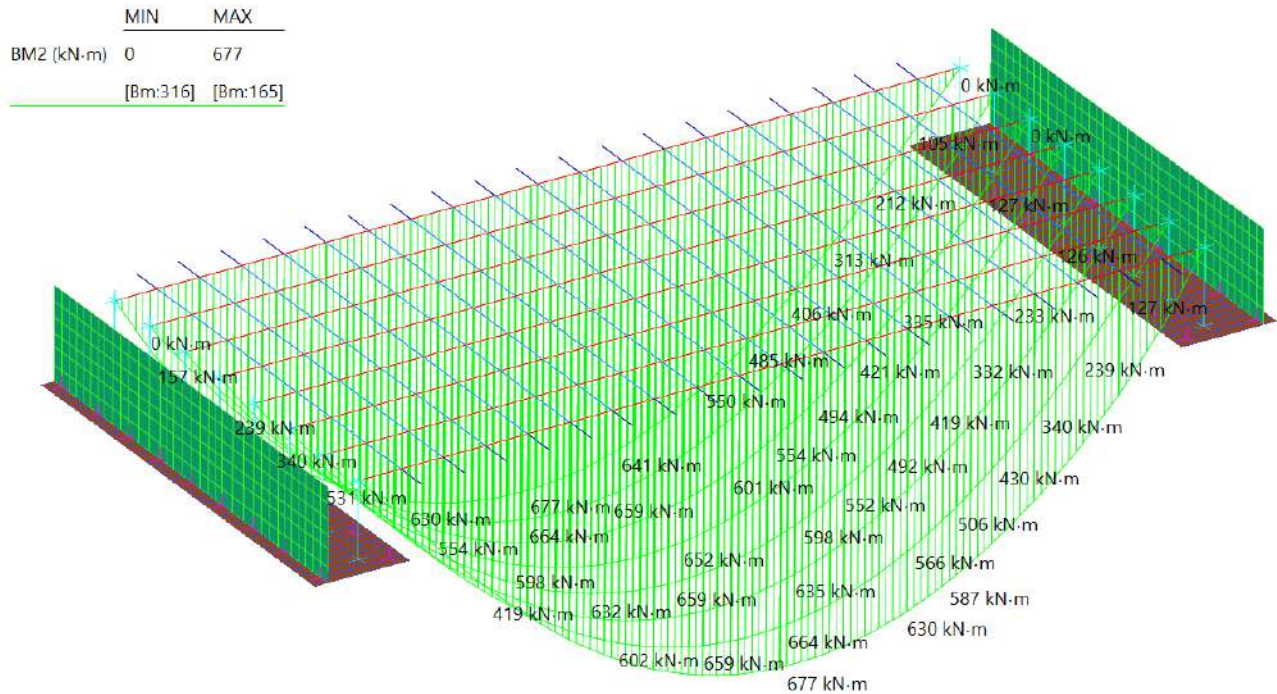


FIGURA 12-1: MOMENTO FLETTENTE IMPALCATO

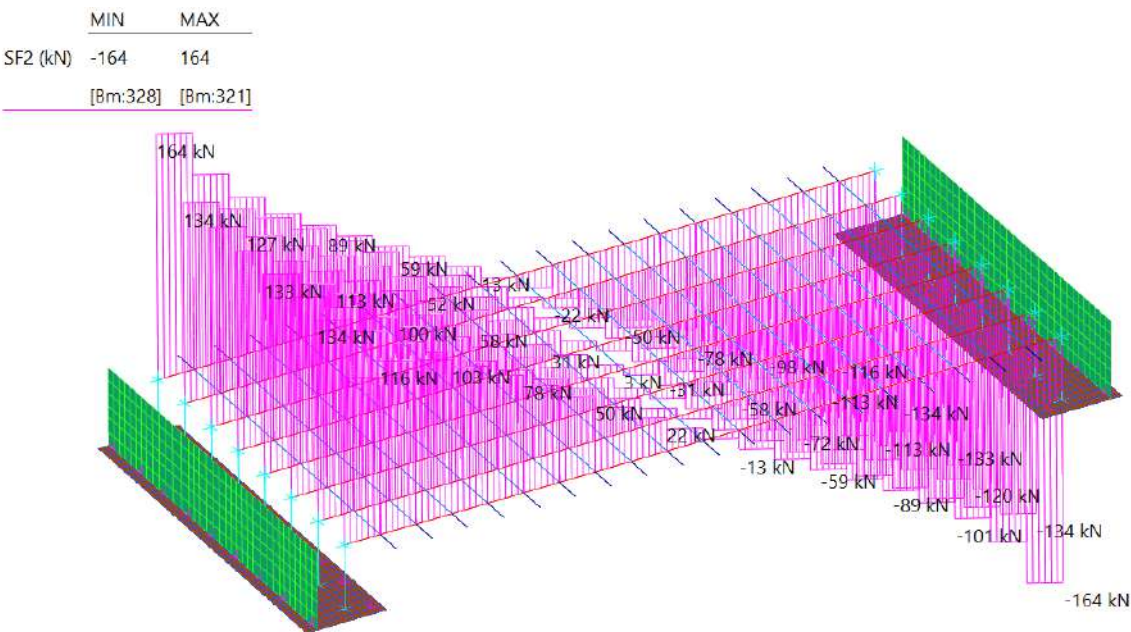


FIGURA 12-2: AZIONE TAGLIANTE IMPALCATO

12.1.2 Peso permanente portato - pavimentazione

	MIN	MAX
BM2 (kN·m)	0	127
	[Bm:316]	[Bm:149]

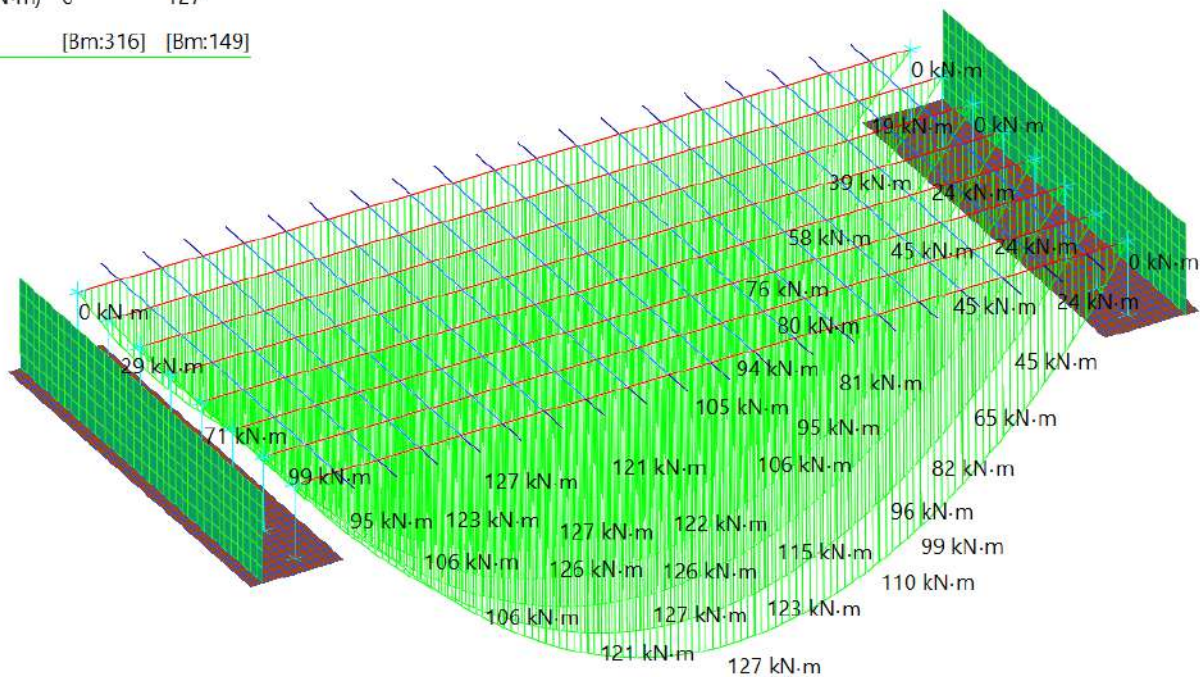


FIGURA 12-3: MOMENTO FLETTENTE IMPALCATO

	MIN	MAX
SF2 (kN)	-31	31
	[Bm:328]	[Bm:321]

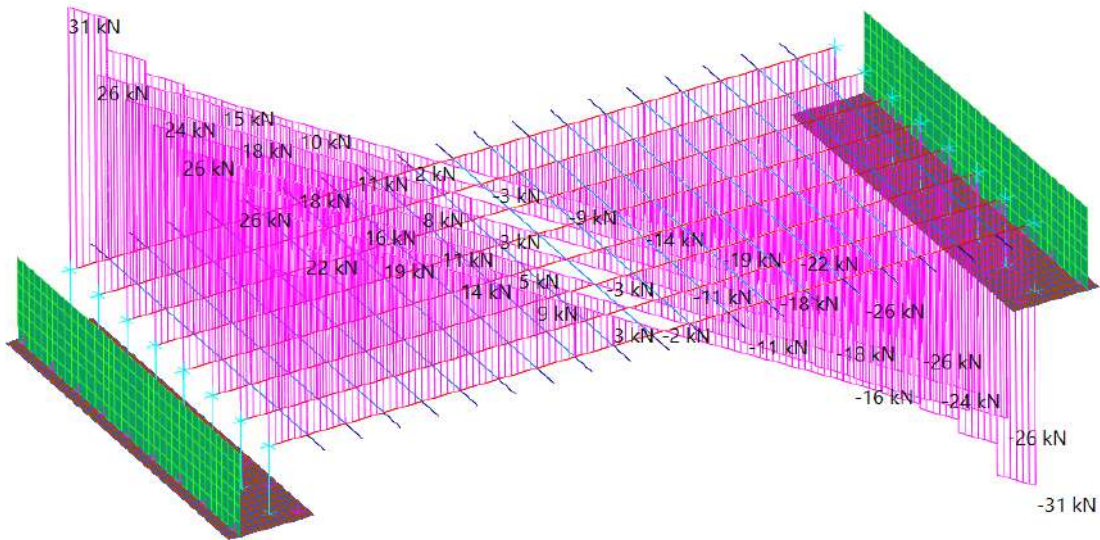


FIGURA 12-4: AZIONE TAGLIANTE IMPALCATO

Peso permanente portato - barriere

	MIN	MAX
BM2 (kN·m)	0	24
	[Bm:324]	[Bm:165]

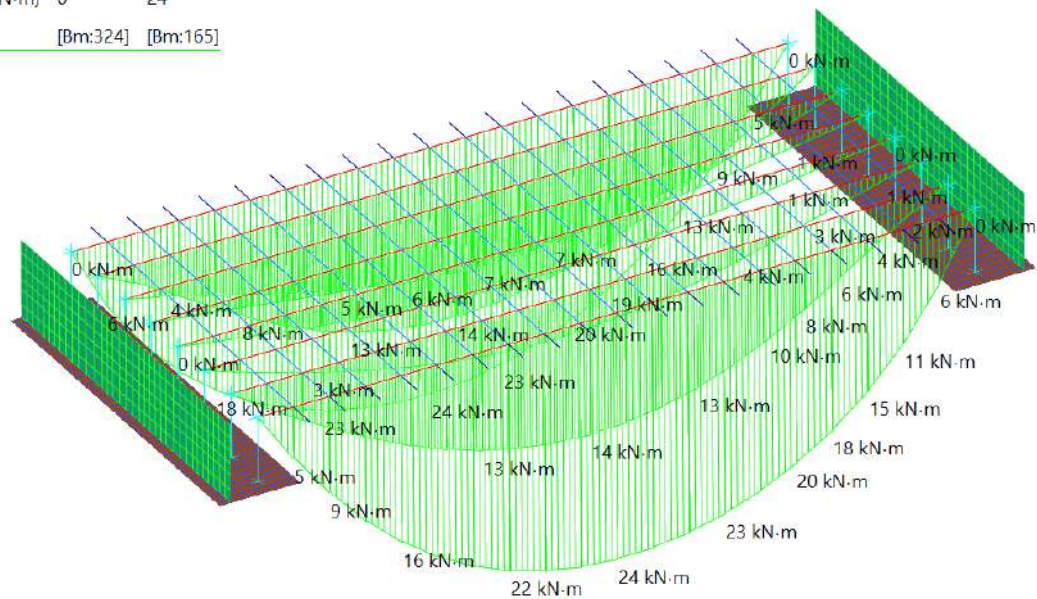


FIGURA 12-5: MOMENTO FLETTENTE IMPALCATO

	MIN	MAX
SF2 (kN)	-6	6
	[Bm:328]	[Bm:321]

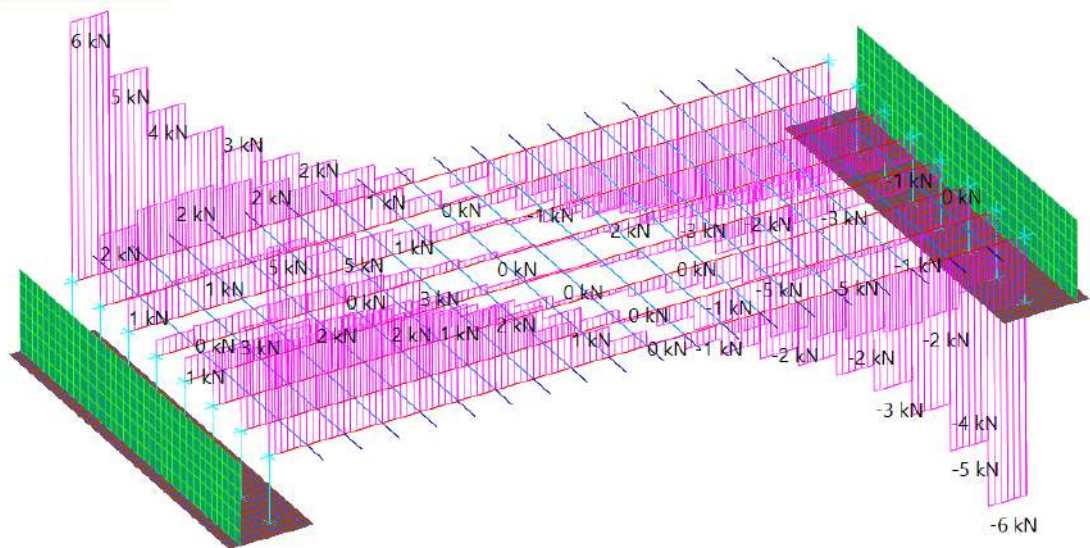


FIGURA 12-6: AZIONE TAGLIANTE IMPALCATO

12.1.3 Precompressione

Visto il tracciato rettilineo dei trefoli costituenti l'armatura pre-tesa, la sollecitazione flettente derivante è pari a $M = - N_p \times e$, dove l'eccentricità è pari a $(86,11 - 32,14) = 53,97$ cm.

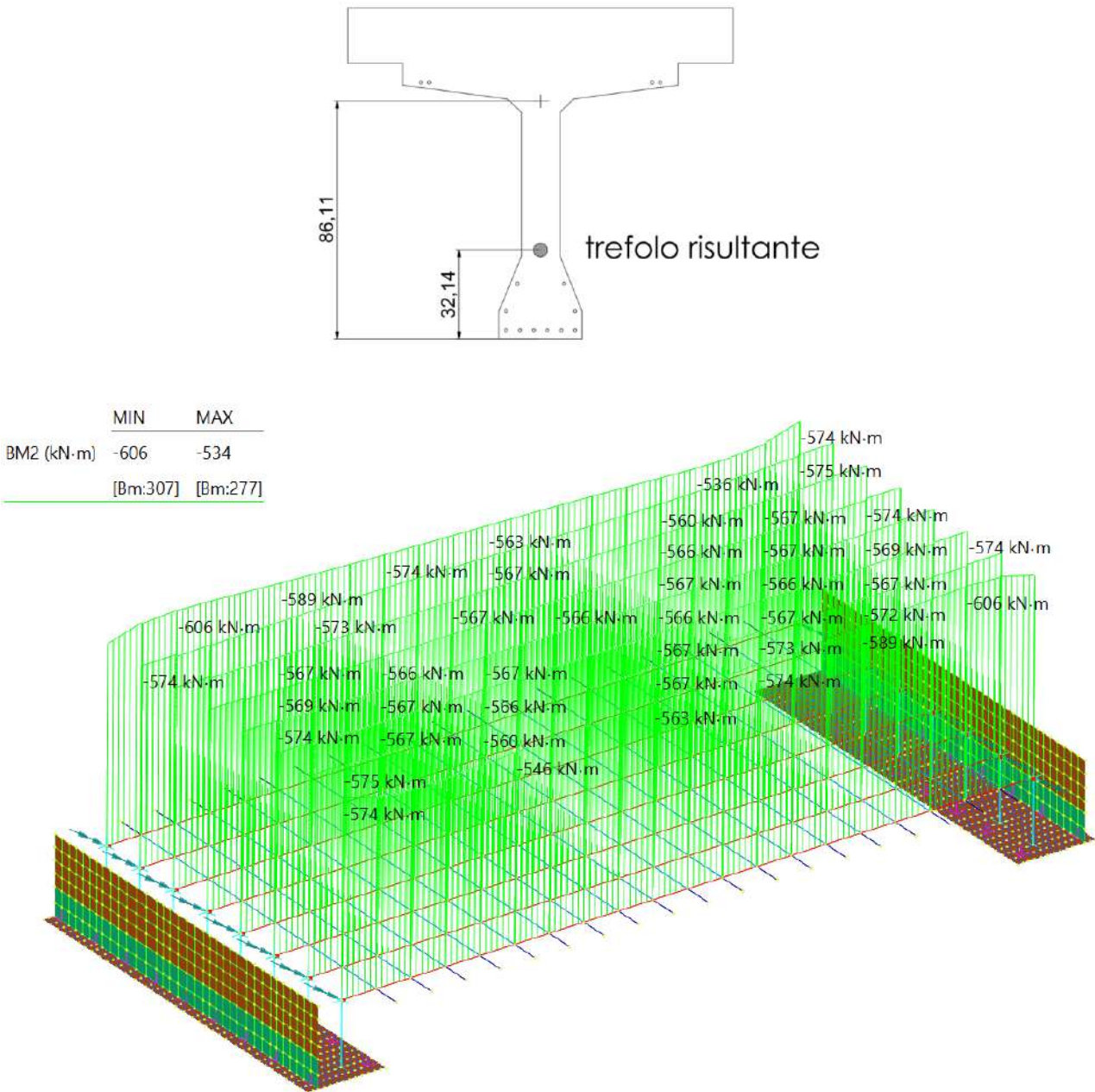


FIGURA 12-7: MOMENTO FLETTENTE IMPALCATO

12.2 Sollecitazioni secondo NTC2018

12.2.1 Schema traffico Adeguatezza/Operatività NTC2018 - T1

	MIN	MAX
BM2 (kN·m)	0	1627
	[Bm:321]	[Bm:149]

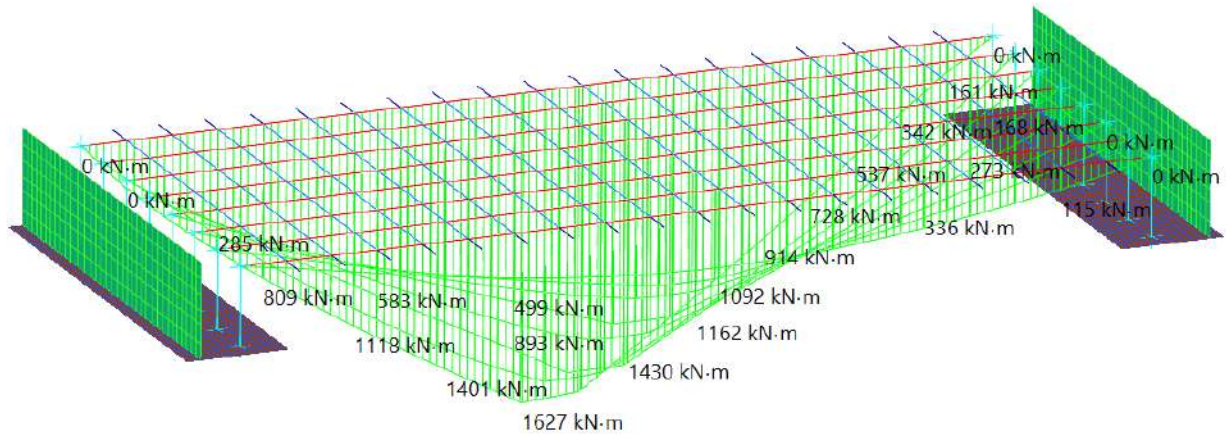


FIGURA 12-8: MOMENTO FLETTENTE IMPALCATO

	MIN	MAX
SF2 (kN)	-223	264
	[Bm:325]	[Bm:321]

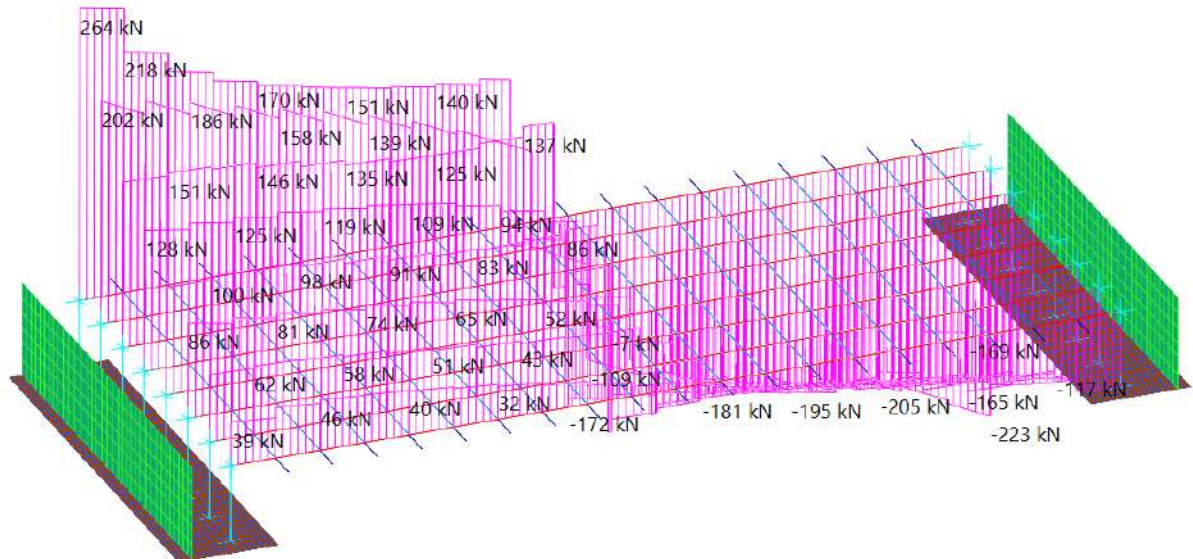


FIGURA 12-9: AZIONE TAGLIANTE IMPALCATO

12.2.2 Schema traffico Adeguatezza/Operatività NTC2018 - T2

	MIN	MAX
BM2 (kN·m)	0	554
	[Bm:320]	[Bm:133]

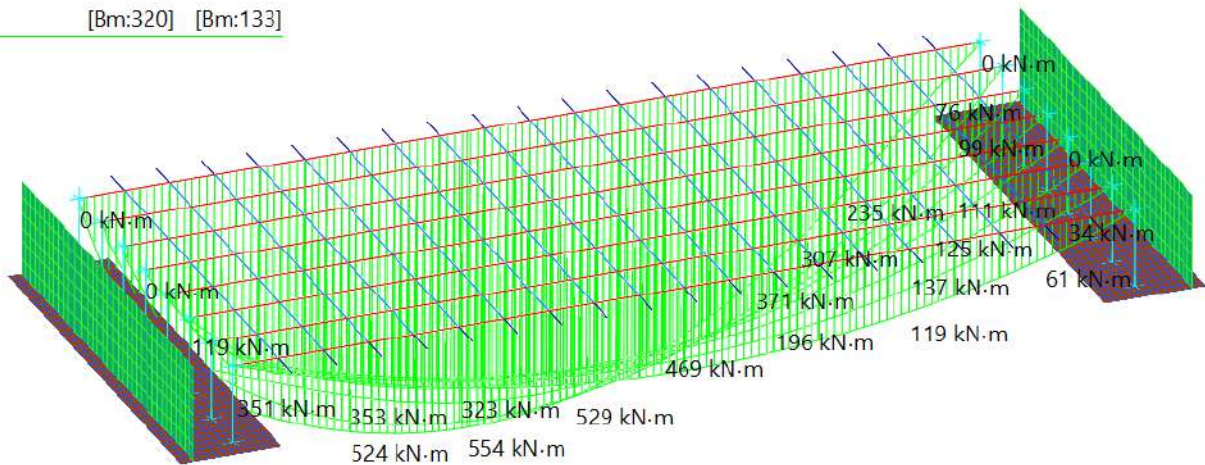


FIGURA 12-10: MOMENTO FLETTENTE IMPALCATO

	MIN	MAX
SF2 (kN)	-110	397
	[Bm:325]	[Bm:321]

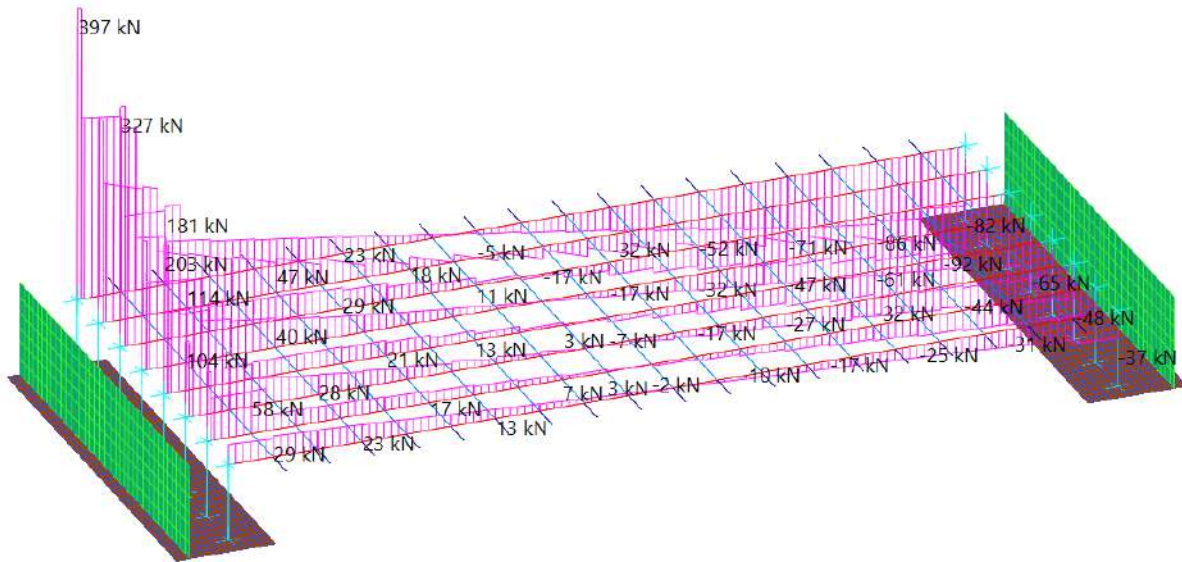


FIGURA 12-11: AZIONE TAGLIANTE IMPALCATO

12.2.3 Schema traffico Adeguatezza/Operatività NTC2018 – T3

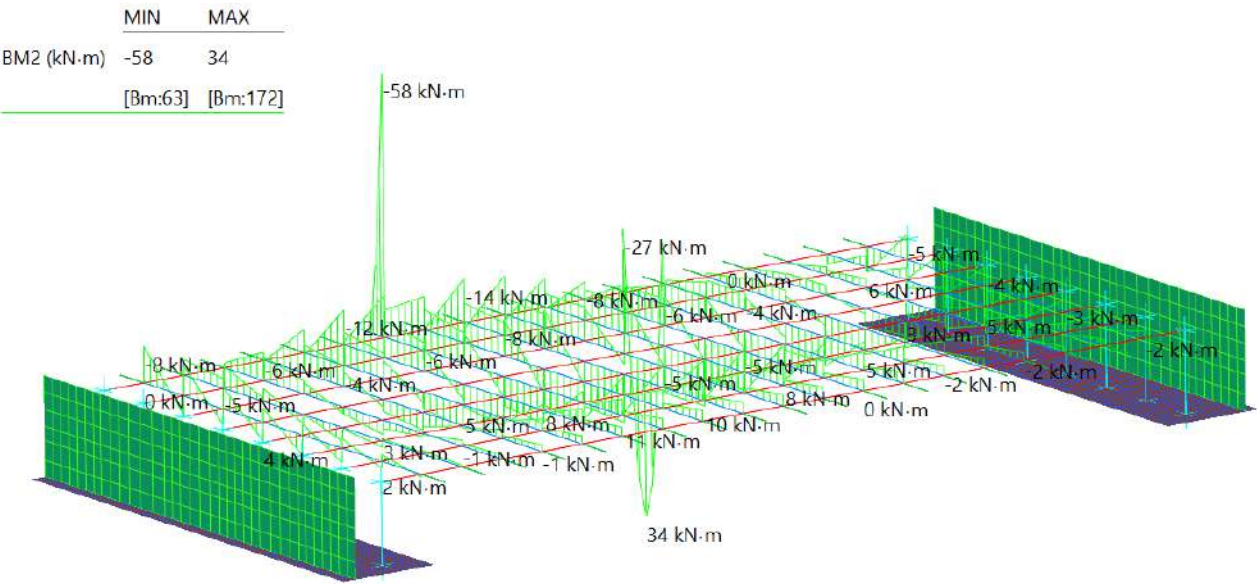


FIGURA 12-12: MOMENTO FLETTENTE SOLETTA

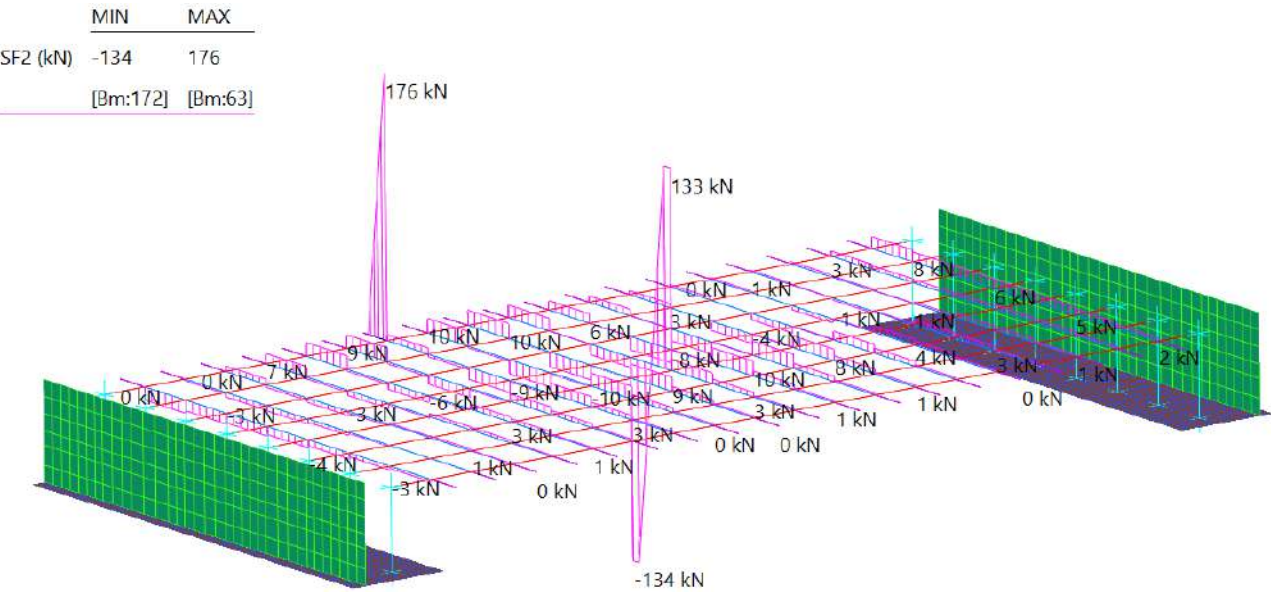


FIGURA 12-13: AZIONE TAGLIANTE SOLETTA

12.3 Sollecitazioni secondo CdS - Mezzi pesanti 44 ton

12.3.1 Schema traffico Adeguatezza/Operatività CdS MP -T1

	MIN	MAX
BM2 (kN·m)	0	896
	[Bm:324]	[Bm:153]

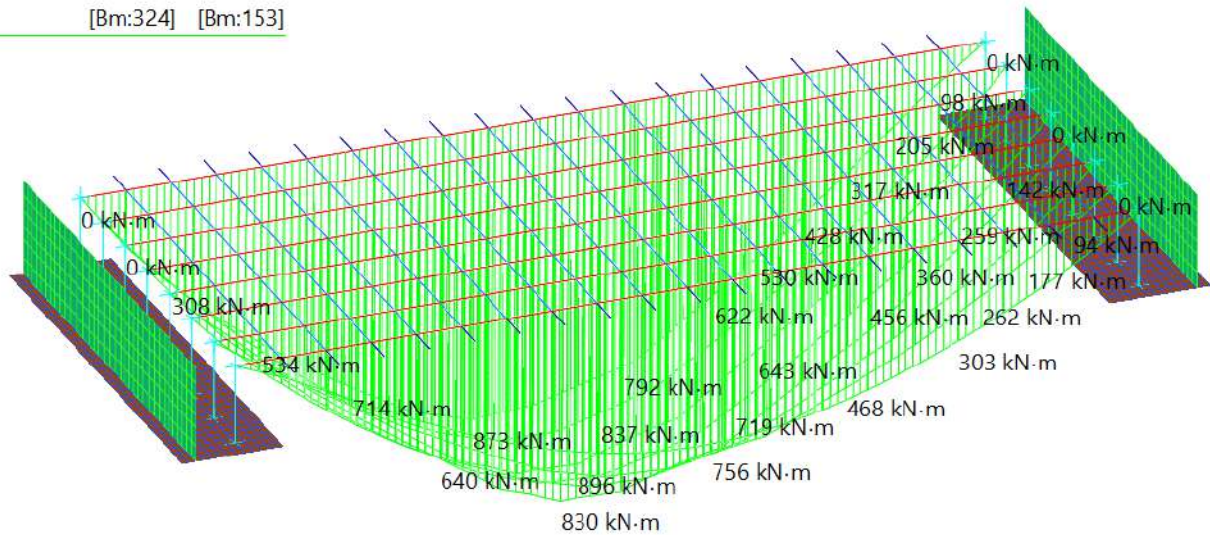


FIGURA 12-14: MOMENTO FLETTENTE IMPALCATO

	MIN	MAX
SF2 (kN)	-157	181
	[Bm:330]	[Bm:321]

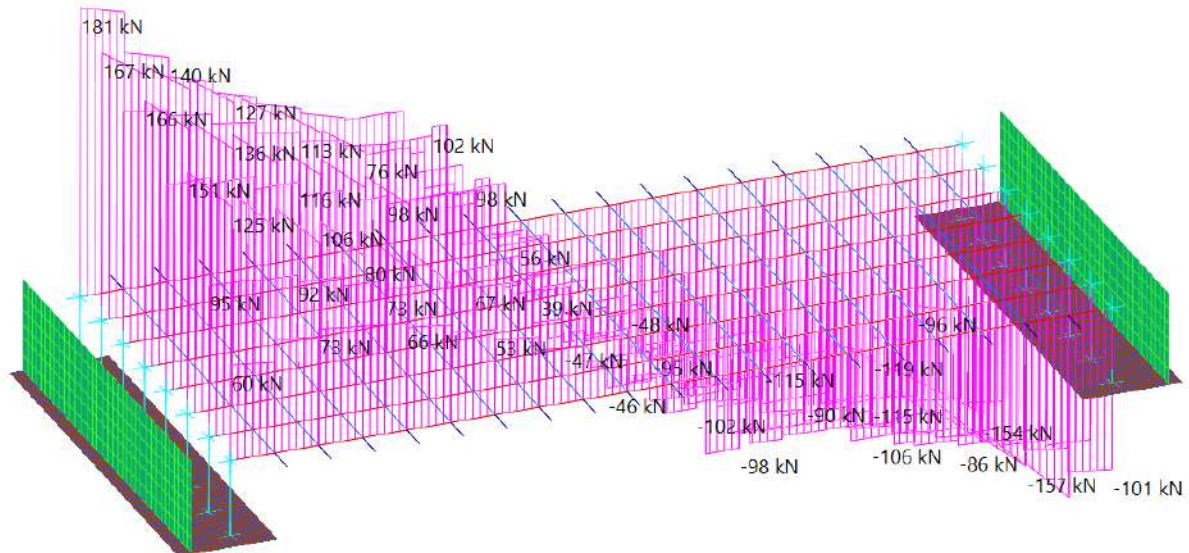


FIGURA 12-15: AZIONE TAGLIANTE IMPALCATO

12.3.2 Schema traffico Adeguatezza/Operatività CdS MP -T2

	MIN	MAX
BM2 (kN·m)	0	603
	[Bm:322]	[Bm:137]

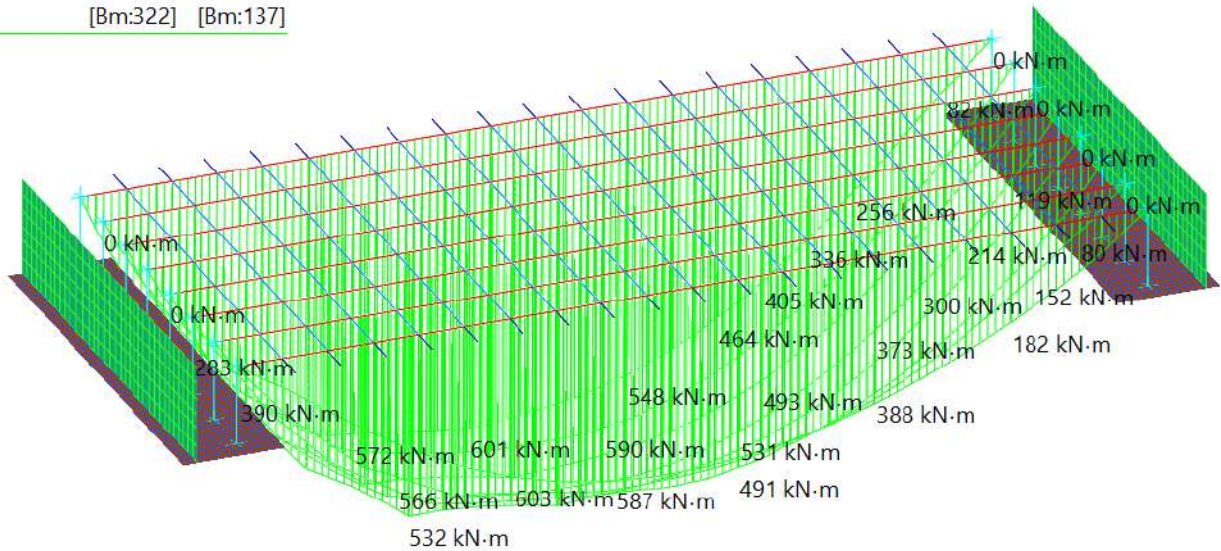


FIGURA 12-16: MOMENTO FLETTENTE IMPALCATO

	MIN	MAX
SF2 (kN)	-133	215
	[Bm:330]	[Bm:319]

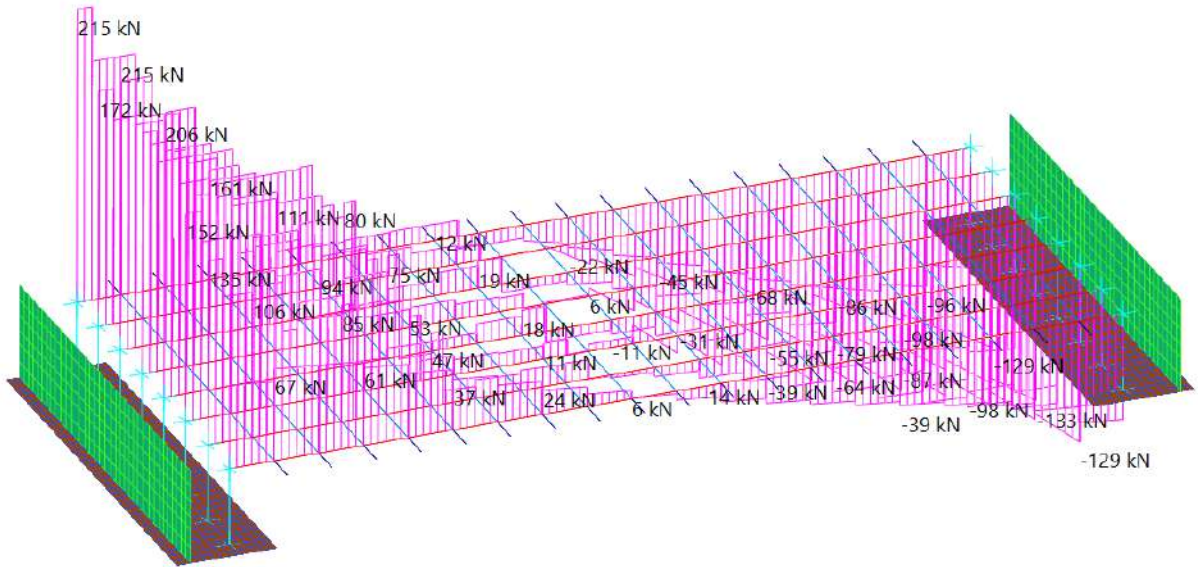


FIGURA 12-17: AZIONE TAGLIANTE IMPALCATO

12.3.3 Schema traffico Adeguatezza/Operatività CdS MP -T3

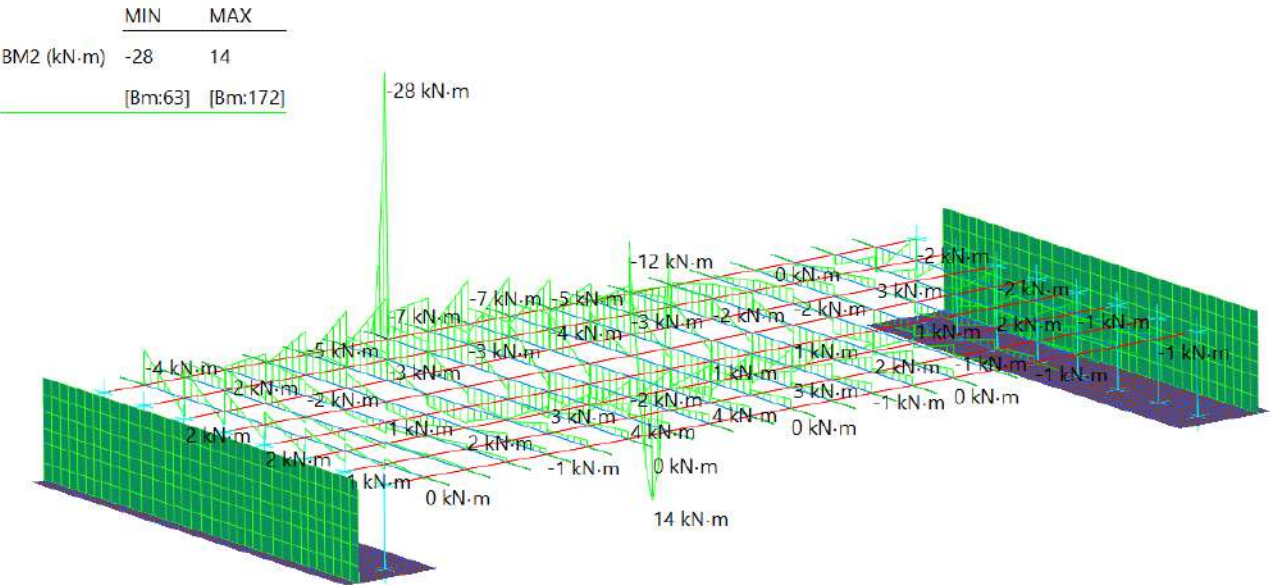


FIGURA 12-18: MOMENTO FLETTENTE SOLETTA

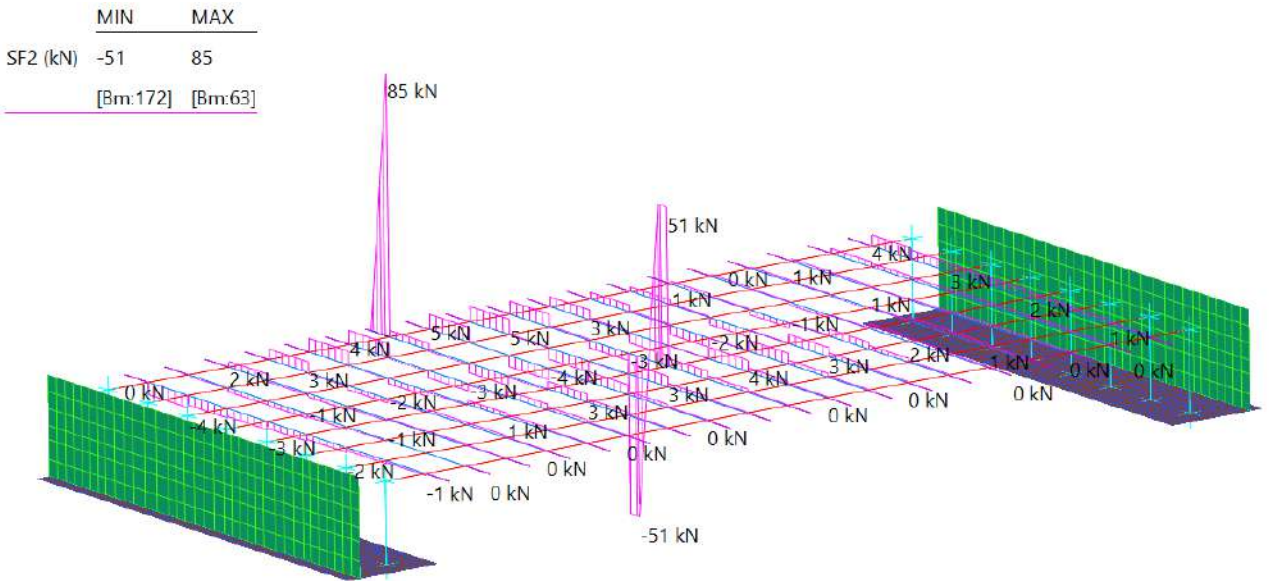


FIGURA 12-19: AZIONE TAGLIANTE SOLETTA

12.4 Sollecitazioni secondo CdS - Mezzi intermedi 26 ton

12.4.1 Schema traffico Adeguatezza/Operatività CdS MI -T1

	MIN	MAX
BM2 (kN·m)	0	647
	[Bm:331]	[Bm:169]

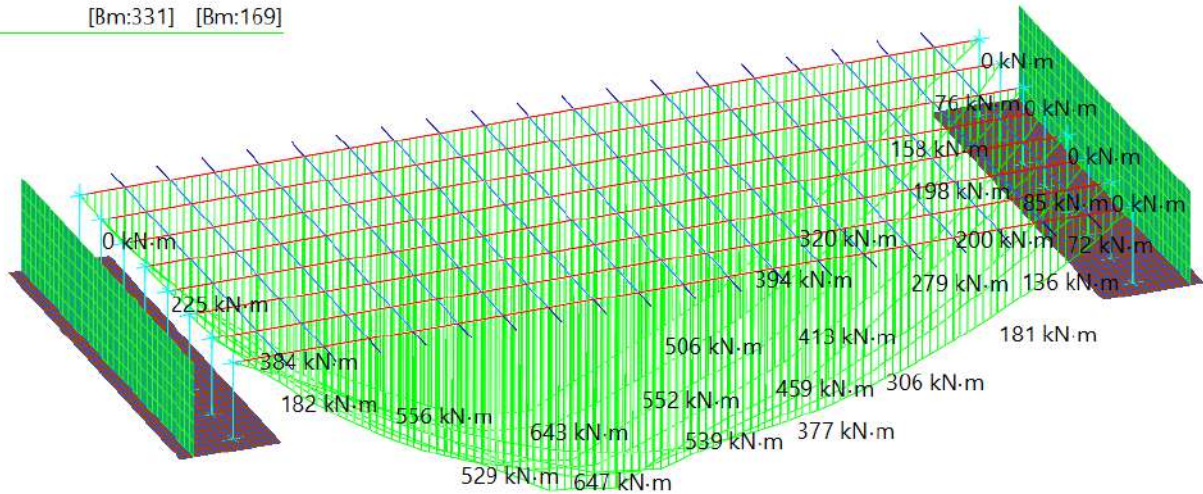


FIGURA 12-20: MOMENTO FLETTENTE IMPALCATO

	MIN	MAX
SF2 (kN)	-122	132
	[Bm:330]	[Bm:321]

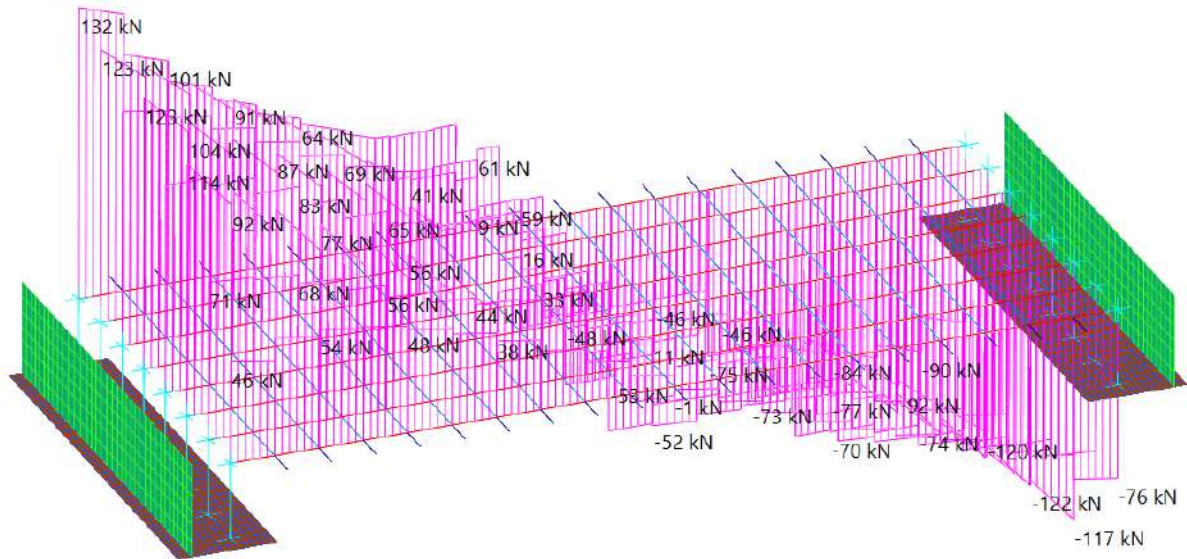


FIGURA 12-21: AZIONE TAGLIANTE IMPALCATO

SCHEMA TRAFFICO ADEGUATEZZA/OPERATIVITÀ CDS MI -T2

	MIN	MAX
BM2 (kN·m)	0	481
	[Bm:316]	[Bm:151]

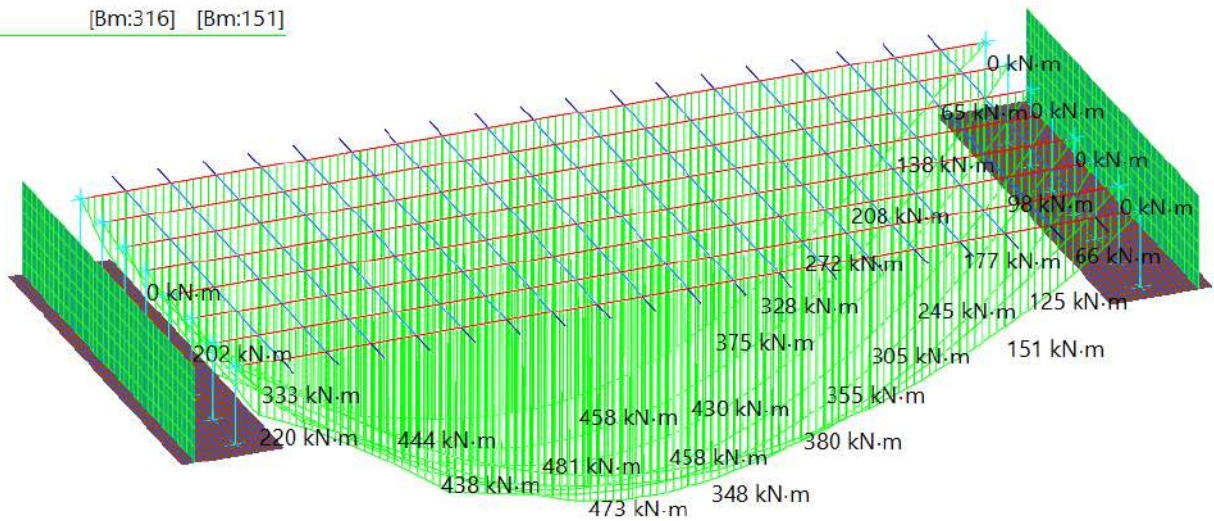


FIGURA 12-22: MOMENTO FLETTENTE IMPALCATO

	MIN	MAX
SF2 (kN)	-110	164
	[Bm:330]	[Bm:321]

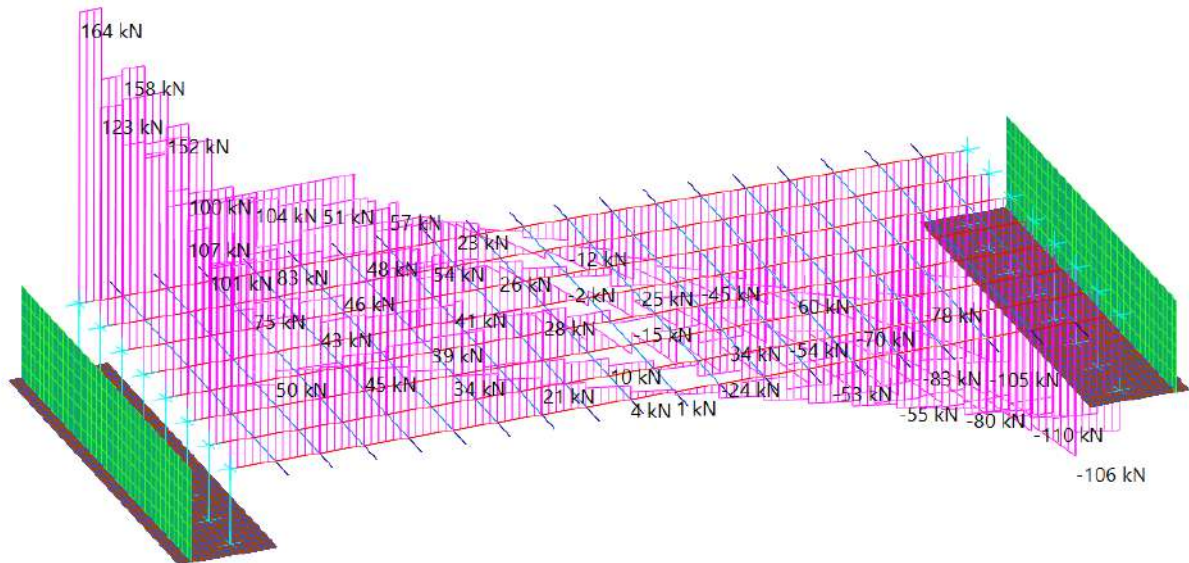


FIGURA 12-23: AZIONE TAGLIANTE IMPALCATO

12.4.2 Schema traffico Adeguatezza/Operatività CdS MI -T3

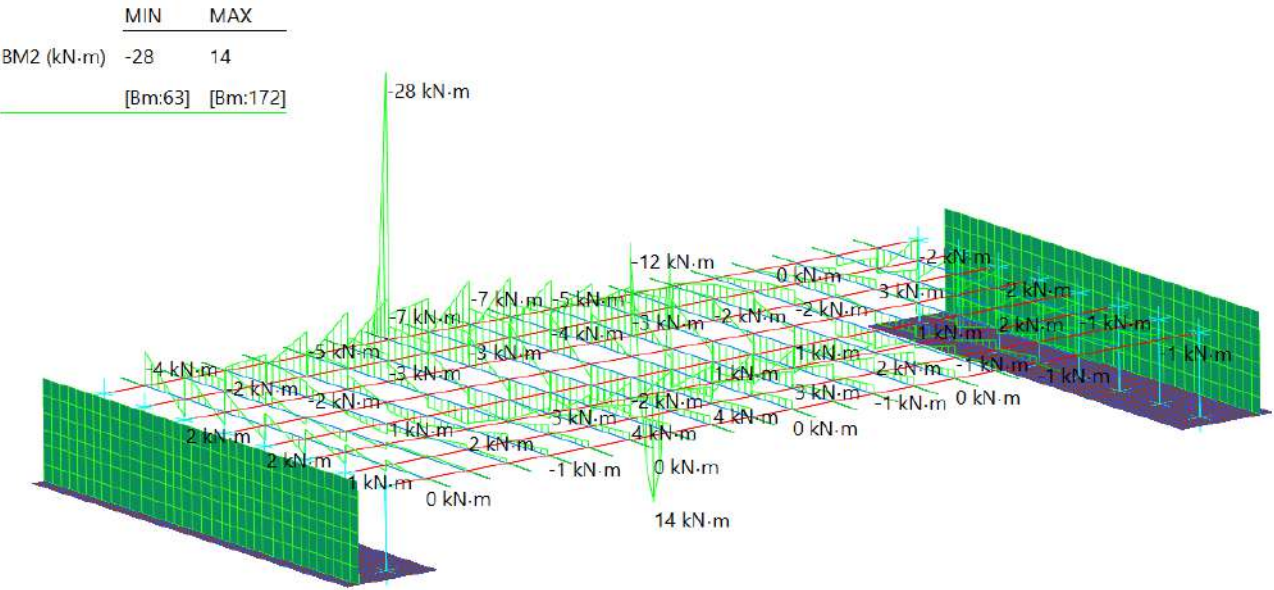


FIGURA 12-24: MOMENTO FLETTENTE SOLETTA

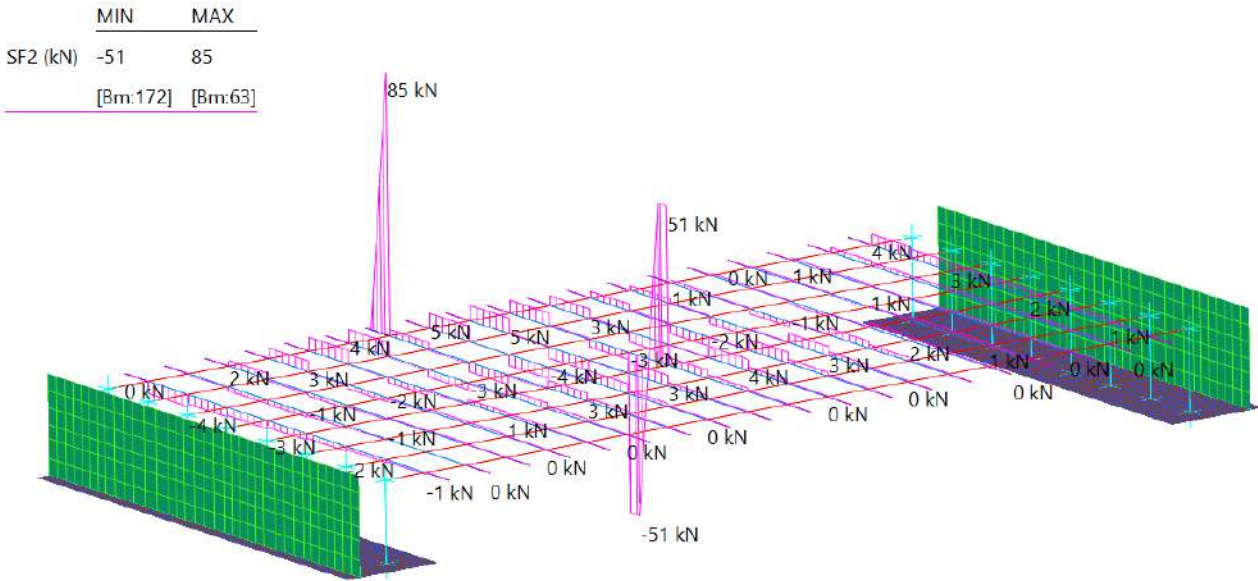


FIGURA 12-25: AZIONE TAGLIANTE SOLETTA

12.5 Sollecitazioni secondo CdS - Mezzi leggeri 7.5 ton

12.5.1 Schema traffico Adeguatezza/Operatività CdS ML -T1

	MIN	MAX
BM2 (kN·m)	0	289
	[Bm:324]	[Bm:153]

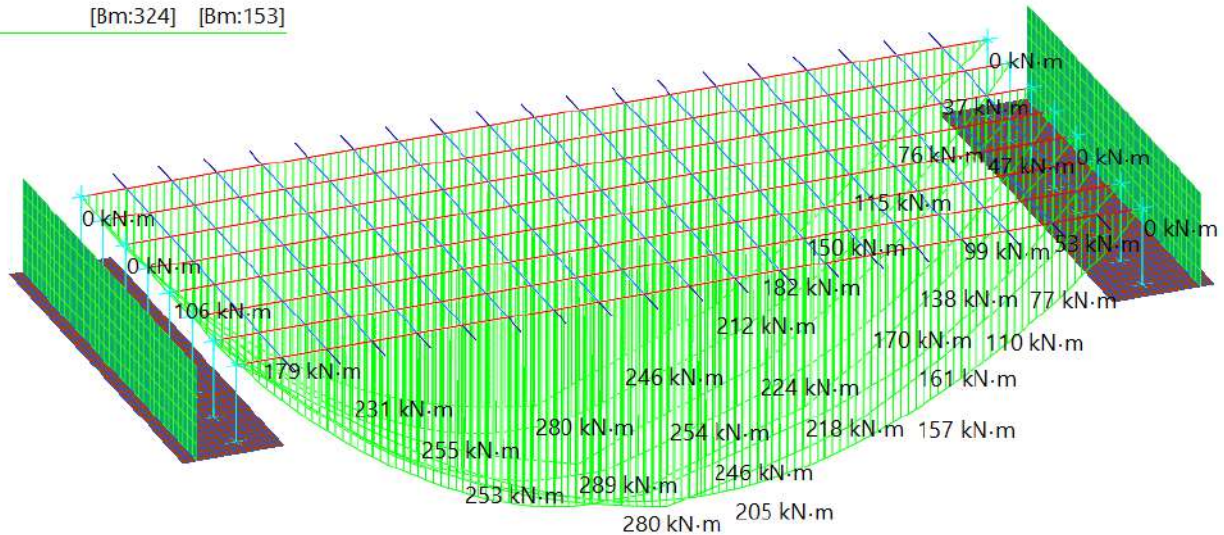


FIGURA 12-26: MOMENTO FLETTENTE IMPALCATO

	MIN	MAX
SF2 (kN)	-62	63
	[Bm:326]	[Bm:321]

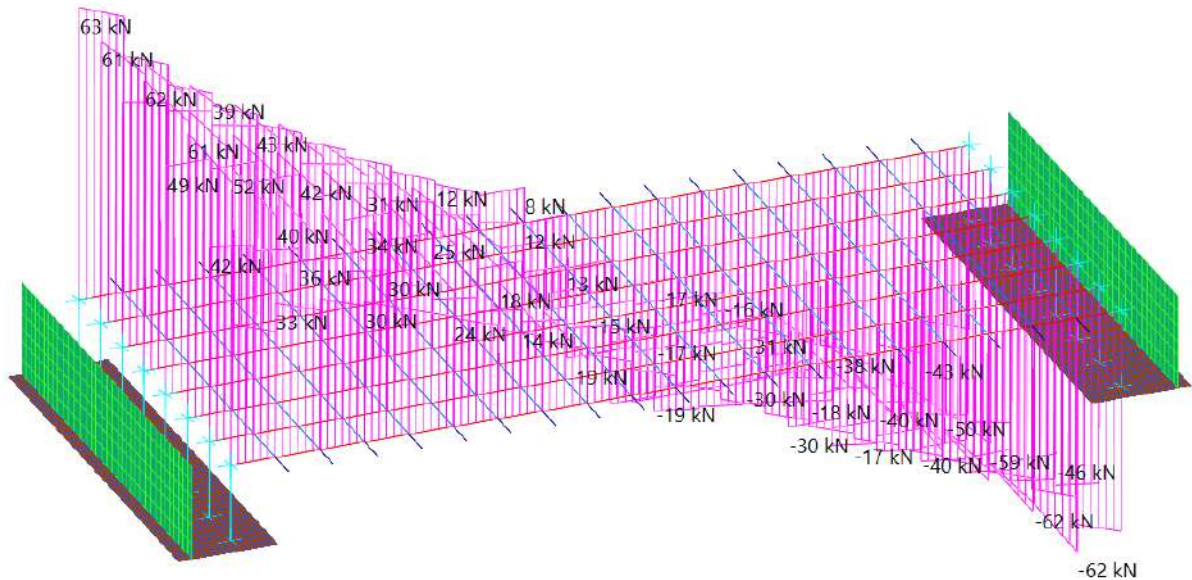


FIGURA 12-27: AZIONE TAGLIANTE IMPALCATO

12.5.2 Schema traffico Adeguatezza/Operatività CdS ML -T2

	MIN	MAX
BM2 (kN·m)	0	259
	[Bm:320]	[Bm:171]

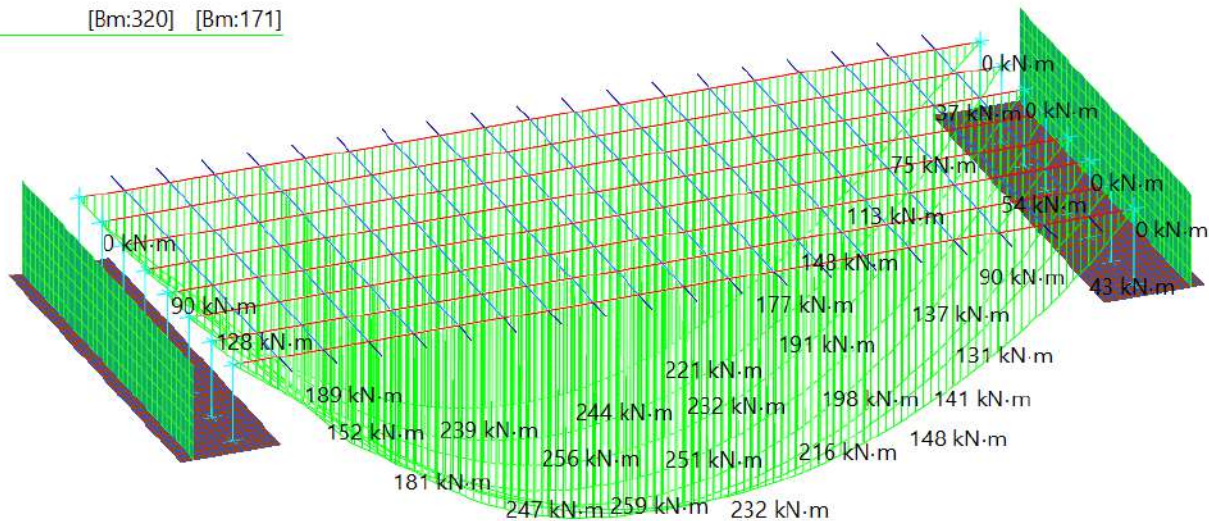


FIGURA 12-28: MOMENTO FLETTENTE IMPALCATO

	MIN	MAX
SF2 (kN)	-61	74
	[Bm:330]	[Bm:321]

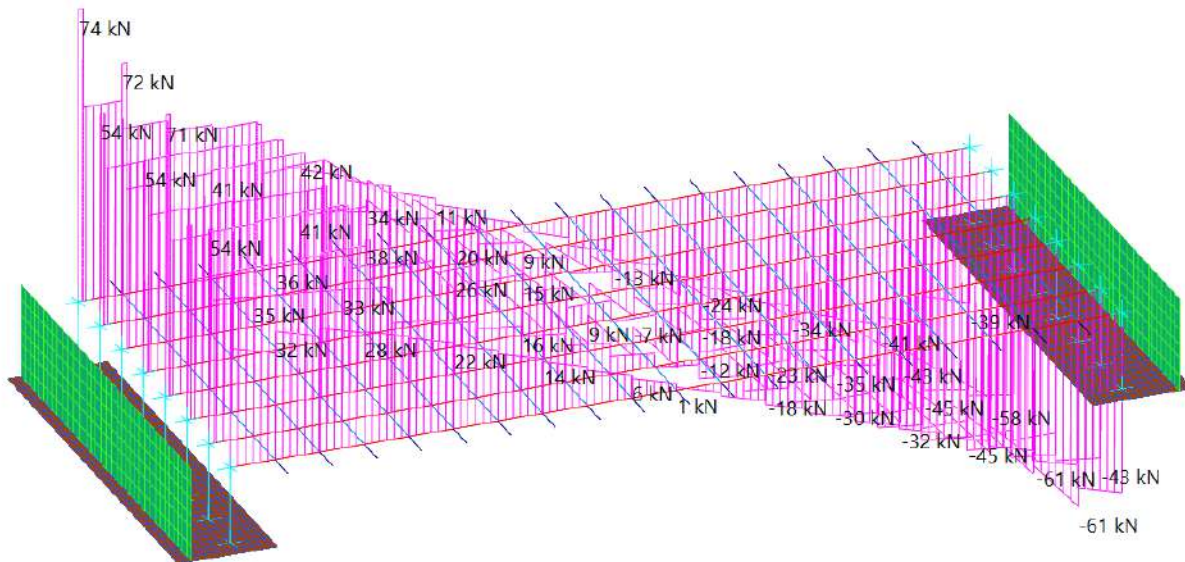


FIGURA 12-29: AZIONE TAGLIANTE IMPALCATO

12.5.3 Schema traffico Adeguatezza/Operatività CdS ML -T3

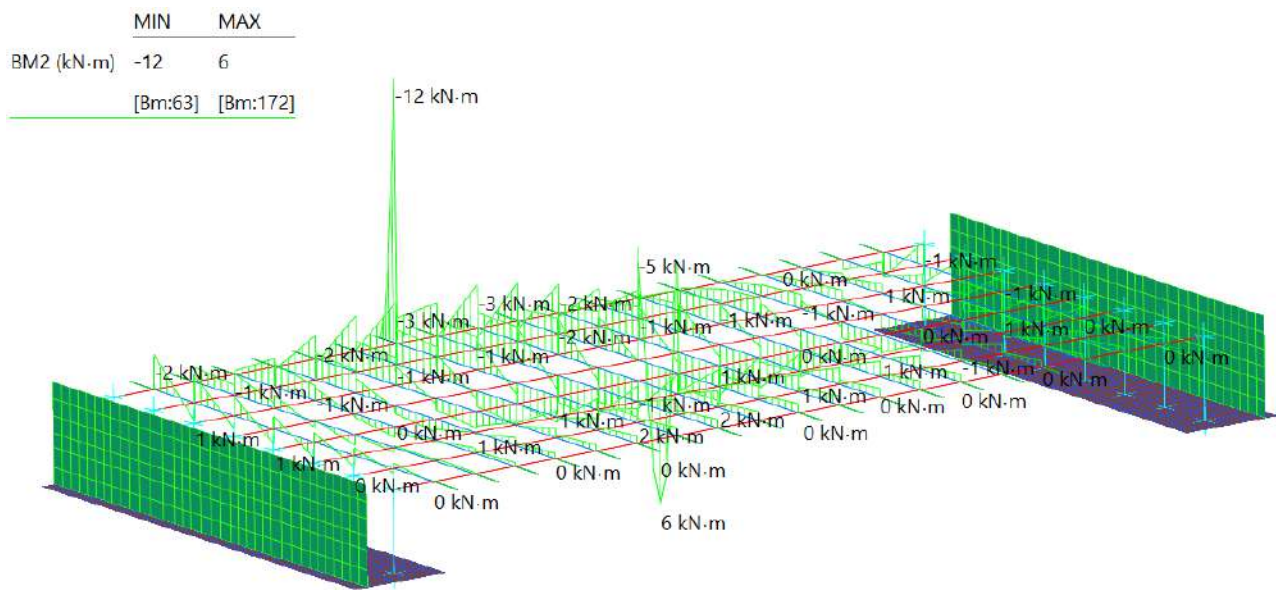


FIGURA 12-30: MOMENTO FLETTENTE SOLETTA

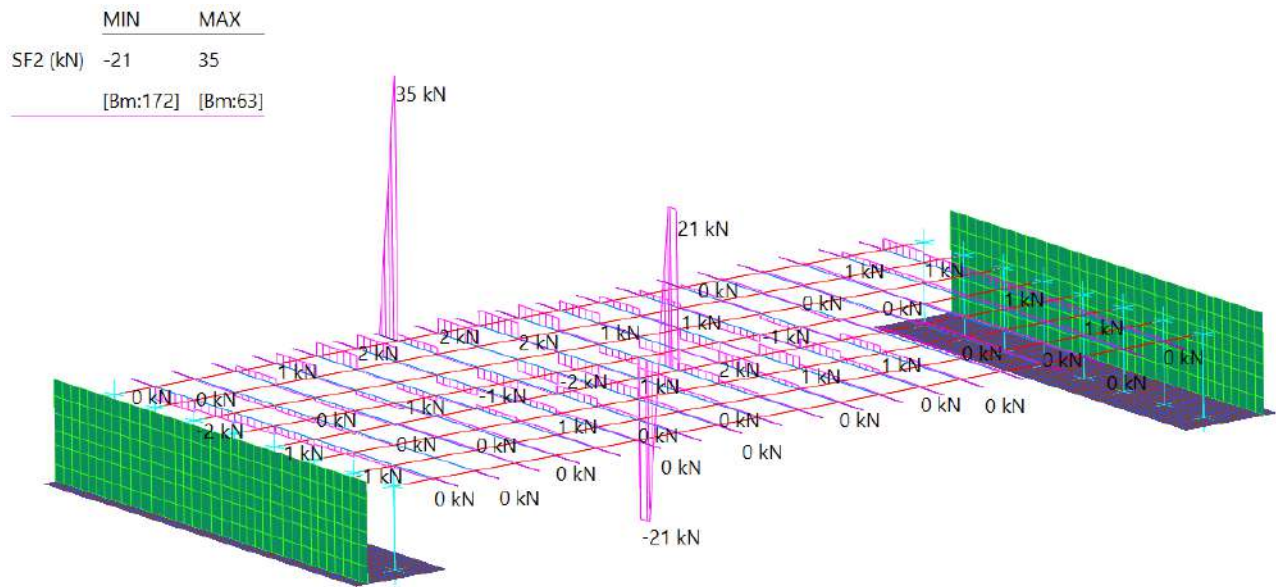
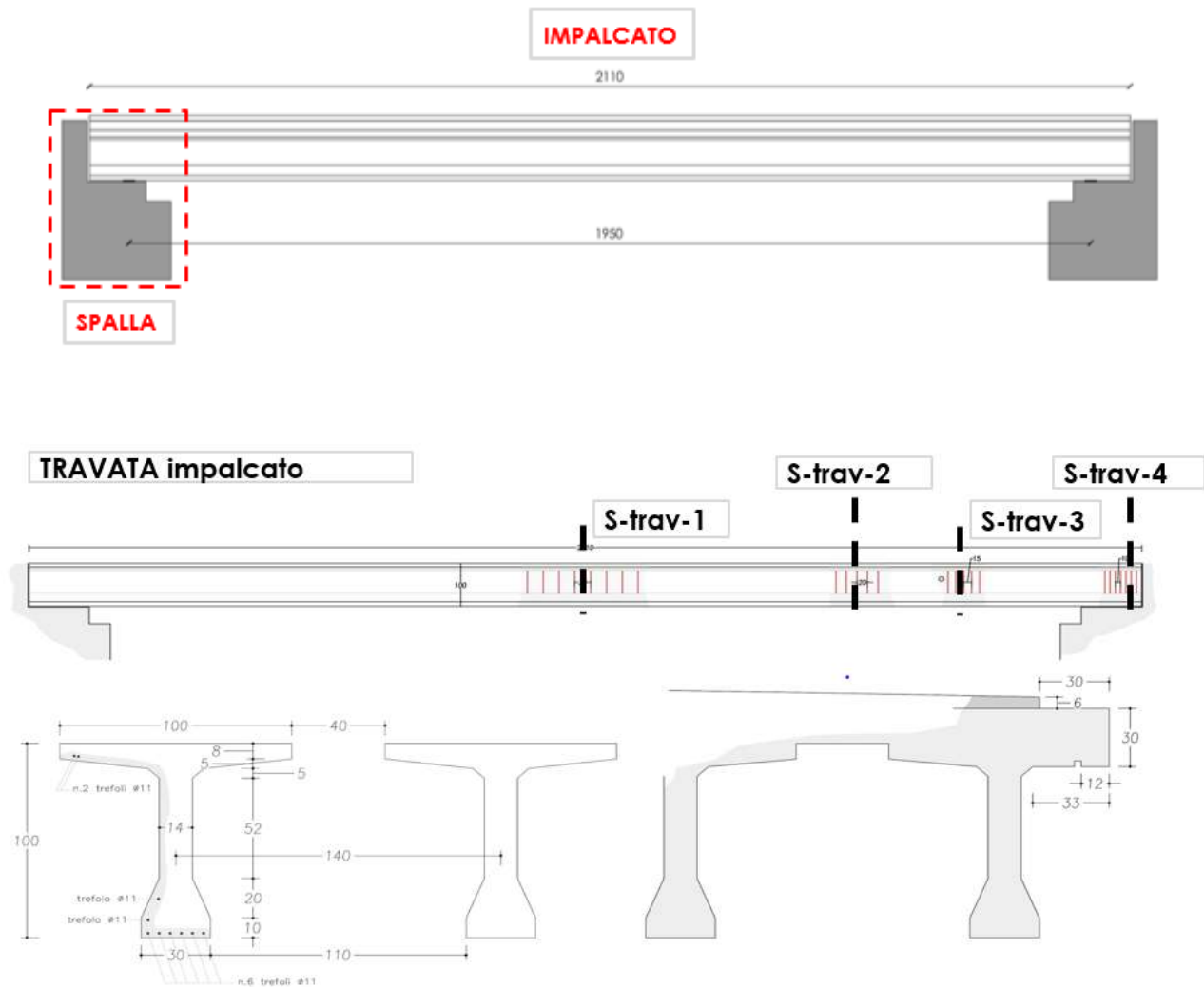


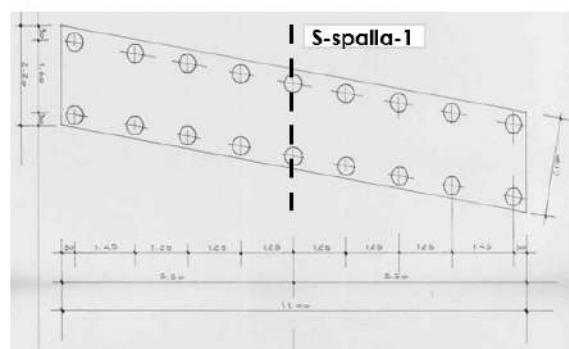
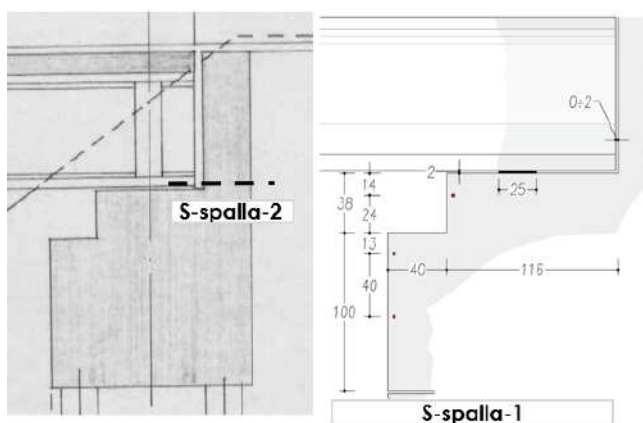
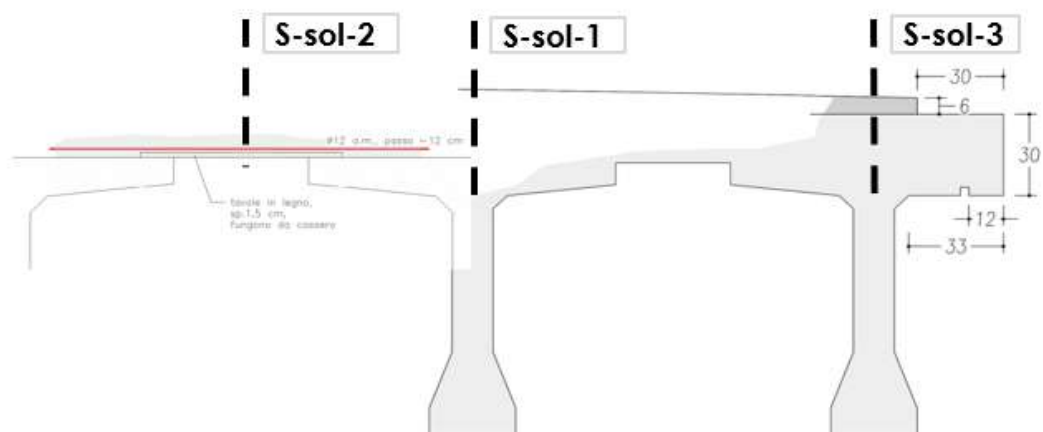
FIGURA 12-31: AZIONE TAGLIANTE SOLETTA

13 VERIFICHE DI LIVELLO 4 – DEFINIZIONE DELLE SEZIONI DI VERIFICA, GEOMETRIA ED ARMATURE PRESENTI

13.1 Individuazione degli Elementi

Di seguito si riportano graficamente le nomenclature delle sezioni oggetto di verifica.





14 VERIFICHE DI ADEGUATEZZA

Per ciascuna sezione di verifica, per le quali le azioni accidentali maggiormente gravose sono quelle relative al traffico stradale, è stato quindi calcolato il relativo coefficiente $\xi_{(V,i)}$, definito al paragrafo 8.3 delle NTC18 come "rapporto tra il valore massimo del sovraccarico variabile verticale sopportabile da quella parte della costruzione e il valore del sovraccarico verticale variabile che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione".

In generale tale rapporto è stato determinato per l'i-esima sezione di verifica sia per la pressoflessione che per le sollecitazioni taglianti:

$$\xi_{V,iM} = \frac{M_{Rd} - \gamma_G \cdot M_G - \sum_i \gamma_{q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot M_{q,i}}{\gamma_{Q,LL} \cdot (\psi_{0,LL}) \cdot M_{LL}}$$

$$\xi_{V,iV} = \frac{V_{Rd} - \gamma_G \cdot V_G - \sum_i \gamma_{q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot V_{q,i}}{\gamma_{Q,LL} \cdot (\psi_{0,LL}) \cdot V_{LL}}$$

dove col pedice i, si indicano i carichi variabili tenuti in conto ad eccezione di quelli legati al traffico individuati col pedice LL. Si precisa che il valore $\psi_{(0,LL)}$ è stato utilizzato solamente per le verifiche in cui la combinazione più gravosa è risultata con la massimizzazione di un'azione diversa da quella del traffico.

14.1 Sollecitazioni di Calcolo

A partire dalle sollecitazioni riportate graficamente, si definiscono gli sforzi sollecitanti in combinazione i quali possono essere riassunti nella seguente tabella.

ADEGUATEZZA NICI8												
SEZIONI DI VERIFICA E SOLLECITAZIONI												
	Elemento	Sezione	Massimizzazione	Comb	Note	Elemento	Shear Force 1	Bending Moment 1	Shear Force 2	Bending Moment 2	Axial Force	Torque
SLU	S-trav-1	Trave 1	Impalcato - M.ezzaria	SLU-1	Mox M+	149	-2	-1	-22	2676	24	-29
	S-trav-2	Trave 2	Impalcato - L/3	SLU-1	V in COMPLEG	229	1	2	-359	1441	27	35
	S-trav-3	Trave 3	Impalcato - L/4	SLU-1	V in COMPLEG	261	3	3	-420	677	21	57
	S-trav-4	Trave 4	Impalcato - Appoggio	SLU-2	V in appoggio	321	-16	1	763	-574	-31	-2
	S-sol-1	Solella	Solella interna	SLU-3		172	1	1	-185	-40	59	0
SLU	S-sol-2	Solella	Solella interna	SLU-3		172	1	0	0	45	59	0
	S-sol-3	Solella	Solella sbordo	SLU-3		63	0	0	244	-82	0	0
	Elemento	Sezione	Massimizzazione	Comb	Note	Elemento	Moment xx	Moment yy	Moment xy	Force xz	Force yz	
SLU	muro frontale	soffittature	Myy +	SLU-envelope	M positivo muro frontale	-	180	165	20	281	401	
	muro frontale	soffittature	Myy -	SLU-envelope	M negativo muro frontale	-	30	-90	7	162	69	
	muro frontale	soffittature	Vyx	SLU-envelope	M positivo muro frontale	-	121	142	37	277	543	
	S-spalla-2	paraghiata	M/V	SLU-paraghiata		-	10	55	0	17	87	

CLIENTE: CITTA' METROPOLITANA
DI VENEZIA

ELAB.: 21173P2115A

PONTI ESISTENTI – AREA NORD CIG 9041138719
Verifiche livello 4 – Ponte 05 – Torre di Mosto
– SP57 – ID Opera 60

Le sollecitazioni in combinazione sismica sono invece valutate come segue:

- sollecitazione flessionale/tagliante agente nel muro frontale in combinazione sismica
- sollecitazione flessionale/tagliante agente nel paraghiaia, ed indotta dalla spinta del terreno incrementata per l'effetto del sisma secondo la teoria di Wood.

SLV												
	Elemento	Sezione	Massimizzazione	Comb	Note	Elemento	Moment x	Moment y	Moment xy	Forze xz	Forze yz	
S-spalle-1	muro frontale	soffstrutture	MY +	SLU-envelope	M positivo muro frontale	-	126	112	26	280	387	
	muro frontale	soffstrutture	MY -	SLU-envelope	M negativo muro frontale	-	-12	-59	-7	200	166	
	muro frontale	soffstrutture	Vyx	SLU-envelope	M positivo muro frontale	-	90	14	22	214	280	
S-spalle-2	paraghiada	soffstrutture	M/V	SLU-paraghiada		-	1	6	0	1	10	

14.2 Resistenze delle Sezioni in Esame

Le resistenze dei materiali impiegate nelle Verifiche di Adeguatezza sono quelle riportate al 8.2 dell'elaborato, per le quali si è considerato:

CALCESTRUZZO: $\gamma_c = 1.50$

BARRE D'ARMATURA: $\gamma_c = 1.15$

14.2.1 Calcolo dei Momenti Resistenti

14.2.1.1 Impalcato

Verifica C.A. S.L.U. - File: P05 - sezione mezzeria tipica

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

Titolo: campata travata - NTC18 adeguato

N° Vertici 18 **Zoom** **N° barre** 0 **Zoom**

N°	x [cm]	y [cm]
1	15	0
2	15	10
3	7	30
4	7	82
5	12	87
6	50	92

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

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

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

Tipo rottura
Lato calcestruzzo - Cavo snervato

Tipo Sezione
☐ Rettan.re ☐ Trapezi
☐ a T ☐ Circolare
☐ Rettangoli ☒ Coord.
☐ DXF

Armatura Precompressione
N° cavi 4 **Zoom**

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]	σ _{sp} [MPa]
1	5,7018	0	3	800
2	1,9006	0	12,5	800
3	1,9006	0	20	800
4	3,8012	0	93	800

Materiali
P05 - acci: ϵ_{su} 67,5 ‰ f_{yd} 319 N/mm² E_s 200.000 N/mm² E_s/E_c 15 ϵ_{syd} 1,595 ‰ $\sigma_{s,adm}$ 240 N/mm²
P-05 - cls: ϵ_{c2} 2 ‰ ϵ_{cu} 3,5 f_{cd} 19,89 f_{cc}/f_{cd} 1 $\sigma_{c,adm}$ 8,24 τ_{co} 0,5195 τ_{c1} 1,656

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

Tipo flessione
☒ Retta ☐ Deviata

Calcola MRd **Dominio M-N** **Col. modello** **M-curvatura**

N° rett. 100 **L₀** 0 cm **Precompresso**

σ_c -19,89 N/mm² **σ_s** N/mm² **ε_c** 3,5 ‰ **ε_s** ‰ **d** 117 cm **x** 7,928 **x/d** 0,06776 **δ** 0,7

P-05 trefolo 11n
P-05 trefolo
 ϵ_{su} 67,5 ‰ f_{yd} 1.348 N/mm² E_s/E_c 6 ϵ_{syd} 6,74 ‰ $\sigma_{s,adm}$ 1.050 N/mm²
 σ_{sp} 1.348 N/mm² ϵ_{sp} 52,15 ‰ compresa predef.

S-trav-1 (mezzeria travata)

Verifica C.A. S.L.U. - File: P05 - soletta mezzeria

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

Titolo : soletta mezzeria - NTC18 adeguato

N° Vertici 4 Zoom N° barre 16 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	0	0
2	100	0
3	100	20
4	0	20

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	1,13	8	2
2	1,13	20	2
3	1,13	32	2
4	1,13	44	2
5	1,13	56	2
6	1,13	68	2

Sollecitazioni

S.L.U. Metodo n

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

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

Tipo rottura
Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

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

Tipo flessione
☒ Retta ☐ Deviata

N° rett. 100

Calcola MRd Dominio M-N

L₀ 0 cm Col. modello

M-curvatura

☐ Precompresso

Materiali

P05 - acci P-05 - cls

ε_{su} 67,5 ‰ ε_{c2} 2 ‰
f_{yd} 319 N/mm² ε_{cu} 3,5 ‰
E_s 200.000 N/mm² f_{cd} 19,89
E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 1 ?
ε_{syd} 1,595 ‰ σ_{c,adm} 8,24
σ_{s,adm} 240 N/mm² τ_{co} 0,5195
τ_{c1} 1,656

M_{xRd} 51,18 kN m

σ_c -19,89 N/mm²
σ_s 319 N/mm²
ε_c 3,5 ‰
ε_s 21,44 ‰
d 18 cm
x 2,526 x/d 0,1403
δ 0,7

S-sol-2 (mezzeria soletta interna)



Titolo : soletta sbalzo - NTC18 adeguato

N° Vertici

4

Zoom

N° barre

16

Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	0	0
2	100	0
3	100	20
4	0	20

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	1,13	8	2
2	1,13	20	2
3	1,13	32	2
4	1,13	44	2
5	1,13	56	2
6	1,13	68	2

Sollecitazioni

S.L.U.



Metodo n

N

Ed

0

0

kN

M

xEd

0

0

kNm

M

yEd

0

0

P.to applicazione N

☒ Centro

☐ Baricentro cls

☐ Coord.[cm]

xN 0

yN 0

Tipo rottura

Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

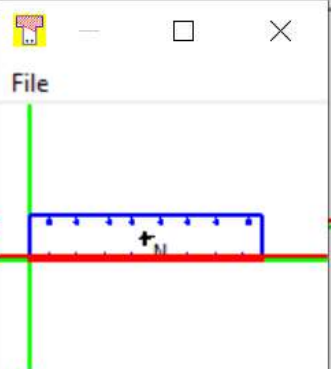
Tipo Sezione

☐ Rettan.re ☐ Trapezi

☐ a T ☐ Circolare

☐ Rettangoli ☒ Coord.

☐ DXF



Metodo di calcolo

☐ S.L.U.+ ☒ S.L.U.-

☐ Metodo n

Tipo flessione

☒ Retta ☐ Deviata

N° rett. 100

Calcola MRd

Dominio M-N

L_o 0 cm

Col. modello

M-curvatura

☐ Precompresso

Materiali

P05 - acci

P-05 - cls

ϵ_{su}

67,5 ‰

ϵ_{c2}

2 ‰

f_{yd}

319 N/mm²

ϵ_{cu}

3,5 ‰

E_s

200.000 N/mm²

f_{cd}

19,89

E_s/E_c

15

f_{cc}/f_{cd}

1

ϵ_{syd}

1,595 ‰

$\sigma_{c,adm}$

8,24

$\sigma_{s,adm}$

240 N/mm²

τ_{co}

0,5195

τ_{c1}

1,656

M

xRd

-46,97 kN m

σ_c

-19,89

N/mm²

σ_s

319

N/mm²

ϵ_c

3,5 ‰

ϵ_s

27,33 ‰

d

17 cm

x

1,93

x/d

0,1135

δ

0,7

S-sol-1 e S-sol-3 (soletta appoggi interni e soletta sbalzo)

14.2.1.2 Sottostrutture

Verifica C.A. S.L.U. - File: P05 - paraghiaia

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

Titolo : paraghiaia - NTC18 adeguato

N° Vertici Zoom N° barre Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	0	0
2	100	0
3	100	50
4	0	50

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
2	2,01	50	4
3	2,01	80	4
4	2,01	20	46
5	2,01	50	46
6	2,01	80	46

Tipo Sezione
☐ Rettan.re ☐ Trapezi
☐ a T ☐ Circolare
☐ Rettangoli ☒ Coord.
☐ DXF

Sollecitazioni
 S.L.U. ☒ Metodo n ☐

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

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

Tipo rottura
 Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

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

Tipo flessione
☒ Retta ☐ Deviata

N° rett.

Calcola MRd Dominio M-N
 L₀ cm Col. modello
☐ Precompresso

Materiali

P05 - acci	P-05 - cls
ϵ_{su} 67,5 ‰	ϵ_{c2} 2 ‰
f_{yd} 319 N/mm²	ϵ_{cu} 3,5 ‰
E_s 200.000 N/mm²	f_{cd} 19,89
E_s/E_c 15	f_{cc}/f_{cd} 1 ?
ϵ_{syd} 1,595 ‰	$\sigma_{c,adm}$ 8,24
$\sigma_{s,adm}$ 240 N/mm²	τ_{co} 0,5195
	τ_{cl} 1,656

M_{xRd} kN m

σ_c N/mm²
 σ_s N/mm²
 ϵ_c ‰
 ϵ_s ‰
 d cm
 x x/d
 δ

S-spalla-2 (paraghiaia)



Titolo : muro frontale - NTC18 adeguato

N° Vertici

6

Zoom

N° barre

4

Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
2	206	0
3	206	100
4	166	100
5	166	138
6	0	138

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	25,13	103	5
2	6,28	103	49
3	12,57	103	93
4	18,85	103	133

Sollecitazioni

S.L.U.

Metodo n

N

Ed

0

0

kN

M

xEd

0

0

kNm

M

yEd

0

0

Materiali

P05 - acci

P-05 - cls

ϵ_{su}

67,5

‰

ϵ_{c2}

2

‰

f_{yd}

319

N/mm²

ϵ_{cu}

3,5

‰

E_s

200.000

N/mm²

f_{cd}

19,89

N/mm²

E_s / E_c

15

f_{cc} / f_{cd}

1

?

ϵ_{syd}

1,595

‰

$\sigma_{c,adm}$

8,24

N/mm²

$\sigma_{s,adm}$

240

N/mm²

τ_{co}

0,5195

τ_{c1}

1,656

Tipo rottura

Lato acciaio - Acciaio snervato

M

xRd

1.393

kN m

σ_c

-19,89

N/mm²

σ_s

319

N/mm²

ϵ_c

2,798

‰

ϵ_s

67,5

‰

d

133

cm

x

5,294

x/d

0,0398

δ

0,7

Tipo Sezione

☐ Rettan.re

☐ Trapezi

☐ a T

☐ Circolare

☐ Rettangoli

☒ Coord.

☐ DXF



File

Metodo di calcolo

☒ S.L.U. +

☐ S.L.U. -

☐ Metodo n

Tipo flessione

☒ Retta

☐ Deviata

N° rett. 100

Calcola MRd

Dominio M-N

o 0 cm

Col. modello

M-curvatura

☐ Precompresso

S-spalla-1 (muro frontale M-positivo)



Titolo : muro frontale - NTC18 adeguato

N° Vertici

6

Zoom

N° barre

4

Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
2	206	0
3	206	100
4	166	100
5	166	138
6	0	138

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	25,13	103	5
2	6,28	103	49
3	12,57	103	93
4	18,85	103	133

Sollecitazioni

S.L.U.

Metodo n

N

Ed

0

0

kN

M

xEd

0

0

kNm

M

yEd

0

0

Materiali

P05 - acci

P-05 - cls

ϵ_{su}

67,5

‰

ϵ_{c2}

2

‰

f_{yd}

319

N/mm²

ϵ_{cu}

3,5

‰

E_s

200.000

N/mm²

f_{cd}

19,89

N/mm²

E_s / E_c

15

f_{cc} / f_{cd}

1

?

ϵ_{syd}

1,595

‰

$\sigma_{c,adm}$

8,24

N/mm²

$\sigma_{s,adm}$

240

N/mm²

τ_{co}

0,5195

τ_{c1}

1,656

M

xRd

-1.254

kN m

σ_c

-19,89

N/mm²

σ_s

319

N/mm²

ϵ_c

2,36

‰

ϵ_s

67,5

‰

d

133

cm

x

4,493

x/d

0,03378

δ

0,7

Tipo Sezione

☐ Rettan.re

☐ Trapezi

☐ a T

☐ Circolare

☐ Rettangoli

☒ Coord.

☐ DXF

File

S-spalla-1 (muro frontale M-negativo)

14.2.2 Calcolo dei Tagli Resistenti

14.2.2.1 Impalcato

Si riporta la resistenza a taglio delle travate, armate con staffe diametro 12mm e passo variabile da 100mm (agli appoggi) fino a 300mm in corrispondenza della mezzeria.

Caratteristiche della sezione		
GEOMETRIA	H = 100 cm b _w = 14 cm h' = 3 cm d = 97 cm z = 87,3 cm f _{cd} = 19,89 Mpa f _{yd} = 319,65 Mpa	altezza sezione larghezza sezione copriferro altezza utile braccio della coppia interna (0,9 d) resistenza calcestruzzo resistenza acciaio
ARMATURA TESA	F = 11 mm n° = 6 A _s = 5,7 cm ² r _l = 0,0041	diametro armatura numero barre area armatura tesa rapporto geometrico d'armatura longitudinale
GEOMETRIA	N _{ed} = 1064 kN s _{cp} = 3,6 Mpa	valore compressione assiale tensione media di compressione
Caratteristiche della sezione armata a taglio - STAFFE		
	F = 12 mm n° = 2,0 A _{sw} = 2,3 cm ² s = 10 cm alpha = 90 ° theta = 41,5 ° α _c = 1,181 n x f _{cd} = 9,95 Mpa	diametro staffe numero braccia area armatura trasversale passo delle staffe angolo inclinazione armature angolo inclinazione puntoni coefficiente maggiorativo pari a: 1 per membrane non compresse 1 + s _{cp} /f _{cd} per 0 ≤ s _{cp} ≤ 0,25 f _{cd} 1.25 per 0,25 f _{cd} ≤ s _{cp} ≤ 0,5 f _{cd} 2,5(1 - s _{cp} /f _{cd}) per 0,5 f _{cd} ≤ s _{cp} ≤ f _{cd} resistenza a compressione ridotta (n f _{cd} = 0,5 f _{cd})
Resistenza totale armature trasversali resistenti a taglio		
resistenza "taglio-trazione"	V _{Rds} = 713 kN	
Con riferimento all'armatura trasversale, la resistenza di progetto a "taglio trazione" si calcola con:		
$V_{Rds} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha \quad [4.1.27]$		
Resistenza a rottura del puntone compresso di calcestruzzo		
resistenza "taglio-compressione"	V _{Rdc} = 712 kN	
Con riferimento al calcestruzzo d'anima, la resistenza di progetto a "taglio compressione" si calcola con		
$V_{Rdc} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot v \cdot f_{cd} (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta) \quad [4.1.28]$		
RESISTENZA FINALE		
resistenza "taglio-trazione"	V _{Rd} = 712 kN	

taglio travata campata - S-trav-4

Caratteristiche della sezione		
GEOMETRIA	H =	100 cm altezza sezione
	b _w =	14 cm larghezza sezione
	h' =	3 cm copriferro
	d =	97 cm altezza utile
	z =	87,3 cm braccio della coppia interna (0,9 d)
	f _{cd} =	19,89 Mpa resistenza calcestruzzo
	f _{yd} =	319,65 Mpa resistenza acciaio
ARMATURA TESA	F =	11 mm diametro armatura
	n° =	6 numero barre
	A _s =	5,7 cm ² area armatura tesa
	rl =	0,0041 rapporto geometrico d'armatura longitudinale
GEOMETRIA	N _{ed} =	1064 kN valore compressione assiale
	σ _{cp} =	3,6 Mpa tensione media di compressione
Caratteristiche della sezione armata a taglio - STAFFE		
	F =	12 mm diametro staffe
	n° =	2,0 numero braccia
	A _{sw} =	2,3 cm ² area armatura trasversale
	s =	15 cm passo delle staffe
	α =	90 ° angolo inclinazione armature
	θ =	33 ° angolo inclinazione puntoni
	α _c =	1,181 coefficiente maggiorativo pari a: 1 per membrane non compresse 1 + σ _{cp} /f _{cd} per 0 ≤ σ _{cp} ≤ 0,25 f _{cd} 1.25 per 0,25 f _{cd} ≤ σ _{cp} ≤ 0,5 f _{cd} 2,5(1 - σ _{cp} /f _{cd}) per 0,5 f _{cd} ≤ σ _{cp} ≤ f _{cd}
	n x f _{cd} =	9,95 Mpa resistenza a compressione ridotta (n f _{cd} = 0,5 f _{cd})
Resistenza totale armature trasversali resistenti a taglio		
resistenza "taglio-trazione"	V _{Rds} =	648 kN
Con riferimento all'armatura trasversale, la resistenza di progetto a "taglio trazione" si calcola con:		
$V_{Rds} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \theta) \cdot \sin \alpha$ [4.1.27]		
Resistenza a rottura del puntone compresso di calcestruzzo		
resistenza "taglio-compressione"	V _{Rdc} =	656 kN
Con riferimento al calcestruzzo d'anima, la resistenza di progetto a "taglio compressione" si calcola con		
$V_{Rdc} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot v \cdot f_{cd} (\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \theta) / (1 + \operatorname{ctg}^2 \theta)$ [4.1.28]		
RESISTENZA FINALE		
resistenza "taglio-trazione"	V _{Rd} =	648 kN

taglio travata campata - S-trav-3

Caratteristiche della sezione		
GEOMETRIA	$H = 100 \text{ cm}$ $b_w = 14 \text{ cm}$ $h' = 3 \text{ cm}$ $d = 97 \text{ cm}$ $z = 87,3 \text{ cm}$ $f_{cd} = 19,89 \text{ Mpa}$ $f_{yd} = 319,65 \text{ Mpa}$	altezza sezione larghezza sezione copriferro altezza utile braccio della coppia interna (0,9 d) resistenza calcestruzzo resistenza acciaio
ARMATURA TESA	$F = 11 \text{ mm}$ $n^\circ = 6$ $A_s = 5,7 \text{ cm}^2$ $rl = 0,0041$	diametro armatura numero barre area armatura tesa rapporto geometrico d'armatura longitudinale
GEOMETRIA	$N_{ed} = 1064 \text{ kN}$ $s_{cp} = 3,6 \text{ Mpa}$	valore compressione assiale tensione media di compressione
Caratteristiche della sezione armata a taglio - STAFFE		
	$F = 12 \text{ mm}$ $n^\circ = 2,0$ $A_{sw} = 2,3 \text{ cm}^2$ $s = 20 \text{ cm}$ $\alpha = 90^\circ$ $\theta = 28^\circ$ $\alpha_c = 1,181$ $n \times f_{cd} = 9,95 \text{ Mpa}$	diametro staffe numero braccia area armatura trasversale passo delle staffe angolo inclinazione armature angolo inclinazione puntoni coefficiente maggiorativo pari a: 1 per membrane non compresse $1 + s_{cp}/f_{cd}$ per $0 \leq s_{cp} \leq 0,25 f_{cd}$ 1.25 per $0,25 f_{cd} \leq s_{cp} \leq 0,5 f_{cd}$ $2,5(1 - s_{cp}/f_{cd})$ per $0,5 f_{cd} \leq s_{cp} \leq f_{cd}$ resistenza a compressione ridotta ($n f_{cd} = 0,5 f_{cd}$)
Resistenza totale armature trasversali resistenti a taglio		
resistenza "taglio-trazione"	$V_{Rds} = 593 \text{ kN}$	
Con riferimento all'armatura trasversale, la resistenza di progetto a "taglio trazione" si calcola con:		
$V_{Rds} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg} \alpha + \text{ctg} \theta) \cdot \sin \alpha \quad [4.1.27]$		
Resistenza a rottura del puntone compresso di calcestruzzo		
resistenza "taglio-compressione"	$V_{Rdc} = 595 \text{ kN}$	
Con riferimento al calcestruzzo d'anima, la resistenza di progetto a "taglio compressione" si calcola con:		
$V_{Rdc} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot v \cdot f_{cd} (\text{ctg} \alpha + \text{ctg} \theta) / (1 + \text{ctg}^2 \theta) \quad [4.1.28]$		
RESISTENZA FINALE		
resistenza "taglio-trazione"	$V_{Rd} = 593 \text{ kN}$	

taglio travata campata - S-trav-2

Caratteristiche della sezione		
GEOMETRIA	$H = 100$ cm $b_w = 14$ cm $h' = 3$ cm $d = 97$ cm $z = 87,3$ cm $f_{cd} = 19,89$ Mpa $f_{yd} = 319,65$ Mpa	altezza sezione larghezza sezione copriferro altezza utile braccio della coppia interna (0,9 d) resistenza calcestruzzo resistenza acciaio
ARMATURA TESA	$F = 11$ mm $n^{\circ} = 6$ $A_s = 5,7$ cm ² $rl = 0,0041$	diametro armatura numero barre area armatura tesa rapporto geometrico d'armatura longitudinale
EOMETRIA	$N_{ed} = 1064$ kN $s_{cp} = 3,6$ Mpa	valore compressione assiale tensione media di compressione
Caratteristiche della sezione armata a taglio - STAFFE		
	$F = 12$ mm $n^{\circ} = 2,0$ $A_{sw} = 2,3$ cm ² $s = 30$ cm $\alpha = 90^{\circ}$ $\theta = 22^{\circ}$ $\alpha_c = 1,181$ $n \times f_{cd} = 9,95$ Mpa	diametro staffe numero braccia area armatura trasversale passo delle staffe angolo inclinazione armature angolo inclinazione puntoni coefficiente maggiorativo pari a: 1 per membrane non compresse $1 + s_{cp}/f_{cd}$ per $0 \leq s_{cp} \leq 0,25 f_{cd}$ 1.25 per $0,25 f_{cd} \leq s_{cp} \leq 0,5 f_{cd}$ $2,5(1 - s_{cp}/f_{cd})$ per $0,5 f_{cd} \leq s_{cp} \leq f_{cd}$ resistenza a compressione ridotta ($nf_{cd} = 0,5 f_{cd}$)
Resistenza totale armature trasversali resistenti a taglio		
resistenza "taglio-trazione"	$V_{Rds} = 520$ kN	Con riferimento all'armatura trasversale, la resistenza di progetto a "taglio trazione" si calcola con: $V_{Rds} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha \quad [4.1.27]$
Resistenza a rottura del puntone compresso di calcestruzzo		
resistenza "taglio-compressione"	$V_{Rdc} = 499$ kN	Con riferimento al calcestruzzo d'anima, la resistenza di progetto a "taglio compressione" si calcola con: $V_{Rdc} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot v \cdot f_{cd} (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta) \quad [4.1.28]$
RESISTENZA FINALE		
resistenza "taglio-trazione"	$V_{Rd} = 499$ kN	

taglio travata campata - S-trav-1

La resistenza di elementi non armati a taglio, quali ad esempio la **soletta in campata ed in corrispondenza degli sbalzi**, è valutata secondo quanto al §6.3.5.2 delle Linee Guida 2022, per le quali:

In particolare per la verifica a taglio negli elementi in cemento armato poco armati o non armati, in alternativa alle formule delle NTC, è consentito l'uso della seguente espressione:

$$V_{Rd} = \frac{0.3 \sqrt{f_{ck}} b_w d}{\gamma_c (1 + 0.0022d)}$$

dove le grandezze sono misurate in MPa e mm ed i simboli hanno lo stesso significato della NTC.

Tale formulazione è una semplificazione conservativa delle SIA 262.

Per quanto concerne il taglio nel cemento armato precompresso, si può valutare con la formulazione (4.1.24) delle NTC 2018 dove σ_{φ} è intesa come l'intera tensione media di precompressione nella sezione considerata.

Nel caso in esame, le solette in corrispondenza degli appoggi sono caratterizzate da un'altezza della sezione pari a 200mm, con un'altezza utile della sezione di 170mm.

Al 8.2.1 dell'elaborato, per le verifiche ai sensi delle NTC-2018 volte alla completa adeguatezza, sono stati definiti i seguenti parametri della resistenza del materiale:

Livello di conoscenza	LC	2
Fattore di Confidenza	FC	1,2
Coefficiente Parziale di sicurezza - γ_c	1,5	[-]
Resistenza a compressione MEDIA da prove - f_{cm}	35,80	[MPa]
Resistenza a compressione CARATTERISTICA da prove - $f_{ck, is}$	29,00	[MPa]

Ne consegue che la resistenza della soletta è pari a:

$$V_{Rd} = \frac{0.30 \times \sqrt{29} \times 1000 \times 170}{1.50 \times (1 + 0.0022 \times 170)} = 133,26 \text{ kN/m}$$

14.2.2.2 Sottostrutture

Si riporta la resistenza a taglio del muro frontale, armato con staffe diametro 10mm ad interasse 200/250mm. A favore di sicurezza, si considera un interasse delle stesse pari a 250mm.

Caratteristiche della sezione		
GEOMETRIA	H =	138 cm altezza sezione
	b _w =	206 cm larghezza sezione
	h' =	5 cm copriferro
	d =	133 cm altezza utile
	z =	119,7 cm braccio della coppia interna (0,9 d)
	f _{cd} =	19,89 Mpa resistenza calcestruzzo
	f _{yd} =	319,65 Mpa resistenza acciaio
ARMATURA TESA	F =	20 mm diametro armatura
	n° =	8 numero barre
	A _s =	25,1 cm ² area armatura tesa
	rl =	0,0009 rapporto geometrico d'armatura longitudinale
CARRIERIA	N _{ed} =	0 kN valore compressione assiale
	sc _p =	0 Mpa tensione media di compressione
Caratteristiche della sezione armata a taglio - STAFFE		
	F =	10 mm diametro staffe
	n° =	2,0 numero braccia
	A _{sw} =	1,6 cm ² area armatura trasversale
	s =	25 cm passo delle staffe
	alpha =	90 ° angolo inclinazione armature
	theta =	21,8 ° angolo inclinazione puntoni
	α _c =	1,000 coefficiente maggiorativo pari a:
1 per membrane non compresse $1 + s_{cp}/f_{cd}$ per $0 \leq s_{cp} \leq 0,25 f_{cd}$ 1.25 per $0,25 f_{cd} \leq s_{cp} \leq 0,5 f_{cd}$ $2,5(1 - s_{cp}/f_{cd})$ per $0,5 f_{cd} \leq s_{cp} \leq f_{cd}$		
n x f _{cd} =		9,95 Mpa resistenza a compressione ridotta (n f _{cd} = 0,5 f _{cd})
Resistenza totale armature trasversali resistenti a taglio		
resistenza "taglio-trazione"	V _{Rds} =	601 kN
Con riferimento all'armatura trasversale, la resistenza di progetto a "taglio trazione" si calcola con:		
$V_{Rds} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \theta) \cdot \sin \alpha \quad [4.1.27]$		
Resistenza a rottura del puntone compresso di calcestruzzo		
resistenza "taglio-compressione"	V _{Rdc} =	8456 kN
Con riferimento al calcestruzzo d'anima, la resistenza di progetto a "taglio compressione" si calcola con:		
$V_{Rdc} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot v \cdot f_{cd} (\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \theta) / (1 + \operatorname{ctg}^2 \theta) \quad [4.1.28]$		
RESISTENZA FINALE		
resistenza "taglio-trazione"	V _{Rd} =	601 kN

taglio muro frontale spalla - S-spalla-1

La resistenza di elementi non armati a taglio, quali ad esempio **il muro paraghiaia** costituente le sottostrutture, è valutata secondo quanto al §6.3.5.2 delle Linee Guida 2022, per le quali:

In particolare per la verifica a taglio negli elementi in cemento armato poco armati o non armati, in alternativa alle formule delle NTC, è consentito l'uso della seguente espressione:

$$V_{Rd} = \frac{0.3 \sqrt{f_{ck}} b_w d}{\gamma_c (1 + 0.0022d)}$$

dove le grandezze sono misurate in MPa e mm ed i simboli hanno lo stesso significato della NTC.

Tale formulazione è una semplificazione conservativa delle SIA 262.

Per quanto concerne il taglio nel cemento armato precompresso, si può valutare con la formulazione (4.1.24) delle NTC 2018 dove σ_{φ} è intesa come l'intera tensione media di precompressione nella sezione considerata.

Nel caso in esame, il muro paraghiaia è caratterizzato da uno spessore della sezione pari a 500mm, con un'altezza utile della sezione di 460mm.

Al 8.2.1 dell'elaborato, per le verifiche ai sensi delle NTC-2018 volte alla completa adeguatezza, sono stati definiti i seguenti parametri della resistenza del materiale:

Livello di conoscenza	LC	2
Fattore di Confidenza	FC	1,2
Coefficiente Parziale di sicurezza - γ_c	1,5	[-]
Resistenza a compressione MEDIA da prove - f_{cm}	35,80	[MPa]
Resistenza a compressione CARATTERISTICA da prove - $f_{ck, is}$	29,00	[MPa]

Ne consegue che la resistenza del muro paraghiaia è pari a:

$$V_{Rd} = \frac{0.30 \times \sqrt{29} \times 1000 \times 460}{1.50 \times (1 + 0.0022 \times 460)} = 246,24 \text{ kN/m}$$

14.3 Verifiche di Resistenza - Adeguatezza

Si riporta di seguito una tabella riepilogativa nella quale vengono riassunti gli sforzi sollecitanti e quelli resistenti illustrati ai precedenti paragrafi, con il relativo coefficiente di sicurezza finale.

NTS	ADEGUATEZZA NTC18			VERIFICHE IMPALCATO		M+			M-			V		
	Elemento	Sezione	Massimizzazione	Comb	MEd	MRd	CS	MEd	MRd	CS	VEd	VRd	CS	
	S-trav-1	Travata	Impalcato - Mezzeria	M+	SLU-1	2676,00	1510	1,772				301	499	0,603
	S-trav-2	Travata	Impalcato - L/3	V (staffe passo 20)	SLU-1							359	593	0,605
	S-trav-3	Travata	Impalcato - L/4	V (staffe passo 15)	SLU-1							420	648	0,648
	S-trav-4	Travata	Impalcato - Appoggio	V (staffe passo 10)	SLU-2							763	712	1,072
	S-sol-1	Soletta	Soletta interna	M-/V	SLU-3				-40	-46,97	0,852	185	133,26	1,388
	S-sol-2	Soletta	Soletta interna	M+	SLU-3	45	51,18	0,879						
	S-sol-3	Soletta	Soletta sbalzo	M-/V	SLU-3				-82	-46,97	1,746	244	133,26	1,831

ADEGUATEZZA NTC18			VERIFICHE SPALLE		Myy +			Myy -			Fyx			
	Elemento	Sezione	Massimizzazione	Comb	MEd	MRd	CS	MEd	MRd	CS	VEd	VRd	CS	
SLU	S-spalla-1	muro frontale	sottostrutture	Myy +	SLU-envelope	165	1393	0,118						
		muro frontale	sottostrutture	Myy -	SLU-envelope				-90	-1254	0,072			
		muro frontale	sottostrutture	Vyx	SLU-envelope						543	601	0,903	
	S-spalla-2	paraghiaia	sottostrutture	M/V	SLU-paraghiaia	55	92,32	0,596				87	246,24	0,353

VERIFICHE SISMICHE			VERIFICHE SPALLE		Myy +			Myy -			Fyx				
SIS	S-spalla-1	muro frontale	sottostrutture	Myy +	SLU-envelope	112	1393	0,080							
		muro frontale	sottostrutture	Myy -	SLU-envelope				-59	-1254	0,047				
		muro frontale	sottostrutture	Vyx	SLU-envelope							280	601	0,466	
	S-spalla-2	paraghiaia	sottostrutture	M/V	SLU-paraghiaia	6	92,32	0,065					10	246,24	0,041

Come da risultati riportati nella tabella di cui sopra, sono diversi i meccanismi che comportano il non rispetto delle verifiche di adeguatezza per il manufatto in esame; si riassumono di seguito le maggiori carenze riscontrate:

In condizioni statiche:

- Importanti carenze a pressoflessione delle travate longitudinali
- Lievi carenze a taglio delle travate in corrispondenza degli appoggi.
- Importanti carenze a pressoflessione ed a taglio per gli elementi costituenti la soletta a sbalzo. La soletta interna invece, la quale verificava in condizioni di adeguatezza a pressoflessione, presenta carenze a taglio.
- Le sottostrutture (paraghiaia e muri frontali) risultano invece adeguate ai carichi da NTC-18.

Si ritiene pertanto che il ponte **NON rispetti le verifiche di Adeguatezza** e risulta pertanto necessario procedere con gli step di carico successivi come da procedura illustrata al capitolo 2 del presente elaborato.

In condizioni sismiche:

- Gli elementi componenti le sottostrutture, quali muri frontali e paraghiaia, verificano in condizioni sismiche
- Non sono state fatte verifiche sui pali di fondazione a causa della mancanza di informazioni specifiche sulle armature e sui parametri geotecnici del terreno

Si ritiene pertanto che il ponte in oggetto sia idoneo dal punto di vista sismico salvo quanto precedentemente evidenziato.

15 VERIFICHE DI OPERATIVITA'

Secondo le recenti disposizioni ministeriali, un ponte viene definito operativo quando soddisfa le verifiche da normativa effettuate considerando un tempo di riferimento limitato a 30 anni. Scopo di tutte le successive verifiche è accertare che la struttura in esame raggiunga il livello minimo di affidabilità per il criterio in esame.

Rispetto alla valutazione della sicurezza trattata nel capitolo precedente, per la verifica di operatività gli unici fattori a cambiare sono i coefficienti di sicurezza.

Per quanto riguarda le azioni ed i materiali, si utilizzano i coefficienti già riportati nei paragrafi precedenti del presente elaborato.

15.1 Sollecitazioni di Calcolo

A partire dalle sollecitazioni riportate graficamente, si definiscono gli sforzi sollecitanti in combinazione i quali possono essere riassunti nella seguente tabella.

OPERATIVITA' NIC18		SEZIONI DI VERIFICA E SOLLECITAZIONI										
	Elemento	Sezione	Massimizzazione	Comb	Note	Elemento	Shear Force 1	Bending Moment 1	Shear Force 2	Bending Moment 2	Axial Force	Torque
\$-trav-1	Trave 1	Impalcato - Mezzera	M+	SLU-1	Max M+	149	-2	-1	-20	2358	22	-25
\$-trav-2	Travata	Impalcato - L/3	V (stefle passo 20)	SLU-1	V in campo	229	1	1	-323	1251	25	32
\$-trav-3	Travata	Impalcato - L/4	V (stefle passo 15)	SLU-1	V in campo	261	2	2	-379	562	19	51
\$-trav-4	Travata	Impalcato - Appoggio	V (stefle passo 10)	SLU-2	V in appoggio	321	-14	0	685	-574	-28	-4
SLU												
\$-sol-1	Solella	Solella interna	M-/V	SLU-3		172	1	-1	164	-35	52	0
\$-sol-2	Solella	Solella interna	M+	SLU-3		172	1	0	0	40	52	0
\$-sol-3	Solella	Solella sbazo	M-/V	SLU-3		63	0	0	217	-73	0	0

CLIENTE: CITTA' METROPOLITANA
DI VENEZIA

ELAB.: 21173P2115A

PONTI ESISTENTI – AREA NORD CIG 9041138719
Verifiche livello 4 – Ponte 05 – Torre di Mosto
– SP57 – ID Opera 60

Rev. A - Pag. 121 di 159

15.2 Resistenze delle Sezioni in Esame

Le resistenze dei materiali impiegate nelle Verifiche di Operatività/Transitabilità sono quelle riportate al 8.2 dell'elaborato, per le quali si è considerato:

CALCESTRUZZO: $\gamma_c = 1.26$

BARRE D'ARMATURA: $\gamma_c = 1.1$

15.2.1 Calcolo dei Momenti Resistenti

15.2.1.1 Impalcato

Verifica C.A. S.L.U. - File: P05 - sezione mezzeria tipica

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

Titolo: campata travata - OPERATIVO/TRANSITABILE

N° Vertici: 18 **Zoom** **N° barre:** 0 **Zoom**

N°	x [cm]	y [cm]
1	15	0
2	15	10
3	7	30
4	7	82
5	12	87
6	50	92

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

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

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

Tipo rottura: Lato calcestruzzo - Cavo snervato

Materiali: P05 - acci **P05 - cls**

ϵ_{su} 67.5 ‰ ϵ_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 319 N/mm² ϵ_{cu} 3.5 ‰
 E_s 200.000 N/mm² f_{cd} 23.68 N/mm²
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 1
 ϵ_{syd} 1.595 ‰ $\sigma_{c,adm}$ 9.383 N/mm²
 $\sigma_{s,adm}$ 240 N/mm² τ_{co} 0.5804 N/mm²
 τ_{c1} 1.787 N/mm²

M_{xRd} 1.519 kN m
 σ_c -23.68 N/mm²
 σ_s N/mm²
 ϵ_c 3.5 ‰
 ϵ_s ‰
 d 117 cm
 x 6.646 x/d 0.0568
 δ 0.7

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

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

N°	As [cm ²]	x [cm]	y [cm]	σ_{sp} [MPa]
1	5.7018	0	3	800
2	1.9006	0	12.5	800
3	1.9006	0	20	800
4	3.8012	0	93	800

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

Tipo flessione: ☒ Retta ☐ Deviata

N° rett. 100 **Calcola MRd** **Dominio M-N** **Col. modello** **M-curvatura**

L₀ 0 cm **Precompresso**

P-05 trefolo 11n **P-05 trefol**

ϵ_{su} 67.5 ‰
 f_{yd} 1348 N/mm²
 E_s/E_c 6
 ϵ_{syd} 6.74 ‰
 $\sigma_{s,adm}$ 1.050 N/mm²

σ_{sp} 1.348 N/mm²
 ϵ_{sp} 62.11 ‰ compressa predef.

S-trav-1 (mezzeria travata)

Verifica C.A. S.L.U. - File: P05 - soletta mezzeria

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018 ?

Titolo : soletta mezzeria - OPERATIVO/TRANSITABILE

N° Vertici **Zoom** **N° barre** **Zoom**

N°	x [cm]	y [cm]
1	0	0
2	100	0
3	100	20
4	0	20

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	1,13	8	2
2	1,13	20	2
3	1,13	32	2
4	1,13	44	2
5	1,13	56	2
6	1,13	68	2

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

N **kN**
M **kNm**
M

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

Tipo rottura
 Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Materiali
P05 - acci **P-05 - cls**
 ϵ_{su} ‰ ϵ_{c2} ‰
 f_{yd} N/mm² ϵ_{cu}
 E_s N/mm² f_{cd}
 E_s/E_c f_{cc}/f_{cd} ?
 ϵ_{syd} ‰ $\sigma_{c,adm}$
 $\sigma_{s,adm}$ N/mm² τ_{co}
 τ_{c1}

M kN m
 σ_c N/mm²
 σ_s N/mm²
 ϵ_c ‰
 ϵ_s ‰
 d cm
 x x/d
 δ

Tipo Sezione
☐ Rettan.re ☐ Trapezi
☐ a T ☐ Circolare
☐ Rettangoli ☒ Coord.
☐ DXF

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

Tipo flessione
☒ Retta ☐ Deviata

N° rett.
Calcola MRd **Dominio M-N**
L₀ cm **Col. modello**
M-curvatura
☐ Precompresso

S-sol-2 (mezzeria soletta interna)



Titolo : soletta sbalzo - OPERATIVO/TRANSITABILE

N° Vertici

4

Zoom

N° barre

16

Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	0	0
2	100	0
3	100	20
4	0	20

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	1,13	8	2
2	1,13	20	2
3	1,13	32	2
4	1,13	44	2
5	1,13	56	2
6	1,13	68	2

Sollecitazioni

S.L.U.

Metodo n

N

Ed

0

0

kN

M

xEd

0

0

kNm

M

yEd

0

0

P.to applicazione N

☒ Centro

☐ Baricentro cls

☐ Coord.[cm]

xN 0

yN 0

Tipo rottura

Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Tipo Sezione

☐ Rettan.re

☐ Trapezi

☐ a T

☐ Circolare

☐ Rettangoli

☒ Coord.

☐ DXF

File

Metodo di calcolo

☐ S.L.U.+

☒ S.L.U.-

☐ Metodo n

Tipo flessione

☒ Retta

☐ Deviata

N° rett. 100

Calcola MRd

Dominio M-N

L₀ 0 cm

Col. modello

M-curvatura

☐ Precompresso

Materiali

P05 - acci

P-05 - cls

ϵ_{su}

67,5

‰

ϵ_{c2}

2

‰

f_{yd}

319

N/mm²

ϵ_{cu}

3,5

‰

E_s

200.000

N/mm²

f_{cd}

23,68

N/mm²

E_s / E_c

15

f_{cc} / f_{cd}

1

?

ϵ_{syd}

1,595

‰

$\sigma_{c,adm}$

9,383

N/mm²

$\sigma_{s,adm}$

240

N/mm²

τ_{co}

0,5804

τ_{c1}

1,787

M

xRd

-47,59

kN m

σ_c

-23,68

N/mm²

σ_s

319

N/mm²

ϵ_c

3,5

‰

ϵ_s

29,15

‰

d

17

cm

x

1,822

x/d

0,1072

δ

0,7

S-sol-1 e S-sol-3 (soletta appoggi interni e soletta sbalzo)

15.2.2 Calcolo dei Tagli Resistenti

15.2.2.1 Impalcato

Si riporta la resistenza a taglio delle travate, armate con staffe diametro 12mm e passo variabile da 100mm (agli appoggi) fino a 300mm in corrispondenza della mezzeria.

Caratteristiche della sezione		
GEOMETRIA	H = 100 cm b _w = 14 cm h' = 3 cm d = 97 cm z = 87,3 cm f _{cd} = 23,68 Mpa f _{yd} = 319,65 Mpa	altezza sezione larghezza sezione copriferro altezza utile braccio della coppia interna (0,9 d) resistenza calcestruzzo resistenza acciaio
ARMATURA TESA	F = 11 mm n° = 6 A _s = 5,7 cm ² r _l = 0,0041	diametro armatura numero barre area armatura tesa rapporto geometrico d'armatura longitudinale
GEOMETRIA	N _{ed} = 1064 kN s _{cp} = 3,6 Mpa	valore compressione assiale tensione media di compressione
Caratteristiche della sezione armata a taglio - STAFFE		
	F = 12 mm n° = 2,0 A _{sw} = 2,3 cm ² s = 10 cm alpha = 90 ° theta = 38 ° α _c = 1,152 n x f _{cd} = 11,84 Mpa	diametro staffe numero braccia area armatura trasversale passo delle staffe angolo inclinazione armature angolo inclinazione puntoni coefficiente maggiorativo pari a: 1 per membrane non compresse 1 + s _{cp} /f _{cd} per 0 ≤ s _{cp} ≤ 0,25 f _{cd} 1,25 per 0,25 f _{cd} ≤ s _{cp} ≤ 0,5 f _{cd} 2,5(1 - s _{cp} /f _{cd}) per 0,5 f _{cd} ≤ s _{cp} ≤ f _{cd} resistenza a compressione ridotta (n f _{cd} = 0,5 f _{cd})
Resistenza totale armature trasversali resistenti a taglio		
resistenza "taglio-trazione"	V _{Rds} = 807 kN	Con riferimento all'armatura trasversale, la resistenza di progetto a "taglio trazione" si calcola con: $V_{Rds} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha \quad [4.1.27]$
Resistenza a rottura del puntone compresso di calcestruzzo		
resistenza "taglio-compressione"	V _{Rdc} = 809 kN	Con riferimento al calcestruzzo d'anima, la resistenza di progetto a "taglio compressione" si calcola con: $V_{Rdc} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot v \cdot f_{cd} (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta) \quad [4.1.28]$
RESISTENZA FINALE		
resistenza "taglio-trazione"	V _{Rd} = 807 kN	

taglio travata campata - S-trav-4

Caratteristiche della sezione		
GEOMETRIA	H =	100 cm altezza sezione
	b _w =	14 cm larghezza sezione
	h' =	3 cm copriferro
	d =	97 cm altezza utile
	z =	87,3 cm braccio della coppia interna (0,9 d)
	f _{cd} =	23,68 Mpa resistenza calcestruzzo
	f _{yd} =	319,65 Mpa resistenza acciaio
ARMATURA TESA	F =	11 mm diametro armatura
	n° =	6 numero barre
	A _s =	5,7 cm ² area armatura tesa
	rl =	0,0041 rapporto geometrico d'armatura longitudinale
GEOMETRIA	N _{ed} =	1064 kN valore compressione assiale
	s _{cp} =	3,6 Mpa tensione media di compressione
Caratteristiche della sezione armata a taglio - STAFFE		
	F =	12 mm diametro staffe
	n° =	2,0 numero braccia
	A _{sw} =	2,3 cm ² area armatura trasversale
	s =	15 cm passo delle staffe
	alpha =	90 ° angolo inclinazione armature
	theta =	30 ° angolo inclinazione puntoni
	α _c =	1,152 coefficiente maggiorativo pari a: 1 per membrane non compresse 1 + s _{cp} /f _{cd} per 0 ≤ s _{cp} ≤ 0,25 f _{cd} 1.25 per 0,25 f _{cd} ≤ s _{cp} ≤ 0,5 f _{cd} 2,5(1 - s _{cp} /f _{cd}) per 0,5 f _{cd} ≤ s _{cp} ≤ f _{cd}
	n x f _{cd} =	11,84 Mpa resistenza a compressione ridotta (n f _{cd} = 0,5 f _{cd})
Resistenza totale armature trasversali resistenti a taglio		
resistenza "taglio-trazione"	V _{Rds} =	728 kN
Con riferimento all'armatura trasversale, la resistenza di progetto a "taglio trazione" si calcola con:		
$V_{Rds} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \theta) \cdot \sin \alpha$ [4.1.27]		
Resistenza a rottura del puntone compresso di calcestruzzo		
resistenza "taglio-compressione"	V _{Rdc} =	722 kN
Con riferimento al calcestruzzo d'anima, la resistenza di progetto a "taglio compressione" si calcola con		
$V_{Rdc} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot v \cdot f_{cd} (\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \theta) / (1 + \operatorname{ctg}^2 \theta)$ [4.1.28]		
RESISTENZA FINALE		
resistenza "taglio-trazione"	V _{Rd} =	722 kN

taglio travata campata - S-trav-3

Caratteristiche della sezione		
GEOMETRIA	$H = 100 \text{ cm}$ $b_w = 14 \text{ cm}$ $h' = 3 \text{ cm}$ $d = 97 \text{ cm}$ $z = 87,3 \text{ cm}$ $f_{cd} = 23,68 \text{ Mpa}$ $f_{yd} = 319,65 \text{ Mpa}$	altezza sezione larghezza sezione copriferro altezza utile braccio della coppia interna (0,9 d) resistenza calcestruzzo resistenza acciaio
ARMATURA TESA	$F = 11 \text{ mm}$ $n^\circ = 6$ $A_s = 5,7 \text{ cm}^2$ $rl = 0,0041$	diametro armatura numero barre area armatura tesa rapporto geometrico d'armatura longitudinale
GEOMETRIA	$N_{ed} = 1064 \text{ kN}$ $s_{cp} = 3,6 \text{ Mpa}$	valore compressione assiale tensione media di compressione
Caratteristiche della sezione armata a taglio - STAFFE		
	$F = 12 \text{ mm}$ $n^\circ = 2,0$ $A_{sw} = 2,3 \text{ cm}^2$ $s = 20 \text{ cm}$ $\alpha = 90^\circ$ $\theta = 26^\circ$ $\alpha_c = 1,152$ $n \times f_{cd} = 11,84 \text{ Mpa}$	diametro staffe numero braccia area armatura trasversale passo delle staffe angolo inclinazione armature angolo inclinazione puntoni coefficiente maggiorativo pari a: 1 per membrane non compresse $1 + s_{cp}/f_{cd}$ per $0 \leq s_{cp} \leq 0,25 f_{cd}$ 1.25 per $0,25 f_{cd} \leq s_{cp} \leq 0,5 f_{cd}$ $2,5(1 - s_{cp}/f_{cd})$ per $0,5 f_{cd} \leq s_{cp} \leq f_{cd}$ resistenza a compressione ridotta ($n f_{cd} = 0,5 f_{cd}$)
Resistenza totale armature trasversali resistenti a taglio		
resistenza "taglio-trazione"	$V_{Rds} = 647 \text{ kN}$	
Con riferimento all'armatura trasversale, la resistenza di progetto a "taglio trazione" si calcola con:		
$V_{Rds} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg} \alpha + \text{ctg} \theta) \cdot \sin \alpha \quad [4.1.27]$		
Resistenza a rottura del puntone compresso di calcestruzzo		
resistenza "taglio-compressione"	$V_{Rdc} = 657 \text{ kN}$	
Con riferimento al calcestruzzo d'anima, la resistenza di progetto a "taglio compressione" si calcola con:		
$V_{Rdc} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot v \cdot f_{cd} (\text{ctg} \alpha + \text{ctg} \theta) / (1 + \text{ctg}^2 \theta) \quad [4.1.28]$		
RESISTENZA FINALE		
resistenza "taglio-trazione"	$V_{Rd} = 647 \text{ kN}$	

taglio travata campata - S-trav-2

Caratteristiche della sezione		
GEOMETRIA	$H = 100 \text{ cm}$ $b_w = 14 \text{ cm}$ $h' = 3 \text{ cm}$ $d = 97 \text{ cm}$ $z = 87,3 \text{ cm}$ $f_{cd} = 23,68 \text{ Mpa}$ $f_{yd} = 319,65 \text{ Mpa}$	altezza sezione larghezza sezione copriferro altezza utile braccio della coppia interna (0,9 d) resistenza calcestruzzo resistenza acciaio
ARMATURA TESA	$F = 11 \text{ mm}$ $n^\circ = 6$ $A_s = 5,7 \text{ cm}^2$ $r_l = 0,0041$	diametro armatura numero barre area armatura tesa rapporto geometrico d'armatura longitudinale
GEOMETRIA	$N_{ed} = 1064 \text{ kN}$ $s_{cp} = 3,6 \text{ Mpa}$	valore compressione assiale tensione media di compressione
Caratteristiche della sezione armata a taglio - STAFFE		
	$F = 12 \text{ mm}$ $n^\circ = 2,0$ $A_{sw} = 2,3 \text{ cm}^2$ $s = 30 \text{ cm}$ $\alpha = 90^\circ$ $\theta = 22^\circ$ $\alpha_c = 1,152$ $n \times f_{cd} = 11,84 \text{ Mpa}$	diametro staffe numero braccia area armatura trasversale passo delle staffe angolo inclinazione armature angolo inclinazione puntoni coefficiente maggiorativo pari a: 1 per membrane non compresse $1 + s_{cp}/f_{cd}$ per $0 \leq s_{cp} \leq 0,25 f_{cd}$ 1.25 per $0,25 f_{cd} \leq s_{cp} \leq 0,5 f_{cd}$ $2,5(1 - s_{cp}/f_{cd})$ per $0,5 f_{cd} \leq s_{cp} \leq f_{cd}$ resistenza a compressione ridotta ($n f_{cd} = 0,5 f_{cd}$)
Resistenza totale armature trasversali resistenti a taglio		
resistenza "taglio-trazione"	$V_{Rds} = 520 \text{ kN}$ Con riferimento all'armatura trasversale, la resistenza di progetto a "taglio trazione" si calcola con: $V_{Rds} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg} \alpha + \text{ctg} \theta) \cdot \sin \alpha \quad [4.1.27]$	
Resistenza a rottura del puntone compresso di calcestruzzo		
resistenza "taglio-compressione"	$V_{Rdc} = 579 \text{ kN}$ Con riferimento al calcestruzzo d'anima, la resistenza di progetto a "taglio compressione" si calcola con: $V_{Rdc} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot v \cdot f_{cd} (\text{ctg} \alpha + \text{ctg} \theta) / (1 + \text{ctg}^2 \theta) \quad [4.1.28]$	
RESISTENZA FINALE		
resistenza "taglio-trazione"	$V_{Rd} = 520 \text{ kN}$	

taglio travata campata - S-trav-1

La resistenza di elementi non armati a taglio, quali ad esempio la **soletta in campata ed in corrispondenza degli sbalzi**, è valutata secondo quanto al §6.3.5.2 delle Linee Guida 2022, per le quali:

In particolare per la verifica a taglio negli elementi in cemento armato poco armati o non armati, in alternativa alle formule delle NTC, è consentito l'uso della seguente espressione:

$$V_{Rd} = \frac{0.3 \sqrt{f_{ck}} b_w d}{\gamma_c (1 + 0.0022d)}$$

dove le grandezze sono misurate in MPa e mm ed i simboli hanno lo stesso significato della NTC.

Tale formulazione è una semplificazione conservativa delle SIA 262.

Per quanto concerne il taglio nel cemento armato precompresso, si può valutare con la formulazione (4.1.24) delle NTC 2018 dove σ_{φ} è intesa come l'intera tensione media di precompressione nella sezione considerata.

Nel caso in esame, le solette in corrispondenza degli appoggi sono caratterizzate da un'altezza della sezione pari a 200mm, con un'altezza utile della sezione di 170mm.

Al 8.2.1 dell'elaborato, per le verifiche ai sensi delle NTC-2018 volte alla all'operatività, sono stati definiti i seguenti parametri della resistenza del materiale:

Livello di conoscenza	LC	2
Fattore di Confidenza	FC	1,2
Coefficiente Parziale di sicurezza - γ_c	1,26	[-]
Resistenza a compressione MEDIA da prove - f_{cm}	35,80	[MPa]
Resistenza a compressione CARATTERISTICA da prove - $f_{ck, is}$	29,00	[MPa]

Ne consegue che la resistenza della soletta è pari a:

$$V_{Rd} = \frac{0.30 \times \sqrt{29} \times 1000 \times 170}{1.26 \times (1 + 0.0022 \times 170)} = 158,64 \text{ kN/m}$$

15.3 Verifiche di Resistenza - Operatività

Si riporta di seguito una tabella riepilogativa nella quale vengono riassunti gli sforzi sollecitanti e quelli resistenti illustrati ai precedenti paragrafi, con il relativo coefficiente di sicurezza finale.

OPERATIVITA' NTC18			VERIFICHE IMPALCATO		M+			M-			V			
	Elemento	Sezione	Massimizzazione	Comb	Med	MRd	CS	Med	MRd	CS	VRd	VRd	CS	
SLU	S-trav-1	Travata	Impalcato - Mezzeria	M+	SLU-1	2358	1519	1.552				VERIFICATO ADEGUATEZZA		
	S-trav-2	Travata	Impalcato - L/3	V (staffe passo 20)	SLU-1						VERIFICATO ADEGUATEZZA			
	S-trav-3	Travata	Impalcato - L/4	V (staffe passo 15)	SLU-1						VERIFICATO ADEGUATEZZA			
	S-trav-4	Travata	Impalcato - Appoggio	V (staffe passo 10)	SLU-2						685	807	0,849	
	S-sol-1	Soletta	Soletta interna	M-/V	SLU-3				VERIFICATO ADEGUATEZZA			164	158,64	1,034
	S-sol-2	Soletta	Soletta interna	M+	SLU-3	VERIFICATO ADEGUATEZZA								
	S-sol-3	Soletta	Soletta sbalzo	M-/V	SLU-3				-73	-47,59	1.534	217	158,64	1,368

Come da risultati riportati nella tabella di cui sopra, sono diversi i meccanismi che comportano il non rispetto delle verifiche di adeguatezza per il manufatto in esame; si riassumono di seguito le maggiori carenze riscontrate:

In condizioni statiche:

- Importanti carenze a pressoflessione delle travate longitudinali
- Importanti carenze a pressoflessione ed a taglio per gli elementi costituenti la soletta a sbalzo. La soletta interna invece, la quale verificava in condizioni di adeguatezza a pressoflessione, presenta lievi carenze a taglio.

Si ritiene pertanto che il ponte **NON rispetti le verifiche di Operatività** e risulta pertanto necessario procedere con gli step di carico successivi come da procedura illustrata al capitolo 2 del presente elaborato.

16 VERIFICHE DI TRANSITABILITA' CdS – MEZZI PESANTI (44t)

Poiché le verifiche non danno ancora tutte esito positivo come risulta dai precedenti paragrafi, si procede a adottare ulteriori misure limitative dell'uso dell'opera.

Si eseguirà l'analisi strutturale con le seguenti condizioni:

- Limitazioni di carico: corsie di carico limitate nel peso secondo le prescrizioni del Codice della Strada, C.d.S. (si veda nel seguito).
- Tutti i coefficienti parziali di sicurezza invariati rispetto alla verifica precedente, tranne il coefficiente dei carichi da traffico γ_Q , qui chiamato γ_{CdS} e pari a **1.60/1.35/1.10**: i fattori parziali differiscono in modo sostanziale a seconda del controllo che si effettua sui carichi che effettivamente transitano sul ponte, come già esplicitato nel paragrafo dedicato ai coefficienti.

Come già riportato precedentemente, le limitazioni di traffico da codice della strada saranno simulate con 4 distinti scenari, il primo limitando il traffico a mezzi (pesanti) con peso non superiore alle 44 tonnellate, il secondo a mezzi (intermedi) di peso non superiore a 26 tonnellate, il terzo a mezzi (leggeri) con peso non superiore a 7,5 tonnellate ed infine il quarto consentendo il transito a soli autoveicoli.

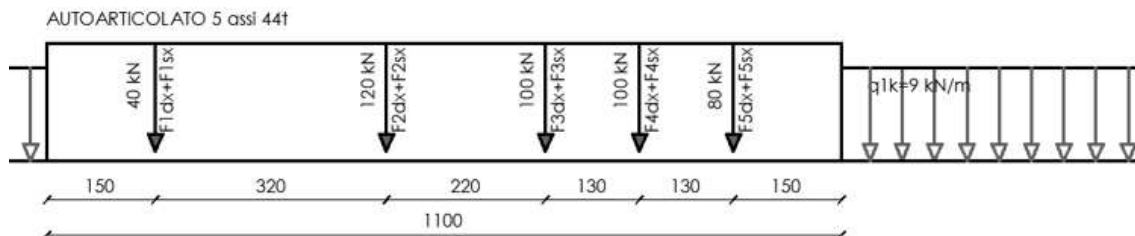


FIGURA 16-1: SCHEMA DI CARICO PER AUTOARTICOLATO 44 TONNELLATE

I coefficienti delle azioni permanenti restano gli stessi definiti per la verifica di operatività ($\gamma_G = 1.16$).

I coefficienti delle azioni permanenti portate restano gli stessi definiti per la verifica di operatività ($\gamma_{G2} = 1.26$).

16.1 Sollecitazioni di Calcolo

A partire dalle sollecitazioni riportate graficamente, si definiscono gli sforzi sollecitanti in combinazione i quali possono essere riassunti nella seguente tabella.

TRANSITABILITA' Cds MEZZI PESANTI 44t (controlli livello 1)												
	Elemento	Sezione	Massimizzazione	Comb	Note	Elemento	Shear Force 1	Bending Moment 1	Shear Force 2	Bending Moment 2	Axial Force	Torque
SLU	\$-hov-1	Trave 1	M+	SLU-1	Max M+	153	-4	3	13	1803	31	-23
	\$-hov-2	Trave1a	V (stifle passo 20)	SLU-1	V/m completa	40	20	-5	253	1091	11	-20
	\$-hov-3	Trave1a	V (stifle passo 15)	SLU-1	V/m completa	56	27	-13	338	576	-4	-10
	\$-hov-4	Trave1a	V (stifle passo 10)	SLU-2	V/m appoggio	321	-1	0	551	-574	38	35
	\$-sol-1	Solella	M-/V	SLU-3		172	2	-1	86	-21	25	0
	\$-sol-2	Solella	M+	SLU-3		61	-23	19	-41	29	-10	0
	\$-sol-3	Solella	M-/V	SLU-3		63	0	0	141	-47	0	0

16.2 Resistenze delle Sezioni in Esame

Le resistenze dei materiali impiegate nelle Verifiche di Operatività/Transitabilità sono quelle riportate al 8.2 dell'elaborato, per le quali si è considerato:

CALCESTRUZZO: $\gamma_c = 1.26$

BARRE D'ARMATURA: $\gamma_c = 1.1$

Per i parametri di resistenza delle sezioni, quali momenti flettenti resistenti o tagli resistenti, si dovrà dunque fare riferimento al capitolo 15.2 dell'elaborato

16.3 Verifiche di Resistenza – Transitabilità da CdS – Mezzi pesanti (44t)

Si riporta di seguito una tabella riepilogativa nella quale vengono riassunti gli sforzi sollecitanti e quelli resistenti illustrati ai precedenti paragrafi, con il relativo coefficiente di sicurezza finale.

TRANSITABILITA' CdS MEZZI PESANTI 44t (controlli Livello 1)			VERIFICHE IMPALCATO		M+			M-			V			REACTION		
	Elemento	Sezione	Massimizzazione	Comb	MEd	MRd	CS	MEd	MRd	CS	VEd	VRd	CS	REd	RRd	CS
SLU	S-trav-1	Travata	Impalcato - Mezzeria	M+	SLU-1	1803	1519	1,187				VERIFICATO ADEGUATEZZA				
	S-trav-2	Travata	Impalcato - L/3	V (staffe passo 20)	SLU-1							VERIFICATO ADEGUATEZZA				
	S-trav-3	Travata	Impalcato - L/4	V (staffe passo 15)	SLU-1							VERIFICATO ADEGUATEZZA				
	S-trav-4	Travata	Impalcato - Appoggio	V (staffe passo 10)	SLU-2							VER. OPERATIVITA' NTC18				
	S-sol-1	Soletta	Soletta interna	M-/V	SLU-3				VERIFICATO ADEGUATEZZA			86	158,64	0,542		
	S-sol-2	Soletta	Soletta interna	M+	SLU-3	VERIFICATO ADEGUATEZZA										
	S-sol-3	Soletta	Soletta sbalzo	M-/V	SLU-3				-47	-47,59	0,988	141	158,64	0,889		

Come da risultati riportati nella tabella di cui sopra, quasi tutti gli elementi risultano verificati in condizioni di transitabilità secondo Codice della Strada – mezzi pesanti; si riassumono di seguito le maggiori carenze ancora presenti:

In condizioni statiche:

- Leggera carenza presso-flessionale delle travate longitudinali precomprese

Dati i risultati esposti sopra si ritiene dunque che il ponte **NON rispetti le verifiche di Transitabilità ai Mezzi Pesanti (44t) previsti dal Codice della Strada** e risulta pertanto necessario procedere con gli step di carico successivi come da procedura illustrata al capitolo 2 del presente elaborato.

17 VERIFICHE DI TRANSITABILITA' CdS – MEZZI INTERMEDI (26t)

Poiché le verifiche non danno ancora tutte esito positivo come risulta dai precedenti paragrafi, si procede a adottare ulteriori misure limitative dell'uso dell'opera.

Si eseguirà l'analisi strutturale con le seguenti condizioni:

- Limitazioni di carico: corsie di carico limitate nel peso secondo le prescrizioni del Codice della Strada, C.d.S. (si veda nel seguito).
- Tutti i coefficienti parziali di sicurezza invariati rispetto alla verifica precedente, tranne il coefficiente dei carichi da traffico γ_Q , qui chiamato γ_{CdS} e pari a **1.60/1.35/1.10**: i fattori parziali differiscono in modo sostanziale a seconda del controllo che si effettua sui carichi che effettivamente transitano sul ponte, come già esplicitato nel paragrafo dedicato ai coefficienti.

Come già riportato precedentemente, le limitazioni di traffico da codice della strada saranno simulate con 4 distinti scenari, il primo limitando il traffico a mezzi (pesanti) con peso non superiore alle 44 tonnellate, il secondo a mezzi (intermedi) di peso non superiore a 26 tonnellate, il terzo a mezzi (leggeri) con peso non superiore a 7,5 tonnellate ed infine il quarto consentendo il transito a soli autoveicoli.

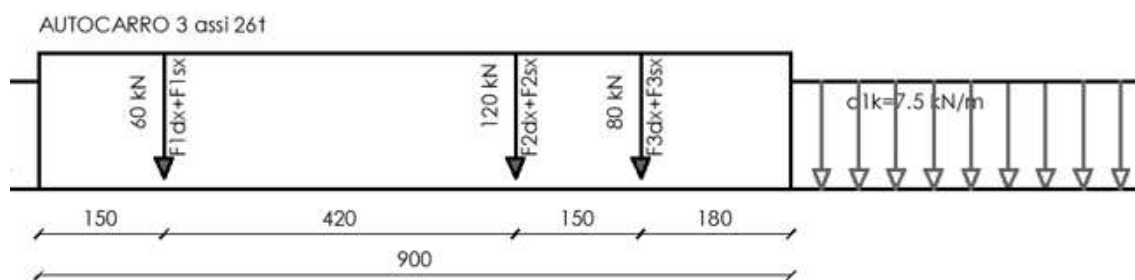


FIGURA 17-1: SCHEMA DI CARICO PER AUTOCARRO 26 TONNELLATE

I coefficienti delle azioni permanenti restano gli stessi definiti per la verifica di operatività ($\gamma_G = 1.16$).

I coefficienti delle azioni permanenti portate restano gli stessi definiti per la verifica di operatività ($\gamma_{G2} = 1.26$).

17.1 Sollecitazioni di Calcolo

A partire dalle sollecitazioni riportate graficamente, si definiscono gli sforzi sollecitanti in combinazione i quali possono essere riassunti nella seguente tabella.

TRANSITABILITA' CDS MEZZI INTERMED) 2dI (controlli livello 1)												
	Elemento	Sezione	Massimizzazione	Comb	Note	Elemento	Shear Force 1	Bending Moment 1	Shear Force 2	Bending Moment 2	Axial Force	Torque
S-hov-1	Trova 1	Impalcato - Mezzera	M+	SLU-1	Max M+	149	0	1	18	1437	-23	-14
S-hov-2	Trova2	Impalcato - U3	V (stafle passo 20)	SLU-1	V in cornata	229	-2	0	-218	785	-6	0
S-hov-3	Trova2	Impalcato - U4	V (stafle passo 15)	SLU-1	V in cornata	36	11	-5	280	384	-2	-12
S-hov-4	Trova2	Impalcato - Appoggio	V (stafle passo 10)	SLU-2	V in appoggio	321	-5	0	470	-574	22	22
SLU												
S-sol-1	Solella	Solella interna	M-/V	SLU-3		172	2	-1	86	-21	25	0
S-sol-2	Solella	Solella interna	M+	SLU-3		172	2	0	0	22	25	0
S-sol-3	Solella	Solella sbazo	M-/V	SLU-3		63	0	0	141	-47	0	0

17.2 Resistenze delle Sezioni in Esame

Le resistenze dei materiali impiegate nelle Verifiche di Operatività/Transitabilità sono quelle riportate al 8.2 dell'elaborato, per le quali si è considerato:

CALCESTRUZZO: $\gamma_c = 1.26$

BARRE D'ARMATURA: $\gamma_c = 1.1$

Per i parametri di resistenza delle sezioni, quali momenti flettenti resistenti o tagli resistenti, si dovrà dunque fare riferimento al capitolo 15.2 dell'elaborato

17.3 Verifiche di Resistenza – Transitabilità da CdS – Mezzi intermedi (26t)

Si riporta di seguito una tabella riepilogativa nella quale vengono riassunti gli sforzi sollecitanti e quelli resistenti illustrati ai precedenti paragrafi, con il relativo coefficiente di sicurezza finale.

TRANSITABILITA' CdS MEZZI INTEREDI 26t (controlli Livello 1)			VERIFICHE IMPALCATO		M+			M-			V			REACTION		
	Elemento	Sezione	Massimizzazione	Comb	Med	MRd	CS	Med	MRd	CS	VRd	VRd	CS	REd	RRd	CS
SLU	S-trav-1	Travata	Impalcato - Mezzeria	M+	SLU-1	1437	1519	0,946						VERIFICATO ADEGUATEZZA		
	S-trav-2	Travata	Impalcato - L/3	V (staffe passo 20)	SLU-1									VERIFICATO ADEGUATEZZA		
	S-trav-3	Travata	Impalcato - L/4	V (staffe passo 15)	SLU-1									VERIFICATO ADEGUATEZZA		
	S-trav-4	Travata	Impalcato - Appoggio	V (staffe passo 10)	SLU-2									VER. OPERATIVITA' NTC18		
	S-s-1	Soletta	Soletta interna	M-/V	SLU-3						VERIFICATO ADEGUATEZZA			VERIFICATO CdS mezzi 44 ton		
	S-s-2	Soletta	Soletta interna	M+	SLU-3			VERIFICATO ADEGUATEZZA								
	S-s-3	Soletta	Soletta sbalzo	M-/V	SLU-3						VERIFICATO CdS mezzi 44 ton			VERIFICATO CdS mezzi 44 ton		

Dati i risultati esposti sopra, per i quali anche la verifica presso-flessionale delle travate longitudinali, con un tasso di lavoro del 94,6%, è rispettata, si ritiene dunque che il ponte **rispetti le verifiche di Transitabilità ai Mezzi Intermedi (26t) previsti dal Codice della Strada**.

Non risulta pertanto necessario procedere con gli step di carico successivi come da procedura illustrata al capitolo 2 del presente elaborato.

18 CONCLUSIONI

18.1 Risultato della Verifica di Livello 4

Le **analisi di livello 4 di cui al presente documento** hanno confermato le carenze già note, dimostrando che il manufatto non risulta adeguato ai carichi delle attuali NTC; si è quindi proceduto con le analisi apportando le riduzioni di carico previste dalle attuali Linee Guida Ponti fino a raggiungere verifiche soddisfacenti per tutti gli elementi portanti del manufatto.

Di seguito una tabella riepilogativa dei coefficienti minimi riscontrati negli step di carico eseguiti.

RIEPILOGO		VERIFICHE IMPALCATO	CS MIN ADEGUATEZZA		CS MIN OPERATIVITA'		CS MIN TRANSITABILITA' CdS (44t)		CS MIN TRANSITABILITA' CdS (26t)		CS MIN TRANSITABILITA' CdS (7.5t)	
	Elemento	Sezione	CS M	CS V	CS M	CS V	CS M	CS V	CS M	CS V	CS M	CS V
SLU	S-trav-1	Travata	Impalcato - Mezzerta	1.772	0.603	1.552	NN	1.187	NN	0.946	NN	NN
	S-trav-2	Travata	Impalcato - L/3		0.605		NN		NN		NN	NN
	S-trav-3	Travata	Impalcato - L/4		0.648		NN		NN		NN	NN
	S-trav-4	Travata	Impalcato - Appoggio		1.072		0.849		NN		NN	NN
	S-sol-1	Soletta	Soletta interna	0.852	1.388	NN	1.034	NN	0.542	NN	NN	NN
	S-sol-2	Soletta	Soletta interna	0.879		NN		NN		NN		NN
	S-sol-3	Soletta	Soletta sbalzo	1.746	1.831	1.534	1.368	0.988	0.889	NN	NN	NN

RIEPILOGO		VERIFICHE SOTTOSTRUTTURE		CS MIN ADEGUATEZZA	
	Elemento	Sezione	CS M	CS V	
SLU	S-spalla-1	muro frontale	0,118		
		sottostrutture Myy +	0,072		
		sottostrutture Myy -		0,903	
		muro frontale			
	S-spalla-2	paraghiaia	0,596	0,353	

	RIEPILOGO		VERIFICHE SOTTOSTRUTTURE	CS MIN SISMICA	
		Elemento	Sezione	CS M	CS V
SLV	S-spalla-1	muro frontale	sottostruttura Myy +	0,060	
		muro frontale	sottostruttura Myy -	0,047	
		muro frontale	sottostruttura Vyz		0,466
	S-spalla-2	paraghiaia	sottostruttura	0,065	0,041

LEGENDA SIMBOLI:

NN: verifica non necessaria in quanto elemento già verificato allo step di carico precedente

ND: verifica non possibile per eccesso di trazione

CS>1: verifica non soddisfatta

CS<1: verifica soddisfatta

Il risultato dell'analisi è dunque che il manufatto risulta **idoneo ai carichi da mezzi intermedi previsti da Codice della Strada (26 tonnellate).**

Il manufatto **risulta inoltre idoneo dal punto di vista sismico.**

L'idoneità sopra menzionata risulta però vincolata alla risoluzione di tutti gli ammaloramenti riscontrati, meglio precisati nel capitolo sottostante.

Il livello di degrado rilevato, sebbene attualmente non a livelli tali da compromettere la stabilità del manufatto, se non accuratamente trattato potrebbe nel tempo evolvere in una condizione più grave tale da inficiare totalmente le considerazioni fatte nel presente elaborato di calcolo oltre che costituire un reale pericolo per la sicurezza del manufatto e degli utilizzatori.

Come anticipato, **le condizioni di ammaloramento ed usura rilevate** durante la campagna di indagini e già riportate al capitolo 6 del presente elaborato, **denotano un'assenza di manutenzione ordinaria.** I punti ritenuti più critici vengono riportati di seguito:

- Esposizione delle staffe alla corrosione per pregressa espulsione del copriferro
- Ammaloramento del giunto di dilatazione/schiacciamento delle scossaline
- Ammaloramenti del calcestruzzo sull'ala del tegolo, presumibilmente per rimozione di dispositivi di fissaggio di vecchi sottoservizi.
- Scalzamento di tutta la spalla di valle e parte di quella di monte
- Dilavamento dei muri e macchie di umidità nelle spalle
- Danneggiamento muro paraghiaia ed esposizioni ferri di armatura travate

Di seguito alcune viste degli ammaloramenti riscontrati:



FIGURA 18-1: ESPOSIZIONE DELLE STAFFE ALLA CORROSIONE PER PREGRESSA ESPULSIONE COPRIFERRO



FIGURA 18-2: AMMALORAMENTO DEL GIUNTO DILATAZIONE CON SCHIACCIAMENTO DELLE SCOSSALINE



FIGURA 18-3: SCALZAMENTO DELLE SPALLE



FIGURA 18-4: DILAVAMENTO DELLE FACCIATE CON OSSIDAZIONE ARMATURE



FIGURA 18-5: DANNEGGIAMENTO MURO PARAGHIAIA ED ESPOSIZIONI FERRI DI ARMATURA TRAVATE

Allegati:

- Giudizio motivato e accettabilità dei risultati
- Software di calcolo, convenzioni e definizioni

GIUDIZIO MOTIVATO E ACCETTABILITÀ DEI RISULTATI

Per quanto concerne le informazioni generali sull'elaborazione, si faccia riferimento a quanto sopra già riportato, nonché a quanto riportato nei vari tabulati di calcolo.

Per quanto concerne il giudizio motivato di accettabilità dei risultati, si dichiara di aver accuratamente controllato i risultati dell'elaborazione, riportati nella presente relazione e nei vari tabulati di calcolo, nonché di aver verificato con cura l'esattezza delle opzioni di input proprie del programma, settando tali opzioni in conformità al caso in esame. Sulla scorta di ciò, si ritiene lecito accettare i risultati forniti dal software di calcolo.

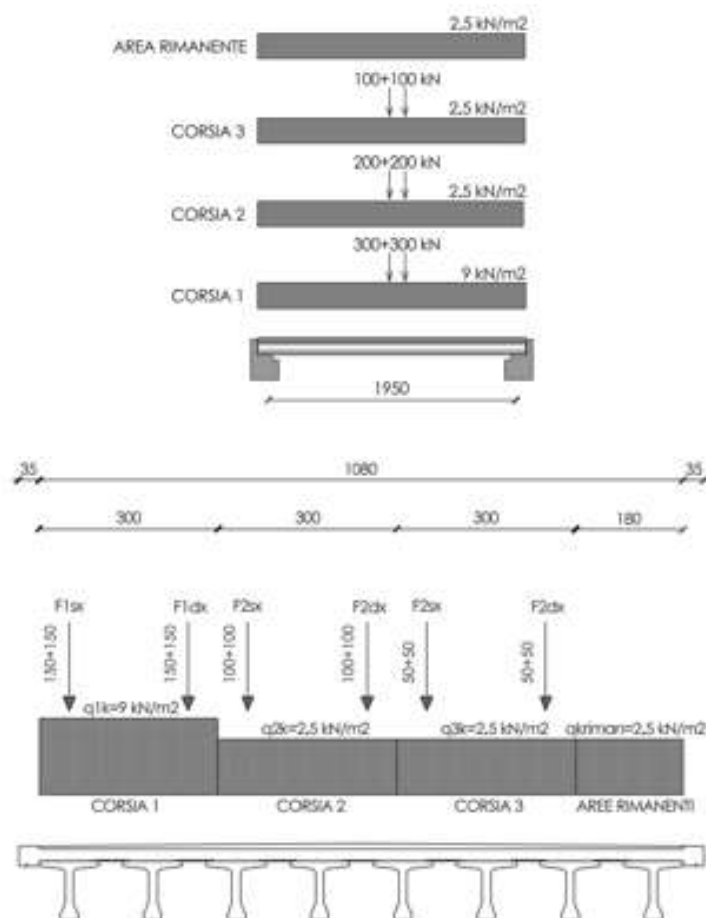
A riscontro dell'attendibilità del software di calcolo adottato, si riporta la verifica della forza sismica complessiva nonché della massa totale scaricata a terra dal modello FEM, come da analisi statica lineare.

Confronto Reazioni Globali dovute a carico da traffico – NTC2018

Si effettua un confronto tra la sommatoria delle reazioni ottenuta da una delle combinazioni del modello FEM per carichi da traffico, ed il corrispondente effettuato analiticamente.

Si prende in oggetto la configurazione di carichi da traffico denominata NTC-T1:

REAZIONI TOTALI A MANO



Qtraffico tandem corsia 1			600	kN
Qtraffico tandem corsia 2			400	kN
Qtraffico tandem corsia 2			200	kN
Qtraffico ripartito corsia 1	19,500	3	9	kN/m²
Qtraffico ripartito corsia 2	19,500	3	2,5	kN/m²
Qtraffico ripartito corsia 3	19,500	3	2,5	kN/m²
Qtraffico ripartito corsia rimanente	19,500	1,8	2,5	kN/m²

Carico Totale 2107 kN

REAZIONI TOTALI FEM - Schema NTC T1						
	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
	kN	kN	kN	kN.m	kN.m	kN.m
Node 196	8,0	-5,0	-19,0	0,0	0,0	0,0
Node 197	3,0	-1,0	9,0	0,0	0,0	0,0
Node 200	1,0	-5,0	31,0	0,0	0,0	0,0
Node 202	-5,0	-3,0	11,0	0,0	0,0	0,0
Node 204	-6,0	-1,0	17,0	0,0	0,0	0,0
Node 206	-4,0	1,0	26,0	0,0	0,0	0,0
Node 208	5,0	1,0	85,0	0,0	0,0	0,0
Node 210	7,0	2,0	67,0	0,0	0,0	0,0
Node 212	2,0	2,0	47,0	0,0	0,0	0,0
Node 213	-2,0	1,0	71,0	0,0	0,0	0,0
Node 241	0,0	-2,0	157,0	0,0	0,0	0,0
Node 242	-1,0	-2,0	55,0	0,0	0,0	0,0
Node 245	-1,0	-2,0	72,0	0,0	0,0	0,0
Node 247	0,0	-4,0	41,0	0,0	0,0	0,0
Node 249	1,0	-4,0	33,0	0,0	0,0	0,0
Node 251	1,0	-2,0	24,0	0,0	0,0	0,0
Node 253	0,0	6,0	15,0	0,0	0,0	0,0
Node 255	1,0	3,0	18,0	0,0	0,0	0,0
Node 257	1,0	0,0	19,0	0,0	0,0	0,0
Node 258	-4,0	6,0	14,0	0,0	0,0	0,0
Node 273	-2,0	-2,0	46,0	0,0	0,0	0,0
Node 278	-7,0	-1,0	59,0	0,0	0,0	0,0
Node 283	-7,0	-2,0	69,0	0,0	0,0	0,0
Node 288	-5,0	-2,0	78,0	0,0	0,0	0,0
Node 293	1,0	-1,0	84,0	0,0	0,0	0,0
Node 298	7,0	3,0	92,0	0,0	0,0	0,0
Node 303	7,0	6,0	141,0	0,0	0,0	0,0
Node 308	-1,0	3,0	114,0	0,0	0,0	0,0
Node 323	1,0	-7,0	171,0	0,0	0,0	0,0
Node 328	0,0	-7,0	115,0	0,0	0,0	0,0
Node 333	0,0	-6,0	100,0	0,0	0,0	0,0
Node 353	0,0	10,0	42,0	0,0	0,0	0,0
Node 358	2,0	9,0	21,0	0,0	0,0	0,0
			2107,0	kN		

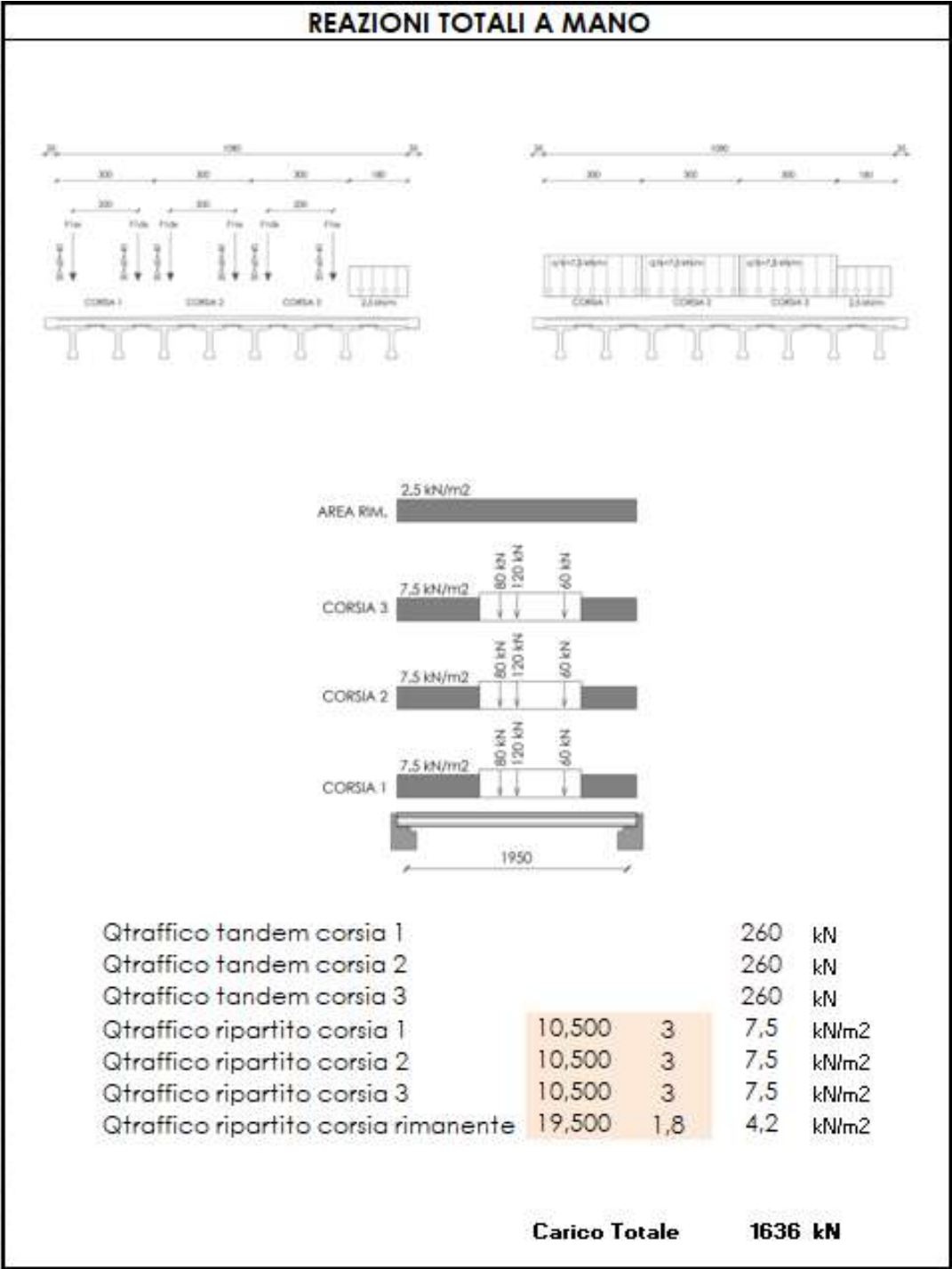
Rtot,FEM	2107 kN
Rtot,mano	2107 kN
	100%
Accettato?	OK

Con una differenza pari allo 0% si può ritenere il modello FEM valido.

Confronto Reazioni Globali dovute a carico da traffico – CdS intermedio 26 ton

Si effettua un confronto tra la sommatoria delle reazioni ottenuta da una delle combinazioni del modello FEM per carichi da traffico, ed il corrispondente effettuato analiticamente.

Si prende in oggetto la configurazione di carichi da traffico denominata CdS ML – T1



REAZIONI TOTALI FEM - Schema CdS MI - T1						
	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
	kN	kN	kN	kN.m	kN.m	kN.m
Node 196	-17,0	-5,0	28,0	0,0	0,0	0,0
Node 197	-15,0	-4,0	-31,0	0,0	0,0	0,0
Node 200	-6,0	-2,0	15,0	0,0	0,0	0,0
Node 202	5,0	-2,0	49,0	0,0	0,0	0,0
Node 204	11,0	-2,0	59,0	0,0	0,0	0,0
Node 206	11,0	-1,0	55,0	0,0	0,0	0,0
Node 208	-5,0	3,0	29,0	0,0	0,0	0,0
Node 210	3,0	2,0	37,0	0,0	0,0	0,0
Node 212	8,0	1,0	54,0	0,0	0,0	0,0
Node 213	-12,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Node 241	0,0	3,0	51,0	0,0	0,0	0,0
Node 242	1,0	1,0	17,0	0,0	0,0	0,0
Node 245	0,0	2,0	42,0	0,0	0,0	0,0
Node 247	0,0	1,0	29,0	0,0	0,0	0,0
Node 249	0,0	0,0	34,0	0,0	0,0	0,0
Node 251	0,0	0,0	32,0	0,0	0,0	0,0
Node 253	1,0	-1,0	19,0	0,0	0,0	0,0
Node 255	0,0	-1,0	30,0	0,0	0,0	0,0
Node 257	0,0	-1,0	27,0	0,0	0,0	0,0
Node 258	0,0	-1,0	7,0	0,0	0,0	0,0
Node 273	-5,0	-12,0	67,0	0,0	0,0	0,0
Node 278	6,0	-8,0	57,0	0,0	0,0	0,0
Node 283	9,0	-3,0	50,0	0,0	0,0	0,0
Node 288	10,0	2,0	56,0	0,0	0,0	0,0
Node 293	8,0	7,0	64,0	0,0	0,0	0,0
Node 298	4,0	9,0	60,0	0,0	0,0	0,0
Node 303	-4,0	9,0	102,0	0,0	0,0	0,0
Node 308	-11,0	3,0	60,0	0,0	0,0	0,0
Node 323	0,0	2,0	86,0	0,0	0,0	0,0
Node 328	0,0	1,0	60,0	0,0	0,0	0,0
Node 333	0,0	1,0	78,0	0,0	0,0	0,0
Node 353	0,0	-2,0	51,0	0,0	0,0	0,0
Node 358	0,0	0,0	14,0	0,0	0,0	0,0
			1593,0	kN		

Rtot,FEM	1593 kN
Rtot,mano	1636 kN
	97%
Accettato?	OK

Con una differenza pari al 8% si può ritenere il modello FEM valido.

Percentuale di Massa Eccitata in condizioni dinamiche

Le attuali Norme tecniche prevedono che, per poter condurre un'analisi dinamica lineare con spettro di risposta, il modello numerico sia in grado di rappresentare correttamente il comportamento dinamico della struttura; per garantire ciò è pertanto necessario studiare un numero di modi naturali di vibrare tali per cui la somma della massa eccitata sia maggiore o uguale all'85 della massa totale.

Si riporta di seguito l'estratto del modello FEM con le caratteristiche dei primi 15 modi di vibrare

Mode	Frequency (Hz)	Frequency converged	Eigenvector converged	X Mass Participation	Y Mass Participation	Z Mass Participation
1	4,973	✓	✓	0,0001 %	0,0002 %	58,0564 %
2	5,380	✓	✓	0,0000 %	0,0184 %	1,0307 %
3	8,615	✓	✓	0,0001 %	0,0000 %	0,3948 %
4	16,249	✓	✓	0,0000 %	0,0000 %	0,0001 %
5	18,062	✓	✓	0,0002 %	0,0022 %	0,0013 %
6	18,212	✓	✓	0,0001 %	0,0001 %	0,0115 %
7	21,316	✓	✓	0,0004 %	0,0002 %	0,0096 %
8	26,975	✓	✓	0,0000 %	0,0007 %	0,0005 %
9	28,778	✓	✓	0,0003 %	0,0002 %	0,0002 %
10	35,573	✓	✓	0,4636 %	58,5835 %	0,0002 %
11	36,699	✓	✓	0,0005 %	0,1629 %	1,0618 %
12	37,121	✓	✓	0,0031 %	0,2308 %	1,0347 %
13	37,767	✓	✓	0,0049 %	0,0562 %	0,5892 %
14	43,055	✓	✓	64,7099 %	0,3896 %	0,0025 %
15	44,156	✓	✓	0,1373 %	0,0003 %	3,8170 %

La massa risultante eccitata nelle diverse direzioni è pari a:

X mass: 86.54%

Y mass: 96.62%

Z mass: 76.92%

SOFTWARE DI CALCOLO, CONVENZIONI E DEFINIZIONI

Metodo di calcolo

Nella stesura dei calcoli ci si attiene alle norme vigenti per la disciplina delle strutture di calcestruzzo; il metodo di verifica adottato è quello semiprobabilistico agli stati limite ultimi.

Lo studio delle strutture è stato condotto secondo i metodi della scienza delle costruzioni ipotizzando i materiali elastici, omogenei ed isotropi.

Descrizione del software

Straus7 è un software di analisi agli elementi finiti (FEM – Finite Element Method) sviluppato per la modellazione, simulazione e verifica di strutture meccaniche e civili. Si distingue per la sua interfaccia grafica intuitiva, che consente all'utente di modellare e analizzare strutture tridimensionali in modo interattivo, integrando in un unico ambiente tutte le fasi del processo: dalla creazione della geometria alla generazione del mesh, fino all'analisi numerica e alla visualizzazione dei risultati.

Il software supporta un'ampia gamma di elementi finiti, tra cui elementi :

- 1D: trave, asta, link rigido, molla, cavo
- 2D: piastra, guscio, membrana
- 3D: elementi solidi tetraedrici ed esaedrici

Questi possono essere sia lineari che quadratici, ed essere usati per modellare strutture 1D, 2D e 3D. Straus7 permette inoltre l'utilizzo di materiali isotropi, ortotropi e anisotropi, con possibilità di definire leggi costitutive complesse, comprese plasticità, creep, comportamento non lineare o dipendente dal tempo.

Le tipologie di analisi che Straus7 è in grado di svolgere comprendono l'analisi statica lineare e non lineare, l'analisi modale per la determinazione delle frequenze proprie e dei modi di vibrazione, l'analisi dinamica (sia transitoria che in frequenza), l'analisi termica (in condizioni stazionarie e transitorie) e l'analisi di buckling per la valutazione della stabilità strutturale. È inoltre possibile effettuare analisi accoppiate, come quelle termomeccaniche, e simulazioni con grandi spostamenti, contatti tra corpi e materiali avanzati.

La fase di modellazione è supportata da strumenti geometrici avanzati e da un meshatore integrato che consente la generazione automatica o manuale della mesh. È anche possibile importare geometrie da software CAD in formati standard come DXF, IGES o STEP. Una volta completata l'analisi, Straus7 mette a disposizione potenti strumenti di post-processing per l'elaborazione dei risultati: visualizzazione di deformazioni, spostamenti, tensioni, reazioni vincolari, fattori di sicurezza, animazioni e diagrammi personalizzabili.

Il software è compatibile con sistemi operativi Windows e consente l'integrazione con altri ambienti di calcolo e programmazione tramite API o interfacce di automazione (es. scripting). Viene utilizzato sia in ambito accademico che professionale, in settori che spaziano dall'ingegneria civile e strutturale a quella meccanica, aerospaziale e navale.

Tipi di analisi

L'analisi statica lineare

La soluzione del problema di equilibrio della struttura discretizzata si traduce nella soluzione del seguente sistema algebrico di equazioni lineari:

$$Ku=f$$

i cui coefficienti sono costituiti dai termini della matrice di rigidezza K , le incognite sono gli spostamenti e le rotazioni nodali contenuti nel vettore u e i termini noti sono costituiti dai vettori dei carichi f in numero pari alle condizioni di carico indipendenti dichiarate.

La matrice di rigidezza, almeno nei casi comuni, risulta essere una matrice di tipo sparso nel senso che molti coefficienti sono nulli. Opportune numerazioni dei nodi della struttura riescono a compattare i coefficienti intorno alla diagonale principale della matrice dando luogo a una banda. Se per ogni riga della matrice si calcolano, a partire dall'elemento diagonale, il numero di elementi oltre il quale i termini sono tutti nulli, si definisce ampiezza di banda il numero massimo di elementi riscontrati per ogni riga.

Si definisce inoltre profilo della matrice di rigidezza la somma dei termini contenuti in ogni colonna partendo dall'elemento diagonale e finendo al primo termine non nullo partendo dall'alto nella colonna considerata.

Un'ottima numerazione dei nodi, quella cioè per cui il profilo risulta essere minimo consente, da un punto di vista computazionale, notevoli risparmi di risorse potendo memorizzare solo i termini utili ed evitando in fase di risoluzione inutili operazioni sugli zeri della matrice di rigidezza.

Il programma prevede in cascata un duplice metodo di minimizzazione del profilo della matrice di rigidezza e il programma valuta quale dei due metodi abbia dato i migliori risultati rinumerando quindi in modo ottimo i nodi.

Durante la fase di assemblaggio della matrice di rigidezza viene controllata la presenza di elementi nulli posti lungo la diagonale principale; in quest'ultimo caso l'elaborazione termina con l'indicazione del numero di equazione ove si è riscontrata l'anomalia.

La risoluzione del sistema di equazioni è condotta attraverso il metodo di Gauss che consiste nel decomporre la matrice di rigidezza nel prodotto di una matrice triangolare inferiore avente sulla diagonale principale tutti i termini pari all'unità con una matrice triangolare superiore:

$$K=LU$$

Il solutore ad elementi finiti consente di risolvere il sistema di equazioni attraverso due metodi.

Il primo metodo memorizza la matrice di rigidezza sotto forma di un'unica colonna compatta (skyline storage), con la definizione di un ulteriore vettore contenente i puntatori agli elementi diagonali della matrice di rigidezza oppure in blocchi di vettori compatti contenenti all'interno i puntatori posti in coda.

In fase di riduzione della matrice di rigidezza viene controllato che il generico termine diagonale della matrice ridotta sia maggiore di zero. In caso contrario l'elaborazione termina con la segnalazione di errore grave.

Quando porzioni molto rigide della struttura sono connesse a porzioni molto deformabili il sistema di equazioni può risultare mal condizionato. Una stima sull'approssimazione della soluzione è indicata dalla seguente quantità:

$$n_i = \log_{10}(K_{ii}) - \log_{10}(U_{ii})$$

In essa n_i è il numero di figure perse, K_{ii} è il termine diagonale della matrice di rigidezza e U_{ii} è il termine diagonale della matrice triangolarizzata.

Di solito il numero delle figure perse è dell'ordine di 4 e pertanto la soluzione è pienamente accettabile. Se il numero di figure perse è compreso tra 6 e 11 il programma segnala anomalia pur continuando ad elaborare; in questo caso la soluzione deve essere accettata con cautela solo dopo aver controllato gli equilibri globali. Se il numero di figure perse è superiore a 11 il programma termina l'elaborazione con la segnalazione di errore grave.

In caso di errori il programma evidenzia il numero di equazione, il nodo, il grado di libertà ove si è verificato e la tripletta delle coordinate nodali espresse nel sistema di riferimento globale della struttura.

Il secondo metodo, denominato metodo delle matrici sparse, memorizza in un vettore tutti i termini non nulli della matrice di rigidezza e i puntatori.

Il codice, che è stato implementato nel solutore ad elementi finiti, è basato su un lavoro riportato nel Rif. [49] ed è distribuito dalla ditta Aspentech con sede in U.S.A.

Questo codice si compone di tre parti e rispettivamente una prima parte che è dedicata a riordinare il sistema di equazioni, una seconda che è dedicata a fattorizzare la matrice di rigidezza mentre una terza parte, dato il vettore dei termini noti, calcola la soluzione del sistema di equazioni.

Il riordino del sistema di equazioni è basato sui Rif. [50] e [51].

In fase di riduzione della matrice di rigidezza viene controllato che il generico termine diagonale della matrice ridotta sia maggiore di zero. In caso contrario l'elaborazione termina con la segnalazione di errore grave.

Al termine dell'elaborazione, è controllato il bilancio globale delle forze confrontando tra loro le risultanti e i momenti risultanti delle forze attive e reattive. Il risultato di questo confronto è l'unico che può garantire l'attendibilità della soluzione trovata.

L'analisi dinamica

Il metodo della proiezione nel sottospazio

L'analisi dinamica della struttura consiste nel determinare le frequenze proprie di vibrazione e le deformate modali, cioè gli autovalori e gli autovettori della matrice dinamica. Dalla seguente equazione:

$$(K - \lambda M) \varphi = 0$$

in cui K è la matrice di rigidezza e M è la matrice delle masse si determinano le frequenze proprie λ e la deformata modale descritta dal vettore φ .

Quando il numero dei gradi di libertà della struttura è notevole e non è richiesto il calcolo di tutti gli autovalori ma solo di quelli collegati ai periodi più alti, allora è conveniente ricorrere al metodo iterativo della proiezione nel sottospazio adottando un certo numero di vettori iterativi. Il metodo per la ricerca delle frequenze di vibrazione e per la determinazione delle deformate modali è contenuto nel Rif. [55].

Pur avendo scelto un numero sufficientemente ampio di vettori iterativi può accadere in alcuni problemi specifici che gli autovalori nel gruppo che si sta iterando non siano sufficientemente separati per cui la velocità di convergenza risulta estremamente bassa.

In tali condizioni è utile applicare la procedura dello "shift" che aumenta notevolmente la velocità di convergenza.

Il metodo dei vettori di Ritz

In vista dell'analisi dinamica di edifici soggetti a terremoti, si dimostra che i modi di vibrare a forte componente rotazionale intorno all'asse verticale contribuiscono poco alla risposta dello spettro.

Alla luce di questa considerazione si è dimostrato valido un approccio differente per il calcolo dei modi di vibrare della struttura. Questo metodo prende in nome di estrazione dei modi di vibrare attraverso i vettori di Ritz Rif. [56] e [57].

Il metodo numerico è stato originato per essere applicato a problemi di risposta dinamica del tipo time-history e con qualche modifica può essere adoperato per trovare con una ragionevole approssimazione i modi di vibrare della struttura e le pulsazioni ad essi associati.

Questo metodo ha lo scopo di generare una sequenza di vettori massa ortogonali i quali, attraverso un'unica proiezione nel sottospazio, vengono ruotati per generare i vettori di Ritz finali.

Si segnala che la procedura precedentemente esposta offre da un punto di vista computazionale notevoli vantaggi in termini di velocità di elaborazione (da 1/2 a 1/3 del tempo di CPU rispetto al calcolo classico degli autovalori).

Essa inoltre consente di raggiungere la percentuale delle masse partecipanti con un numero di vettori inferiori rispetto all'analisi dinamica classica in quanto il metodo, per un numero limitato di vettori, scarta le rotazioni di impalcato che non danno contributo al calcolo delle masse partecipanti. Le rotazioni di impalcato iniziano a manifestarsi all'aumentare del numero di vettori richiesti.

Alla luce di quanto esposto, si ritiene che questo metodo, sia del tutto alternativo al metodo classico e comunque costituisce un indispensabile e agevole strumento per il predimensionamento strutturale.

Il troncamento modale

Nella valutazione della risposta di strutture soggette a carichi dinamici, spesso si ritiene accettabile considerare un numero limitato di autovettori al fine di ottenere una soluzione convenientemente approssimata. Tale operazione viene detta troncamento modale.

Un parametro che tiene conto in modo forfetario dell'ammissibilità del troncamento modale è il cosiddetto fattore percentuale delle masse traslazionali e di quelle rotazionali partecipanti.

La nostra normativa, similmente a quella americana, impone di considerare tanti modi di vibrare fino a che le percentuali delle masse traslazionali partecipanti attingano valori superiori al 85%.

La risposta allo spettro e le tecniche di combinazione

In generale su una struttura possono agire contemporaneamente terremoti lungo due direzioni ortogonali nel piano X,Y e lungo Z aventi ognuno uno spettro di risposta. Il solutore ad elementi finiti prevede questa ipotesi.

Assegnato uno spettro di risposta, per ogni modo di vibrare, il programma calcola i massimi spostamenti e le massime sollecitazioni associate allo spettro assegnato.

Il metodo più noto per combinare la generica entità è quello della radice quadrata della somma dei quadrati detto anche SRSS. Modellazioni numeriche hanno mostrato che questo metodo è efficiente solo quando le frequenze di vibrazione sono ben separate tra loro.

Un metodo che ha mostrato buoni risultati anche quando le frequenze modali sono ravvicinate è il cosiddetto metodo CQC (combinazione quadratica completa) funzione anche del fattore di smorzamento inteso come frazione di quello critico (cfr. Rif. [58]). Nel programma è previsto l'adozione di uno o dell'altro metodo di combinazione.

Un parametro importante nell'analisi di risposta allo spettro è costituito dallo sforzo di taglio alla base dell'edificio.

Il programma, per ogni modo di vibrare e per ogni direzione di ingresso del sisma, fornisce le forze di taglio lungo gli assi globali del sistema di riferimento e lungo le direzioni di ingresso del terremoto.

Queste forze vengono combinate sia attraverso il metodo CQC sia attraverso il metodo SRSS per fornire il massimo valore.

Quando vengono assegnati terremoti contemporanei lungo le tre direzioni ortogonali (XY-Z), il programma per determinare il tagliante risultante, adopera il metodo della radice quadrata della somma dei quadrati (SRSS) per combinare la risposta sia in termini di CQC che in termini di SRSS. Una buona progettazione strutturale dovrebbe fare in modo che la struttura resista con adeguato coefficiente di sicurezza per tutti gli angoli di ingresso del terremoto.

La nostra normativa, come altre, prevede tuttavia che l'edificio sia analizzato solo per una coppia di terremoti agenti ortogonalmente tra loro la cui direzione è lasciata alla sensibilità del progettista.

Di solito l'angolo di ingresso del terremoto viene posto lungo una direzione parallela alla tessitura degli elementi preposti ad assorbire le azioni sismiche. Questa non è detto che sia la scelta più opportuna in quanto il progettista dovrebbe tentare con più direzioni di ingresso di valutare quale caso sia il più gravoso.

Se si dispone la struttura con un asse che si ritiene principale lungo una direzione del sistema di riferimento globale (ad esempio X), si può valutare almeno quale sia l'angolo di ingresso del sisma che induce il massimo taglio proprio lungo quella direzione (ad esempio X).

Il programma prevede la possibilità di calcolare l'angolo che si ritiene critico e i valori dei taglianti affinti sotto questa condizione. La valutazione viene ovviamente condotta con riferimento alla combinazione CQC e SRSS.

L'analisi non lineare in controllo di forze

Il programma consente di analizzare strutture per le quali si sia dichiarata la non linearità del materiale. In questa analisi si possono includere gli effetti P-Delta.

Il programma analizza la struttura sotto una serie di combinazioni di carico definite dall'utente in quanto, come è noto, in campo non lineare non è ammessa la sovrapposizione degli effetti.

Si deve quindi risolvere il seguente sistema di equazioni non lineari:

$$r(u)=f$$

in cui r è la risultante degli elementi finiti, u è il vettore degli spostamenti e f è il vettore dei carichi.

La soluzione del problema non lineare è condotta per via iterativa adottando il metodo della secante (metodo diretto) e quello della tangente (Newton-Raphson).

Il metodo della secante prevede la costruzione della matrice di rigidità secante K_s valutata in funzione degli spostamenti determinati nell'iterazione precedente $k-1$ e nella soluzione del seguente sistema di equazioni:

$$K_s u_k = f$$

Il metodo di Newton-Raphson prevede la costruzione di una successione di spostamenti incrementali Δu_k tali che:

$$u_{k+1} = u_k + \Delta u_k$$

e la soluzione del seguente sistema di equazioni:

$$K_t \Delta u_k = f - r(u_k)$$

in cui K_t è la matrice di rigidità tangente e $r(u_k)$ è il vettore della risultante degli elementi finiti valutata sotto il campo di spostamento u_k .

Per entrambi i metodi, le iterazioni si arrestano in corrispondenza della tolleranza assegnata sulla norma residuale degli spostamenti o al raggiungimento del numero massimo di iterazioni. (cfr. Rif. [7]).

Alla fine dell'analisi è condotto il bilancio globale delle forze. Questo metodo, anche se non computazionalmente efficiente, garantisce nella maggior parte dei casi la convergenza.

L'analisi non lineare in controllo di spostamento (Path-Following)

Per molti sistemi strutturali è necessario calcolare la relazione non lineare tra i carichi applicati e le corrispondenti deformazioni strutturali.

Tracciando questi percorsi di equilibrio, è possibile identificare fenomeni di collasso e, in generale, comprendere il comportamento delle strutture. Il metodo è regolato dalla soluzione del seguente sistema di equazioni non-lineari:

$$r(u) = f_d + \lambda f_L$$

in cui u è il vettore degli spostamenti nodali, r è la risultante degli elementi finiti sotto lo spostamento u , f_d è il vettore dei carichi gravitazionali (in generale carichi permanenti e accidentali), λ è il moltiplicatore di un sistema di carichi assegnati f_L (distribuzione dei carichi laterali per strutture in zona sismica).

Il metodo prevede l'individuazione di un nodo di controllo strutturale e del relativo grado di libertà associato (in genere spostamento lungo l'asse X o Y del sistema di riferimento globale della struttura). Assegnata quindi l'entità dello spostamento si vuole determinare il moltiplicatore dei carichi laterali sotto lo spostamento assegnato.

Convenzioni di segno

Sistema di riferimento

Sistema di riferimento globale

- È il sistema di coordinate XYZ fisso, definito per l'intero modello.
- Tutti gli input e output (carichi, vincoli, spostamenti, reazioni, ecc.) sono per default espressi in questo sistema.
- Gli assi X, Y, Z formano un sistema di coordinate destro (regola della mano destra).

Sistemi di riferimento locali

- Alcuni elementi (soprattutto beam, shell, plate, brick) hanno un proprio sistema locale.
- Il sistema locale può essere automatico (assegnato da Straus7 in base all'orientamento dei nodi) oppure definito dall'utente.

Per elementi 1D l'asse locale x è orientato da nodo 1 a nodo 2. Gli assi y e z definiscono il piano della sezione trasversale.

Per elementi 2D/3D (plate, shell, solid): L'asse locale z è normale alla superficie (verso l'esterno). Gli assi x e y giacciono nel piano dell'elemento.

Carichi

Carichi nodali (forze e momenti)

- Vettori applicati ai nodi.
- Positivi se orientati lungo i versi positivi degli assi globali (X, Y, Z).
- I momenti positivi seguono la regola della mano destra attorno agli assi X, Y, Z.

Carichi distribuiti

Possono essere applicati lungo elementi beam (1D), shell (2D) o solidi (3D).

Il segno dipende dal sistema di riferimento usato per applicarli (globale o locale). Ad esempio, una forza verso il basso lungo l'asse globale Y ha segno negativo in Y, ma potrebbe avere segno positivo o negativo in un asse locale diverso.

Pressioni su superfici: Una pressione positiva agisce verso l'interno dell'elemento (direzione opposta alla normale locale uscente).

Spostamenti e rotazioni

Spostamenti nodali: Positivi lungo le direzioni +X, +Y, +Z del sistema globale.

Rotazioni nodali: Definite per elementi beam o shell. Positivi secondo la regola della mano destra attorno agli assi X, Y, Z globali o locali (a seconda dell'elemento).

Reazioni vincolari

Le reazioni sono espresse nel sistema globale.

Hanno segno opposto ai carichi applicati, quindi se applichi una forza $-Y$, ti aspetti una reazione in $+Y$ (equilibrio).

Anche le rotazioni bloccate generano momenti di reazione, con convenzione coerente con la mano destra.

Elementi Beam

L'elemento beam ha un proprio sistema locale x-y-z:

- x = asse longitudinale, da nodo 1 a nodo 2
- y, z = assi trasversali (definiscono la sezione)
- Le sollecitazioni (forza normale, taglio, momento) sono restituite nel sistema locale dell'elemento.
- Forza normale positiva = trazione
- Taglio positivo = forza verso l'alto (in y) su sinistra, e verso il basso su destra (convenzione ingegneristica classica)
- Momento flettente positivo comprime le fibre superiori (a seconda dell'orientamento locale)

Elementi Shell e plate

Ogni shell ha un sistema locale:

- z = normale uscente dalla superficie (può essere invertito a mano)
- x, y = giacciono nel piano dell'elemento
- Le tensioni di membrana, flessioni e tagli sono riferite a questo sistema:
- Tensioni positive = trazione
- Momenti positivi = curvatura positiva (comprime le fibre superiori, cioè sul lato opposto al vettore z)

Tensioni e deformazioni (stress/strain)

Sono disponibili sia nel sistema globale che in quello locale (in base al tipo di risultato richiesto).

- Per convenzione:
- Tensioni normali positive (σ) = trazione
- Deformazioni positive (ϵ) = allungamento
- Tensioni di taglio (τ) = segno secondo rotazione positiva nel piano (regola mano destra)