



COMUNE DI RAVENNA

AREA INFRASTRUTTURE CIVILI
SERVIZIO STRADE



Sistema di Qualità certificato per:
Progettazione, programmazione,
affidamento, direzione lavori
dei lavori pubblici
e delle manutenzioni;
gestione espropri.

INTERVENTI SUL PONTE IN VIA RAVEGNANA (A16)

PROGETTO PRELIMINARE - DEFINITIVO - ESECUTIVO

Segretario Generale: Dott. PAOLO NERI		Assessore ai LL.PP.: Sig. ROBERTO GIOVANNI FAGNANI		Capo Area: Ing. MASSIMO CAMPRINI	
Capo Servizio: Ing. ANNA FERRI			Sindaco: Sig. MICHELE DE PASCALE		
RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO:		Ing.FULVIO CUNDARI		Firme:	
PROGETTISTA COORDINATORE:		ing.FULVIO CUNDARI		_____	
PROGETTISTA OPERE STRUTTURALI (ESTERNO):		Ing.FRANCESCO BARTOLI		_____	
PROGETTISTA OPERE STRADALI:		Ing.LEONARDA PRINCIPATO		_____	
PROGETTISTA OPERE DI VIABILITA'				_____	
E SEGNALETICA STRADALE:		Ing: IVAN BROSIO		_____	
COLLABORATORE PER I SISTEMI DI MOBILITA':		Geom. ROSARIA CIANCIULLI		_____	
COLLABORATORE PER LE OPERE DI P.I.:		P.I. IVANO PAPA		_____	
COORD. SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:		Ing.LEONARDA PRINCIPATO		_____	
ELABORAZIONE GRAFICA:		Dis. FRANCA BERTOZZI		_____	
		Geom. ELISA FORTIBUONI		_____	
RILIEVI:		Sig. ANDREA GHIBERTI		_____	

0	EMISSIONE	FB	LP	FC	NOV. 2017
Rev.	Descrizione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Data:

ELABORATO:

RELAZIONE SPECIALISTICA E DI CALCOLO DELLE STRUTTURE

Fascicolo: 2017/06.05/316	Data: NOVEMBRE 2017	Codice Elaborato: R_1003
Scala:	File:	Revisione: R0



COMUNE DI RAVENNA
AREA INFRASTRUTTURE CIVILI
SERVIZIO STRADE
U.O. STRADE CENTRO/SUD E CICLO IDRICO INTEGRATO

INTERVENTI SUL PONTE IN VIA RAVEGNANA (A16)

PROGETTO PRELIMINARE-DEFINITIVO-ESECUTIVO

ELABORATO: R_1003

RELAZIONE SPECIALISTICA E DI CALCOLO DELLE STRUTTURE

Emissione:
Ravenna lì, 20 /11/ 2017

SOMMARIO

1	ILLUSTRAZIONE SINTETICA	3
2	NORMATIVE DI RIFERIMENTO	4
3	CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI MATERIALI.....	5
4	IL PROGETTO.....	6
4.1	SEZIONI STRUTTURALI	7
4.2	CALIBRAZIONE DEL MODELLO	10
4.3	ANALISI DEI CARICHI	12
4.4	VALUTAZIONE SPETTRO SISMICO	17
4.5	COMBINAZIONI DI CARICO.....	19
5	RISULTATI E VERIFICHE	22
5.1	ANALISI MODALE DELLO STATO DI FATTO.....	22
5.2	CONSIDERAZIONI SUL TAGLIO DEI GIUNTI	25
5.3	ANALISI MODALE DELLO STATO DI PROGETTO	25
5.4	ANALISI A SPETTRO DI RISPOSTA	28
5.5	ANALISI STATICA LINEARE.....	29
5.6	VERIFICA DELLA SEZIONE TRAVE+SOLETTA CON FRP	33
5.7	VALUTAZIONI DELLE DEFORMATE	39
5.8	OUTPUT LOG SAP2000	42
6	CONCLUSIONI	47

1 ILLUSTRAZIONE SINTETICA

Oggetto d'intervento è la progettazione preliminare/definitiva/esecutiva dei rinforzi strutturali da eseguirsi su ponte di via Ravennana A16, Ravenna (RA). Il fine è quello di conseguire la positività delle verifiche strutturali dell'impalcato al fine di poterlo riconsiderare come ponte di categoria 1.

Tra Luglio e Dicembre 2015 è stata svolta intensa campagna di indagini da parte di studio 4Emme al fine di ottenere un rilievo esaustivo della struttura portante (fattore di confidenza 1) e quindi classificarne la categoria di transitabilità e funzionalità dell'opera. A conclusione si è rilevato un diffuso degrado delle travi principali costituenti la carreggiata stradale del ponte e si è pertanto confermata la necessità di declassare la struttura da ponte di categoria I a ponte di categoria II con il fine ultimo di eseguire successive opere di rinforzo e riportarlo alla sua categoria/condizione originaria.

Il sottoscritto ing. Bartoli Francesco è stato quindi incaricato, a seguito di determina dirigenziale D23 n.125 del 31/10/2017, di affiancare il servizio strade del Comune di Ravenna nella progettazione delle opere di consolidamento strutturale da eseguirsi mediante utilizzo di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica FRP.

La relazione di calcolo pertanto verterà esclusivamente sulle sezioni strutturali costituenti l'impalcato ovvero travi, traversi e soletta collaborante così come rilevato da indagini strutturali. Si escludono quindi interventi sulle spalle e sulle pile. Non si conosce lo stato delle fondazioni poiché andrebbe eseguito dragaggio del tratto di fiume Montone e opportuna indagine geologica/geotecnica a riguardo.

La struttura dell'impalcato viene quindi valutata mediante modellazione ad elementi finiti ed analisi di tipo elastica lineare, con analisi a spettro di risposta per quanto riguarda gli aspetti sismici. Si valuta anche una condizione di modellazione specifica in cui la singola campata si considera completamente

appoggiata alle sue estremità. Ciò poiché si prende in considerazione l'ipotesi di creare un giunto di separazione tra le campate mediante taglio del cordolo laterale che si presuppone sia stato eseguito successivamente al progetto originario. Tale aspetto, allo stato di fatto, comporta che la struttura si debba ritenere iperstaticamente vincolata sebbene le singole campate presentino travi svincolate tra di loro. Il ripristino dell'isostaticità è solo un'ipotesi progettuale che sarà sviscerata nei capitoli successivi al fine di valutarne la fattibilità poiché è presumibile si ottengano valori di momento massimo positivo in mezzzeria superiori nonché deformabilità differenti. I modelli saranno calibrati secondo i risultati indagati e simulati approfonditamente da 4Emme. Le verifiche deformative e flesso/taglienti delle sezioni principali si rifanno alle prescrizioni di NTC 2008 e capitoli di seguito riportati. Conclude la relazione giudizio motivato ed esempio applicativo a convalidare i dati ottenuti dal software.



2 NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Si considerano le vigenti normative italiane Norme Tecniche per le Costruzioni datate 14 Gennaio 2008 integrate con la circolare esplicativa n°617 del 2 Febbraio 2009.

In particolare si fa riferimento ai seguenti capitoli:

- NTC C_Cap_02 “Sicurezza e Prestazione Attese”;
- NTC C_Cap_03 “Azioni sulle strutture”;
- NTC C_Cap_04 “Costruzioni Civile e Industriali”;
- NTC C_Cap_05 “Ponti”;
- NTC C_Cap_08 “Costruzioni esistenti”.

E per quanto riguarda i fibrorinforzati:

- CNR DT 200 R1-2013.

3 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI MATERIALI

Il calcestruzzo strutturale indagato presenta i seguenti parametri meccanici:

Modulo elastico E	28000 MPa
Coeff. Poisson	0.1
Coeff. d'espansione termica	1e-5 C
Modulo di taglio G	11667 MPa

General Data

Material Name and Display Color: CLS 4EMME

Material Type: Concrete

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 2.500E-05

Mass per Unit Volume: 2.549E-09

Units: N, mm, C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 28000.

Poisson, U: 0.1

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.000E-05

Shear Modulus, G: 12727.273

Other Properties for Concrete Materials

Characteristic Concrete Cylinder Strength, f_{ck}: 14.

Expected Concrete Compressive Strength: 17.

☐ Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

C16/20	f _{ck}	16	N/mm ²
	R _{ck}	20	N/mm ²
	γ _c	1.5	
ε _{c2}	2	%	
α _{cc}	0.85	?	
	f _{cd}	9.067	N/mm ²
	f _{cc} / f _{cd}	0.8	?
	G _{c,adm}	7.25	N/mm ²
τ _{co}	0.4667		
	τ _{cl}	1.543	N/mm ²
f _{ctm}	1.905		
	E _{cm}	28.608	N/mm ²
	ε _{cu}	3.5	%

Per quanto riguarda il ferro d'armatura rilevato mediante prova distruttiva:

Limite di snervamento	320 MPa
Limite di rottura	350 MPa
Allungamento	11%
Modulo elastico E	200000 MPa

General Data

Material Name and Display Color: FEB22K 4EMME

Material Type: Rebar

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 7.697E-05

Mass per Unit Volume: 7.849E-09

Units: N, mm, C

Uniaxial Property Data

Modulus of Elasticity, E: 200000

Poisson, U: 0.3

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.170E-05

Shear Modulus, G: 80769.23

Other Properties for Rebar Materials

Minimum Yield Stress, Fy: 320

Minimum Tensile Stress, Fu: 350

Expected Yield Stress, Fye: 320

Expected Tensile Stress, Fue: 350

FeB32k	f_{yk}	315	N/mm ²
	f_{tk}	490	N/mm ²
	γ_s	1.15	
E_s/E_c	15		
	E_s	200,000	N/mm ²
	ϵ_{su}	67.5	‰
	f_{yd}	273.9	N/mm ²
	ϵ_{syd}	1.37	‰
	$C_{s,adm}$	155	N/mm ²

4 IL PROGETTO

L'intervento consisterà nel risanamento delle travi principali dell'impalcato mediante applicazione di fibrorinforzanti a matrice polimerica CFRP (C sta per carbonio) in tessuti abbinati a resine polimeriche da applicarsi in sito. Le successive verifiche sono state svolte utilizzando il prodotto Fibrenet di Betontex tipo GV330-U-HT unidirezionale 300 g/m² che presenta le caratteristiche riportate in tabella:

Modulo elastico del rinforzo fibre + resina	270 GPa
Resistenza a trazione	3140 MPa
Deformazione a rottura	1.45 %
Frazione in peso di fibre	32 %

Si studierà la struttura realizzando un modello ad elementi finiti mediante il software di calcolo Sap2000 v.19 prodotto da Csi inc. Berkeley, distribuito da Csi Italia e licenziato a nome ing. Bartoli Francesco.

4.1 Sezioni strutturali

Si riportano le caratteristiche geometriche con annesse armature per ogni sezione strutturale del modello di calcolo.

Rectangular Section

Section Name: TRAVE A16 Display Color: ■

Section Notes: Modify/Show Notes...

Dimensions

Depth (t3) : 0.95

Width (t2) : 0.35

Section

Material

+ CLS 4EMME

Property Modifiers

Set Modifiers...

Properties


Section Properties...

Time Dependent Properties...

Concrete Reinforcement...

OK Cancel

Armatura superiore:	2 Φ 32	copriferro 45 mm
Armatura inferiore:	6 Φ 32	copriferro 45 mm
Armatura a taglio:	Φ 10 passo 35	copriferro 35 mm

 Rectangular Section

Section Name

NERVATURE

Section Notes

Modify/Show Notes...

Display Color

Dimensions

Depth (t3)

0.95

Width (t2)

0.2

Material

+

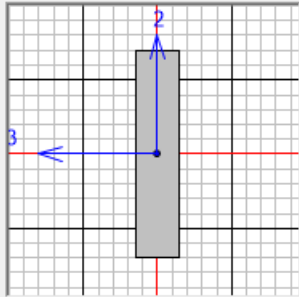
CLS 4EMME

▼

Property Modifiers

Set Modifiers...

Section



Properties

Section Properties...

Time Dependent Properties...

Concrete Reinforcement...

OK

Cancel

Armatura superiore:	non rilevata	
Armatura inferiore:	3 $\Phi 24$	copriferro 25 mm
Armatura a taglio:	$\Phi 8$ passo 30	copriferro 15 mm

Shell Section Data

Section Name CARREGGIATA **Display Color** [Red Square]

Section Notes [Modify/Show...]

Type

- ☒ Shell - Thin
- ☐ Shell - Thick
- ☐ Plate - Thin
- ☐ Plate Thick
- ☐ Membrane
- ☐ Shell - Layered/Nonlinear

[Modify/Show Layer Definition...]

Thickness

Membrane 0.34

Bending 0.34

Material

Material Name + CLS 4EMME

Material Angle 0.

Time Dependent Properties

[Set Time Dependent Properties...]

Concrete Shell Section Design Parameters

[Modify/Show Shell Design Parameters...]

Stiffness Modifiers

[Set Modifiers...]

Temp Dependent Properties

[Thermal Properties...]

[OK] [Cancel]

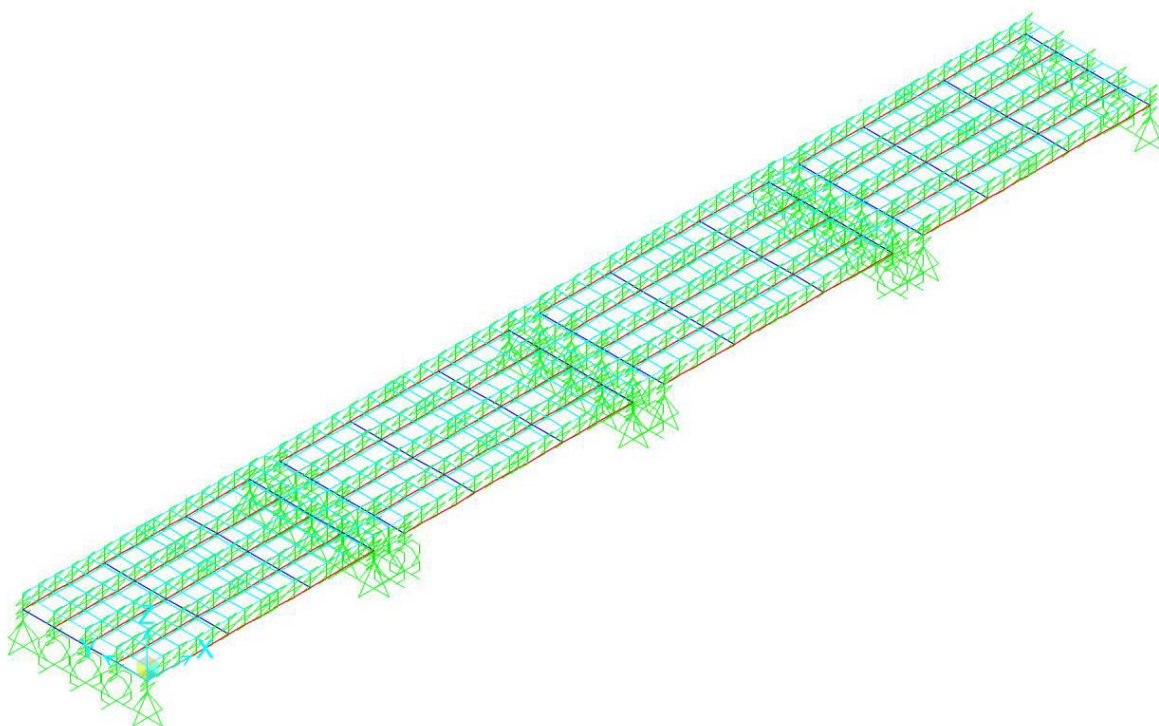
Ponendosi in favore di sicurezza non si considera armatura nella soletta (non è stato possibile inoltre rilevarla con accuratezza).

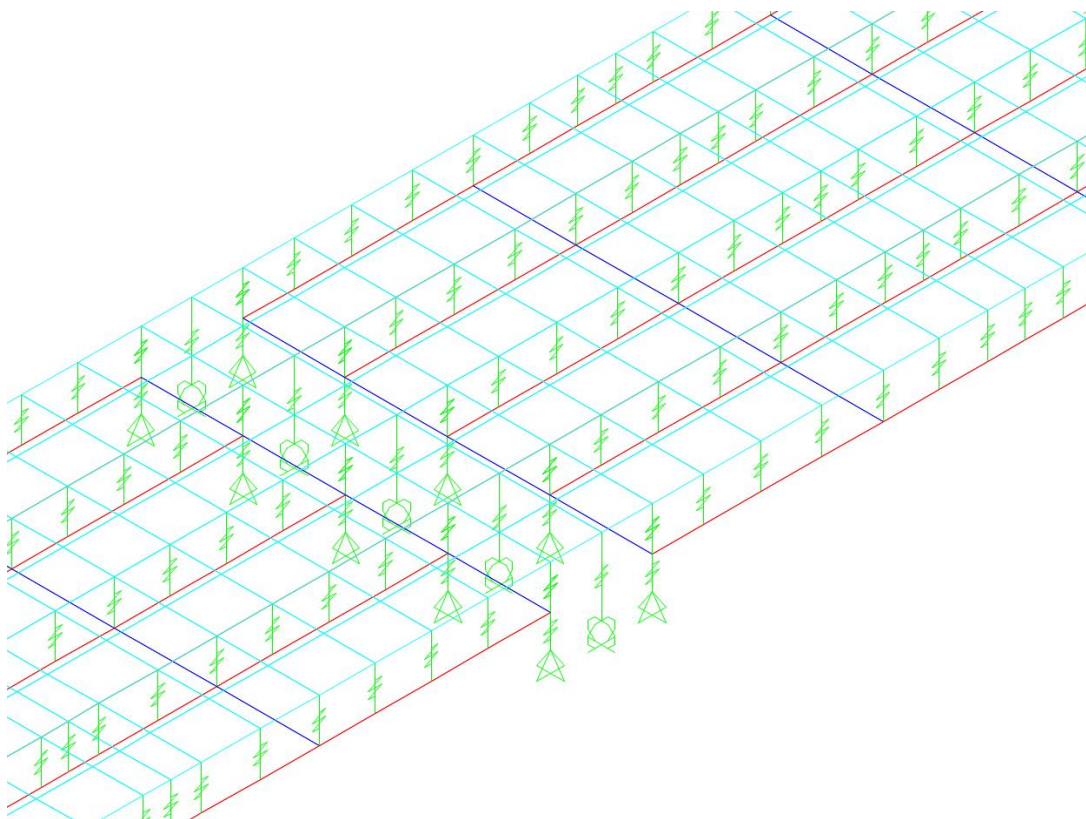
4.2 Calibrazione del modello

Il modello di calcolo verrà realizzato utilizzando elementi mono e bidimensionali. In particolare travi e nervature sono discretizzate con elementi beam mentre la soletta con elementi plates.

Gli elementi finiti sono posizionati sull'asse delle sezioni come da rilievo. Per ragioni di modellazione non si eseguono offset ma soletta e trave sono posizionati sui loro assi reali e collegati tra loro mediante link rigidi. In questo modo, utilizzando una trave fittizia in asse con la soletta è possibile applicare i carichi mobili direttamente su quest'ultima e cogliere il reale comportamento della trave portante sottostante (che non è quindi direttamente caricata).

Si eseguiranno analisi statica di tipo elastica lineare per quanto riguarda le combinazioni SLU comprensive di peso proprio, proprio non strutturale, vento, carico mobile e neve e analisi dinamica finalizzata alla calibrazione del modello con conseguente annessa analisi a spettro di risposta sismico per comprendere le combinazioni sismiche di normativa. L'analisi modale annessa a spettro di risposta ha l'obiettivo di calibrare il modello e viene svolta con il fine di raggiungere almeno l'85% delle masse partecipanti.





L'analisi modale è svolta con il metodo dei vettori di Ritz definendo due accelerazioni orizzontali atte a sollecitare la sorgente di massa specificatamente definita come peso proprio e proprio non strutturale.

Load Case Data - Modal

Load Case Name: MODAL Set Def Name Modify/Show...

Load Case Type: Modal Design...

Stiffness to Use:
☒ Zero Initial Conditions - Unstressed State
☐ Stiffness at End of Nonlinear Case ...
 Important Note: Loads from the Nonlinear Case are NOT included in the current case

Type of Modes:
☐ Eigen Vectors
☒ Ritz Vectors

Mass Source: MSSSRC1

Number of Modes:
 Maximum Number of Modes: 150
 Minimum Number of Modes: 1

Loads Applied

Load Type	Load Name	Maximum Cycles	Target Dynamic Participation Ratios (%)
Accel	UY	150	99.
Accel	UX	150	99.
Accel	UY	150	99.

Add Modify Delete OK Cancel

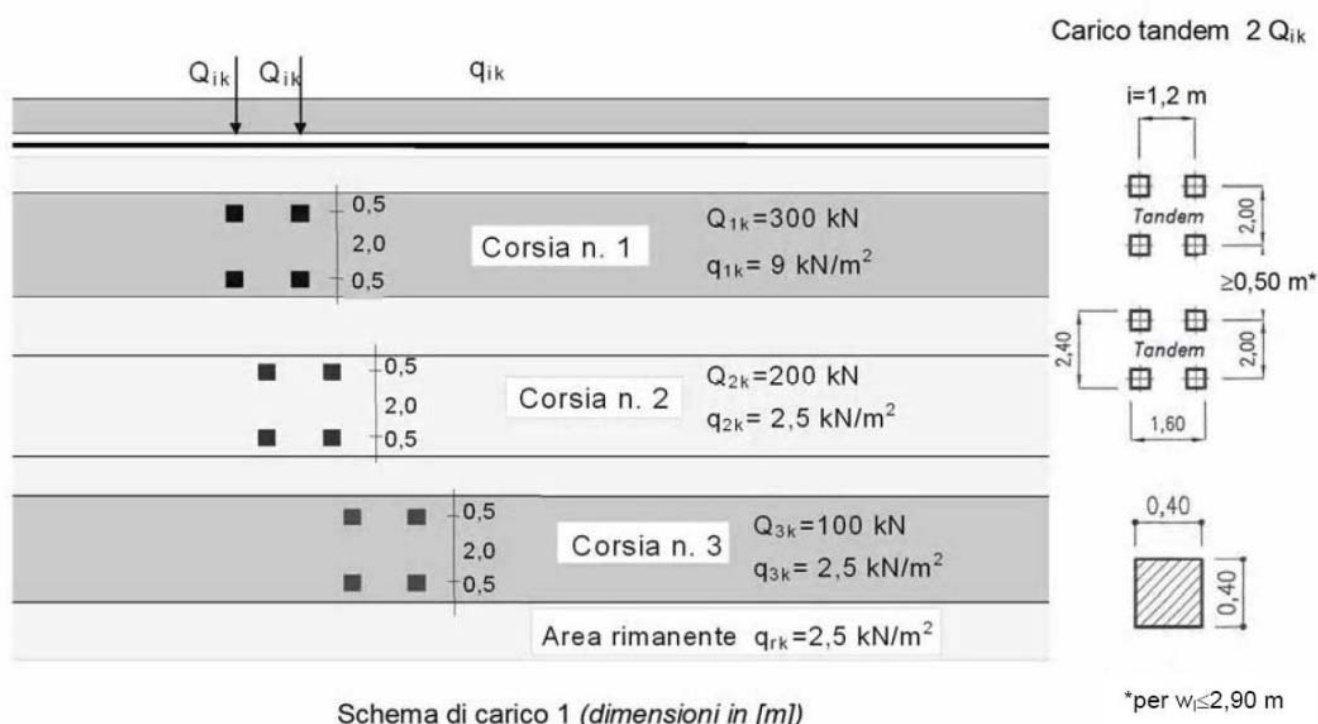
4.3 Analisi dei carichi

I carichi applicati al modello sono il peso proprio strutturale, il peso proprio non strutturale, il carico mobile, il carico vento e neve. I carichi sono poi combinati tra loro secondo NTC 2008.

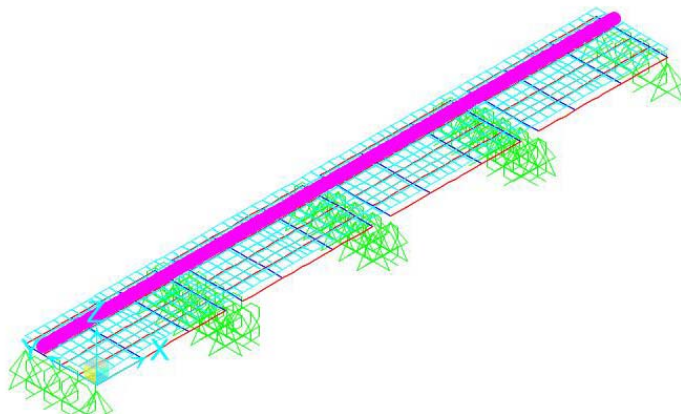
Peso proprio: automaticamente calcolato dal software in funzione delle geometrie e delle proprietà dei materiali considerate.

Peso proprio non strutturale: è rappresentativo dello strato di conglomerato bituminoso costituente la carreggiata stradale e supposto di peso 1200 kg/m^3 pertanto, moltiplicato per lo strato di circa 10 cm, si riconduce ad un carico per superficie pari a 1.2 kN/m^2 .

Carico mobile: è da normativa inteso come scheda di carico tipo 1 e quindi assimilabile ad un carico su carreggiata 1 pari a 9 kN/m^2 di distribuito + carico tandem 300 kN ad interasse 1.2 metri, su carreggiata 2 pari a 2.5 kN/m^2 di distribuito + carico tandem 200 kN ad interasse 1.2 metri. Le carreggiate hanno larghezza 3 metri (quindi i carichi uniformemente distribuiti su superficie saranno ricondotti a metro lineare). I carichi saranno quindi applicati direttamente come carico “moving load” alla trave centrale alla carreggiata.



La struttura presenta solo due corsie e trave centrale per entrambe, pertanto la modellazione non ha richiesto particolari accorgimenti e il carico può essere automaticamente ripartito in asse verticale con le travi centrali sottostanti senza necessità di creare sottocombinazioni (l'impalcato è simmetrico).



Vehicle Data
×

Vehicle name

Units

Load Elevation

Loads


Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Axle Load
Leading Load	Infinite		27.	0.
Leading Load	Infinite		27.	0.
Fixed Length	1.000E-03		27.	300.
Fixed Length	1.2		27.	300.
Trailing Load	Infinite		27.	

☒ Vehicle Remains Fully In Path

Vehicle Data

Vehicle name: Units:

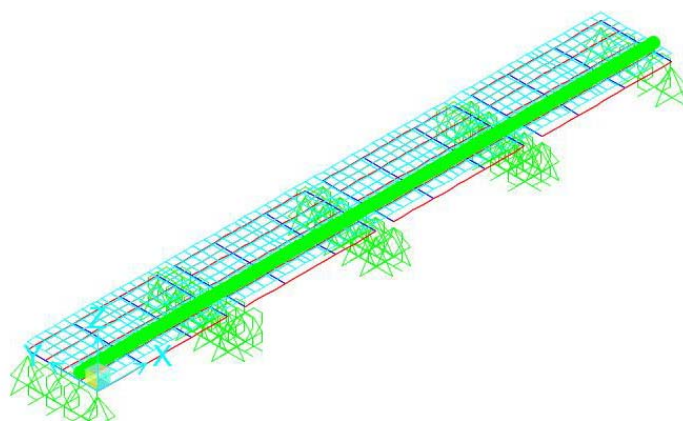
Load Elevation



Loads

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Axle Load
Leading Load	Infinite		7.5	0.
Leading Load	Infinite		7.5	0.
Fixed Length	1.000E-03		7.5	200.
Fixed Length	1.2		7.5	200.
Trailing Load	Infinite		7.5	

☒ Vehicle Remains Fully In Path



Il software si occuperà quindi di simulare lo scorrimento del carico lungo l'asse di entrambe le corsie valutando così la condizione di applicazione più gravosa per la struttura. Il carico mobile adottato è riferito a ponti di categoria 1.

Carico vento: si escludono fenomeni dinamici scaturiti dall'azione del vento su questa tipologia di struttura massiccia quindi si considera un carico agente perpendicolare alla superficie della carreggiata e uniformemente distribuito pari a 2.5 kN/m^2 ripartito su un'altezza di $3+1=4 \text{ m}$ (altezza trave + altezza autoveicolo) e quindi applicato come carico linearmente distribuito sulla trave di bordo (lato più sfavorevole corsia 1).

calcolata come di seguito:

$$a_s < a_0 = 750 \text{ m}$$

$$v_b = v_{b0} = 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La classe di esposizione dell'area è di tipo II.

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = 0.5 \cdot 1.25 \cdot 25^2 = 391 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$c_e (z \geq z_{\min} = 11 \text{ m}) = k_r^2 \cdot c_t \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot \left[7 + c_t \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right]$$

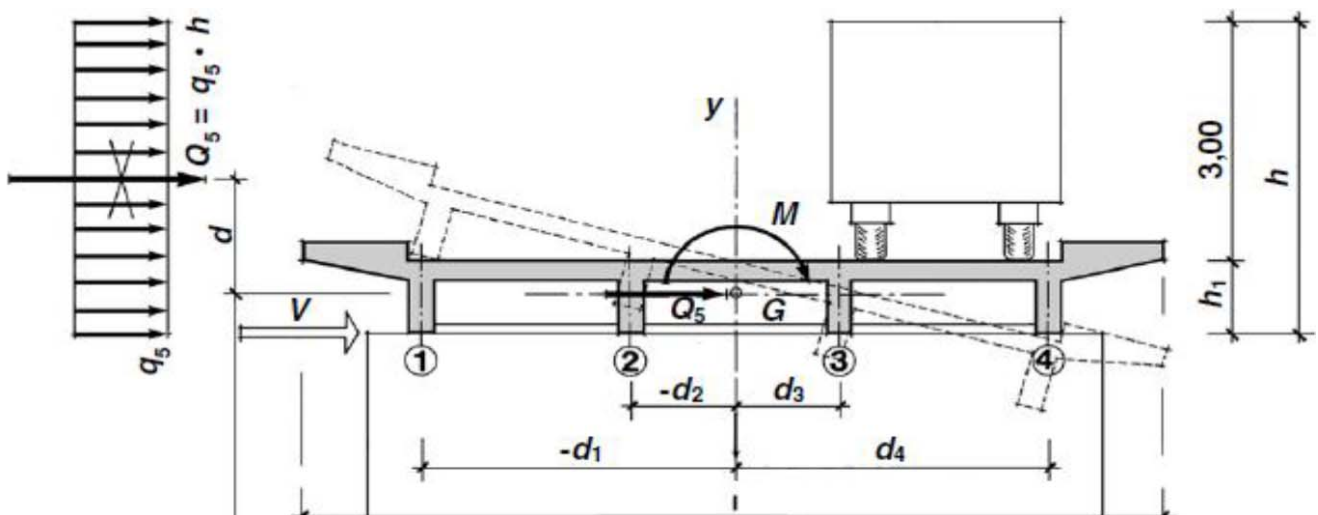
$$= 0.19^2 \cdot 1 \cdot \ln\left(\frac{11}{0.05}\right) \cdot \left[7 + 1 \cdot \ln\left(\frac{11}{0.05}\right)\right] = 2.41$$

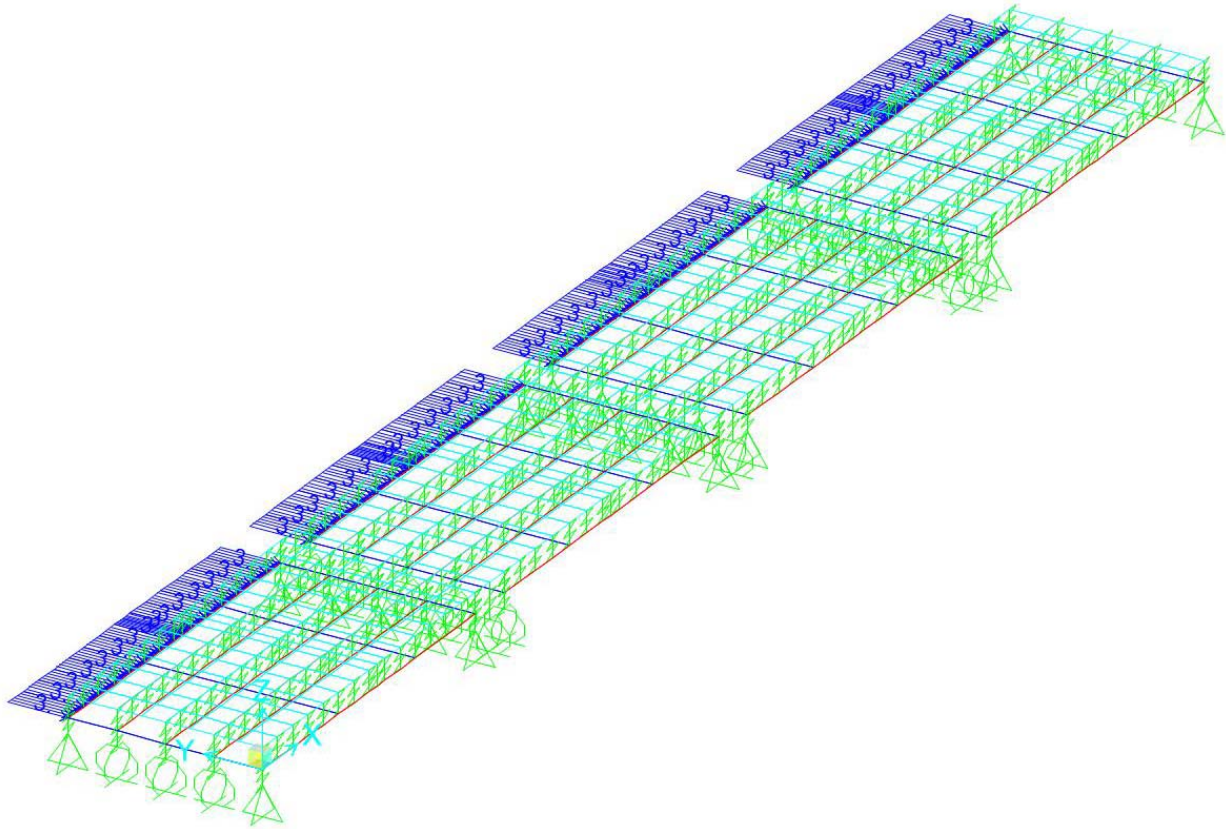
$$c_p = 0.8$$

$$c_d = 1$$

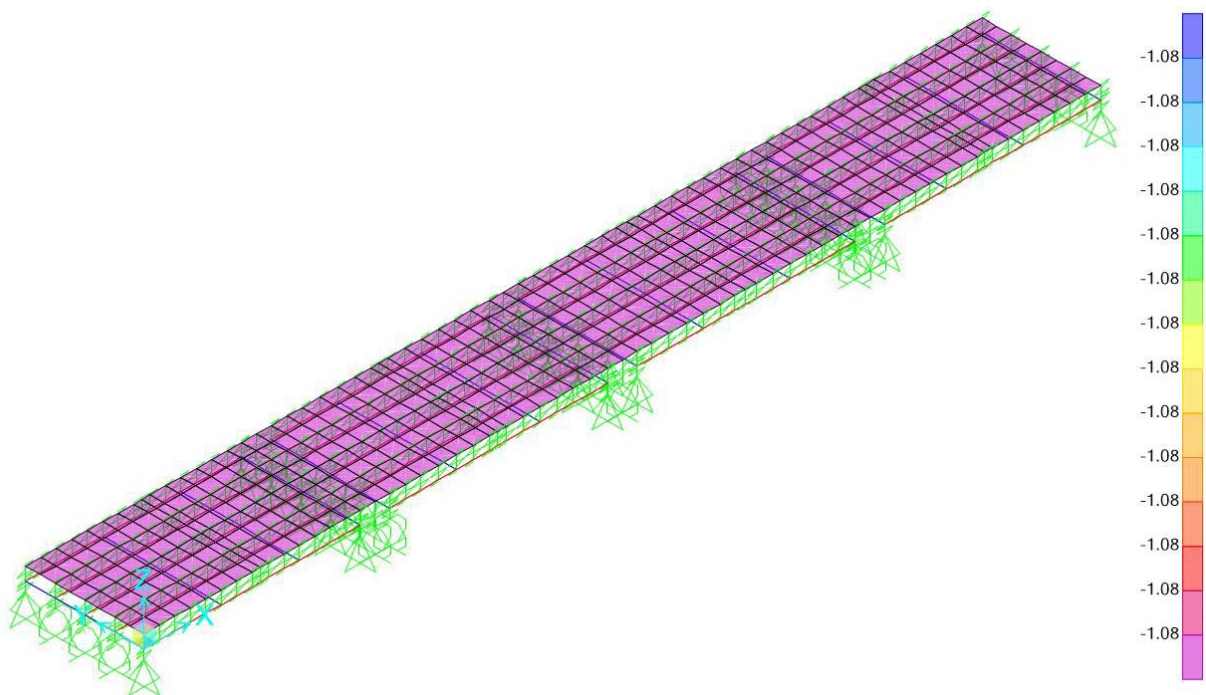
$$p = q_b \cdot c_e \cdot c_d = 391 \cdot 2.41 \cdot 0.8 \cdot 1 = 754 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Ripartendo si ottiene un carico distribuito lineare di: $0.75 \text{ kN/m}^2 \cdot 4 \text{ m} = 3 \text{ kN/m}$





Carico neve: da normativa ricavato per località Ravenna $1.5 \text{ kN/m}^2 \cdot 0.8$ (copertura piana) $\cdot 0.9$ (facilmente rimovibile) $= 1.08 \text{ kN/m}^2$. L'azione della neve non viene combinata con i carichi mobili e sarà utilizzata solo per verifica agli stati limite di esercizio e valutazione della freccia.



4.4 Valutazione spettro sismico

Response Spectrum Italian NTC2008 Function Definition

Function Name SPETTRO ORIZZONTALE SLV **Function Damping Ratio** 0.05

Parameters

☒ ag, F0 and Tc* - by Latitude/Longitude
☐ ag, F0 and Tc* - by Island
☐ ag, F0 and Tc* User Specified

Site Longitude (degree) 12.197
 Site Latitude (degree) 44.3963
 Island Name
 Limit State SLV
 Usage Class II
 Nominal Life 50.
 Peak Ground Acc., ag/g 0.1641
 Magnification Factor, F0 2.5435
 Reference period, Tc* 0.281
 Spectrum Type Design Horiz
 Soil Type D
 Topography T1
 h/H ratio 1.
 Spectrum Period, Tb 0.2209
 Spectrum Period, Tc 0.6626
 Spectrum Period, Td 2.2564
 Damping Percentage, Xi
 Behavior Factor, q 1.

Define Function

Period	Acceleration
0.	0.2911
0.2209	0.7404
0.6626	0.7404
0.7626	0.6433
0.8626	0.5687
0.9626	0.5097
1.0626	0.4617
1.1626	0.422
1.2626	0.3886

Function Graph

Display Graph (2.9858 , 0.1243)

OK Cancel

Convert to User Defined

Parametri indipendenti

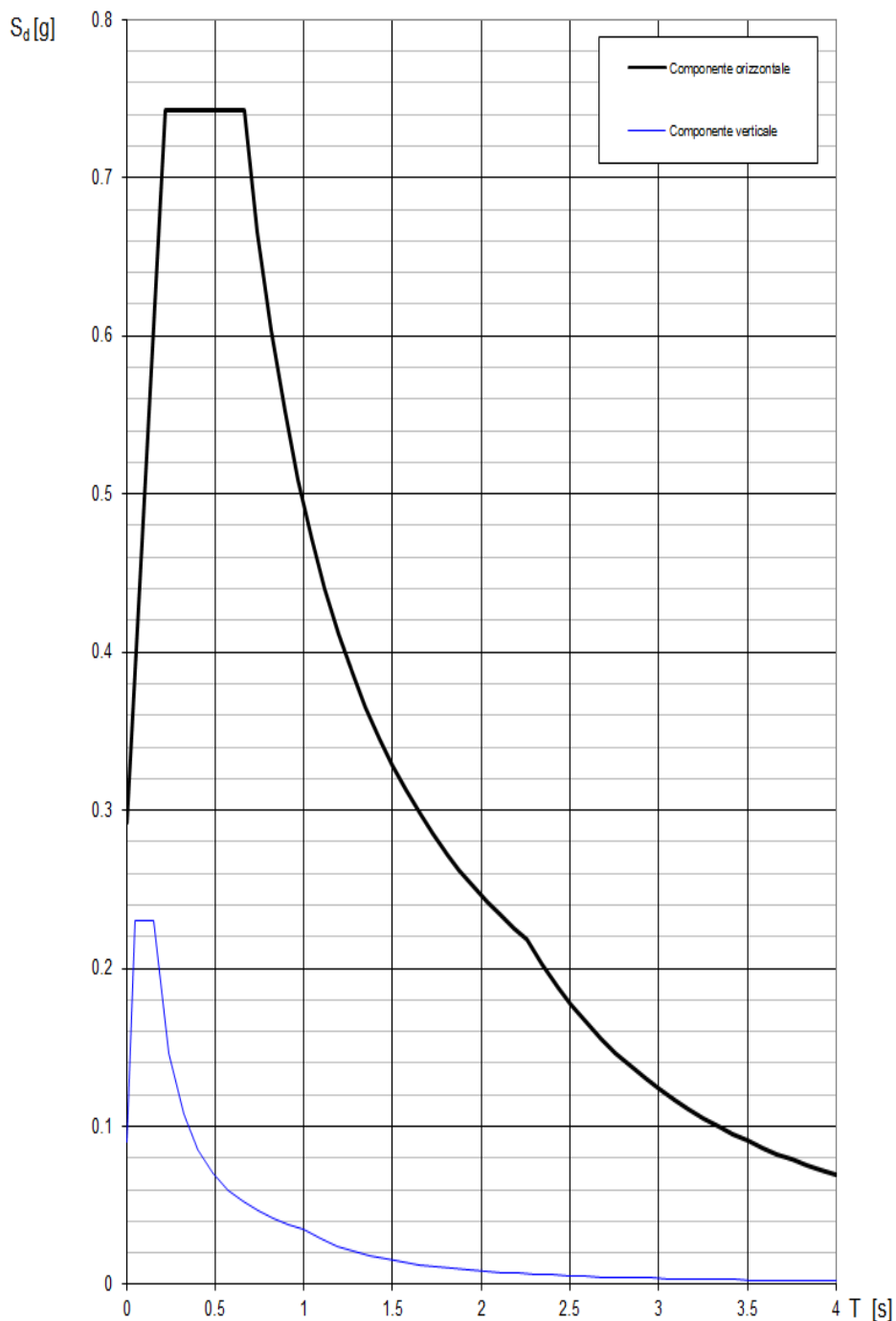
STATO LIMITE	SLV
a_g	0.165 g
F_o	2.539
T_{c^*}	0.281 s
S_s	1.771
C_c	2.356
S_T	1.000
q	1.000

Parametri dipendenti

S	1.771
η	1.000
T_B	0.221 s
T_C	0.663 s
T_D	2.260 s

Punti dello spettro di risposta

	T [s]	Se [g]
	0.000	0.292
$T_B \leftarrow$	0.221	0.743
$T_C \leftarrow$	0.663	0.743
	0.739	0.666
	0.815	0.604
	0.891	0.552
	0.967	0.509
	1.043	0.472
	1.120	0.440
	1.196	0.412
	1.272	0.387
	1.348	0.365
	1.424	0.346
	1.500	0.328
	1.576	0.313
	1.652	0.298
	1.728	0.285
	1.804	0.273
	1.880	0.262
	1.956	0.252
	2.032	0.242
	2.108	0.234
	2.184	0.225
$T_D \leftarrow$	2.260	0.218
	2.343	0.203
	2.426	0.189
	2.509	0.177
	2.592	0.166
	2.675	0.156
	2.757	0.146
	2.840	0.138
	2.923	0.130
	3.006	0.123
	3.089	0.117
	3.172	0.111
	3.254	0.105
	3.337	0.100
	3.420	0.095
	3.503	0.091
	3.586	0.087
	3.669	0.083
	3.751	0.079
	3.834	0.076
	3.917	0.073
	4.000	0.070



Non sono disponibili indagini geologiche eseguite appositamente ma si ritiene cautelativo e rappresentativo della zona adottare parametri geofisici di classificazione del suolo D e stratigrafia tipo T1.

Viene incluso anche lo spettro verticale e quindi combinato con il precedente orizzontale nelle sue due componenti.

Response Spectrum Italian NTC2008 Function Definition

Function Name SPETTRO VERTICALE SLV **Function Damping Ratio** 0.05

Parameters

☒ ag, F0 and Tc* - by Latitude/Longitude
☐ ag, F0 and Tc* - by Island
☐ ag, F0 and Tc* User Specified

Site Longitude (degree) 12.197
 Site Latitude (degree) 44.3963
 Island Name
 Limit State SLV
 Usage Class II
 Nominal Life 50.
 Peak Ground Acc., ag/g 0.1641
 Magnification Factor, F0 2.5435
 Reference period, Tc* 0.281
 Spectrum Type Design Vertical
 Soil Type D
 Topography T1
 h/H ratio 1.
 Spectrum Period, Tb 0.05
 Spectrum Period, Tc 0.15
 Spectrum Period, Td 1.
 Damping Percentage, Xi
 Behavior Factor, q 1.

Define Function

Period	Acceleration
0.	0.0897
0.05	0.2283
0.15	0.2283
0.25	0.137
0.35	0.0978
0.45	0.0761
0.55	0.0623
0.65	0.0527
0.75	0.0457

Function Graph

Display Graph 0.0,0.0

OK Cancel

Convert to User Defined

Le azioni sismiche saranno pertanto tra loro combinate:

$$E_x + 0.3 \cdot E_y + 0.3 \cdot E_z$$

$$E_y + 0.3 \cdot E_x + 0.3 \cdot E_z$$

$$E_z + 0.3 \cdot E_x + 0.3 \cdot E_y$$

4.5 Combinazioni di carico

La combinazione statica e sismica adottata è quella della nuova normativa. Il calcolo delle sollecitazioni è implementato direttamente nel programma impostando gli opportuni coefficienti di sicurezza e considerando le seguenti combinazioni di carico:

- Combinazione permanente
 - $\gamma_g = 1.3$
 - $\gamma_p = 1.5$ per permanente non strutturale
 - $\gamma_q = 1.5$ per esercizio o neve a seconda dei casi
 - $\varphi_{01} = 0.7$ per esercizio
 - $\varphi_{02} = 0.5$ per neve
- Combinazione sismica
 - $\gamma_I = 1.00$

Gli altri coefficiente φ_{2i} della combinazione sismica sono nulli. I singoli coefficienti vengono poi moltiplicati tra loro, a seconda della combinazione permanente adottata, poiché i coefficienti riduttivi per i carichi accidentali si alternano a seconda del caso considerato. Le formule seguenti di combinazione permanente e sismica espongono chiaramente la procedura adottata.

$$F_d = \gamma_g \cdot G_k + \gamma_p \cdot P_k + \gamma_q \cdot \left[Q_{1k} + \sum_{i=2}^n (\varphi_{0i} \cdot Q_{ik}) \right] \text{ (Combinazione Permanente)}$$

$$F_d = G_k + P_k + \gamma_I \cdot A_{Ed} + \sum_{i=1}^n (\varphi_{2i} \cdot Q_{ik}) \text{ (Combinazione Sismica)}$$

- A_{Ed} valore di progetto dell'azione sismica;
- G_k indica i carichi permanente strutturali calcolati automaticamente dal software;
- P_k forza di precompressione non considerata;
- Q_{1k} e Q_{ik} rispettivamente i carichi di peso proprio non strutturale, servizio, neve e vento alternati (vento non presente nel caso in esame).

Le combinazioni totali saranno quindi 2 permanenti per le verifiche statiche (servizio e neve) e 2 sismiche per le verifiche dinamiche che corrispondono alle possibili combinazioni tra sisma in direzione x e sisma in direzione y.

Si riporta estrapolato della combinazioni SLU, SLE e sismiche introdotte nel modello di calcolo:

TABLE: Combination Definitions					
ComboName	ComboType	AutoDesign	CaseType	CaseName	ScaleFactor
Text	Text	Yes/No	Text	Text	Unitless
SLU 1	Linear Add	No	Linear Static	DEAD	1.35
SLU 1			Linear Static	WIND	0.9
SLU 1			Linear Static	NOSTRUT	1.5
SLU 1			Moving Load	SCHEMA CARICO 1	1.35
SLU 2	Linear Add	No	Linear Static	DEAD	1.35
SLU 2			Linear Static	WIND	1.5
SLU 2			Linear Static	NOSTRUT	1.5
SLU 2			Moving Load	SCHEMA CARICO 1	1.0125
SLE 1	Linear Add	No	Linear Static	DEAD	1
SLE 1			Linear Static	NOSTRUT	1
SLE 1			Moving Load	SCHEMA CARICO 1	0.75
SLE 2	Linear Add	No	Linear Static	DEAD	1
SLE 2			Linear Static	NOSTRUT	1
SLE 2			Linear Static	WIND	0.2
QUAKE X	Linear Add	No	Linear Static	DEAD	1
QUAKE X			Linear Static	NOSTRUT	1
QUAKE X			Moving Load	SCHEMA CARICO 1	0.2
QUAKE X			Response Spectrum	SISMA X	1
QUAKE X			Response Spectrum	SISMA Y	0.3
QUAKE X			Response Spectrum	SISMA Z	0.3
QUAKE Y	Linear Add	No	Linear Static	DEAD	1
QUAKE Y			Linear Static	NOSTRUT	1
QUAKE Y			Moving Load	SCHEMA CARICO 1	0.2
QUAKE Y			Response Spectrum	SISMA X	0.3
QUAKE Y			Response Spectrum	SISMA Y	1
QUAKE Y			Response Spectrum	SISMA Z	0.3
QUAKE Z	Linear Add	No	Linear Static	DEAD	1
QUAKE Z			Linear Static	NOSTRUT	1
QUAKE Z			Moving Load	SCHEMA CARICO 1	0.2
QUAKE Z			Response Spectrum	SISMA X	0.3
QUAKE Z			Response Spectrum	SISMA Y	0.3
QUAKE Z			Response Spectrum	SISMA Z	1
SLE QP	Linear Add	No	Linear Static	DEAD	1
SLE QP			Linear Static	NOSTRUT	1
SLE QP			Linear Static	SNOW	0.5

5 RISULTATI E VERIFICHE

5.1 *Analisi modale dello stato di fatto*

Obiettivo dell'analisi è lo studio di un numero sufficiente di modi di vibrare atto a coinvolgere almeno l'85% delle masse partecipanti nelle 3 direzioni principali. L'analisi modale ha lo scopo, oltre che di poter fornire i parametri necessari al fine di eseguire l'analisi a spettro di risposta sismico, soprattutto il vantaggio di cogliere il comportamento della struttura, evidenziandone le criticità sotto forma di modi di vibrare, periodi e frequenze proprie della struttura. L'indagine svolta da 4Emme ha evidenziato i primi due modi di vibrare di tipo traslazionale e torsionale con frequenze calibrate sui risultati della prova di caratterizzazione dinamica svolta. Da report si identifica che la partecipazione maggiore di masse si ha con i modi più alti quali il 10 per esempio. Nel modello realizzato con Sap2000 si studieranno 60 modi di vibrare e si terrà conto di un cls fessurato con modulo elastico ridotto del 50% rispetto al valore originario. In tal modo si terrà in conto dei fenomeni fessurativi che si potrebbero innescare durante l'evento sismico considerando anche che la struttura attualmente si presenta fortemente deteriorata.

TABLE: Modal Participating Mass Ratios									
OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	0.070307	0.04054	0	5.538E-07	0.04054	0	5.538E-07
MODAL	Mode	2	0.064863	0	0.000003972	0	0.04054	0.000003972	5.538E-07
MODAL	Mode	3	0.06275	0.00001267	0	0.25857	0.04055	0.000003972	0.25857
MODAL	Mode	4	0.062614	0.00313	0	0.00109	0.04368	0.000003972	0.25967
MODAL	Mode	5	0.059488	0	0.00302	0	0.04368	0.00303	0.25967
MODAL	Mode	6	0.057989	0	0.000003481	0	0.04368	0.00303	0.25967
MODAL	Mode	7	0.057447	2.259E-07	0	0.4229	0.04368	0.00303	0.68257
MODAL	Mode	8	0.056494	0	0.23918	0	0.04368	0.24221	0.68257
MODAL	Mode	9	0.039001	0	0.69069	0	0.04368	0.9329	0.68257
MODAL	Mode	10	0.038168	0	0.000002489	0	0.04368	0.9329	0.68257
MODAL	Mode	11	0.034546	0	0.00007736	0	0.04368	0.93298	0.68257
MODAL	Mode	12	0.032809	0	0.000004194	0	0.04368	0.93298	0.68257
MODAL	Mode	13	0.030469	0.57724	0	7.979E-09	0.62093	0.93298	0.68257
MODAL	Mode	14	0.028479	0.000004804	0	0.00035	0.62093	0.93298	0.68292
MODAL	Mode	15	0.027937	0.0000274	0	3.072E-10	0.62096	0.93298	0.68292
MODAL	Mode	16	0.027815	0.00002363	0	1.485E-07	0.62098	0.93298	0.68292
MODAL	Mode	17	0.026554	0.01181	0	0.00001246	0.63279	0.93298	0.68293
MODAL	Mode	18	0.026248	0.00005845	0	0.00171	0.63285	0.93298	0.68464

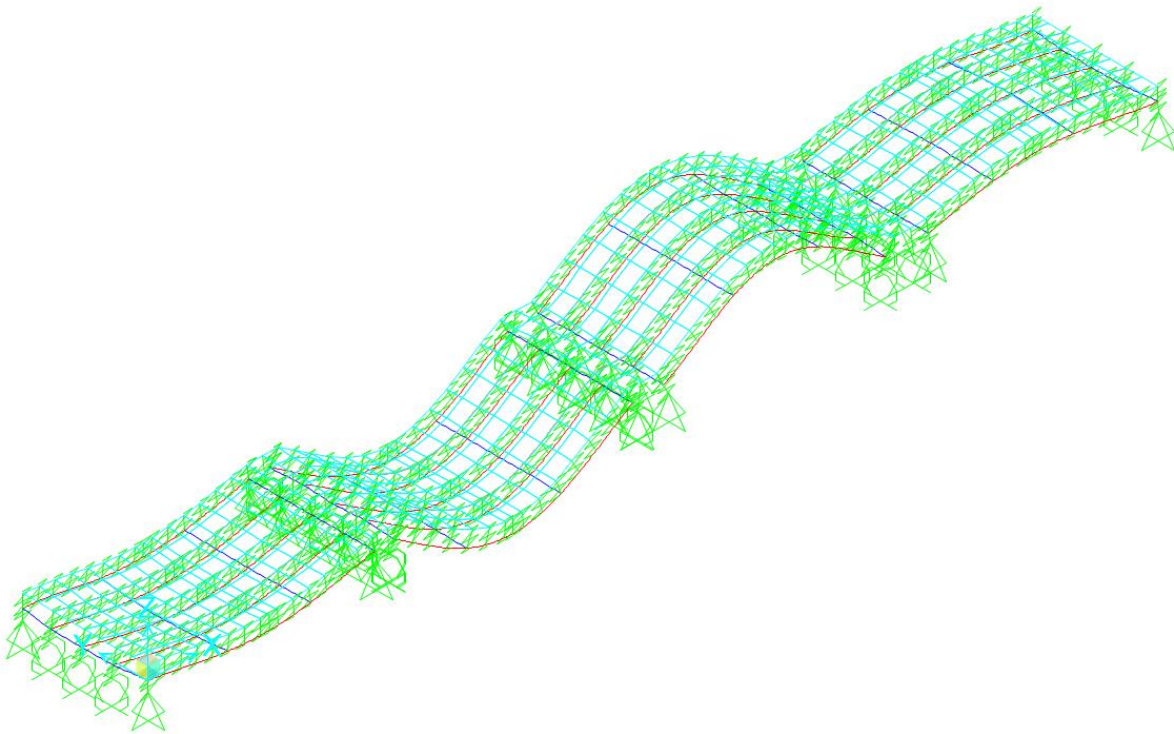
TABLE: Modal Participating Mass Ratios									
OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	19	0.023404	0	0.00549	0	0.63285	0.93848	0.68464
MODAL	Mode	20	0.022816	0	0.000000333	0	0.63285	0.93848	0.68464
MODAL	Mode	21	0.022718	0.00118	0	0.000001671	0.63403	0.93848	0.68464
MODAL	Mode	22	0.021825	0	0.00104	0	0.63403	0.93952	0.68464
MODAL	Mode	23	0.02144	8.556E-07	0	0.00126	0.63403	0.93952	0.6859
MODAL	Mode	24	0.019808	0	0.00193	0	0.63403	0.94145	0.6859
MODAL	Mode	25	0.019693	0.25799	0	2.166E-07	0.89202	0.94145	0.6859
MODAL	Mode	26	0.019488	0.00001274	4.088E-20	0.00123	0.89203	0.94145	0.68713
MODAL	Mode	27	0.017617	0.02908	1.701E-19	8.025E-07	0.92112	0.94145	0.68713
MODAL	Mode	28	0.01658	2.245E-12	0.00314	7.518E-13	0.92112	0.94459	0.68713
MODAL	Mode	29	0.016437	0.00033	6.242E-10	0.00000599	0.92145	0.94459	0.68714
MODAL	Mode	30	0.016372	0.00017	1.014E-09	0.00001282	0.92162	0.94459	0.68715
MODAL	Mode	31	0.016212	4.703E-08	2.344E-09	0.00001284	0.92162	0.94459	0.68716
MODAL	Mode	32	0.015838	0.01701	2.275E-13	1.399E-08	0.93863	0.94459	0.68716
MODAL	Mode	33	0.015539	2.096E-13	0.00426	3.635E-12	0.93863	0.94885	0.68716
MODAL	Mode	34	0.015121	1.251E-07	5.432E-11	0.00018	0.93863	0.94885	0.68734
MODAL	Mode	35	0.012585	1.357E-11	0.01162	1.863E-09	0.93863	0.96047	0.68734
MODAL	Mode	36	0.012053	0.000005058	0.000001857	0.00082	0.93863	0.96047	0.68817
MODAL	Mode	37	0.011813	0.00089	0.000001117	0.00057	0.93953	0.96048	0.68874
MODAL	Mode	38	0.011573	0.000002822	0.000001437	0.06005	0.93953	0.96048	0.74879
MODAL	Mode	39	0.011542	0.01238	6.832E-07	0.00026	0.9519	0.96048	0.74905
MODAL	Mode	40	0.01124	0.000001448	0.01326	0.00012	0.95191	0.97373	0.74917
MODAL	Mode	41	0.011166	0.00057	0.00002036	0.03096	0.95247	0.97375	0.78013
MODAL	Mode	42	0.011113	0.00179	0.00001977	0.00255	0.95426	0.97377	0.78268
MODAL	Mode	43	0.009816	6.899E-08	0.00003807	0.00071	0.95426	0.97381	0.78339
MODAL	Mode	44	0.009579	1.056E-07	0.0052	0.000004383	0.95426	0.97901	0.78339
MODAL	Mode	45	0.009142	0.00204	3.496E-07	2.552E-08	0.95631	0.97901	0.78339
MODAL	Mode	46	0.008101	0.00178	4.79E-08	0.00018	0.95809	0.97901	0.78357
MODAL	Mode	47	0.008044	0.00042	0.000003599	0.00088	0.9585	0.97902	0.78446
MODAL	Mode	48	0.007167	0.00008066	0.0035	0.000004272	0.95859	0.98252	0.78446
MODAL	Mode	49	0.007135	0.01471	0.00001774	0.000002944	0.97329	0.98253	0.78446
MODAL	Mode	50	0.006338	0.00003426	0.000005932	0.01303	0.97333	0.98254	0.7975
MODAL	Mode	51	0.005794	0.00007982	0.000004079	0.02328	0.97341	0.98254	0.82077
MODAL	Mode	52	0.005469	0.00594	0.000001797	0.00015	0.97935	0.98255	0.82092
MODAL	Mode	53	0.005022	0.000003753	0.00356	0.00001158	0.97935	0.9861	0.82093
MODAL	Mode	54	0.004502	0.0049	5.163E-07	0.00007414	0.98425	0.9861	0.821
MODAL	Mode	55	0.004021	0.000002158	4.235E-07	0.04365	0.98426	0.9861	0.86466
MODAL	Mode	56	0.003089	0.00002846	3.893E-07	0.02527	0.98428	0.9861	0.88993
MODAL	Mode	57	0.002944	0.0028	1.492E-07	0.00016	0.98709	0.9861	0.89009
MODAL	Mode	58	0.00202	1.314E-07	0.00487	0.00000141	0.98709	0.99097	0.89009
MODAL	Mode	59	0.00145	0.00555	5.991E-08	0.00001354	0.99264	0.99097	0.89011
MODAL	Mode	60	0.000889	0.000001013	1.103E-07	0.08326	0.99264	0.99097	0.97336

L'analisi modale individua per direzione X primo modo significativo il 13, per direzione Y modi 8 e 9 e direzione Z 3 e 7. Si riportano i primi due modi di vibrare constatando la comparabilità dei risultati con quanto ottenuto da 4Emme.

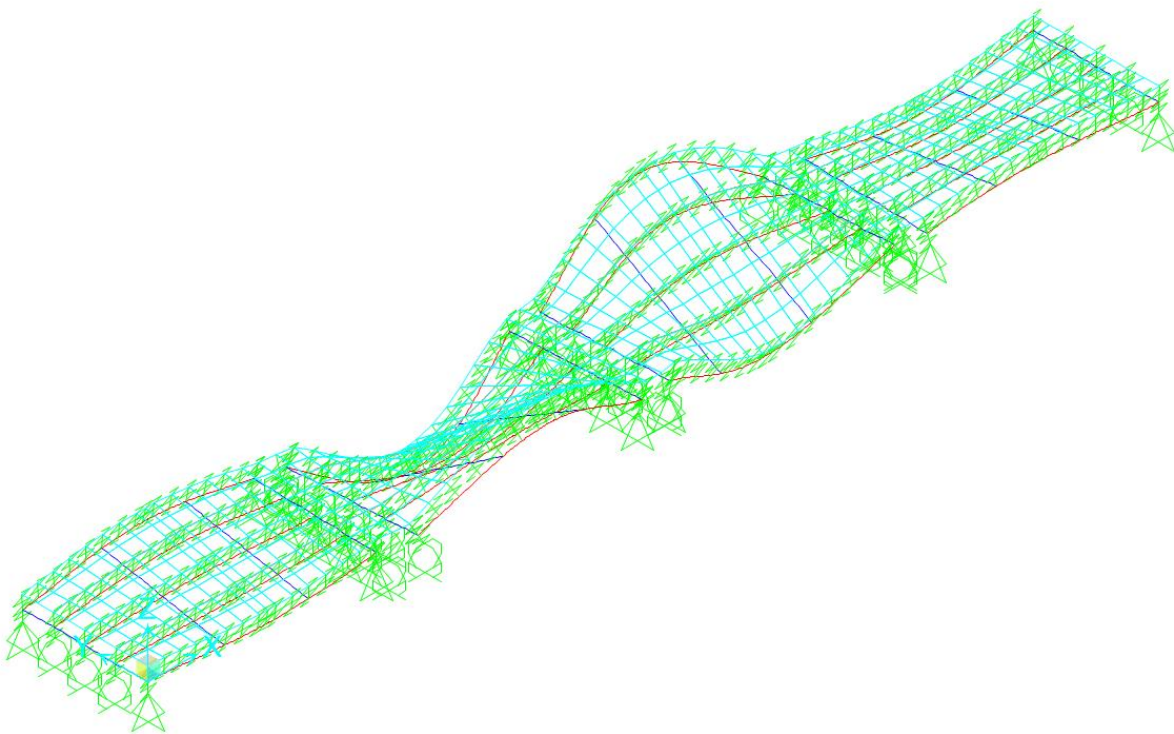
Modo 1: freq: 14.23 Hz Traslazionale verticale

Modo 2: freq: 15.42 Hz Torsionale verticale

Deformed Shape (MODAL) - Mode 1; T = 0.07031; f = 14.22324



Deformed Shape (MODAL) - Mode 2; T = 0.06486; f = 15.41701



5.2 Considerazioni sul taglio dei giunti

Successivamente all'analisi modale svolta sullo stato di fatto del ponte e constatato che la soletta della carreggiata è interrotta in prossimità degli appoggi delle travi principali, si sceglie di analizzare la struttura considerandone la singola campata come isostatica e quindi includendo in progetto anche il taglio dei cordoli laterali. Ciò presuppone una reiterazione dei risultati precedenti, con nuova analisi modale e conseguente verifica delle sezioni delle travi sulla base delle nuove sollecitazioni ottenute.

5.3 Analisi modale dello stato di progetto

La nuova analisi restituisce valori differenti in quanto variato completamente lo schema di vincolamento, inoltre il modello è completamente differente essendo stata isolata la singola campata centrale ritenuta la più gravosa.

TABLE: Modal Participating Mass Ratios									
OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	0.154566	0	0.64991	0	0	0.64991	0
MODAL	Mode	2	0.099767	0.11313	0	0.6832	0.11313	0.64991	0.6832
MODAL	Mode	3	0.05716	0	0.06519	0	0.11313	0.7151	0.6832
MODAL	Mode	4	0.034684	0.61265	0	0.053	0.72578	0.7151	0.7362
MODAL	Mode	5	0.028308	0.00159	0	0.00024	0.72737	0.7151	0.73644
MODAL	Mode	6	0.027932	0	0.21209	0	0.72737	0.92718	0.73644
MODAL	Mode	7	0.023623	0	0.01859	0	0.72737	0.94577	0.73644
MODAL	Mode	8	0.021899	0.20447	0	0.00789	0.93184	0.94577	0.74432
MODAL	Mode	9	0.017026	0.00055	0	0.00002562	0.93238	0.94577	0.74435
MODAL	Mode	10	0.016535	0	0.00374	0	0.93238	0.94951	0.74435
MODAL	Mode	11	0.013138	0	0.01056	0	0.93238	0.96007	0.74435
MODAL	Mode	12	0.012375	0.00334	0	0.04325	0.93573	0.96007	0.7876
MODAL	Mode	13	0.01222	0.00233	0	0.02643	0.93805	0.96007	0.81403
MODAL	Mode	14	0.012131	0	0.00157	0	0.93805	0.96164	0.81403
MODAL	Mode	15	0.011893	0	0.01157	0	0.93805	0.9732	0.81403
MODAL	Mode	16	0.011881	0.00046	0	0.00614	0.93851	0.9732	0.82017
MODAL	Mode	17	0.010499	0	0.00019	0	0.93851	0.97339	0.82017
MODAL	Mode	18	0.01017	4.184E-09	0	0.00002962	0.93851	0.97339	0.8202
MODAL	Mode	19	0.009892	0	0.00187	0	0.93851	0.97526	0.8202
MODAL	Mode	20	0.009764	0.00003904	0	0.00007472	0.93855	0.97526	0.82028
MODAL	Mode	21	0.009089	0.01974	0	0.00555	0.95829	0.97526	0.82583
MODAL	Mode	22	0.008767	0	0.00058	0	0.95829	0.97584	0.82583
MODAL	Mode	23	0.008535	0.0013	0	0.00034	0.95959	0.97584	0.82617
MODAL	Mode	24	0.008487	0	0.00306	0	0.95959	0.9789	0.82617
MODAL	Mode	25	0.008438	0.00018	0	0.00014	0.95976	0.9789	0.82631
MODAL	Mode	26	0.007925	0.000002988	3.141E-19	0.000005115	0.95977	0.9789	0.82632
MODAL	Mode	27	0.007715	0.01289	2.423E-19	0.00216	0.97266	0.9789	0.82848

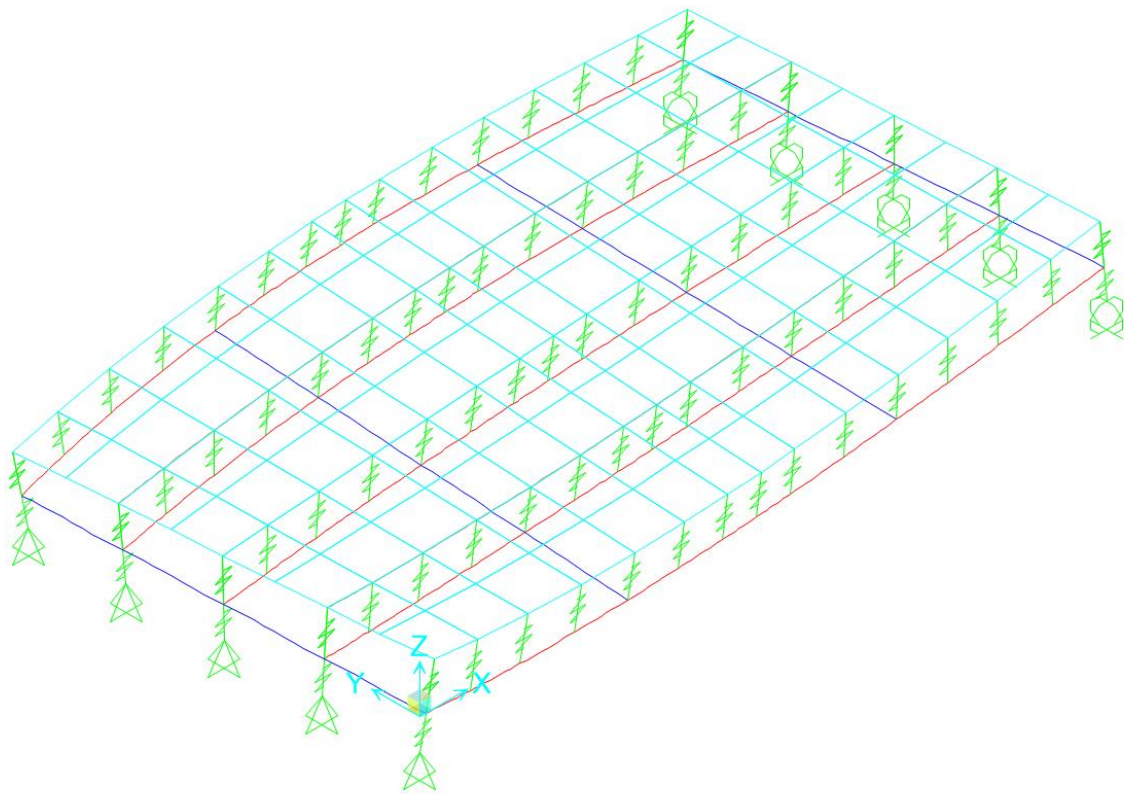
TABLE: Modal Participating Mass Ratios									
OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	28	0.007603	1.027E-16	0.00111	7.997E-18	0.97266	0.98001	0.82848
MODAL	Mode	29	0.007503	0.00297	1.375E-16	0.00015	0.97563	0.98001	0.82863
MODAL	Mode	30	0.00742	0.00078	1.408E-16	0.00001683	0.97641	0.98001	0.82864
MODAL	Mode	31	0.007268	0.00033	1.031E-16	0.00005023	0.97674	0.98001	0.82869
MODAL	Mode	32	0.00696	1.677E-15	0.0016	1.642E-16	0.97674	0.9816	0.82869
MODAL	Mode	33	0.006911	0.00007262	3.652E-14	0.000006937	0.97681	0.9816	0.8287
MODAL	Mode	34	0.006448	0.000007061	1.763E-15	0.00043	0.97682	0.9816	0.82913
MODAL	Mode	35	0.006385	0.00028	1.148E-15	0.00264	0.9771	0.9816	0.83177
MODAL	Mode	36	0.006217	0.0003	3.065E-15	0.00832	0.9774	0.9816	0.84009
MODAL	Mode	37	0.006176	0.00157	2.126E-14	0.01696	0.97897	0.9816	0.85706
MODAL	Mode	38	0.006145	1.182E-14	0.00156	1.169E-13	0.97897	0.98317	0.85706
MODAL	Mode	39	0.005811	0.00000283	3.55E-16	0.00073	0.97897	0.98317	0.85778
MODAL	Mode	40	0.005326	0.0000574	2.189E-16	0.00084	0.97903	0.98317	0.85862
MODAL	Mode	41	0.005105	1.117E-15	0.00231	7.165E-16	0.97903	0.98548	0.85862
MODAL	Mode	42	0.004934	0.00331	3.396E-15	0.00157	0.98234	0.98548	0.86019
MODAL	Mode	43	0.004755	0.00317	1.845E-15	0.00202	0.98551	0.98548	0.86222
MODAL	Mode	44	0.004275	0.00009442	2.397E-17	0.01092	0.9856	0.98548	0.87314
MODAL	Mode	45	0.004139	0.00054	2.383E-14	0.00517	0.98614	0.98548	0.87831
MODAL	Mode	46	0.004043	9.977E-15	0.00104	3.597E-13	0.98614	0.98652	0.87831
MODAL	Mode	47	0.003884	0.00001234	2.665E-14	0.00365	0.98615	0.98652	0.88196
MODAL	Mode	48	0.003516	0.00185	6.513E-16	0.003	0.988	0.98652	0.88496
MODAL	Mode	49	0.003459	0.00004954	1.26E-15	0.01415	0.98805	0.98652	0.8991
MODAL	Mode	50	0.003117	7.733E-16	0.00159	1.988E-15	0.98805	0.98811	0.8991
MODAL	Mode	51	0.002712	0.00041	2.531E-17	0.00526	0.98846	0.98811	0.90436
MODAL	Mode	52	0.002567	0.00037	2.348E-15	0.00121	0.98882	0.98811	0.90557
MODAL	Mode	53	0.002155	0.00004197	8.336E-16	0.0059	0.98886	0.98811	0.91146
MODAL	Mode	54	0.001963	0.0026	1.051E-13	0.00004724	0.99146	0.98811	0.91151
MODAL	Mode	55	0.001921	6.682E-14	0.00433	1.948E-16	0.99146	0.99244	0.91151
MODAL	Mode	56	0.001513	0.00194	1.085E-15	0.00121	0.9934	0.99244	0.91272
MODAL	Mode	57	0.001231	0.00016	1.45E-15	0.00455	0.99356	0.99244	0.91727
MODAL	Mode	58	0.000891	6.512E-16	0.0028	4.289E-15	0.99356	0.99524	0.91727
MODAL	Mode	59	0.000679	0.00001095	6.42E-17	0.08133	0.99357	0.99524	0.9986
MODAL	Mode	60	0.000403	0.00477	5.029E-16	4.583E-11	0.99834	0.99524	0.9986

Il raggiungimento della soglia imposta da normativa per le masse partecipanti interesserebbe un numero minore di modi ma sono comunque considerati tutti e 60 i modi già precedentemente implementati.

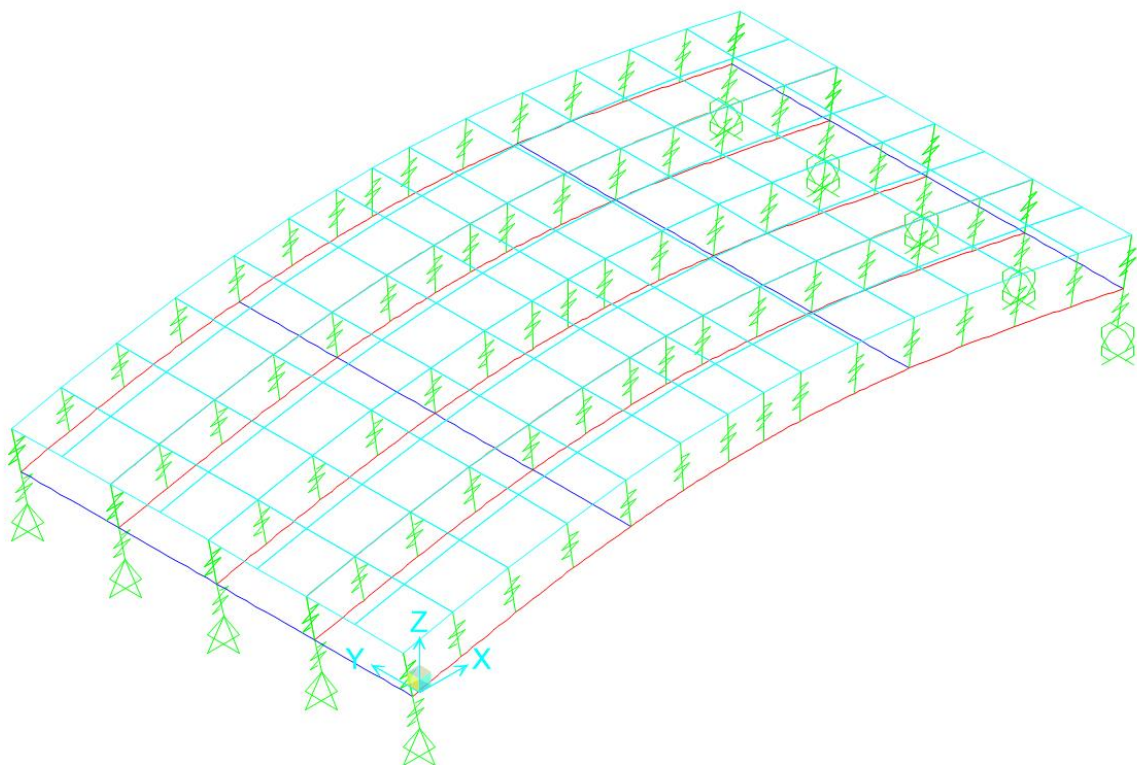
In tal caso i primi due modi ottengono la partecipazione maggiore delle masse e possono considerarsi entrambi di tipo traslazionale, il primo orizzontale, il secondo verticale.

Si ribadisce che per analisi modale e spettrale si è ridotto il modulo elastico del calcestruzzo del 50% per tenere in conto dei fenomeni fessurativi in situazione sismica (sgretolamento del cls).

Deformed Shape (MODAL) - Mode 1; $T = 0.15457$; $f = 6.46973$



Deformed Shape (MODAL) - Mode 2; $T = 0.09977$; $f = 10.02333$



5.4 Analisi a spettro di risposta

Il valore massimo di q_0 fattore di struttura (rappresentante lo smorzamento della struttura e tale semplificazione agisce riducendo le forze elastiche strutturali) impostato è pari ad 1 ovvero il minimo adottabile per normativa (struttura rigida minimamente duttile). La procedura consiste quindi nel creare due analisi spettrali, dipendenti dalla direzione del terremoto (le direzioni orizzontali per Sap2000 sono x e y), che tengono conto dell'analisi modale precedentemente eseguita. Le accelerazioni agiscono in funzione della gravitazionale 9.81 m/s^2 . Il software esegue quindi un involuppo dei risultati ottenuti combinando le varie direzioni in funzione SRSS (la radice quadrata della somma dei quadrati delle singole modalità). Per la combinazione modale utilizzerà CQC. I risultati ottenuti saranno estrapolati dal software in termini assoluti e quindi iterativamente combinati.

Load Case Data - Response Spectrum

Load Case Name
 SISMA X Set Def Name

Notes
 Modify/Show...

Load Case Type
 Response Spectrum Design...

Modal Combination

☒ CQC
☐ SRSS
☐ Absolute
☐ GMC
☐ NRC 10 Percent
☐ Double Sum

GMC f1: 1.
 GMC f2: 0.
 Periodic + Rigid Type: SRSS

Modal Load Case

Use Modes from this Modal Load Case: MODAL

☒ Standard - Acceleration Loading
☐ Advanced - Displacement Inertia Loading

Directional Combination

☒ SRSS
☐ CQC3
☐ Absolute

Scale Factor:

Mass Source
 Previous (MSSSRC1)

Diaphragm Eccentricity

Eccentricity Ratio: 0.
 Override Eccentricities: Override...

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	SPETTRO Of	9.81
Accel	U1	SPETTRO ORIZZ	9.81

Add Modify Delete

☐ Show Advanced Load Parameters

Other Parameters

Modal Damping: Constant at 0.05 Modify/Show...

OK Cancel

5.5 Analisi statica lineare

Le sollecitazioni agenti sulla sezione della trave principale sono ricavate eseguendo delle sections cut specifiche in determinate “fette” di carreggiata e compressive della soletta sovrastante. Si riporta quindi valore di momento, taglio e sforzo assiale sulla section cut della trave interna e a seguire sulla trave esterna. Si evidenziano i valori massimi e la posizione di section cut oltre la quale i valori scendono sotto il limite di resistenza della sezione (che ricordiamo essere trave $h=0.95$ m + soletta $h=0.34$ m). Il valore in tal caso dovrà essere inferiore a 1198 kNm per il momento e 345 kN per il taglio:

Verifica C.A. S.L.U. - File: L 0.5 flessione TRAVE int con soletta

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : trave centrale L/2 - A16

N° figure elementari Zoom N° strati barre Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	35	130

N°	As [cm²]	d [cm]
1	24.13	35.5
2	16.08	119
3	32.17	122

Tipo Sezione

☒ Rettan.re ☐ Trapezi
☐ a T ☐ Circolare
☐ Rettangoli ☐ Coord.

Sollecitazioni

S.L.U. Metodo n

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

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

Materiali

4EMME C16/20

ϵ_{su} 67.5 ‰ ϵ_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 243.5 N/mm² ϵ_{cu} 3.5 ‰
 E_s 200.000 N/mm² f_{cd} 9.067 N/mm²
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0.8 ?
 ϵ_{syd} 1.218 ‰ $\sigma_{c,adm}$ 7.25 N/mm²
 $\sigma_{s,adm}$ 115 N/mm² τ_{co} 0.4667 N/mm²
 τ_{c1} 1.543 N/mm²

M_{xRd} 1.198 kNm

σ_c -9.067 N/mm²
 σ_s 243.5 N/mm²
 ϵ_c 3.5 ‰
 ϵ_s 7.358 ‰
d 122 cm
x 39.33 cm x/d 0.3224
 δ 0.8429

N° rett. 100

Calcola MRd Dominio M-N

L₀ 0 cm Col. modello

☐ Precompresso

Dati sezione e materiale					
Base [cm]	35.00	Carico assiale [kN]	557		
Altezza [cm]	129.00	diametro ferri lon.[mm]	32		
Copriferro [cm]	3.50	f_{ck} [N/mm ²]	14.00		
f_{yk} [N/mm ²]	320.00	f_{cd} [N/mm ²]	7.93		
Armatura trasversale			Area staffe [mm ²]	157	
diametro staffe [mm]	10.00	passo [cm]	35.00	numero braccia	2
Verifica a Taglio					
θ per $V_{Rsd}=V_{Rsd}$	$\cotg\theta$	α_c	V_{Rsd} [kN]	V_{Rcd} [kN]	V_{Rd} [kN]
3.4418	2.5000	1.16	345.33	611.87	345.33

Se non si adottasse la procedura della section cut, leggere direttamente i risultati di momento e taglio sulla trave mediante i diagrammi restituiti dal software fornirebbe valore completamente errati poiché l'azione viene applicata sulla soletta e quindi trasmessa alla trave mediante link rigidi e i risultati visualizzati sulla trave non tengono conto di quanto trasmesso dalla soletta.

TABLE: Section Cut Forces - Analysis												
SectionCut	OutputCase	CaseType	StepType	F1	F2	F3	M1	M2	M3	GlobalX	GlobalY	GlobalZ
Text	Text	Text	Text	KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m	m	m	m
SCUT CAMP4 S1	SISMA X	LinRespSpec	Max	71.991	2.345	10.177	0.4268	35.5047	1.1648	0	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S1	SISMA Y	LinRespSpec	Max	264.39	126.365	3.846	55.636	126.6745	55.9338	0	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S1	SISMA Z	LinRespSpec	Max	18.443	1.292	11.725	0.3599	11.0353	0.32	0	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S1	SLU 1	Combination	Max	222.86	8.038	440.932	70.9651	34.5405	8.9641	0	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S1	SLU 1	Combination	Min	-30.817	-13.388	100.929	-34.1917	-81.6109	-5.167	0	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S1	SLU 2	Combination	Max	158.138	11.235	355.434	56.1402	33.942	9.226	0	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S1	SLU 2	Combination	Min	-32.12	-4.834	100.432	-22.7274	-53.1716	-1.3723	0	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S1	SLE 1	Combination	Max	136.243	-2.156	263.678	38.505	15.9488	2.3364	0	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S1	SLE 1	Combination	Min	-4.689	-14.059	74.787	-19.9154	-48.5798	-5.5142	0	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S1	SLE 2	Combination		12.074	-5.783	74.622	2.421	5.2447	-1.6806	0	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S1	SLE QP	Combination		16.222	-7.856	76.925	1.8756	3.6035	-2.5378	0	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S2	SISMA X	LinRespSpec	Max	37.582	1.717	7.407	0.4534	49.4977	0.6462	6.057	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S2	SISMA Y	LinRespSpec	Max	44.651	71.592	11.879	26.1397	89.7042	31.9521	6.057	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S2	SISMA Z	LinRespSpec	Max	6.68	1.117	1.714	0.3069	63.0844	0.7833	6.057	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S2	SLU 1	Combination	Max	-70.807	-8.151	168.007	17.0462	-383.9514	44.0963	6.057	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S2	SLU 1	Combination	Min	-208.716	-30.163	-131.216	-2.7066	-1238.569	-12.1146	6.057	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S2	SLU 2	Combination	Max	-71.8	-10.406	129.378	14.2571	-386.4	35.5974	6.057	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S2	SLU 2	Combination	Min	-175.232	-26.915	-95.039	-0.5576	-1027.3633	-6.5607	6.057	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S2	SLE 1	Combination	Max	-53.914	-3.584	95.076	9.0382	-279.5591	24.3739	6.057	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S2	SLE 1	Combination	Min	-130.53	-15.813	-71.159	-1.9356	-754.3467	-6.8543	6.057	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S2	SLE 2	Combination		-57.289	-4.43	8.479	1.2978	-280.3753	3.4746	6.057	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S2	SLE QP	Combination		-59.185	-3.855	8.425	1.0686	-288.1799	3.2044	6.057	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S3	SISMA X	LinRespSpec	Max	44.419	2.444	8.143	0.3547	47.1274	0.9439	4.228	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S3	SISMA Y	LinRespSpec	Max	88.483	87.884	10.015	9.1549	110.9302	47.7808	4.228	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S3	SISMA Z	LinRespSpec	Max	6.025	2.156	4.117	0.2622	60.6883	0.2984	4.228	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S3	SLU 1	Combination	Max	-65.257	34.491	40.785	17.8819	-361.5431	29.5908	4.228	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S3	SLU 1	Combination	Min	-198.749	10.039	-205.802	-30.1674	-1155.8646	-22.3953	4.228	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S3	SLU 2	Combination	Max	-64.478	25.569	27.913	13.5705	-365.0754	24.035	4.228	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S3	SLU 2	Combination	Min	-164.598	7.23	-157.028	-22.4665	-960.8165	-14.9546	4.228	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S3	SLE 1	Combination	Max	-50.793	24.329	19.671	9.1661	-261.9019	14.465	4.228	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S3	SLE 1	Combination	Min	-124.955	10.744	-117.322	-17.5279	-703.1916	-14.4161	4.228	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S3	SLE 2	Combination		-52.548	10.086	-10.128	-1.314	-263.0793	-1.3058	4.228	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S3	SLE QP	Combination		-54.718	11.419	-11.002	-1.4545	-269.9332	-1.9864	4.228	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S4	SISMA X	LinRespSpec	Max	61.297	2.613	9.78	0.6585	38.1664	0.7371	1.403	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S4	SISMA Y	LinRespSpec	Max	204.893	106.48	7.711	35.0752	131.9371	40.1405	1.403	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S4	SISMA Z	LinRespSpec	Max	13.565	3.069	10.397	0.8194	30.2601	0.2147	1.403	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S4	SLU 1	Combination	Max	8.71	30.228	-62.609	31.7077	-160.5024	18.5463	1.403	4.53	0.372

TABLE: Section Cut Forces - Analysis

SectionCut	OutputCase	CaseType	StepType	F1	F2	F3	M1	M2	M3	GlobalX	GlobalY	GlobalZ
Text	Text	Text	Text	KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m	m	m	m
SCUT CAMP4 S4	SLU 1	Combination	Min	-199.086	7.492	-324.776	-70.1185	-531.3769	-9.331	1.403	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S4	SLU 2	Combination	Max	9.337	21.396	-62.021	21.1345	-165.0102	15.5959	1.403	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S4	SLU 2	Combination	Min	-146.51	4.344	-258.646	-55.2352	-443.166	-5.312	1.403	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S4	SLE 1	Combination	Max	-7.882	24.251	-46.599	17.51	-113.0385	8.6835	1.403	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S4	SLE 1	Combination	Min	-123.324	11.619	-192.247	-39.0601	-319.0799	-6.8038	1.403	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S4	SLE 2	Combination		-21.81	13.281	-46.403	-4.1036	-114.5411	-0.8048	1.403	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S4	SLE QP	Combination		-25.418	15.157	-48.346	-3.8093	-116.4546	-1.3446	1.403	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S5	SISMA X	LinRespSpec	Max	4.845	1.585	11.366	0.3544	2.2493	0.6932	11.1	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S5	SISMA Y	LinRespSpec	Max	2.553	6.628	13.485	41.1137	2.8614	1.5099	11.1	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S5	SISMA Z	LinRespSpec	Max	0.865	2.033	11.745	0.3508	2.4526	0.8772	11.1	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S5	SLU 1	Combination	Max	-2.809	-8.608	384.941	64.6178	-16.1195	11.8775	11.1	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S5	SLU 1	Combination	Min	-20.151	-28.08	97.537	-36.4168	-67.7768	2.9534	11.1	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S5	SLU 2	Combination	Max	-2.937	-9.344	313.258	50.6576	-16.206	9.9589	11.1	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S5	SLU 2	Combination	Min	-15.944	-23.948	97.705	-25.1183	-54.949	3.2658	11.1	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S5	SLE 1	Combination	Max	-2.625	-6.872	231.244	35.1832	-11.7517	7.6726	11.1	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S5	SLE 1	Combination	Min	-12.26	-17.69	71.576	-20.9471	-40.4502	2.7148	11.1	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S5	SLE 2	Combination		-3.397	-8.522	71.632	1.7639	-11.7805	3.74	11.1	4.53	0.372
SCUT CAMP4 S5	SLE QP	Combination		-3.597	-8.779	73.552	1.3057	-12.1265	3.9152	11.1	4.53	0.372

Quindi per quanto riguarda la trave interna (la più sollecitata ovvero sottostante alla corsia di schema di carico 1) la combinazione più gravosa è SLU1 con massima amplificazione di carico mobile e vento. Il valore massimo di momento si ha per SCUT S2 ovvero mezzeria della trave, mentre il valore di taglio massimo per SCUT S1/S5 ovvero estremità (appoggio). Le SCUT S3, S4 sono sezioni intermedie atte a valutare in quale preciso punto il taglio e il momento scendono sotto il limite di resistenza della sezione. Pertanto il momento scende sotto SCUT S3 ovvero a circa 1.20 m dalla mezzeria e il taglio sotto SCUT S4 ovvero a circa 2.60 m dall'appoggio. Analoga procedura si svolge per la trave esterna.

TABLE: Section Cut Forces - Analysis

SectionCut	OutputCase	CaseType	StepType	F1	F2	F3	M1	M2	M3	GlobalX	GlobalY	GlobalZ
Text	Text	Text	Text	KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m	m	m	m
SCUT CAMP4 S1 EST	SISMA X	LinRespSpec	Max	43.113	6.323	11.4	3.1381	35.6589	7.5506	0	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S1 EST	SISMA Y	LinRespSpec	Max	356.818	14.422	73.385	40.3791	310.529	82.4473	0	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S1 EST	SISMA Z	LinRespSpec	Max	16.815	6.699	11.829	3.7238	13.2446	2.6712	0	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S1 EST	SLU 1	Combination	Max	-43.824	-37.787	229.06	93.7269	168.6709	43.7969	0	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S1 EST	SLU 1	Combination	Min	-199.248	-98.067	104.511	7.04	32.1454	5.2941	0	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S1 EST	SLU 2	Combination	Max	-54.758	-35.99	195.887	80.1946	144.4902	37.5745	0	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S1 EST	SLU 2	Combination	Min	-171.326	-81.2	102.475	15.1794	42.0961	8.6974	0	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S1 EST	SLE 1	Combination	Max	-20.077	-29.774	148.378	54.4249	88.4317	22.4149	0	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S1 EST	SLE 1	Combination	Min	-106.423	-63.263	79.184	6.2655	12.5842	1.0244	0	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S1 EST	SLE 2	Combination		-23.722	-29.175	78.505	19.3883	15.9011	3.0955	0	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S1 EST	SLE QP	Combination		-21.032	-30.637	81.184	18.9628	13.2764	2.264	0	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S2 EST	SISMA X	LinRespSpec	Max	30.163	3.768	8.23	2.2299	36.9497	14.1371	6.057	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S2 EST	SISMA Y	LinRespSpec	Max	141.357	30.018	33.292	18.9686	124.024	37.632	6.057	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S2 EST	SISMA Z	LinRespSpec	Max	24.727	1.318	2.266	0.753	47.2175	17.7723	6.057	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S2 EST	SLU 1	Combination	Max	272.732	3.486	69.201	17.1282	-289.0881	-109.9551	6.057	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S2 EST	SLU 1	Combination	Min	115.609	-29.596	-24.005	-0.285	-837.9458	-325.5381	6.057	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S2 EST	SLU 2	Combination	Max	237.389	0.918	56.366	14.6137	-293.5578	-111.2668	6.057	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S2 EST	SLU 2	Combination	Min	119.547	-23.893	-13.539	1.5538	-705.2011	-272.954	6.057	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S2 EST	SLE 1	Combination	Max	167.972	1.548	39.608	9.2061	-207.6416	-79.4023	6.057	5.9	0.296

TABLE: Section Cut Forces - Analysis												
SectionCut	OutputCase	CaseType	StepType	F1	F2	F3	M1	M2	M3	GlobalX	GlobalY	GlobalZ
Text	Text	Text	Text	KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m	m	m	m
SCUT CAMP4 S2 EST	SLE 1	Combination	Min	80.681	-16.83	-12.173	-0.4679	-512.5626	-199.1706	6.057	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S2 EST	SLE 2	Combination		81.994	-3.301	8.935	1.9824	-209.1315	-79.8395	6.057	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S2 EST	SLE QP	Combination		83.031	-3.269	8.705	1.7545	-213.8439	-81.7858	6.057	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S3 EST	SISMA X	LinRespSpec	Max	39.723	4.812	9.695	2.6848	36.2322	13.8228	4.228	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S3 EST	SISMA Y	LinRespSpec	Max	226.766	32.36	35.081	8.3659	154.2903	44.4339	4.228	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S3 EST	SISMA Z	LinRespSpec	Max	25.974	2.691	5.324	1.4977	46.8144	17.964	4.228	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S3 EST	SLU 1	Combination	Max	261.299	71.958	1.854	-0.7118	-281.0515	-109.1864	4.228	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S3 EST	SLU 1	Combination	Min	111	13.126	-89.688	-24.8956	-830.2538	-329.2272	4.228	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S3 EST	SLU 2	Combination	Max	230.715	56.765	-3.616	-3.5587	-286.3125	-110.6246	4.228	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S3 EST	SLU 2	Combination	Min	117.991	12.641	-72.272	-21.6965	-698.2142	-275.6552	4.228	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S3 EST	SLE 1	Combination	Max	157.418	44.306	-4.312	-1.8956	-200.8483	-78.6937	4.228	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S3 EST	SLE 1	Combination	Min	73.919	11.622	-55.168	-15.3311	-505.9606	-200.9386	4.228	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S3 EST	SLE 2	Combination		76.25	12.957	-18.305	-7.4987	-202.6019	-79.1731	4.228	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S3 EST	SLE QP	Combination		76.085	13.824	-19.314	-7.498	-206.8928	-81.0716	4.228	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S4 EST	SISMA X	LinRespSpec	Max	45.025	5.622	11.112	3.0227	33.5237	11.6347	1.403	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S4 EST	SISMA Y	LinRespSpec	Max	340.735	21.32	55.037	25.4762	227.0313	69.6889	1.403	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S4 EST	SISMA Z	LinRespSpec	Max	19.496	6.985	11.288	3.6862	27.6596	10.3105	1.403	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S4 EST	SLU 1	Combination	Max	209.448	104.581	-73.44	-4.9669	-154.4535	-57.3074	1.403	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S4 EST	SLU 1	Combination	Min	58.765	44.582	-200.992	-89.5291	-450.9934	-169.5207	1.403	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S4 EST	SLU 2	Combination	Max	181.721	89.758	-71.907	-11.803	-162.2493	-59.3977	1.403	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S4 EST	SLU 2	Combination	Min	68.708	44.758	-167.571	-75.2247	-384.6542	-143.5576	1.403	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S4 EST	SLE 1	Combination	Max	115.883	65.942	-55.681	-6.275	-104.9571	-39.8251	1.403	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S4 EST	SLE 1	Combination	Min	32.17	32.608	-126.543	-53.254	-269.7014	-102.1657	1.403	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S4 EST	SLE 2	Combination		35.484	32.667	-55.169	-19.0612	-107.5557	-40.5218	1.403	5.9	0.296
SCUT CAMP4 S4 EST	SLE QP	Combination		33.431	33.497	-57.397	-19.0817	-108.1603	-41.0499	1.403	5.9	0.296

Per la trave esterna le sollecitazioni di momento e taglio risultano, anche per le sections cut più critiche, inferiori ai limiti di resistenza della sezione trave+soletta e pertanto non sarà necessario nessun rinforzo. Si provvederà però al ripristino dei ferri e copriferri deteriorati.

5.6 Verifica della sezione trave+soletta con FRP

Per contenere il momento sollecitante massimo in mezzzeria si prevede l'utilizzo di 3 nastri sovrapposti di rinforzo CFRP tipo Betontex GV330U-HT con le seguenti caratteristiche meccaniche:

Caratteristiche fisico-meccaniche del sistema di rinforzo						
Proprietà	1 strato	2 strati	3 strati	4 strati	5 strati	Metodo di prova
Modulo elastico del laminato riferito all'area netta di fibre, E_f , GPa (val. medio) ^(Nota 1)	271	273	270	269	271	UNI EN 2561
Resistenza a trazione del laminato riferito all'area di fibre, f_{fib} , MPa (val. caratteristico) ^(Nota 1)	3156	3225	3148	3097	3503	UNI EN 2561
Deformazione a rottura del laminato, ϵ_{fib} , (val. medio) ^(Nota 1)	1.42 %	1.46 %	1.45 %	1.50 %	1.56 %	UNI EN 2561
Frazione in peso delle fibre nel composito	25 %	30 %	32 %	34 %	37 %	interno
Frazione in volume delle fibre nel composito	17 %	22 %	23 %	24 %	27 %	interno
Temperature limite di utilizzo	-15 °C / +58 °C					interno
Temperature limite di utilizzo con primer Betontex FB-RC01 ^(Nota 2)	-15 °C / +54 °C					interno
Temperature limite di applicazione	+5 °C / +30 °C					interno
Resistenza al fuoco	n.p.d.					EN 13501-2
Reazione al fuoco	n.p.d.					EN 13501-1

Caratteristiche della fase tessuto		
Proprietà	Valore	Metodo di prova
Prodotto	Betontex FB-GV330U-HT	
Tipo di tessuto	unidirezionale in fibra di carbonio HT	
Densità delle fibre, ρ_{fib}	1.78 g/cm ³	ASTM D792, ISO 1183-1
Massa della fibra per unità di area, p_x	300 g/m ²	ISO 3374
Area equivalente di fibra, per ciascuno strato di tessuto, A_{re}	169 mm ² /m	UNI EN 2561
Spessore equivalente di fibra, per ciascuno strato di tessuto, t_{eq}	0.169 mm	UNI EN 2561
Resistenza a trazione della fibra	5100 MPa	ISO 10618
Modulo elastico della fibra	245 GPa	ISO 10618
Allungamento a rottura della fibra	2.1 %	ISO 10618

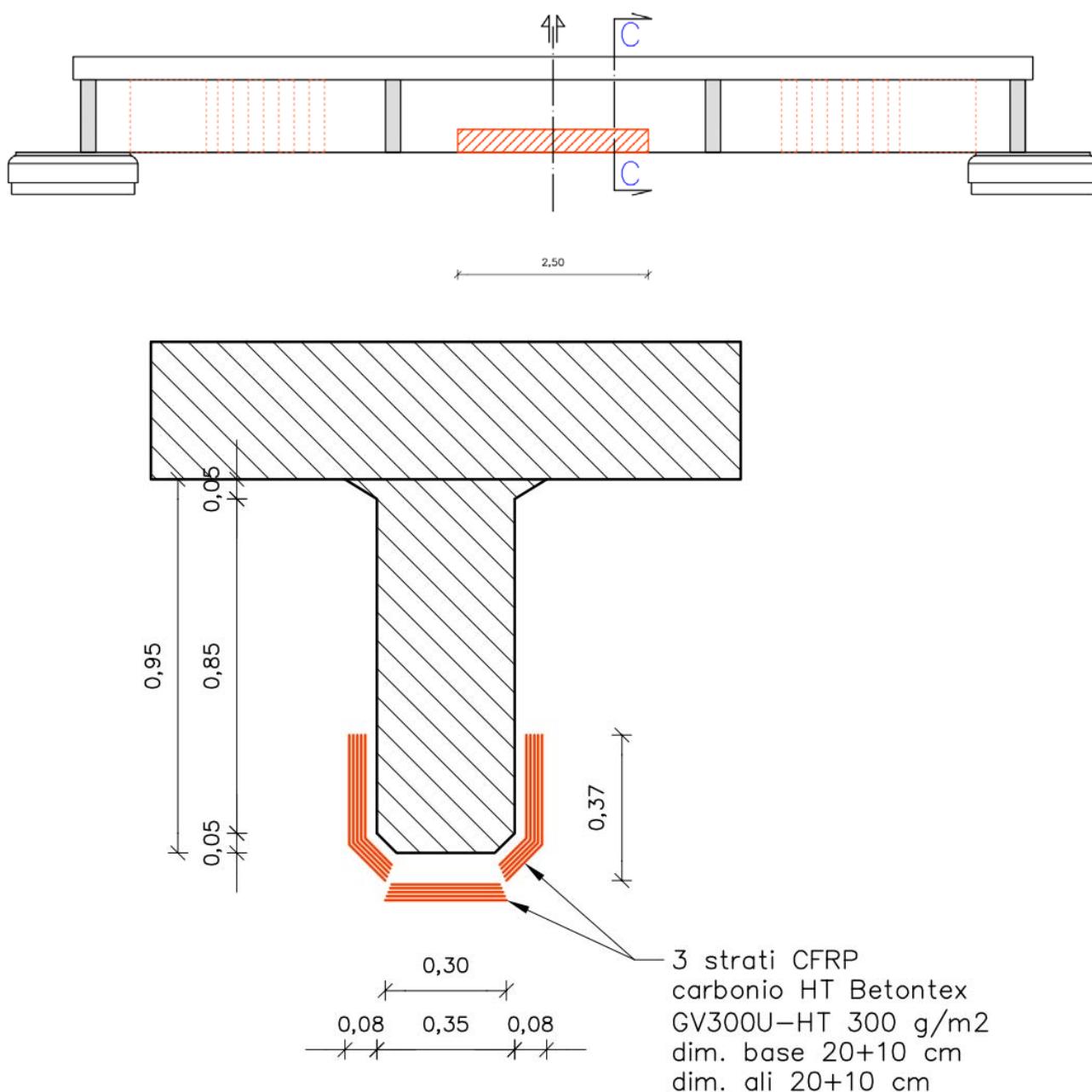
Caratteristiche della fase resina			
Proprietà	Valore		Metodo di prova
Prodotto	Betontex FB-RC01 ^(Nota 2)	Betontex FB-RC02	-
Funzione	primer	resina impregnante	-
Tipo di resina	epossidica	epossidica	-
Rapporto di catalisi (A : B)	2:1	2:1	-
Densità della resina, ρ_m	1.05 g/cm ³	1.10 g/cm ³	ASTM D792, ISO 1183-1
Temperatura di transizione vetrosa ^(Nota 3) , T_g	69 °C	73 °C	ISO 11357-2:1999 (DSC)

Nota 2: dove previsto.

Nota 3: valutata sul composito.

Si verificherà la sezione rinforzata secondo formule riportate in (formule di CNR DT 200 R1-2013).

Il rinforzo sarà applicato in mezzzeria alle tre travi centrali per un tratto lungo 2.50 m utilizzando nastri di lunghezza 20+10 cm affiancati atti a formare una fasciatura continua di larghezza 30 cm (sia all'intradosso che ai fianchi per 37 cm di altezza). Il singolo nastro sarà applicato utilizzando apposita resina epossidica tipo Betontex FB-RC02.



L'intervento consisterà quindi nella preparazione della superficie da rinforzare mediante sua regolarizzazione e pulizia. Applicazione di un fondo tipo FB-RC01 e quindi prima stesura di resina FB-RC02, applicazione del nastro e ripetizione delle fasi per gli strati successivi fino al raggiungimento dello spessore richiesto.

Dall'analisi sulla sezione non rinforzata esposta a pag. 29 si calcolano:

deformazione limite del laminato per rottura a compressione del cls (zona 2):

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} \cdot (h - x) - \varepsilon_0 = \frac{0.0035}{39.33} \cdot (130 - 39.33) - 0 = 0.0081 = 0.81\% < 1.45\%$$

Deformazione limite del laminato per delaminazione (zona 1)

$$\varepsilon_f = \min\left(\eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fu}}{\gamma_f}, k_{cr} \cdot \frac{f_{fdd}}{E_f}\right) = \min\left(0.85 \cdot \frac{0.0145}{1.25}, 3 \cdot \frac{245}{270000}\right) = 0.0034$$

Dove:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{fd}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot 0.03 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}}}{t_f}} = \frac{1}{1.5} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 270000 \cdot 0.03 \cdot 1 \cdot \sqrt{16 \cdot 2.85}}{0.169 \cdot 3}} = 310 \text{ MPa}$$

Ponendosi in ipotesi di rottura zona 1:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f \cdot \frac{x}{h - x} = 0.0034 \cdot \frac{x}{1300 - x} (< 0.35\%)$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_f \cdot \frac{x - d_2}{h - x} = 0.0034 \cdot \frac{x - 1.5}{1300 - x}$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_f \cdot \frac{d - x}{h - x} = 0.0034 \cdot \frac{122 - x}{1300 - x}$$

$$\begin{aligned} 0 &= b \cdot x \cdot f_{cd} - A_f \cdot \varepsilon_f \cdot E_f - A_{s1} \cdot f_{yd} + A_{s2} \cdot \varepsilon_{s2} \cdot E_{s2} \\ &= 350 \cdot x \cdot 9.067 - 1845 \cdot 0.0034 \cdot 270000 - 4825 \cdot 243 + 2413 \\ &\quad \cdot 0.0034 \cdot \frac{x - 1.5}{1300 - x} \cdot 200000 \\ &= 3173 \cdot x \cdot (1300 - x) - 1693710 \cdot (1300 - x) - 1172475 \\ &\quad \cdot (1300 - x) + 1640840 \cdot (x - 1.5) \rightarrow x = 538.56 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{Rd} &= \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (d - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \varepsilon_{s2} \cdot E_{s2} \cdot (d - d_2) + A_f \cdot \varepsilon_f \cdot E_f \cdot d_1] \\
&= 0.8 \cdot 350 \cdot 538.56 \cdot 9.067 \cdot (1220 - 0.4 \cdot 538.56) + 2413 \cdot 0.0027 \\
&\quad \cdot \frac{301.10 - 1.5}{1300 - 301.10} \cdot 200000 \cdot (1220 - 355) + 1845 \cdot 0.0034 \cdot 270000 \\
&\quad \cdot 35 = 1373531234 + 330238411 + 47075175 = 1751 \text{ kNm}
\end{aligned}$$

Ne consegue che $M_{Rd} > M_{Sd}$ VERIFICA SODDISFATTA tenendo conto anche della possibile delaminazione del rinforzo.

I valori sono ricavati da CNR DT-200 utilizzando i seguenti parametri:

Tabella 3-1 – Coefficienti parziali γ_{Rd} .

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Tabella 3-2– Fattore di conversione ambientale η_a per varie condizioni di esposizione e vari sistemi di FRP.

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Un'ulteriore analisi più precisa può essere svolta considerando che 3 strati sovrapposti di GV330U-HT larghi 30 cm equivalgono a 6.15 cm^2 di acciaio pertanto A_{frp} equivalente $= 3 \cdot 300 \cdot 0.169 \cdot 756.37 / 187 = 615 \text{ mm}^2$. Si valuta il momento resistente della sezione rinforzata con lo stesso programma di verifica (VcaSLU di prof. Gelfi) e questa volta è pari a 1554 kNm valore incrementato del 30% rispetto alla sezione non rinforzata e superiore al momento sollecitante massimo pari a 1239 kNm e quindi **verifica soddisfatta lato flessionale**.

Verifica C.A. S.L.U. - File: L 0.5 flessione TRAVE int con soletta FRP

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo: trave centrale L/2 - A16 CON FRP

N° figure elementari Zoom N° strati barre Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	35	130

N°	As [cm²]	d [cm]
1	24.13	35.5
2	16.08	119
3	32.17	122
4	6.15	125
5	6.15	110
6	6.15	110

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

Materiali

4EMME C16/20

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_{xRd} 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.

Metodo di calcolo

☒ S.L.U.+ ☐ S.L.U.-
☒ Metodo n

Tipo flessione

☒ Retta ☐ Deviata

N° rett.

Calcola MRd Dominio M-N

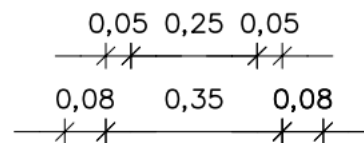
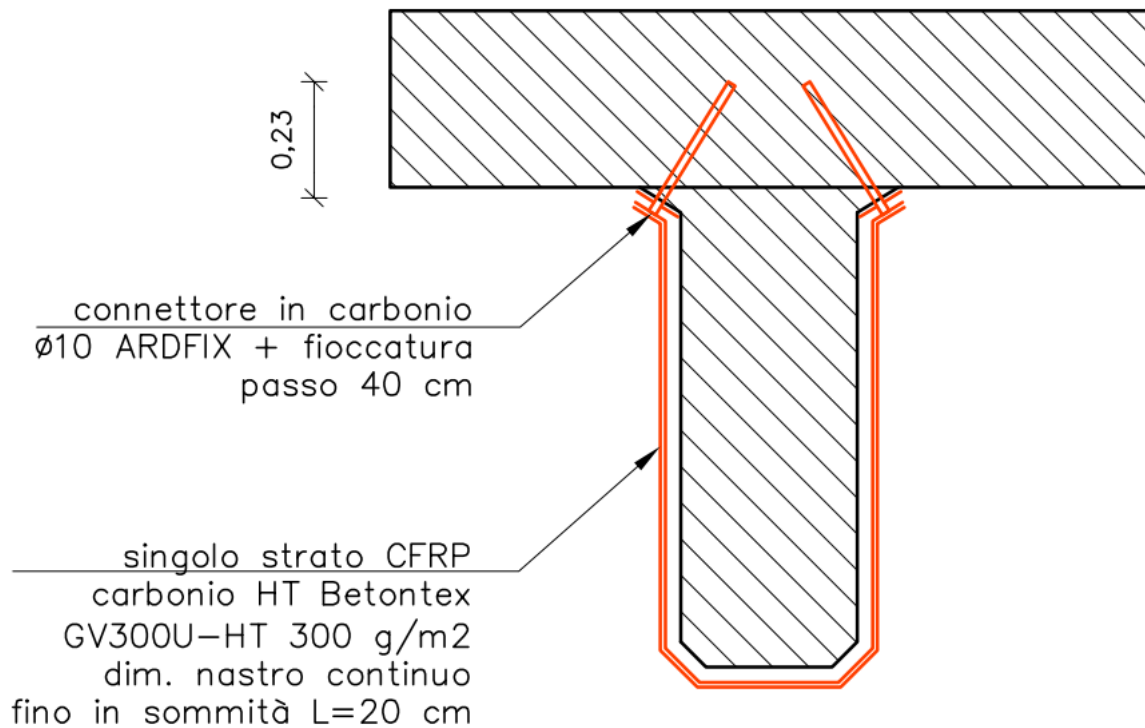
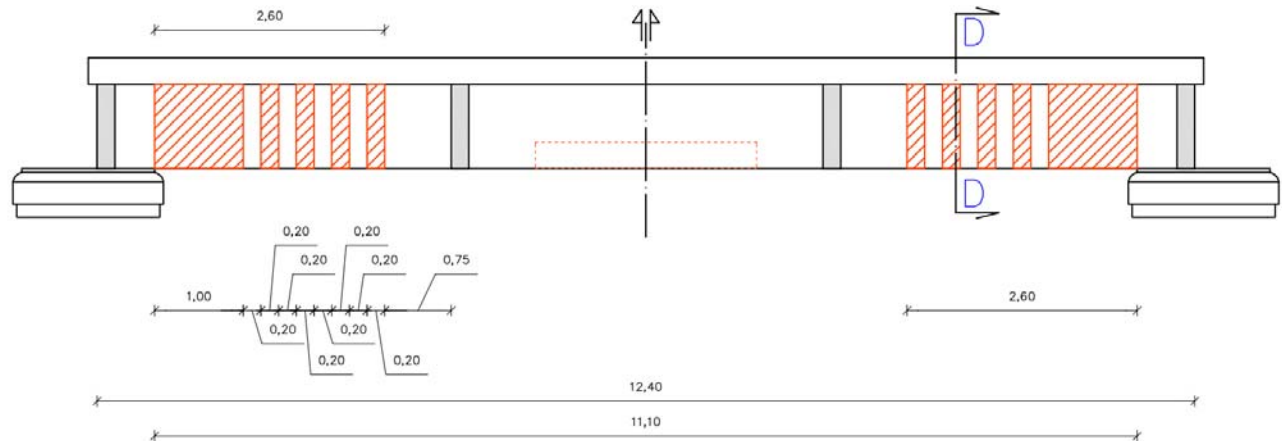
L₀ cm Col. modello

☐ Precompresso

$M_{rd}=1554 \text{ kNm} < M_{sd}=1238 \text{ kNm}$ VERIFICA SODDISFATTA.

Per quanto riguarda la verifica a taglio si predisporrà fasciatura continua in nastri di larghezza 20 cm sul primo metro dall'appoggio e successivi nastri a passo 40 cm fino a raggiungere una distanza di circa 2.60 m dall'appoggio.

In questo caso si applicherà un singolo strato di carbonio di tipologia analoga al precedente utilizzato per la flessione ma in abbinamento con barra in carbonio di diametro $\Phi 10$ e fiocchi di completamento. Ogni strato di 20 cm di larghezza sarà applicato previa disposizione di barra (per lato), applicazione di resina+fiocco in CFRP e successiva nuova stesura di resina epossidica.



BARRE IN FIBRA DI VETRO O DI CARBONIO FB-G E FBBAR

Barre in materiale composito ad adherenza migliorata, realizzate in fibra di vetro o in fibra di carbonio ad alta tenacità, prodotte per pultrusione.

Caratteristiche	Barre in GFRP	Barre in CFRP
Diametro (mm)	6-8-10-12-16-20-24	6 - 8 - 10
Tensione di rottura della barra (MPa)	800	1700
Modulo elastico a trazione della barra (GPa)	35	130



$$V_{Rd} = \min(V_{Rdct} + V_{Rds} + V_{Rdf}, V_{Rdmax})$$

Dove:

V_{Rdct} è il contributo a taglio del cls;

V_{Rds} è il contributo dell'armatura trasversale;

V_{Rdf} è il contributo del rinforzo in FRP;

V_{Rdmax} resistenza a taglio della biella compressa di cls.

Ne consegue che:

$$V_{Rdct} = 0.6 \cdot b \cdot d \cdot f_{ctd} \cdot \delta = 0.6 \cdot 350 \cdot 1220 \cdot 1.25 \cdot 1 = 319 \text{ kN}$$

$$V_{Rds} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{ywd} = \frac{157}{350} \cdot 0.9 \cdot 1220 \cdot 320 = 157 \text{ kN}$$

$$V_{Rdf} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t \cdot \frac{\cot \theta + \cot \beta}{\sin \theta + \beta} \cdot \frac{w_f}{p_f}$$

$$= \frac{1}{1.2} \cdot 0.9 \cdot 1220 \cdot 310 \cdot 2 \cdot 0.169 \cdot 1 \cdot 1 = 96 \text{ kN}$$

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{3 \cdot \min(0.9 \cdot d, h_w)} \right] = 310 \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{110 \cdot 1}{3 \cdot 315} \right] = 310 \text{ MPa}$$

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{f_{ctm} \cdot c_2}} = \sqrt{\frac{270000 \cdot 0.169}{1.9 \cdot 2}} = 110 \text{ mm}$$

$$V_{Rdmax} = 0.3 \cdot b \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{cd} = 0.3 \cdot 350 \cdot 0.9 \cdot 1220 \cdot 9.067 = 1045 \text{ kN}$$

Da cui si ottiene la resistenza a taglio pari a:

$$V_{Rd} = \min(572 \text{ kN}, 1045 \text{ kN})$$

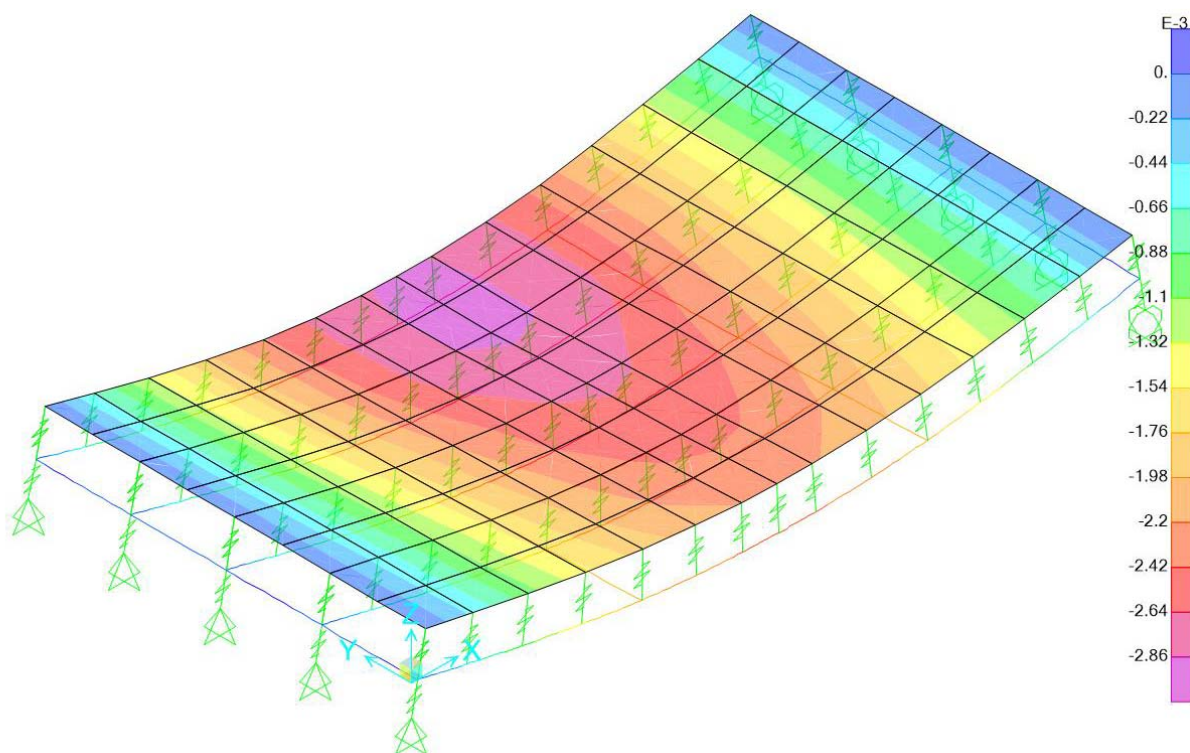
$$V_{Rd}=572 \text{ kN} < V_{Sd}=441 \text{ kN} \quad \text{VERIFICA SODDISFATTA}$$

Pertanto anche la verifica a taglio utilizzando un singolo strato di nastro CFRP come precedentemente descritto consegue una **verifica soddisfatta lato taglio**.

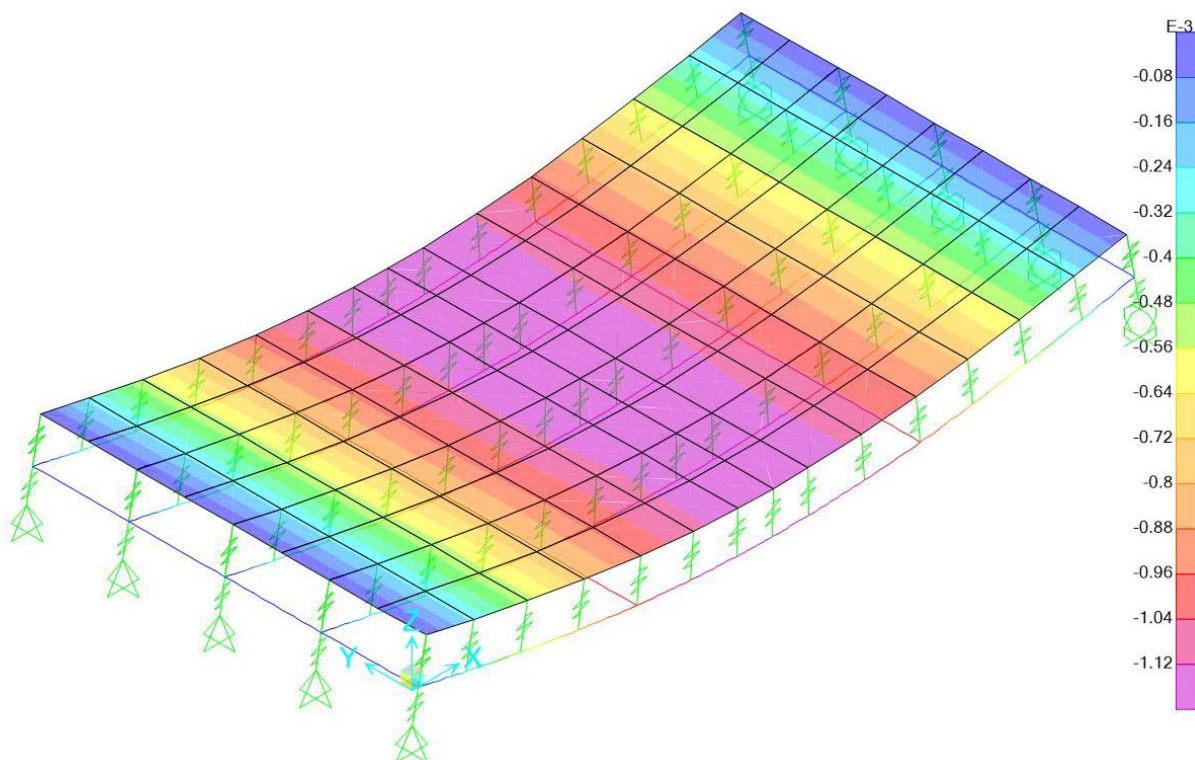
5.7 Valutazioni delle deformate

Si riportano i cedimenti massimi analizzati in condizione di stato limite di esercizio (SLE), tali condizioni non si presenteranno durante la prova di carico e si ritiene che il rinforzo mediante fibra di carbonio non comporterà reali modifiche a quanto già analizzato e valutato sperimentalmente durante la prova di carico di 4Emme.

Combinazione SLE 1 (uz=2.86 mm):



Combinazione SLE 2 (uz=1.12 mm):



In condizioni di esercizio le tensioni del fibrorinforzato devono rispettare la limitazione di $\sigma_f < \eta \cdot f_{fk}$

Tabella 3-3 – Fattore di conversione per effetti di lunga durata η_l per vari sistemi di FRP (carichi di esercizio).

Modalità di carico	Tipo di fibra / resina	η_l
Carico di lungo termine	Vetro / Epossidica	0.30
	Arammidica / Epossidica	0.50
	Carbonio / Epossidica	0.80
Ciclico	Tutte	0.50

$$\eta \cdot f_{fk} = 0.8 \cdot 3148 = 2518 \text{ MPa}$$

Si procede quindi a valutare le tensioni nella fibra in condizione di esercizio (combinazione rara) come da formule di CNR DT-200:

$$\sigma_f = n_f \cdot \frac{M_{Sd}}{J_x / (d - x_1)}$$

Dal modello si ricava $M_{Sd(rara)} = 754 \text{ kNm}$ (vedi pag. 30 SCUT S2 SLE1), mentre per quanto riguarda x_1 si estrapola da calcolo precedentemente eseguito con VcaSLU (vedi pag. 37):

$$\sigma_f = 3 \cdot \frac{754000000}{\frac{256000000000}{(1220 - 470.6)}} = 6.62 \text{ MPa}$$

Valore inferiore a 2518 MPa e quindi verifica soddisfatta.

5.8 Output log Sap2000

SAP2000 v19.2.1 Plus 64-bit (Analysis Build 9582/64)

File: D:\Documenti\\$\$_Lavori\...na\stato di fatto ponte via ravegnana REV01.LOG

B E G I N A N A L Y S I S

2017/11/30 18:46:13

RUNNING ANALYSIS WITHIN THE GUI PROCESS

USING THE ADVANCED SOLVER (PROVIDES LIMITED INSTABILITY INFORMATION)

NUMBER OF JOINTS	=	950
WITH RESTRAINTS	=	55
NUMBER OF FRAME/CABLE/TENDON ELEMENTS	=	482
NUMBER OF SHELL ELEMENTS	=	512
NUMBER OF LINK/SUPPORT ELEMENTS	=	395
NUMBER OF LOAD PATTERNS	=	4
NUMBER OF ACCELERATION LOADS	=	9
NUMBER OF LOAD CASES	=	9

ADDRESSABLE PHYSICAL MEMORY (RAM)	=	15.942 GB
-----------------------------------	---	-----------

PARALLELIZATION OF ANALYSIS OPERATIONS:

(Env. variable SAPFIRE_NUM_THREADS	=	0)
NUMBER OF THREADS: STATE (AUTOMATIC)	=	4
NUMBER OF THREADS: STIFFNESS (AUTOMATIC)	=	4
NUMBER OF THREADS: EVENT (AUTOMATIC)	=	4
NUMBER OF THREADS: MOVE (AUTOMATIC)	=	4
NUMBER OF THREADS: RESPONSE (AUTOMATIC)	=	4
NUMBER OF THREADS: SOLVE (AUTOMATIC)	=	4
NUMBER OF THREADS: FORM (AUTOMATIC)	=	4

E L E M E N T F O R M A T I O N

18:46:13

L I N E A R E Q U A T I O N S O L U T I O N

18:46:13

FORMING STIFFNESS AT ZERO (UNSTRESSED) INITIAL CONDITIONS

TOTAL NUMBER OF EQUILIBRIUM EQUATIONS	=	5597
NUMBER OF NON-ZERO STIFFNESS TERMS	=	120990

BASIC STABILITY CHECK FOR LINEAR LOAD CASES:

NUMBER OF NEGATIVE STIFFNESS EIGENVALUES SHOULD BE ZERO FOR STABILITY.

(NOTE: FURTHER CHECKS SHOULD BE CONSIDERED AS DEEMED NECESSARY,
SUCH AS REVIEWING EIGEN MODES FOR MECHANISMS AND RIGID-BODY MOTION)NUMBER OF NEGATIVE EIGENVALUES = 0, OK.

L I N E A R S T A T I C C A S E S

18:46:14

USING STIFFNESS AT ZERO (UNSTRESSED) INITIAL CONDITIONS

TOTAL NUMBER OF CASES TO SOLVE	=	4
NUMBER OF CASES TO SOLVE PER BLOCK	=	4

LINEAR STATIC CASES TO BE SOLVED:

CASE: DEAD

CASE: WIND

CASE: NOSTRUT

CASE: SNOW

I N F L U E N C E L O A D C A S E

18:46:14

CASE: <Influence>

USING STIFFNESS AT ZERO (UNSTRESSED) INITIAL CONDITIONS

NUMBER OF BRIDGE INFLUENCE LOADS	=	590
NUMBER OF LOADS TO SOLVE PER BLOCK	=	590
SIZE OF THE INFLUENCE RESULTS FILE	=	25.658 MB

V E H I C L E I N F L U E N C E A N A L Y S I S

18:46:16

CASE: <Vehicle 1 0 0>

USING INFLUENCE RESPONSE FROM CASE: <Influence>

VERTICAL DIRECTION FACTOR	=	1.000000
BRAKING/ACCELERATION DIRECTION FACTOR	=	.000000
CENTRIFUGAL DIRECTION FACTOR	=	.000000

NUMBER OF LOAD-DIRECTION PERMUTATIONS	=	1
---------------------------------------	---	---

NUMBER OF LANES	=	2
NUMBER OF VEHICLES	=	2
NUMBER OF VEHICLES ON LANES RUN BEFORE	=	0
NUMBER OF VEHICLES ON LANES TO BE RUN NOW	=	2

NUMBER OF INFLUENCE LOAD POINTS	=	590
CALCULATION METHOD (QUICK OR "EXACT")	=	"EXACT"
NUMBER OF THREADS: MOVE (AUTOMATIC)	=	4

ALLOW LOADS TO REDUCE RESPONSE SEVERITY	=	YES
---	---	-----

NOTE: CHOOSING "YES" IS LESS CONSERVATIVE

NUMBER OF DISPLACEMENT RESPONSE POINTS	=	950	YES	CORRESPONDENCE
NUMBER OF SPRING RESPONSE POINTS	=	950	YES	---
NUMBER OF REACTION RESPONSE POINTS	=	55	YES	---
NUMBER OF FRAME RESPONSE POINTS	=	2596	YES	---
NUMBER OF SHELL RESPONSE POINTS	=	2048	YES	---
NUMBER OF LINK RESPONSE POINTS	=	790	NO	---

TOTAL NUMBER OF RESPONSE POINTS	=	7389	SOME
---------------------------------	---	------	------

TIME FOR COMPUTING JOINT RESPONSE	=	1.11
TIME FOR COMPUTING SPRING RESPONSE	=	0.29
TIME FOR COMPUTING REACTION RESPONSE	=	4.79
TIME FOR COMPUTING FRAME RESPONSE	=	1.59
TIME FOR COMPUTING SHELL RESPONSE	=	6.88
TIME FOR COMPUTING LINK RESPONSE	=	0.45
TIME FOR CONTROLLING ANALYSIS	=	0.01

TOTAL TIME FOR THIS ANALYSIS	=	15.16

R I T Z M O D A L A N A L Y S I S

18:46:31

CASE: MODAL

USING STIFFNESS AT ZERO (UNSTRESSED) INITIAL CONDITIONS

NUMBER OF STIFFNESS DEGREES OF FREEDOM	=	5597
NUMBER OF MASS DEGREES OF FREEDOM	=	2685
MAXIMUM NUMBER OF RITZ MODES SOUGHT	=	60
MINIMUM NUMBER OF RITZ MODES SOUGHT	=	1
NUMBER OF STARTING VECTORS	=	3
VECTOR BLOCK SIZE	=	6
FREQUENCY SHIFT (CENTER) (CYC/TIME)	=	.000000
NUMBER OF RITZ MODES FOUND	=	60
NUMBER OF GENERATION CYCLES PERFORMED	=	20

R E S P O N S E - S P E C T R U M A N A L Y S I S

18:46:32

CASE: SISMA X

TYPE OF EXCITATION = STANDARD GROUND ACCELERATION

USING MODES FROM CASE: MODAL

NUMBER OF DYNAMIC MODES TO BE USED = 60

R E S P O N S E - S P E C T R U M A N A L Y S I S 18:46:32

CASE: SISMA Y

TYPE OF EXCITATION = STANDARD GROUND ACCELERATION

USING MODES FROM CASE: MODAL

NUMBER OF DYNAMIC MODES TO BE USED = 60

R E S P O N S E - S P E C T R U M A N A L Y S I S 18:46:32

CASE: SISMA Z

TYPE OF EXCITATION = STANDARD GROUND ACCELERATION

USING MODES FROM CASE: MODAL

NUMBER OF DYNAMIC MODES TO BE USED = 60

M O V I N G L O A D A N A L Y S I S 18:46:32

CASE: SCHEMA CARICO 1

USING VEHICLE RESPONSE FROM CASE: <Vehicle 1 0 0>

VERTICAL DIRECTION FACTOR = 1.000000

BRAKING/ACCELERATION DIRECTION FACTOR = .000000

CENTRIFUGAL DIRECTION FACTOR = .000000

A N A L Y S I S C O M P L E T E 2017/11/30 18:46:33

6 CONCLUSIONI

Gli interventi di ripristino dei copriferri e ferri ammalorati sarà eseguita su tutte le travi principali di dimensioni 0.35x0.95 m. Per quanto riguarda il rinforzo con fibra di carbonio sarà necessaria l'applicazione sulle tre travi interne per tutte e quattro le campate. Si eseguiranno rinforzi a taglio e flessione come da elaborato grafico allegato. Per rinforzo a flessione si adotterà fibra tipo Betontex 300 g/m² (E=245 GPa) in nastri da 20+10 cm in triplo strato per la porzione di mezzera di lunghezza 2.50 m. Per rinforzo a taglio si utilizzerà stessa tipologia di fibra disposta in singolo strato continua per 1 metro dagli appoggio e a passo 20 cm oltre fino a 2.60 m dall'appoggio. A completamento del rinforzo a taglio si utilizzeranno preliminarmente connettori in carbonio diametro $\Phi 10$ (E=130 GPa) e fiocchi.

In conclusione le verifiche hanno esito positivo e il ponte in oggetto può essere riconsiderato in categoria 1.

Longiano, lì 30/11/2017