

# PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



## PROGETTO DEFINITIVO

### EUROLINK S.C.p.A.

IMPREGILO S.p.A. (MANDATARIA)  
 SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA S.p.A. (MANDANTE)  
 COOPERATIVA MURATORI E CEMENTISTI - C.M.C. DI RAVENNA SOC. COOP. A.R.L. (MANDANTE)  
 SACYR S.A.U. (MANDANTE)  
 ISHIKAWAJIMA - HARIMA HEAVY INDUSTRIES CO. LTD (MANDANTE)  
 A.C.I. S.C.P.A. - CONSORZIO STABILE (MANDANTE)

**IL PROGETTISTA**

Dott. Ing. E. Pagani  
 Ordine Ingegneri Milano  
 n° 15408



**IL CONTRAENTE GENERALE**

Project Manager  
 (Ing. P.P. Marcheselli)

**STRETTO DI MESSINA**  
 Direttore Generale e  
 RUP Validazione  
 (Ing. G. Fiammenghi)

**STRETTO DI MESSINA**  
 Amministratore Delegato  
 (Dott. P. Ciucci)

*Unità Funzionale* OPERA DI ATTRAVERSAMENTO

*Tipo di sistema* CANTIERI

*Raggruppamento di opere/attività* ITINERARI

*Opera - tratto d'opera - parte d'opera* NUOVI ITINERARI – NI.83

*Titolo del documento* P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA

**CZ0476\_F0**

CODICE

C G 0 0 0 0 P C L D P C Z C 2 N I 8 3 0 0 0 0 0 1 F 0

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
F0	20/06/2011	EMISSIONE FINALE	PUGLIESE	FARINA	PAGANI

NOME DEL FILE: CZ0476\_F0

revisione interna:00



**Ponte sullo Stretto di Messina**  
**PROGETTO DEFINITIVO**

P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI  
CALCOLO TIPOLOGICA

*Codice documento*  
CZ0476\_F0

<i>Rev</i>	<i>Data</i>
F0	20/06/2011

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## INDICE

1.	Introduzione .....	5
2.	Caratterizzazione geotecnica .....	7
2.1	Terreni di fondazione .....	7
2.2	Rilevati stradali .....	8
3.	Pericolosità sismica .....	9
4.	Codici di calcolo utilizzati .....	13
5.	Normativa di riferimento .....	13
6.	Prestazioni attese dalle strutture .....	13
7.	Unità di misura .....	15
8.	Caratteristiche dei materiali .....	15
8.1	Calcestruzzo travi in c.a.p. classe C45/55 .....	15
8.2	Calcestruzzo da prefabbricazione classe C35/45 .....	16
8.3	Calcestruzzo soletta classe C32/40 .....	16
8.4	Acciaio per armatura ordinaria B450C .....	17
8.5	Acciaio per armatura da compressione .....	18
8.6	Calcestruzzo gettato in opera C25/30 .....	18
8.7	Variazione nel tempo della resistenza del calcestruzzo .....	19
8.8	Variazione nel tempo dei moduli elastici del calcestruzzo .....	19
8.9	Variazione nel tempo della viscosità del calcestruzzo .....	19
8.10	Variazione nel tempo del ritiro del calcestruzzo .....	20
8.11	Perdite di carico per rilassamento dell'acciaio .....	21
9.	Fasi costruttive .....	21
10.	Calcolo impalcato .....	22
10.1	Generalità .....	22
10.2	Calendario della trave .....	24
10.3	Modello di calcolo impalcato .....	25
10.4	Analisi dei carichi .....	32
10.4.1	Riepilogo dei carichi applicati .....	32
10.4.2	Peso proprio degli elementi strutturali (G1) .....	32
10.4.3	Carichi permanenti portati (G2) .....	32
10.4.4	Azione del vento (Q5) .....	34
10.4.5	Carichi mobili .....	41
10.5	Verifica della trave .....	42

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>	<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

10.5.1	Ripartizione dei carichi sulla trave .....	44
10.5.2	Combinazioni di carico .....	46
10.5.3	Parametri principali di calcolo della trave in CAP .....	49
10.5.4	Sollecitazioni per combinazioni allo SLU.....	51
10.5.5	Verifiche allo SLU .....	53
10.5.6	Verifiche allo SLE .....	57
11.	Calcolo spalle .....	71
11.1	Analisi dei carichi.....	71
11.1.1	Peso proprio elementi strutturali.....	71
11.1.2	Azioni trasmesse dall'impalcato .....	72
11.1.2.1	Peso proprio .....	72
11.1.2.2	Peso permanente portato.....	73
11.1.2.3	Azione per effetto del sisma .....	74
11.1.2.4	Azione per effetto del carico mobile .....	75
11.1.3	Spinta statica del terrapieno .....	76
11.1.4	Sovrappinta sismica del terrapieno .....	77
11.1.5	Spinta sul terrapieno per effetto del carico mobile .....	78
11.2	Modello di calcolo .....	79
11.3	Calcolo delle sollecitazioni.....	79
11.3.1	Combinazione di carico 1 allo slu .....	80
11.3.2	Combinazione di carico 2 allo SLU .....	82
11.3.3	Combinazione di carico 3 allo SLU .....	84
11.3.4	Combinazione di carico 4 allo SLU .....	86
11.4	Verifica delle sezioni .....	88

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">F0</td> <td style="text-align: left;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

## 1. Introduzione

La presente relazione riguarda il progetto delle opere d'arte necessarie a garantire la continuità viaria della "pista di cantiere denominata PSN1 A" in corrispondenza delle infrastrutture esistenti e di quelle di futura realizzazione. Le opere progettate a tal fine sono quattro cavalcavia che possono essere così schematizzati:

Sovrappasso alla pk 0+291.80: da realizzare tra la sezione 15.PSN1 A e la 16.PSN1 A, consentirà l'attraversamento della variante SN0 E;

Sovrappasso alla pk 0+310.98: tra la sezione 16.PSN1 A e la 17.PSN1 A. La realizzazione del cavalcavia garantirà l'attraversamento del canale;

Sovrappasso alla pk 0+360.00: collocato in corrispondenza della sezione 19.PSN1 A, permetterà il superamento della strada provinciale;

Sovrappasso alla pk 0+480.00: quello in corrispondenza della sezione 25.PSN1 A permetterà di scavalcare la strada V-SN1D.

Questi cavalcavia, lato Sicilia, saranno destinati al transito sull'impalcato di un carrello porta bobine di peso pari a 160 Ton indicato nell'immagine seguente, e dunque sono stati dimensionati per resistere a carichi di eccezionale entità.

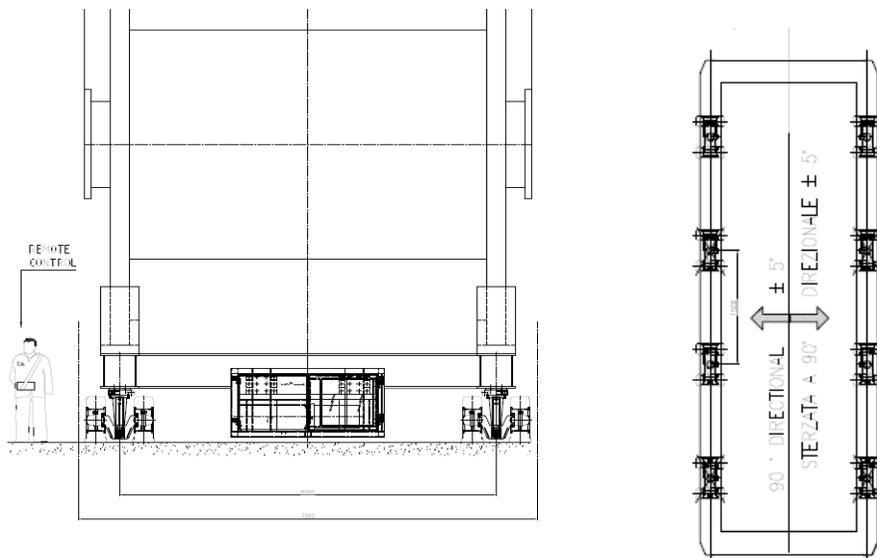


Figura 1.1 : Carrello porta bobine

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

La progettazione dei sovrappassi viene redatta a livello di progetto definitivo; sono stati dunque mantenuti ampi margini di verifica, che, se possibile, verranno ridotti in fase di progettazione esecutiva, in cui saranno effettuate delle analisi più dettagliate.

I calcoli sono stati condotti agli stati limite nel rispetto del D.M. 14.01.2008.

Come criterio generale di progettazione si è cercato di unificare le luci delle travi e le altezze delle spalle prefabbricate, in modo da poter effettuare un unico calcolo valido per tutti i sovrappassi.

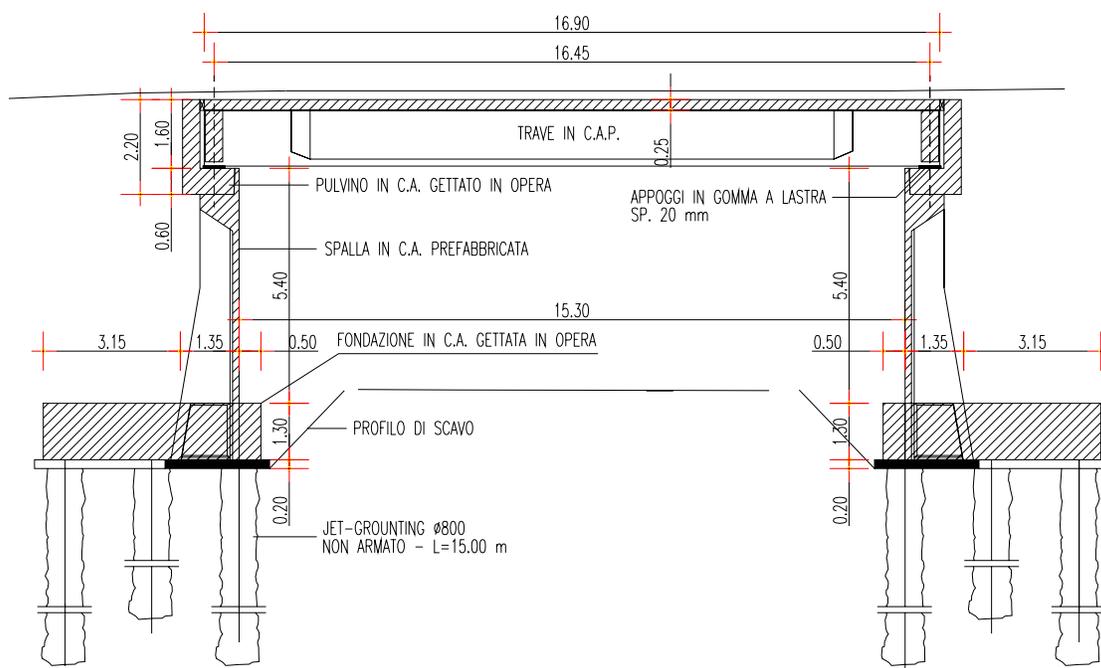


Figura 1.2 : Profilo tipico sovrappassi

Ciascun cavalcavia risulta composto da due spalle e da un impalcato realizzato con travi prefabbricate a cassone ad ali larghe in C.A.P, la cui lunghezza è pari a 16.90 m per i primi tre cavalcavia, e 16.00 m per l'ultimo. Il calcolo dell'impalcato viene comunque effettuato soltanto nel caso della trave a lunghezza maggiore.

Le spalle saranno realizzate con elementi prefabbricati a T da inglobare nella platea di fondazione e solidarizzate in sommità da un cordolo in cemento armato che assolve altresì alla funzione di appoggio per le travi dell'impalcato. La geometria delle spalle risulta uguale per tutti i cavalcavia al fine di ottimizzare la fase di calcolo e semplificare ed economizzare la realizzazione dell'opera.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Dal momento che la pista PSN1A è una via di transito temporanea, e verrà demolita alla fine dei lavori di realizzazione del Ponte, si è scelto di adottare elementi prefabbricati per la realizzazione delle spalle.

Questa scelta è giustificata dal fatto che tali elementi costituiscono una soluzione di rapida esecuzione e in seguito garantiranno anche una rapida demolizione dei sovrappassi, riducendo inoltre l'interferenza con la viabilità presente nella zona durante le suddette fasi di realizzazione e demolizione.

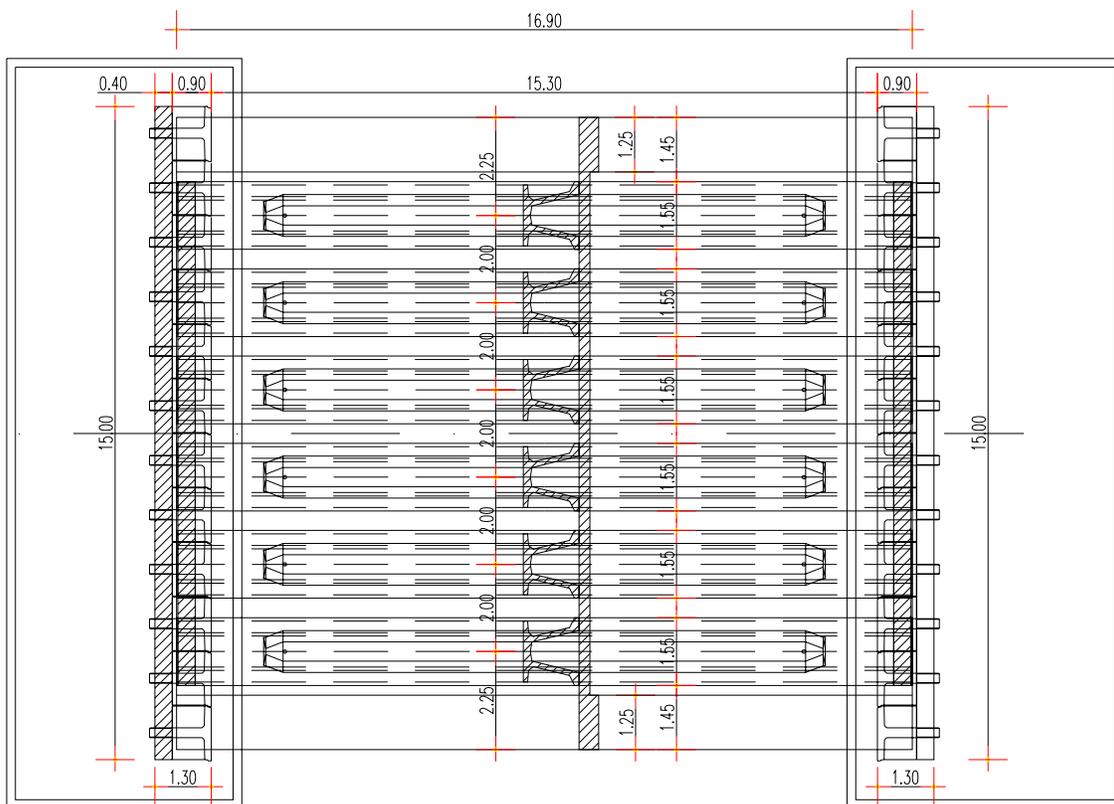


Figura 1.3 : Planimetria sovrappasso tipico

## 2. Caratterizzazione geotecnica

### 2.1 Terreni di fondazione

Il sito interessato dall'intervento di realizzazione dei sovrappassi in oggetto è caratterizzato prevalentemente da depositi alluvionali.

Le scarse caratteristiche dei terreni superficiali hanno reso necessario un consolidamento degli stessi mediante un trattamento con colonne di jet-grouting a interasse tipico di 4 m e lunghezza

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>	<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

tipica di 15 m al fine di garantire la stabilità della fondazione e ridurre i cedimenti della stessa. Per le verifiche geotecniche si rimanda all'apposita relazione.

Nella zona del canale alla progressiva 0+310,98, per poter consentire la realizzazione delle fondazioni del sovrappasso tra le sezioni 16.PSN1 A e 17.PSN1 A, si prevede l'infissione da entrambi i lati del canale, di Palancole di tipo Larsen in acciaio.

## 2.2 Rilevati stradali

Le spalle del cavalcavia in oggetto saranno sottoposte alla spinta del rilevato stradale che costituisce la pista PSN1 A. Si tratta di terreni granulari sottoposti ad apposite operazioni di costipazione a strati. Il comportamento meccanico di tali tipi di terreno è descritto dai seguenti parametri:

Peso specifico:	$\gamma_t = 19 \text{ kN/m}^3$
Angolo di attrito operativo:	$\phi' = 35^\circ$
Coesione efficace:	$c' = 0 \text{ kPa}$

I muri di risvolto a sostegno dei rilevati a tergo dei sovrappassi sono di due tipologie:

per i sovrappassi alla pk 0+291.80, pk 0+310.98 e pk 0+360.00 si adottano muri di risvolto in T.A.;  
per il sovrappasso alla pk 0+480.00 sono realizzati con elementi prefabbricati e fondazioni gettate in opera (soluzione adottata anche per tutti i sovrappassi sul lato Calabria).

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 3. Pericolosità sismica

Le azioni sismiche considerate sono quelle orizzontali. Per il calcolo delle azioni indotte dal sisma sulla struttura in elevazione si è fatto ricorso all'analisi dinamica modale considerando un numero di modi necessari tali da eccitare almeno l'85% della massa sismica. Per valutare l'effetto del sisma sulle spinte del terreno si è fatto ricorso al coefficiente di intensità sismica  $K_h$  valutato come da normativa.

L'ubicazione sismica dell'opera è individuata tramite la latitudine e la longitudine dell'area di sedime. In particolare l'area in oggetto è individuata dalla seguenti coordinate topografiche:

latitudine: 38,265024

longitudine: 15,626601

I parametri sismici che definiscono gli spettri di progetto sono riassunte nelle seguenti tabelle riepilogative.

$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_o$ [-]	$T_c^*$ [s]
30	0.059	2.371	0.280
50	0.078	2.324	0.301
72	0.095	2.320	0.316
101	0.113	2.331	0.324
140	0.134	2.352	0.331
201	0.159	2.369	0.340
475	0.235	2.416	0.365
975	0.318	2.452	0.389
2475	0.455	2.504	0.434

Tabella 2.1

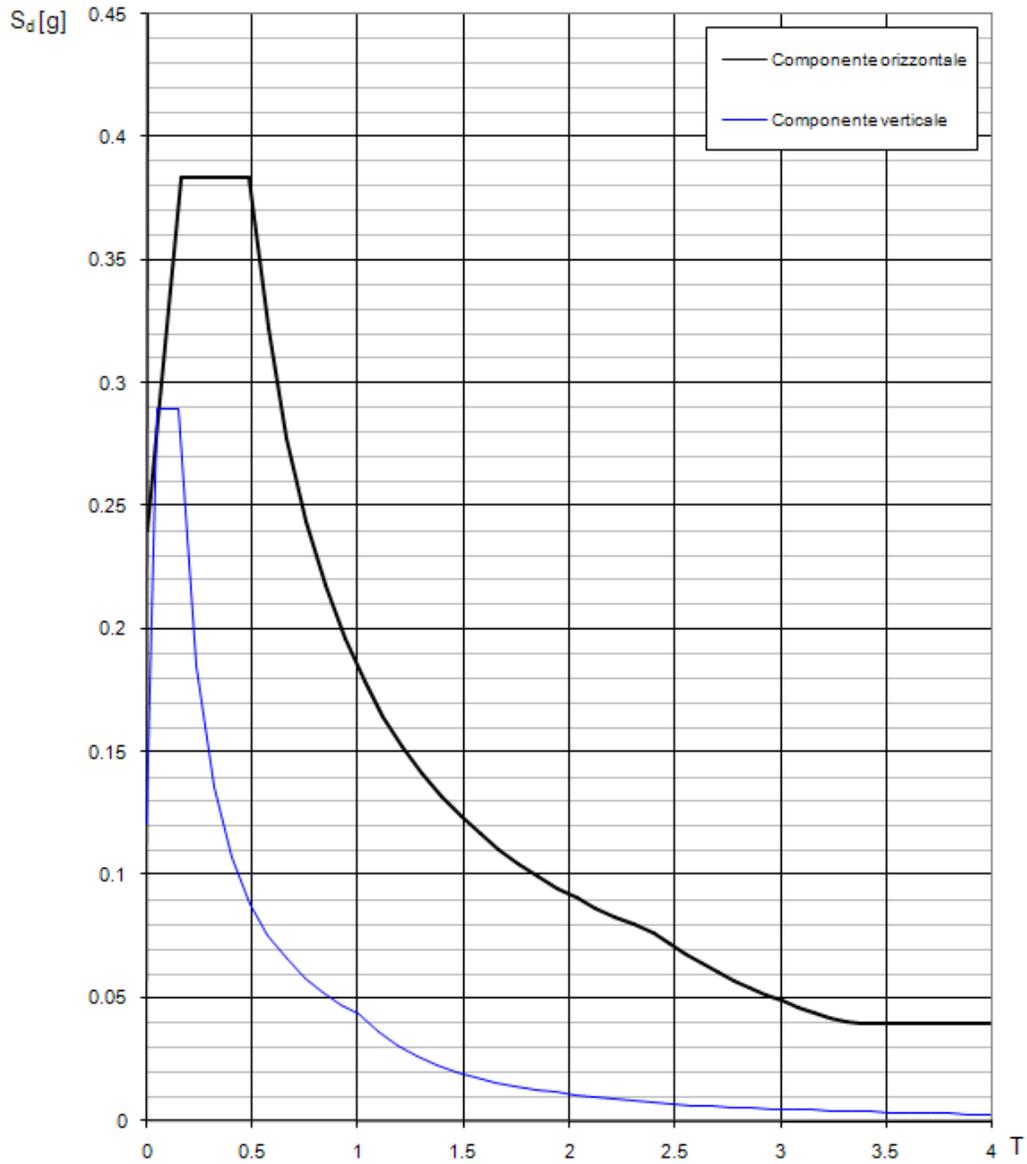


Tabella 2.2

**Parametri e punti dello spettro di risposta orizzontale per lo stato limiSLV**

**Parametri indipendenti**

STATO LIMITE	SLV
$a_c$	0.200 g
$F_c$	2.396
$T_c$	0.355 s
$S_s$	1.200
$C_c$	1.353
$S_T$	1.000
$q$	1.000

**Parametri dipendenti**

$S$	1.200
$\eta$	1.000
$T_B$	0.160 s
$T_C$	0.480 s
$T_D$	2.400 s

**Espressioni dei parametri dipendenti**

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

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

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

$$T_C = C_c \cdot T_c \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

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

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

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

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

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

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

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

**Punti dello spettro di risposta**

	T [s]	Se [g]
	0.000	0.240
$T_B \leftarrow$	0.160	0.575
$T_C \leftarrow$	0.480	0.575
	0.571	0.483
	0.663	0.417
	0.754	0.366
	0.846	0.327
	0.937	0.295
	1.029	0.269
	1.120	0.247
	1.212	0.228
	1.303	0.212
	1.395	0.198
	1.486	0.186
	1.577	0.175
	1.669	0.166
	1.760	0.157
	1.852	0.149
	1.943	0.142
	2.035	0.136
	2.126	0.130
	2.218	0.125
	2.309	0.120
$T_D \leftarrow$	2.400	0.115
	2.477	0.108
	2.553	0.102
	2.629	0.096
	2.705	0.091
	2.781	0.086
	2.857	0.081
	2.934	0.077
	3.010	0.073
	3.086	0.070
	3.162	0.066
	3.238	0.063
	3.314	0.060
	3.391	0.058
	3.467	0.055
	3.543	0.053
	3.619	0.051
	3.695	0.049
	3.771	0.047
	3.848	0.045
	3.924	0.043
	4.000	0.041

Tabella 2.3

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: center;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

Per il sito in questione i parametri necessari a tenere conto dell'effetto sismico sulla spinta dei terreni sono di seguito riportati:

Categoria sottosuolo:	B	Categoria topografica:	T1
Periodo di riferimento:	10anni	Coefficiente cu:	1
Operatività (SLO):		Salvaguardia della vita (SLV):	
Probabilità di superamento:	81 %	Probabilità di superamento:	10 %
Tr:	30 [anni]	Tr:	95 [anni]
ag:	0,058 g	ag:	0,108 g
Fo:	2,373	Fo:	2,342
Tc*:	0,281 [s]	Tc*:	0,325 [s]

Danno (SLD):	Prevenzione dal collasso (SLC):		
Probabilità di superamento:	63 %	Probabilità di superamento:	5 %
Tr:	30 [anni]	Tr:	195 [anni]
ag:	0,058 g	ag:	0,154 g
Fo:	2,373	Fo:	2,377
Tc*:	0,281 [s]	Tc*:	0,342 [s]

Coefficienti Sismici	Kv: 0,006
SLO:	Amax: 0,688
Ss: 1,200	Beta: 0,180
Cc: 1,420	SLV:
St: 1,000	Ss: 1,200
Kh: 0,013	Cc: 1,380
Kv: 0,006	St: 1,000
Amax: 0,688	Kh: 0,031
Beta: 0,180	Kv: 0,016
SLD:	Amax: 1,275
Ss: 1,200	Beta: 0,240
Cc: 1,420	SLC:
St: 1,000	Ss: 1,200
Kh: 0,013	Cc: 1,360
St: 1,000	Amax: 1,814
Kh: 0,044	Beta: 0,240
Kv: 0,022	

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

#### 4. Codici di calcolo utilizzati

Straus 7 - G+D Computing

Sap2000 – Computer and Structures, Inc.

SezioneWin – Ingegneria Soft

Procap – Pro-gineer s.r.l.

Fogli di calcolo non commerciali

#### 5. Normativa di riferimento

- D.M. Infrastrutture 14 Gennaio 2008, pubblicato su S.O. alla G.U. 4 febbraio 2008, n. 29 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”
- CIRCOLARE 2 Febbraio 2009, n. 617 – Istruzioni per l'applicazione delle ‘Nuove norme tecniche per le costruzioni’ di cui al decreto ministeriale 14 Gennaio 2008 (GU n.47 del 26 Febbraio 2009 – Suppl. Ordinario n.27)
- UNI ENV 1992-1-1,1-2,1-3,-3: “Eurocodice 2. Progettazione delle strutture di calcestruzzo”;
- UNI ENV 1997: “Eurocodice 7. Progettazione geotecnica”

#### 6. Prestazioni attese dalle strutture

Con riferimento alle prescrizioni impartite dal DM 2008, le strutture sono state progettate perseguendo i seguenti obiettivi:

Vita nominale →  $V_n = 10$  anni

Classe d'uso → Classe II,  $C_u = 1,0$

Le verifiche di sicurezza eseguite contemplano sia le verifiche di SLU che le verifiche di SLE, ciò seguendo quelle che sono le richieste riportate dalla normativa.

In particolare le verifiche per SLU considerano sia le verifiche per azioni sismiche sia quelle per azione dei carichi statici applicati. Per quanto attiene alla valutazione delle azioni sismiche queste sono valutate facendo riferimento allo spettro di progetto per SLV. Viste le richieste imposte ai vari elementi strutturali risulta completamente superflua ogni verifica sismica agli SLE. Per maggiori approfondimenti in merito ai valori assunti dai vari parametri che definiscono le forzanti sismiche si rimanda al paragrafo appositamente predisposto.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA	<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>	<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 7. Unita' di misura

Le unità di misura riportate nel presente elaborato sono quelle prescritte dal SI. Tuttavia, vista la maggiore familiarità con alcune unità del ST, ove espressamente dichiarato deve intendersi che le quantità indicate possano essere quelle previste da quest'ultimo.

## 8. Caratteristiche dei materiali

### 8.1 Calcestruzzo travi in C.A.P. classe C45/55

Peso specifico	$\gamma$ = [kN/mc]	29.45
Classe di resistenza	=	C45/55
Resistenza caratteristica cubica	$R_{ck}$ = [MPa]	55.00
Resistenza caratteristica cilindrica	$f_{ck}$ = [MPa]	45.65
Resistenza media cilindrica a compressione	$f_{cm}$ = [MPa]	53.65
Resistenza di progetto a compressione	$f_{cd}$ = [MPa]	25.87
Resistenza caratteristica a trazione	$f_{ctk}$ = [MPa]	2.68
Resistenza di progetto a trazione	$f_{ctd}$ = [MPa]	1.79
Valore medio resist. a trazione semplice	$f_{ctm}$ = [MPa]	3.83
Valore medio resist. a trazione per flessione	$f_{cfm}$ = [MPa]	4.60
Modulo di elasticità longitudinale (a 28 gg)	$E_{cm}$ = [MPa]	36416.11
Coefficiente parziale di sicurezza	$C_c$ =	1.5
Coefficiente di Poisson	$\nu$ =	0.2
Coefficiente di dilatazione termica	$\alpha$ = [1/°C]	1E-05
Resistenza massima	$f_2$ = [MPa]	25.87
Resistenza massima	$f_3$ = [MPa]	25.87
Deformazione di picco	$\epsilon_{c2}$ =	0.002
Deformazione di picco	$\epsilon_{c3}$ =	0.00175
Deformazione ultima	$\epsilon_{cu2}$ =	0.0035
Deformazione ultima	$\epsilon_{cu3}$ =	0.0035
Tensione tangenziale di aderenza acciaio/clc	$f_{bd}$ = [MPa]	3.25
Parametro s (funzione del tipo di cemento)	$s$ =	0.25
Umidità relativa	$RH$ = [%]	70
Coefficiente di ritiro	$\alpha_{ds1}$ =	6
Coefficiente di ritiro	$\alpha_{ds2}$ =	0.11

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>	<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 8.2 Calcestruzzo da prefabbricazione classe C35/45

Peso specifico	$\gamma$ = [kN/mc]	24.53
Classe di resistenza	=	C35/45
Resistenza caratteristica cubica	$R_{ck}$ = [MPa]	45.00
Resistenza caratteristica cilindrica	$f_{ck}$ = [MPa]	37.35
Resistenza media cilindrica a compressione	$f_{cm}$ = [MPa]	45.35
Resistenza di progetto a compressione	$f_{cd}$ = [MPa]	21.17
Resistenza caratteristica a trazione	$f_{ctk}$ = [MPa]	2.35
Resistenza di progetto a trazione	$f_{ctd}$ = [MPa]	1.56
Valore medio resist. a trazione semplice	$f_{ctm}$ = [MPa]	3.35
Valore medio resist. a trazione per flessione	$f_{cfm}$ = [MPa]	4.02
Modulo di elasticità longitudinale (a 28 gg)	$E_{cm}$ = [MPa]	34625.49
Coefficiente parziale di sicurezza	$C_c$ =	1.5
Coefficiente di Poisson	$\nu$ =	0.2
Coefficiente di dilatazione termica	$\alpha$ = [1/°C]	1E-05
Resistenza massima	$f_2$ = [MPa]	21.17
Resistenza massima	$f_3$ = [MPa]	21.17
Deformazione di picco	$\epsilon_{c2}$ =	0.002
Deformazione di picco	$\epsilon_{c3}$ =	0.00175
Deformazione ultima	$\epsilon_{cu2}$ =	0.0035
Deformazione ultima	$\epsilon_{cu3}$ =	0.0035
Tensione tangenziale di aderenza acciaio/cls	$f_{bd}$ = [MPa]	3.25
Parametro s (funzione del tipo di cemento)	$s$ =	0.25
Umidità relativa	$RH$ = [%]	70
Coefficiente di ritiro	$\alpha_{ds1}$ =	6
Coefficiente di ritiro	$\alpha_{ds2}$ =	0.11

## 8.3 Calcestruzzo soletta classe C32/40

Peso specifico	$\gamma$ = [kN/mc]	25.25
Classe di resistenza	=	C32/40
Resistenza caratteristica cubica	$R_{ck}$ = [MPa]	40.00
Resistenza caratteristica cilindrica	$f_{ck}$ = [MPa]	33.20
Resistenza media cilindrica a compressione	$f_{cm}$ = [MPa]	41.20

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>	<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Resistenza di progetto a compressione	$f_{cd} = [\text{MPa}]$	18.81
Resistenza caratteristica a trazione	$f_{ctk} = [\text{MPa}]$	2.17
Resistenza di progetto a trazione	$f_{ctd} = [\text{MPa}]$	1.45
Valore medio resist. a trazione semplice	$f_{ctm} = [\text{MPa}]$	3.10
Valore medio resist. a trazione per flessione	$f_{cfm} = [\text{MPa}]$	3.72
Modulo di elasticità longitudinale (a 28 gg)	$E_{cm} = [\text{MPa}]$	33642.78
Coefficiente parziale di sicurezza	$C_c =$	1.5
Coefficiente di Poisson	$\nu =$	0.2
Coefficiente di dilatazione termica	$\alpha = [1/^\circ\text{C}]$	1E-05
Resistenza massima	$f_2 = [\text{MPa}]$	18.81
Resistenza massima	$f_3 = [\text{MPa}]$	18.81
Deformazione di picco	$\epsilon_{c2} =$	0.002
Deformazione di picco	$\epsilon_{c3} =$	0.00175
Deformazione ultima	$\epsilon_{cu2} =$	0.0035
Deformazione ultima	$\epsilon_{cu3} =$	0.0035
Tensione tangenziale di aderenza acciaio/cls	$f_{bd} = [\text{MPa}]$	3.25
Parametro s (funzione del tipo di cemento)	$s =$	0.25
Umidità relativa	$RH = [\%]$	70
Coefficiente di ritiro	$\alpha_{ds1} =$	4
Coefficiente di ritiro	$\alpha_{ds2} =$	0.12

#### 8.4 Acciaio per armatura ordinaria B450C

Tipo di acciaio	=	B450C
Coefficiente parziale di sicurezza	=	1.15
Tensione caratteristica di snervamento	$f_{syk} = [\text{MPa}]$	450.00
Tensione di progetto di snervamento	$f_{syd} = [\text{MPa}]$	391.30
Tensione caratteristica di rottura	$f_{stk} = [\text{MPa}]$	540.00
Tensione di progetto a rottura	$f_{std} = [\text{MPa}]$	469.57
Modulo di elasticità longitudinale	$E_s = [\text{MPa}]$	206000
Massima deformazione di calcolo	$\epsilon_{ud} =$	0.0675
Deformazione alla tensione di rottura	$\epsilon_{uk} =$	0.075

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: center;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

## 8.5 Acciaio per armatura da compressione

Tipo di acciaio	=	Trefoli
Coefficiente parziale di sicurezza	=	1.15
Tensione caratteristica di snervamento	$f_{pyk}$ = [MPa]	0.00
Tensione di progetto di snervamento	$f_{pyd}$ = [MPa]	0.00
Tensione caratteristica di rottura	$f_{ptk}$ = [MPa]	1860.00
Tensione di progetto a rottura	$f_{ptd}$ = [MPa]	1617.39
Tensione caratt. allo 0.1% di def.residua	$f_{p(0.1)k}$ = [MPa]	0.00
Tensione di progetto allo 0.1% di def.residua	$f_{p(0.1)d}$ = [MPa]	0.00
Tensione caratt. all' 1% di def.residua	$f_{p(1)k}$ = [MPa]	1670.00
Tensione di progetto all' 1% di def.residua	$f_{p(1)d}$ = [MPa]	1452.17
Modulo di elasticità longitudinale	$E_p$ = [MPa]	195000
Massima deformazione di calcolo	$\epsilon_{ud}$ =	0.0315
Deformazione alla tensione di rottura	$\epsilon_{uk}$ =	0.035
Perdita di rilassamento a 1000 ore	$\rho_{1000}$ = [%]	2.5
Coefficiente di rilassamento a	$a$ =	0.66
Coefficiente di rilassamento b	$b$ =	9.1

## 8.6 Calcestruzzo gettato in opera C25/30

Peso specifico	$\gamma$ = [kN/mc]	24.53
Classe di resistenza	=	C25/30
Resistenza caratteristica cubica	$R_{ck}$ = [MPa]	30.00
Resistenza caratteristica cilindrica	$f_{ck}$ = [MPa]	24.90
Resistenza media cilindrica a compressione	$f_{cm}$ = [MPa]	32.90
Resistenza di progetto a compressione	$f_{cd}$ = [MPa]	14.11
Resistenza caratteristica a trazione	$f_{ctk}$ = [MPa]	1.79
Resistenza di progetto a trazione	$f_{ctd}$ = [MPa]	1.19
Valore medio resist. a trazione semplice	$f_{ctm}$ = [MPa]	2.56
Valore medio resist. a trazione per flessione	$f_{cfm}$ = [MPa]	3.07
Modulo di elasticità longitudinale (a 28 gg)	$E_{cm}$ = [MPa]	31447.16
Coefficiente parziale di sicurezza	$C_c$ =	1.5
Coefficiente di Poisson	$\nu$ =	0.2
Coefficiente di dilatazione termica	$\alpha$ = [1/°C]	1E-05

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><i>Rev</i></td> <td style="width: 50%;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

Resistenza massima	f2 = [MPa] 14.11
Resistenza massima	f3 = [MPa] 14.11
Deformazione di picco	$\epsilon_{c2} = 0.002$
Deformazione di picco	$\epsilon_{c3} = 0.00175$
Deformazione ultima	$\epsilon_{cu2} = 0.0035$
Deformazione ultima	$\epsilon_{cu3} = 0.0035$
Tensione tangenziale di aderenza acciaio/cls	fbd = [MPa] 3.25
Parametro s (funzione del tipo di cemento)	s = 0.25
Umidità relativa	RH = [%] 70
Coefficiente di ritiro	$\alpha_{ds1} = 4$
Coefficiente di ritiro	$\alpha_{ds2} = 0.12$

### 8.7 Variazione nel tempo della resistenza del calcestruzzo

Al tempo t di applicazione del carico, espresso in giorni, in accordo con quanto prescritto dalle norme tecniche e dagli eurocodici, la resistenza sviluppata risulta essere:

$$f_{cm}(t) = f_{cm} \times \beta_{cc}(t) \quad \text{con} \quad \beta_{cc}(t) = e^{[s(1-5.3/\sqrt{t})]}$$

s=0.25 per cemento ad indurimento rapido o normale.

### 8.8 Variazione nel tempo dei moduli elastici del calcestruzzo

Per l'evoluzione del modulo di elasticità nel tempo si è considerata la relazione, con quanto prescritto dalle norme tecniche e dagli eurocodici:

$$E_c(t) = \beta_E(t) E_c$$

dove :

$E_c(t)$  modulo elastico a t giorni di maturazione;

$E_c$  modulo elastico a 28 g.

$\beta_E(t) = [\beta_{cc}(t)]^{0.5}$  con  $\beta_{cc}(t) = e^{[s(1-5.3/\sqrt{t})]}$  definito precedentemente.

### 8.9 Variazione nel tempo della viscosità del calcestruzzo

Il coefficiente di viscosità viene calcolato dal programma stesso con quanto prescritto dalle norme tecniche e dagli eurocodici:

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \beta_c(t, t_0)$$

essendo:

t età del calcestruzzo al tempo considerato

$t_0$  età del calcestruzzo alla applicazione del carico

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

$\beta_c$  coefficiente che descrive l'evoluzione della viscosità nel tempo

$\phi_0$  coefficiente di viscosità finale

si ha inoltre:

$$\phi_0 = \phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0)$$

dove:

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 + RH/100}{0.1 \times \sqrt[3]{h_0}} \quad \beta(f_{cm}) = \frac{16.8}{\sqrt{f_{cm}}} \quad \beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + t_0^{0.2}}$$

dove:

RH = umidità relativa

$f_{cm}$  = resistenza media a compressione del calcestruzzo a 28gg

$$h_0 = \frac{2A}{u}$$

di cui:

A = area della sezione trasversale (soletta + trave corrente)

u = perimetro a contatto con l'atmosfera

$$\beta_c(t - t_0) = \left( \frac{t - t_0}{\beta_H + (t - t_0)} \right)^{0.3}$$

$$\beta_H = 1.5 \times [1 + (0.012 \times RH)^{18}] \times h_0 + 250 \leq 1500$$

Nei calcoli si è assunta :

RH = 80%

## 8.10 Variazione nel tempo del ritiro del calcestruzzo

La deformazione per ritiro viene calcolata con quanto prescritto dalle norme tecniche e dagli eurocodici:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cs0} \beta_s(t - t_s)$$

essendo :

$\varepsilon_{cs0}$  il coefficiente di ritiro nominale

t l'età del calcestruzzo in giorni

$t_s$  l'età del calcestruzzo all'inizio del ritiro

Il coefficiente di ritiro nominale  $\varepsilon_{cs0}$  può essere ottenuto dalla formula:

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_s(f_{cm}) \times \beta_{RH} \quad \text{con}$$

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = [160 + \beta_{sc}(90 - f_{cm})] \cdot 10^{-6} \quad \text{dove}$$

$f_{cm}$  = resistenza media a compressione del calcestruzzo a 28gg

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

$\beta_{sc}$  = coefficiente che dipende dal tipo di cemento ( =5 per cemento ad indurimento rapido o normale)

Per una umidità relativa RH compresa tra il 40% e il 99%

$$\beta_{RH} = 1.55 \times \beta_{sRH}$$

$$\text{con } \beta_{sRH} = 1 - \left( \frac{RH}{100} \right)^3$$

L'evoluzione del ritiro nel tempo avviene secondo la relazione

$$\beta_s(t - t_s) = \left( \frac{t - t_s}{0.035 \times h_0^2 + t - t_s} \right)^{0.5}$$

dove  $h_0$  è stato definito per la viscosità.

## 8.11 Perdite di carico per rilassamento dell'acciaio

Si fa riferimento a quanto prescritto dalle norme tecniche e dagli eurocodici,:

$$\rho_t = \rho_{1000} \left( \frac{t}{1000} \right)^k$$

In cui:

$\rho_{1000}$  = percentuale di rilassamento a 1000 ore

$\rho_t$  = rilassamento a t ore

k = parametro dipendente dal tipo di acciaio

dove si assume:

$$\rho_{1000} = 2.0\%$$

$$k = 0.19 \text{ (acciaio in trefoli a rilassamento ridotto)}$$

## 9. Fasi costruttive

L'opera in oggetto risulta realizzata da un' opportuna integrazione di elementi strutturali ciascuno realizzato secondo una specifica tecnologia.

È necessario quindi stabilire già in sede di progettazione le fasi necessarie alla realizzazione dell'opera.

Tali fasi tengono conto di tutto un processo costruttivo e consentono di individuare eventuali condizioni di carico da tenere in conto in fase di calcolo dell'opera. Sono state individuate complessivamente 9 fasi costruttive e vengono di seguito esplicitate.

**Fase 1:** La prima fase di costruzione del cavalcavia prevede la predisposizione del piano di posa della platea di fondazione. In particolare è necessario operare una bonifica dello strato

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>	<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

superficiale di terreno e procedere al consolidamento dello stesso con la realizzazione di un numero opportuno di colonne di jet-grouting (per il progetto del sistema di consolidamento si rimanda alla relazione geotecnica). Successivamente alle operazioni di consolidamento si procede alla realizzazione di un piano di posa su cui adagiare la fondazione della struttura.

- **Fase 2:** In questa fase si procede alla posa degli elementi prefabbricati a T che andranno a costituire la struttura portante delle spalle. Tali elementi presentano nella parte inferiore una forma opportuna che consente una completa solidarizzazione con la platea di fondazione.
- **Fase 3:** Si effettua l'infissione nel terreno delle palancole in acciaio tipo Larsen in corrispondenza del canale (solo per il sovrappasso tra le sezioni 16.PSN1 A e 17.PSN1 A).
- **Fase 4:** Si procede alla posa in opera delle armature di fondazione ed al successivo getto del calcestruzzo. Realizzata la platea di fondazione si procede alla solidarizzazione degli elementi prefabbricati in sommità con la realizzazione di un cordolo che nel caso specifico assolverà altresì alla funzione di pulvino.
- **Fase 5:** In questa fase si procede con l'ultimazione di tutte quelle parti che consentono il contenimento del terrapieno, ed in particolare il muro paraghiaia ed i muri di risvolto. Ultimata la realizzazione di questi elementi si procede con il rinterro e l'ultimazione del rilevato stradale.
- **Fase 6:** Varo delle travi in c.a.p. autoportanti
- **Fase 7:** Dopo aver posizionato le travi, si effettua il getto dei traversi di testata.

**Fase 8:** Si effettua quindi il getto della soletta in c.a.

**Fase 9:** Si procede infine al completamento dell'impalcato con Pavimentazione e finiture.

## **10. Calcolo impalcato**

### **10.1 Generalita'**

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

L'impalcato in progetto è realizzato con travi longitudinali a cassone in c.a.p. ad ali larghe inferiori. La sua larghezza totale è pari a 14.50 m, di cui 12.00 m sono occupati dalla carreggiata stradale e 2.50 m dai marciapiedi, come si può osservare nell'immagine seguente.

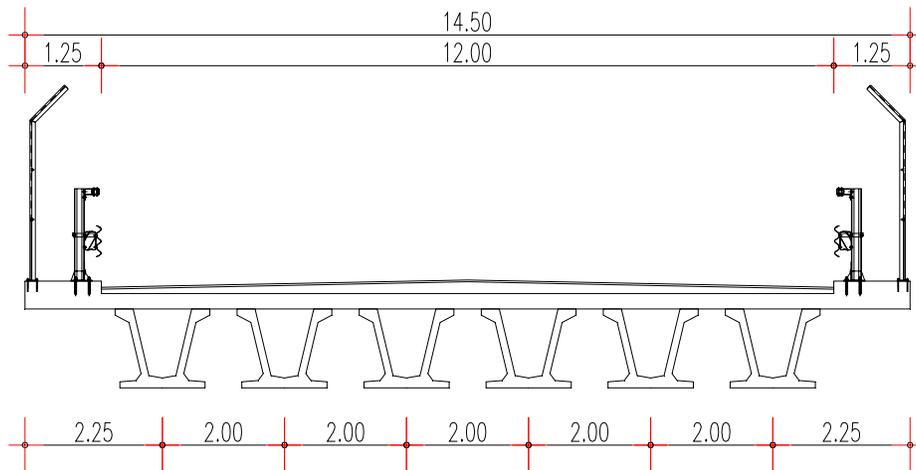


Figura 10.1 : Sezione impalcato

La struttura principale dell'impalcato è costituita da 6 travi in c.a.p. prefabbricate in stabilimento con il sistema delle armature pretese e poste ad interasse di 2.00 m; la loro sezione è a V con ala larga inferiore, ma che diventa a sezione piena nelle zone di testata. L'altezza delle travi è di 1.28 m e la larghezza del bulbo inferiore è pari a 1.40 m.



Figura 10.2 : Sezioni trasversali della trave prefabbricata

All'estradosso delle travi sono appoggiate delle predalles aventi la funzione di cassero a perdere per la realizzazione della soletta in cemento armato di spessore 25 cm; la stessa sarà collaborante con le travi sotto l'azione di carichi permanenti e variabili, agenti dopo la maturazione di quest'ultima, e sarà tale da garantire la ripartizione dei carichi su tutte le travi dell'impalcato in

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

esame. I traversi di testata, posti in corrispondenza dell'asse appoggi, sono in cemento armato di spessore pari a 40 cm ed hanno la funzione di irrigidire trasversalmente l'impalcato.

Si prevedono appoggi del tipo a lastra in neoprene, che permettono di realizzare un vincolo capace di sopportare carichi elevati e ottenere una maggiore rigidità nelle deformazioni.

## 10.2 Calendario della trave

L'impalcato sarà realizzato con travi prefabbricate in stabilimento e precomprese col sistema delle armature pretese costituite da trefoli in acciaio trafilato: esse saranno atte, dopo il loro collegamento trasversale ed il successivo getto della soletta formante l'estradosso dell'impalcato medesimo, al sostentamento dei Sovraccarichi Accidentali previsti dalla normativa vigente per i "Ponti di Prima Categoria".

Nella relazione che segue verrà dimostrato che, in corrispondenza ad un numero sufficiente di sezioni, ogni fase di sollecitazione, sia pure provvisoria, comporta per i materiali impiegati tassi di lavoro compatibili con le loro resistenze dichiarate in ottemperanza alla vigente normativa.

Si individuano le seguenti fasi di Costruzione e Calcolo delle Travi:

<b>FASE</b>	<b>T[gg]</b>	<b>Schema</b>	<b>Struttura</b>	<b>Nome fase</b>
1	4	RILASCIO	Trave	Maturazione cls trave
2	5	RILASCIO	Trave	Rilascio armature di precompressione
3	6	SOLLEVAMENTO	Trave	Sollevamento della trave
4	15	STOCCAGGIO	Trave	Stoccaggio della trave
5	30	TRASPORTO	Trave	Trasporto della trave
6	36	ESERCIZIO	Trave	Messa in opera della trave
7	40	ESERCIZIO	Trave	Permanenti di I fase
8	46	ESERCIZIO	Trave+Sol.	Maturazione soletta
9	60	ESERCIZIO	Trave+Sol.	Permanenti di II fase
10	30000	ESERCIZIO	Trave+Sol.	Permanenti + accidentali di III fase

- Tempo di maturazione calcestruzzo trave: 4 gg
- Tempo di maturazione calcestruzzo soletta: 46 gg
- Correzione tempo di maturazione calcestruzzo trave: 4 gg
- Correzione tempo di maturazione calcestruzzo soletta: 1 gg
- Correzione rilassamento delle armature di precompressione: 0 gg

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

- Inizio fenomeni di ritiro trave: 1gg
- Inizio fenomeni di ritiro soletta: 1 gg
- Inizio fenomeni di viscosità trave: 4 gg
- Inizio fenomeni di viscosità soletta: 1 gg

### 10.3 Modello di calcolo impalcato

Allo scopo di effettuare la corretta ripartizione trasversale dei carichi agenti sull'impalcato, è stato predisposto un modello completo tridimensionale a graticcio, mediante il metodo degli elementi finiti, ove i vari elementi strutturali sono stati simulati mediante elementi di tipo beam per le travi, la soletta e per i traversi. La sezione della soletta è stata considerata un tutt'uno con quella della trave, conglobando entrambe in un'unica sezione trasversale. A questo scopo però, per tener conto della diversità dei rispettivi materiali, è stato omogeneizzato il calcestruzzo della soletta a quello della trave, ottenendo così uno spessore equivalente per la soletta pari a 23 cm.

Per garantire comunque la ripartizione trasversale dei carichi sulle travi operata dalla soletta, sono stati inseriti degli ulteriori elementi soletta sempre di tipo beam, ma di peso nullo, perpendicolari rispetto alla direzione delle travi. I traversi, infine, sono stati modellati con elementi beam aventi area pari a quella dei traversi da realizzare in opera.

Nelle figure seguenti si riportano il modello completo FEM dell'impalcato e le numerazioni dei nodi e delle aste.

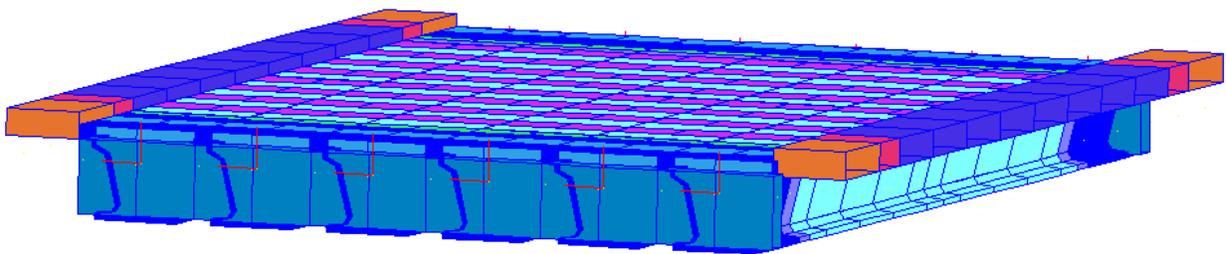


Figura 10.3 : Vista 3D impalcato

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>	<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

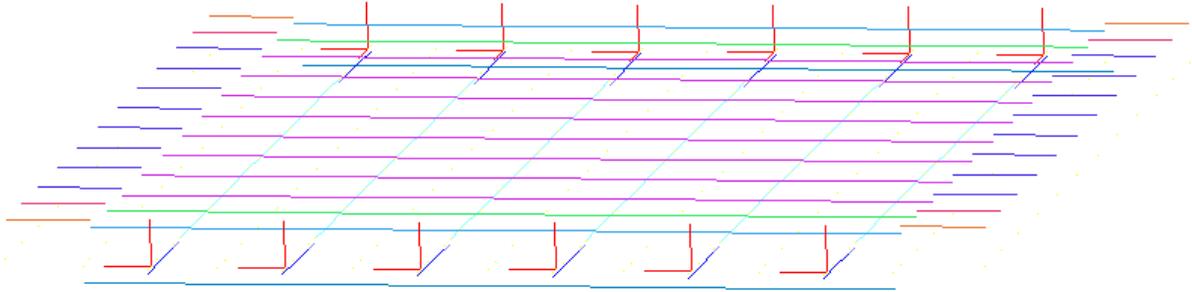


Figura 10.4 : Modello strutturale impalcato

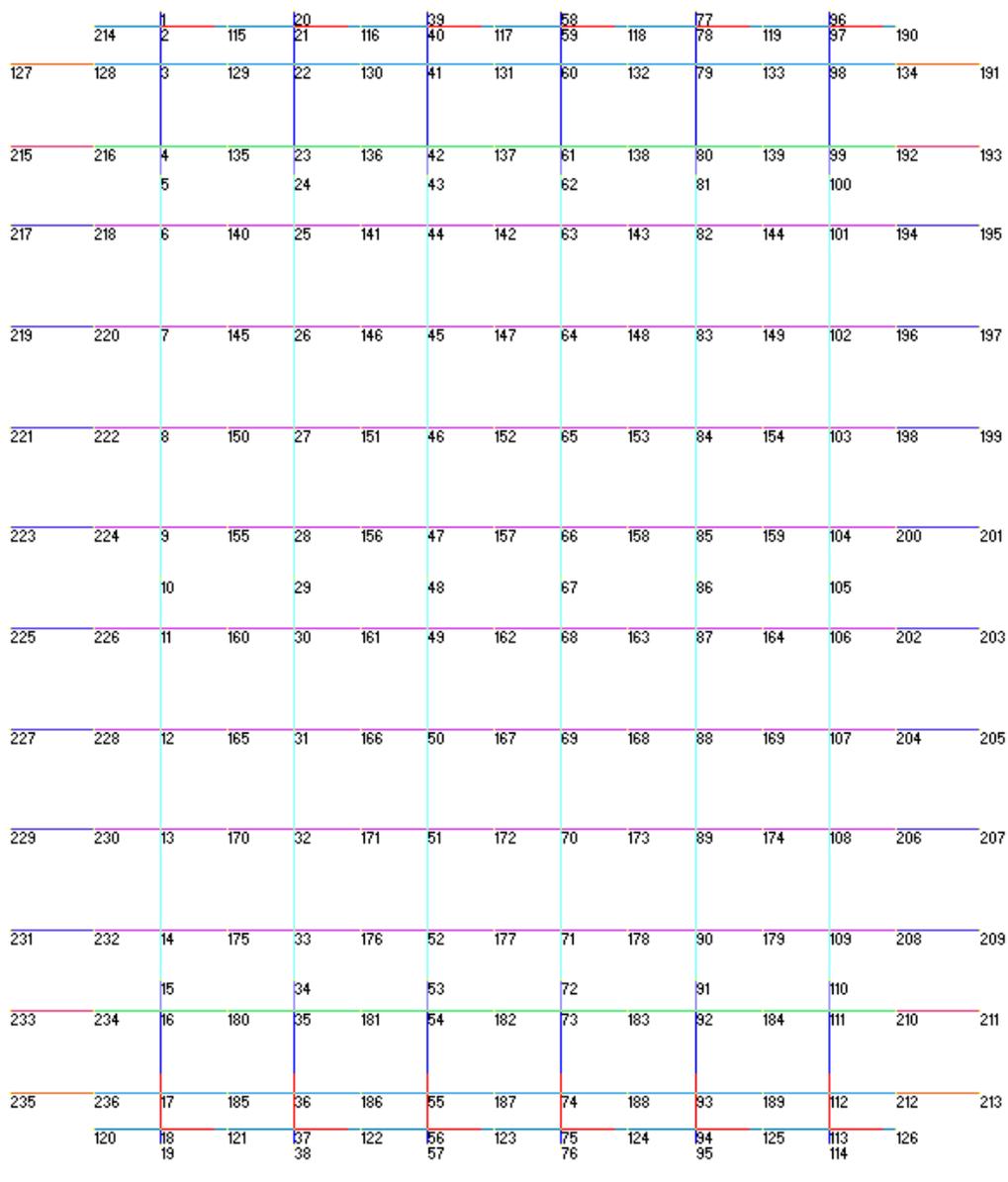


Figura 10.5 : Numerazione dei nodi

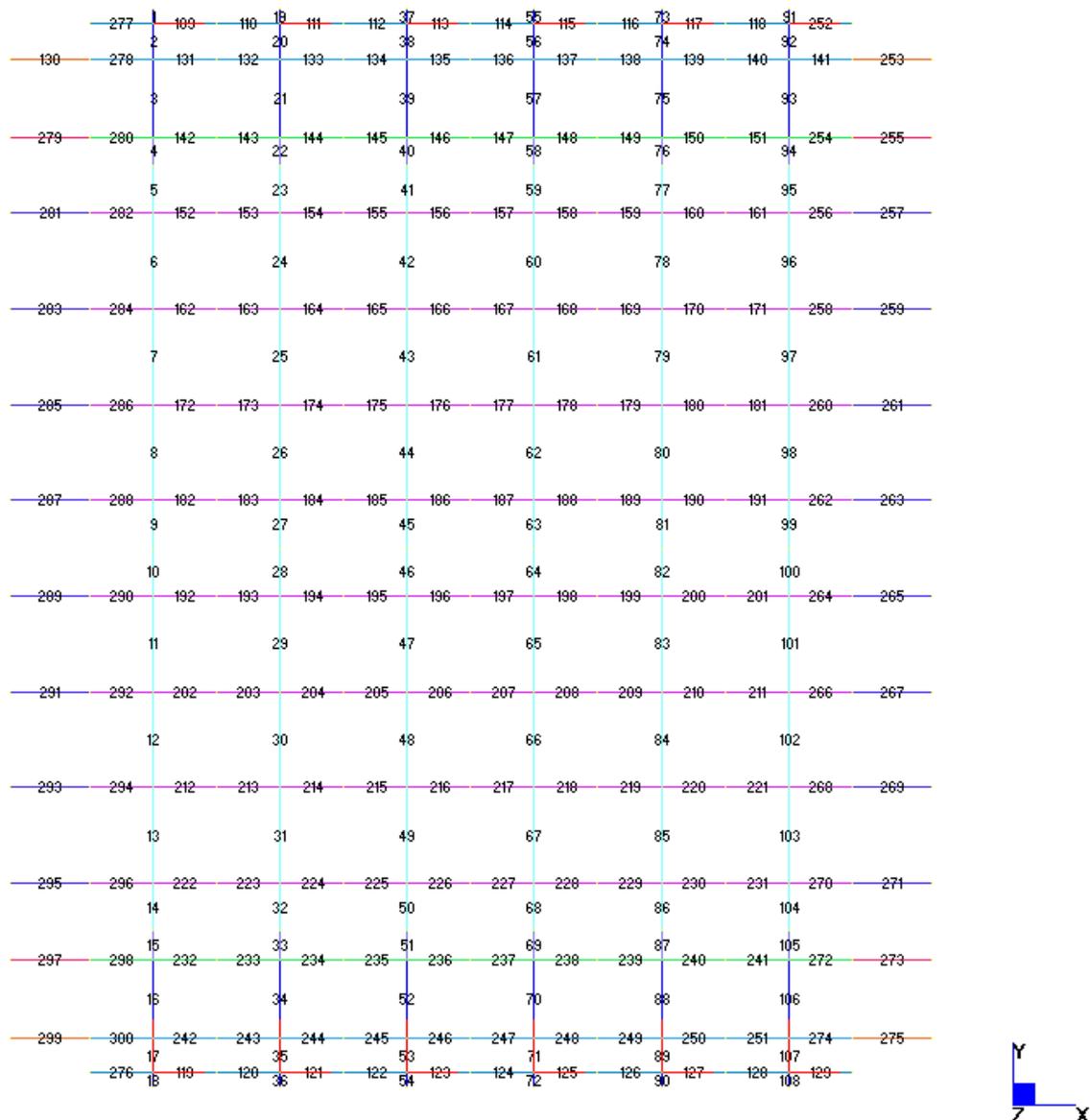
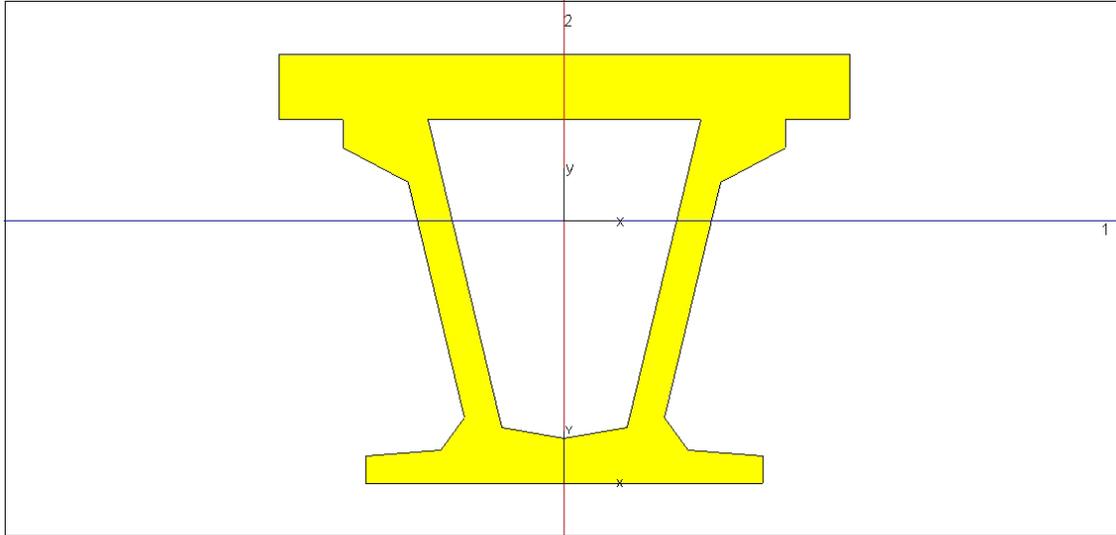


Figura 10.6 : Numerazione delle aste

Le travi presentano sezioni differenti a seconda che si considerino i tratti di testata, e corrente. Nella zona di passaggio tra queste due è presente inoltre una sezione di rastremo, di cui si è tenuto anche conto nel modello.

Le travi presentano le seguenti caratteristiche:



Centroid (m)  
 Xc : 0.000000x10<sup>0</sup>  
 Yc : 9.247890x10<sup>-1</sup>  
 Area (m<sup>2</sup>) : 1.002628x10<sup>0</sup>

Global Moments of Area (m<sup>4</sup>)  
 IXX : 1.155911x10<sup>0</sup>  
 IYY : 2.553798x10<sup>-1</sup>  
 IXY : 1.126089x10<sup>-10</sup>

**PRINCIPAL AXES**

Moments of Area (m<sup>4</sup>)  
 I11 : 2.984288x10<sup>-1</sup>  
 I22 : 2.553798x10<sup>-1</sup>  
 Angle (deg) : 0.000000x10<sup>0</sup>

**LOCAL AXES**

Moments of Area (m<sup>4</sup>)  
 Ixx : 2.984288x10<sup>-1</sup>  
 Iyy : 2.553798x10<sup>-1</sup>  
 Ixy : 2.249449x10<sup>-10</sup>

Section Modulus (m<sup>3</sup>)

Z11 + : 5.099507x10<sup>-1</sup>  
 Z11 - : 3.226994x10<sup>-1</sup>  
 Z22 + : 2.553798x10<sup>-1</sup>  
 Z22 - : 2.553798x10<sup>-1</sup>

Section Modulus (m<sup>3</sup>)

Zxx + : 3.226994x10<sup>-1</sup>  
 Zxx - : 5.099507x10<sup>-1</sup>  
 Zyy + : 2.553798x10<sup>-1</sup>  
 Zyy - : 2.553798x10<sup>-1</sup>

Plastic Modulus (m<sup>3</sup>)

S11 : 4.591009x10<sup>-1</sup>  
 S22 : 4.463683x10<sup>-1</sup>

Plastic Modulus (m<sup>3</sup>)

Sxx : 4.591009x10<sup>-1</sup>  
 Syy : 4.463683x10<sup>-1</sup>

Radius of Gyration (m)

r1 : 5.455701x10<sup>-1</sup>  
 r2 : 5.046886x10<sup>-1</sup>

Radius of Gyration (m)

rx : 5.455701x10<sup>-1</sup>  
 ry : 5.046886x10<sup>-1</sup>

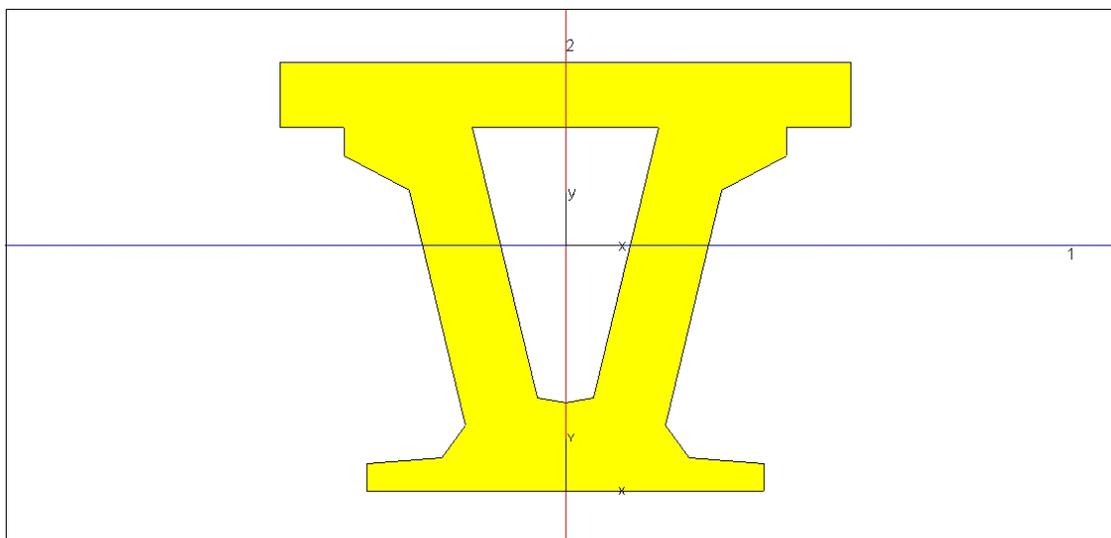
Shear Area (m<sup>2</sup>)

SA1 : 7.523673x10<sup>-1</sup>  
 SA2 : 4.053108x10<sup>-1</sup>

Torsion Constant (m<sup>4</sup>)

J : 2.006896x10<sup>-1</sup>

Figura 10.7 : Caratteristiche della sezione corrente



Centroid (m)  
 $X_c$  : 0.000000x10<sup>0</sup>  
 $Y_c$  : 8.655041x10<sup>-1</sup>  
 Area (m<sup>2</sup>) : 1.364129x10<sup>0</sup>

Global Moments of Area (m<sup>4</sup>)  
 $I_{XX}$  : 1.372504x10<sup>0</sup>  
 $I_{YY}$  : 2.829391x10<sup>-1</sup>  
 $I_{XY}$  : 2.027464x10<sup>-10</sup>

**PRINCIPAL AXES**

Moments of Area (m<sup>4</sup>)  
 $I_{11}$  : 3.506388x10<sup>-1</sup>  
 $I_{22}$  : 2.829391x10<sup>-1</sup>  
 Angle (deg) : 0.000000x10<sup>0</sup>

**LOCAL AXES**

Moments of Area (m<sup>4</sup>)  
 $I_{xx}$  : 3.506388x10<sup>-1</sup>  
 $I_{yy}$  : 2.829391x10<sup>-1</sup>  
 $I_{xy}$  : 1.049020x10<sup>-10</sup>

Section Modulus (m<sup>3</sup>)

$Z_{11+}$  : 5.440512x10<sup>-1</sup>  
 $Z_{11-}$  : 4.051267x10<sup>-1</sup>  
 $Z_{22+}$  : 2.829391x10<sup>-1</sup>  
 $Z_{22-}$  : 2.829391x10<sup>-1</sup>

Section Modulus (m<sup>3</sup>)

$Z_{xx+}$  : 4.051267x10<sup>-1</sup>  
 $Z_{xx-}$  : 5.440512x10<sup>-1</sup>  
 $Z_{yy+}$  : 2.829391x10<sup>-1</sup>  
 $Z_{yy-}$  : 2.829391x10<sup>-1</sup>

Plastic Modulus (m<sup>3</sup>)

$S_{11}$  : 6.138136x10<sup>-1</sup>  
 $S_{22}$  : 5.389319x10<sup>-1</sup>

Plastic Modulus (m<sup>3</sup>)

$S_{xx}$  : 6.138136x10<sup>-1</sup>  
 $S_{yy}$  : 5.389319x10<sup>-1</sup>

Radius of Gyration (m)

$r_1$  : 5.069934x10<sup>-1</sup>  
 $r_2$  : 4.554271x10<sup>-1</sup>

Radius of Gyration (m)

$r_x$  : 5.069934x10<sup>-1</sup>  
 $r_y$  : 4.554271x10<sup>-1</sup>

Shear Area (m<sup>2</sup>)

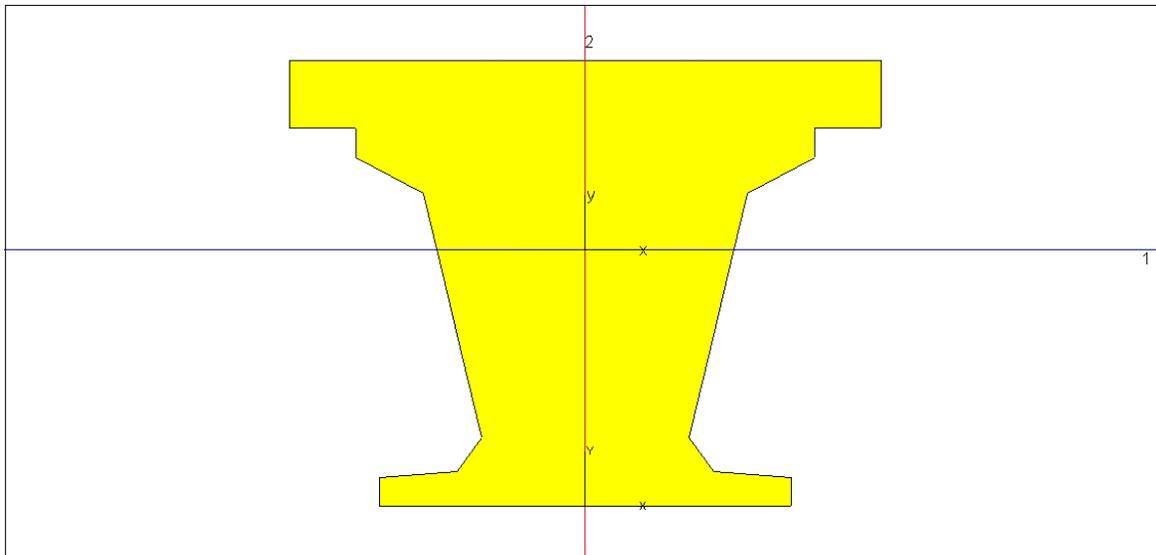
$SA_1$  : 1.078397x10<sup>0</sup>  
 $SA_2$  : 8.353725x10<sup>-1</sup>

Torsion Constant (m<sup>4</sup>)

$J$  : 2.606824x10<sup>-1</sup>

Figura 10.8 : Caratteristiche della sezione di rastremo

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



Centroid (m)	Global Moments of Area (m <sup>4</sup> )
Xc : 0.000000x10 <sup>0</sup>	IXX : 1.719177x10 <sup>0</sup>
Yc : 8.707309x10 <sup>-1</sup>	IYY : 2.907190x10 <sup>-1</sup>
Area (m <sup>2</sup> ) : 1.768163x10 <sup>0</sup>	IXY : 4.892840x10 <sup>-10</sup>
<b>PRINCIPAL AXES</b>	<b>LOCAL AXES</b>
Moments of Area (m <sup>4</sup> )	Moments of Area (m <sup>4</sup> )
I11 : 3.786047x10 <sup>-1</sup>	Ixx : 3.786047x10 <sup>-1</sup>
I22 : 2.907190x10 <sup>-1</sup>	Iyy : 2.907190x10 <sup>-1</sup>
Angle (deg) : 0.000000x10 <sup>0</sup>	Ixy : 1.264447x10 <sup>-10</sup>
Section Modulus (m <sup>3</sup> )	Section Modulus (m <sup>3</sup> )
Z11 + : 5.922461x10 <sup>-1</sup>	Zxx + : 4.348125x10 <sup>-1</sup>
Z11 - : 4.348125x10 <sup>-1</sup>	Zxx - : 5.922461x10 <sup>-1</sup>
Z22 + : 2.907190x10 <sup>-1</sup>	Zyy + : 2.907190x10 <sup>-1</sup>
Z22 - : 2.907190x10 <sup>-1</sup>	Zyy - : 2.907190x10 <sup>-1</sup>
Plastic Modulus (m <sup>3</sup> )	Plastic Modulus (m <sup>3</sup> )
S11 : 7.046612x10 <sup>-1</sup>	Sxx : 7.046612x10 <sup>-1</sup>
S22 : 5.857641x10 <sup>-1</sup>	Syy : 5.857641x10 <sup>-1</sup>
Radius of Gyration (m)	Radius of Gyration (m)
r1 : 4.627344x10 <sup>-1</sup>	rx : 4.627344x10 <sup>-1</sup>
r2 : 4.054857x10 <sup>-1</sup>	ry : 4.054857x10 <sup>-1</sup>
Shear Area (m <sup>2</sup> )	Torsion Constant (m <sup>4</sup> )
SA1 : 1.718360x10 <sup>0</sup>	J : 2.827511x10 <sup>-1</sup>
SA2 : 1.300775x10 <sup>0</sup>	

Figura 10.9 : Caratteristiche della sezione di testata

Il posizionamento in quota delle travi è stato ottenuto imponendo un adeguato offset all'asse delle travi rispetto all'allineamento nodale. Anche la soletta, così come i traversi e i marciapiedi, sono stati posizionata con l'asse baricentrico in quota tramite opportuni offset. Agli elementi beam che costituiscono la soletta sono stati assegnate delle distanze opportunamente scelte, in modo da coincidere con gli assi su cui agiscono i carichi viaggianti. Si è data così a tutti gli elementi una

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

larghezza di 1.50 m, tranne a quelli di estremità, che hanno invece delle dimensioni leggermente diverse.

## 10.4 Analisi dei carichi

### 10.4.1 Riepilogo dei carichi applicati

I calcoli eseguiti hanno preso in considerazione tutti i casi di carico previsti dal DM 2008 ovvero:

- Il peso proprio degli elementi strutturali: carico G1
- I carichi permanenti portati: carico G2
- I carichi da vento: carico Q5
- Le azioni variabili dovute ai carichi mobili.

Non sono stati applicati dovuti al sisma in quanto questi non sono dimensionanti per l'impalcato, ma per le sottostrutture. Per quanto riguarda la valutazione delle azioni sismiche agenti sulle sottostrutture si rimanda dunque al paragrafo relativo al calcolo delle spalle.

### 10.4.2 Peso proprio degli elementi strutturali (G1)

Il peso proprio degli elementi strutturali è valutato per via automatica dal software di calcolo utilizzato in base alla reale geometria degli elementi finiti ed il peso specifico dei vari materiali che li costituiscono. In corrispondenza delle sovrapposizioni nodali, i pesi degli elementi finiti convergenti sono valutati due volte senza tenere presente l'effetto della compenetrazione. Tale approssimazione, comunque a vantaggio di sicurezza, si ritiene largamente accettabile. Nel peso proprio G1 si fanno rientrare anche i pesi della soletta, in quanto essa è stata modellata unitamente alla trave e la sua sezione rientra dunque nella medesima sezione trasversale della trave, e i pesi dovuti ai cordoli, che sono stati assunti di larghezza pari a 1.25 m e spessore pari a 0.20 m oltre lo spessore della soletta.

### 10.4.3 Carichi permanenti portati (G2)

I carichi permanenti portati comprendono:

- Il peso della pavimentazione stradale valutato, nella peggiore delle ipotesi, in un carico uniformemente distribuito pari a  $G2.1 = 20 \text{ kN/m}^3$ . Si assume per la pavimentazione stradale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

uno spessore medio pari a 0.15 m, per cui il carico G2.1 dovuto alla pavimentazione equivale ad una pressione pari a:  $20 \text{ kN/m}^3 \times 0.15 \text{ m} = 3 \text{ kN/m}^2$ .

Questo carico deve essere ripartito sugli elementi beam con cui è stata schematizzata la soletta, per cui, tenendo conto delle superfici di influenza di tali elementi, si assume che i carichi ad essi afferenti siano rispettivamente:

- Elementi beam da 1.55 m:  $3 \text{ kN/m}^2 \times 1.55 \text{ m} = 4.65 \text{ kN/m}$
- Elementi beam da 1.50 m:  $3 \text{ kN/m}^2 \times 1.50 \text{ m} = 4.50 \text{ kN/m}$
- Elementi beam da 0.90 m:  $3 \text{ kN/m}^2 \times 0.90 \text{ m} = 2.70 \text{ kN/m}$
  
- Il peso dovuto ai sicurvia e alla rete di protezione, valutato in un carico lineare pari a G2.2 = 2kN/m. Tale carico viene distribuito sulla larghezza dei marciapiedi, che è pari a 1.25 m, ottenendo così una pressione di  $1.60 \text{ kN/m}^2$ . Come per la pavimentazione, questo carico deve essere ripartito sugli elementi beam con cui sono stati schematizzati i marciapiedi, per cui, tenendo conto delle superfici di influenza di tali elementi, si assume che i carichi ad essi afferenti siano rispettivamente:
- Elementi beam da 1.55 m:  $1.60 \text{ kN/m}^2 \times 1.55 \text{ m} = 2.48 \text{ kN/m}$
- Elementi beam da 1.50 m:  $1.60 \text{ kN/m}^2 \times 1.50 \text{ m} = 2.40 \text{ kN/m}$
- Elementi beam da 0.90 m:  $1.60 \text{ kN/m}^2 \times 0.90 \text{ m} = 1.44 \text{ kN/m}$

Questi carichi permanenti si imputano nel modello di calcolo con riferimento ad un solo caso di carico sommando i contributi dei vari termini.

Rinviando ai tabulati di calcolo allegati per ogni approfondimento di merito si riporta nella seguente figura una sintesi dei carichi permanenti portati.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> <b>CZ0476_F0</b>	<i>Rev</i> <b>F0</b>	<i>Data</i> <b>20/06/2011</b>

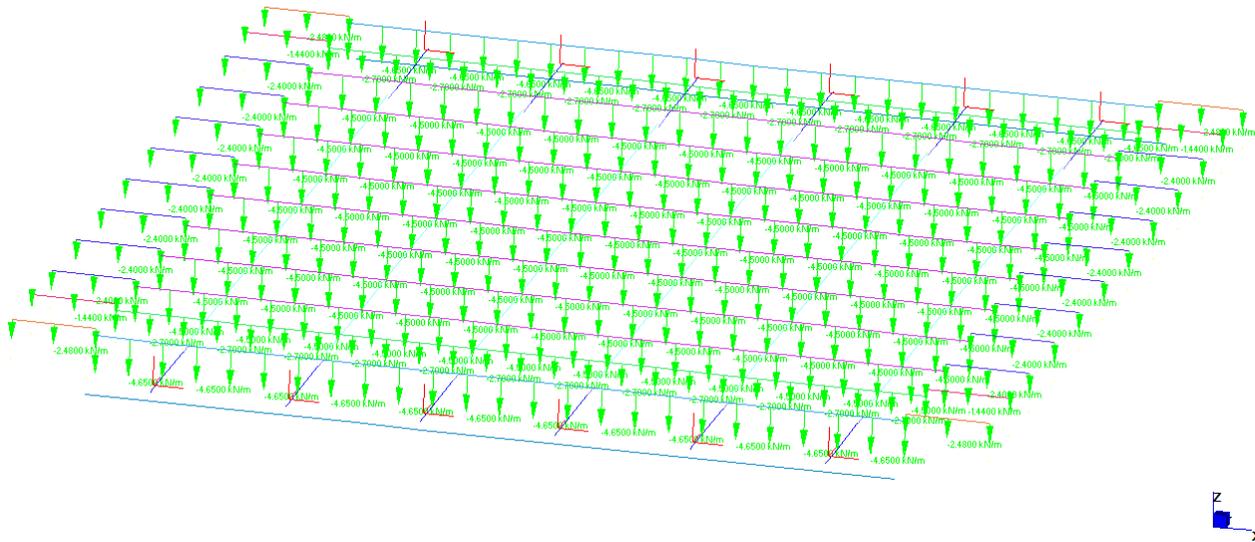


Figura 10.10 : Carichi permanenti portati G2

#### 10.4.4 Azione del vento (Q5)

La pressione esercitata dal vento è valutata, in conformità alle prescrizioni del DM 2008, con la relazione:

$$P = q_b C_c C_p C_d$$

- $q_b$  è la pressione cinetica di riferimento valutabile (in  $N/m^2$ ) come:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2$$

Dove:

- $v_b$  è la velocità di riferimento del vento (in m/s) valutabile come:

$$v_b = v_{b,0} \quad \text{per } a_s \leq a_0$$

$$v_b = v_{b,0} + k_a (a_s - a_0) \quad \text{per } a_0 < a_s \leq 1500 \text{ m}$$

- $v_{b,0}$ ,  $a_0$ ,  $k_a$  sono parametri forniti nella tabella seguente e legati alla regione in cui sorge la costruzione in esame:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA		Codice documento CZ0476_F0	Rev F0	Data 20/06/2011

Zona	Descrizione	v <sub>b,0</sub> [m/s]	a <sub>0</sub> [m]	k <sub>a</sub> [1/s]
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (con l'eccezione della provincia di Trieste)	25	1000	0,010
2	Emilia Romagna	25	750	0,015
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)	27	500	0,020
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0,020
5	Sardegna (zona a oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	750	0,015
6	Sardegna (zona a occidente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	500	0,020
7	Liguria	28	1000	0,015
8	Provincia di Trieste	30	1500	0,010
9	Isole (con l'eccezione di Sicilia e Sardegna) e mare aperto	31	500	0,020

Tabella 10.11

- a<sub>s</sub> è l'altitudine sul livello del mare (in m) del sito ove sorge la costruzione.
- ρ è la densità dell'aria assunta convenzionalmente costante e pari a 1,25 kg/m<sup>3</sup>.
- Il coefficiente di esposizione c<sub>e</sub> dipende dall'altezza z sul suolo del punto considerato, dalla topografia del terreno, e dalla categoria di esposizione del sito ove sorge la costruzione.

In assenza di analisi specifiche che tengano in conto la direzione di provenienza del vento e l'effettiva scabrezza e topografia del terreno, per altezze sul suolo non maggiori di z = 200 m, esso è dato dalla formula:

$$c_e(z) = k_r^2 c_t \ln(z/z_0) [7 + c_t \ln(z/z_0)] \quad \text{per } z \geq z_{\min}$$

$$c_e(z) = c_e(z_{\min}) \quad \text{per } z < z_{\min}$$

Dove:

- k<sub>r</sub>, z<sub>0</sub>, z<sub>min</sub> sono assegnati nella seguente tabella in funzione della categoria di esposizione del sito ove dovrà sorgere la struttura;
- c<sub>t</sub> è il coefficiente di topografia posto generalmente pari a 1, sia per le zone pianeggianti sia per quelle ondulate, collinose e montane.

Categoria di esposizione del sito	k <sub>r</sub>	z <sub>0</sub> [m]	z <sub>min</sub> [m]
I	0,17	0,01	2
II	0,19	0,05	4
III	0,20	0,10	5
IV	0,22	0,30	8
V	0,23	0,70	12

Tabella 10.12

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Classe di rugosità del terreno	Descrizione
A	Aree urbane in cui almeno il 15% della superficie sia coperto da edifici la cui altezza media superi i 15m
B	Aree urbane (non di classe A), suburbane, industriali e boschive
C	Aree con ostacoli diffusi (alberi, case, muri, recinzioni.....); aree con rugosità non riconducibile alle classi A, B, D
D	Aree prive di ostacoli (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, zone paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate, mare, laghi.....)

L'assegnazione della classe di rugosità non dipende dalla conformazione orografica e topografica del terreno. Affinché una costruzione possa dirsi ubicata in classe A o B è necessario che la situazione che contraddistingue la classe permanga intorno alla costruzione per non meno di 1 km e comunque non meno di 20 volte l'altezza della costruzione. Laddove sussistano dubbi sulla scelta della classe di rugosità, a meno di analisi dettagliate, verrà assegnata la classe più sfavorevole.

Tabella 10.13

ZONE 1,2,3,4,5						
A	-	-	IV	IV	V	V
	-	-	III	III	IV	IV
B	-	-	*	III	III	IV
C	-	-	I	II	II	III
D	I	II	II	II	III	**
* Categoria II in zona 1,2,3,4 Categoria III in zona 5						
** Categoria III in zona 2,3,4,5 Categoria IV in zona 1						

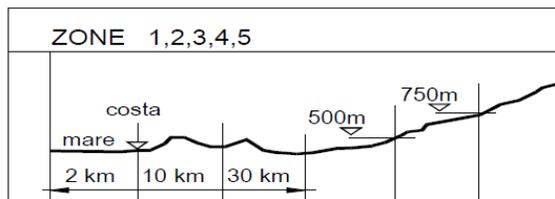


Tabella 10.14

- $c_p$  è il coefficiente di forma (o coefficiente aerodinamico), funzione della tipologia e della geometria della costruzione e del suo orientamento rispetto alla direzione del vento;

#### Travi isolate

$$c_p = 2 - \frac{4}{3} \varphi \quad \text{per } 0 \leq \varphi < 0,3$$

$$c_p = 1,6 \quad \text{per } 0,3 \leq \varphi \leq 0,8$$

$$c_p = 2,4 - \varphi \quad \text{per } 0,8 < \varphi \leq 1$$

Dove:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

$$\varphi = \frac{S_p}{S}$$

S = la superficie delimitata dal contorno della trave;

S<sub>p</sub> = la superficie della parte piena della trave;

### Travi multiple

Nel caso di più travi disposte parallelamente a distanza d non maggiore del doppio dell'altezza h, il valore della pressione sull'elemento successivo sarà pari a quello sull'elemento precedente moltiplicato per un coefficiente di riduzione dato da:

$$\mu = 1 - 1,2\varphi \quad \text{per } \varphi \leq \frac{2}{3}$$

$$\mu = 0,2 \quad \text{per } \varphi > \frac{2}{3}$$

Per  $d/h \geq 5$  gli elementi vengono considerati come isolati.

Per  $2 < d/h < 5$  si procede all'interpolazione lineare.

- $c_d$  è il coefficiente dinamico con cui si tiene conto degli effetti riduttivi associati alla non contemporaneità delle massime pressioni locali e degli effetti amplificativi dovuti alle vibrazioni strutturali. Valutabile dal grafico seguente, valido per ponti e viadotti:

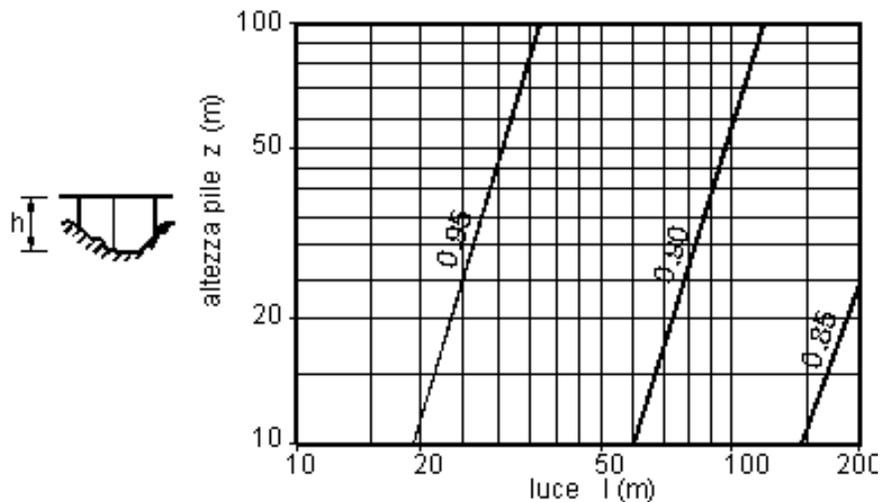


Figura 10.15

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Assumendo dunque come dati generali:

Zona	Zona	<b>4</b>	
Categoria di esposizione del sito	CT	<b>III</b>	
Altitudine del sito ove sorge la costruzione	as	<b>60.00</b>	m. s. l. m.
Altezza dal suolo della costruzione	z	<b>7.00</b>	m

Si ottiene:

#### Velocità di riferimento

vb,0	28	m/s	
a0	500	m	valori tabellari
Ka	0.02	1/s	
vb	<b>28</b>	m/s	velocità base di riferimento

#### Pressione cinetica di riferimento

qb **490.00** N/mq

#### Coefficiente di esposizione

kr	0.2		
z0	0.1	m	Valori tabellari
zmin	5	m	
ct	1		coefficiente di topografia
ce(z)	<b>1.912</b>		

#### Coefficiente di forma

LLtrave	<b>16.90</b>	(lunghezza totale trave)
TTsin	<b>2.00</b>	(lunghezza tratto di testata sinistro)
RRsin	<b>0.45</b>	(lunghezza tratto di rastremo sinistro)
RRdes	<b>0.45</b>	(lunghezza tratto di rastremo destro)
TTdes	<b>2.00</b>	(lunghezza tratto di testata destro)
Lcorr	<b>12.00</b>	(lunghezza tratto di sezione corrente)

S	21.6	mq
Sp	21.6	mq

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

$\varphi$         1.000  
 $c_p$         1.400

#### Coefficiente dinamico

$c_d$         1        Valore tabellare

#### Pressione del vento

$p_k$         1.31        KN/mq

Si ricava dunque una pressione pari a circa 1.31 kN/m<sup>2</sup>.

Considerando tale pressione, si ammette che questa si eserciti sull'altezza dell'impalcato e su un'ulteriore altezza pari a 3 metri misurata a partire dalla quota del piano viabile.

Valutando la condizione peggiore tra quella a ponte carico e quella a ponte scarico, si assume quella relativa al caso di ponte carico. Si ottiene così una risultante di carico sull'impalcato pari a 4.46 kN/m.

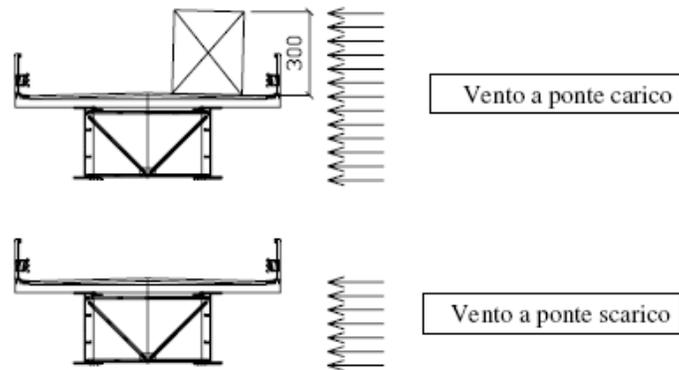


Figura 10.16

Poiché ci si trova nel caso di travi multiple, per quanto detto in precedenza questo carico si applica non solo sulle travi di bordo, ma si assume che agisca anche sulle altre, in base ad un coefficiente di riduzione pari a  $\mu=0.2$ . In base a questo, si ottiene per ogni trave la seguente ripartizione:

Trave	$F_{xi}$ (KN/m)
1	1.679
2	0.336
3	0.067
4	0.013
5	0.003
6	0.001

Tabella 10.17

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Queste azioni si considerano agenti direttamente sui singoli appoggi.

L'azione dovuta alla pressione del vento, se riportata nel baricentro delle travi, determina inoltre una coppia di trasporto sull'impalcato pari a  $M=10.93$  kNm/m, che di fatto viene applicata facendo agire su ogni trave delle forze verticali emisimmetriche rispetto alla mezzeria dell'impalcato, che complessivamente equivalgono a tale momento.

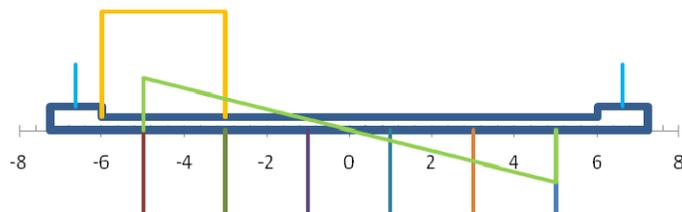


Figura 10.18

Per la determinazione dei valori delle singole forze da applicare a ciascuna trave si utilizzano i coefficienti di ripartizione di Courbon:

$$P_i = \pm (M x_i) / \sum_i x_i^2$$

in cui  $x_i$  è la distanza della trave  $i$ -esima dalla mezzeria dell'impalcato. Si ottengono in tal modo i seguenti carichi da applicare alle singole travi:

Trave	$P_i$ (kN/m)
1	<b>0.781</b>
2	<b>0.469</b>
3	<b>0.156</b>
4	<b>-0.156</b>
5	<b>-0.469</b>
6	<b>-0.781</b>

Tabella 10.19

Essendo l'impalcato perfettamente simmetrico sia come geometria che come carichi, il vento si è considerato spirante solo in una direzione. Nelle seguenti figure si riporta una sintesi di questa condizione di carico.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> <b>CZ0476_F0</b>	<i>Rev</i> <b>F0</b>	<i>Data</i> <b>20/06/2011</b>

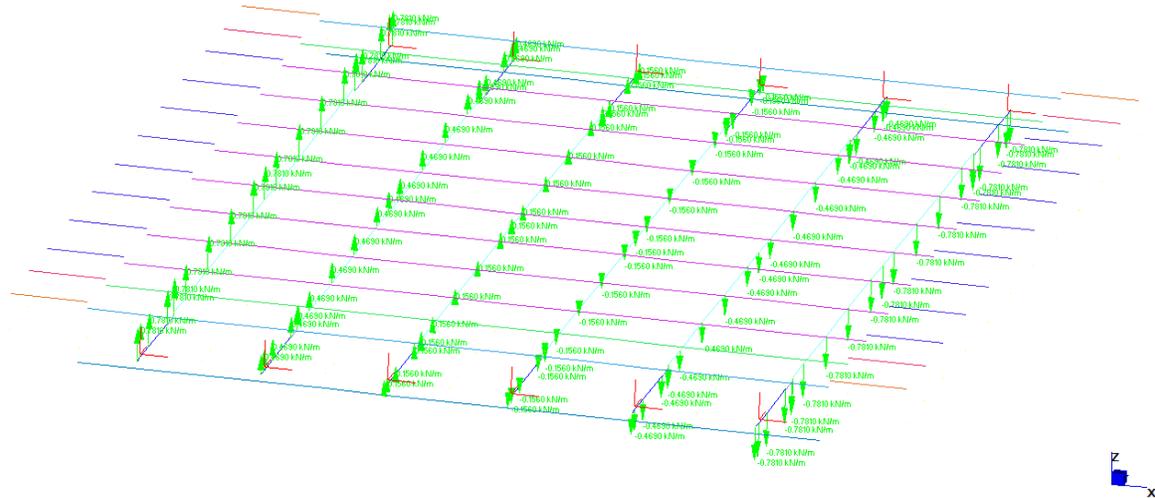


Figura 10.20 : Carichi da vento Q5 applicati nel modello

#### 10.4.5 Carichi mobili

I carichi mobili applicati al modello non sono quelli dettati dalla normativa, poiché, tenendo conto che i sovrappassi di progetto saranno destinati al transito di un carrello porta bobine del peso di 160 Ton, e visto il carattere eccezionale di tale carico, viene applicato quest'ultimo come carico mobile, ritenendo non necessario aggiungere ulteriori carichi.

Esso viene ripartito su 8 assi di 200 kN ciascuno, coincidenti con le ruote che costituiscono il mezzo, rispettivamente suddivisi in due gruppi distanti tra loro di 6 m.

Ciascun gruppo è costituito da 4 assi posti ad interasse di 1.50 m l'uno dall'altro. Si riporta di seguito l'immagine relativa a tale condizione di carico.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

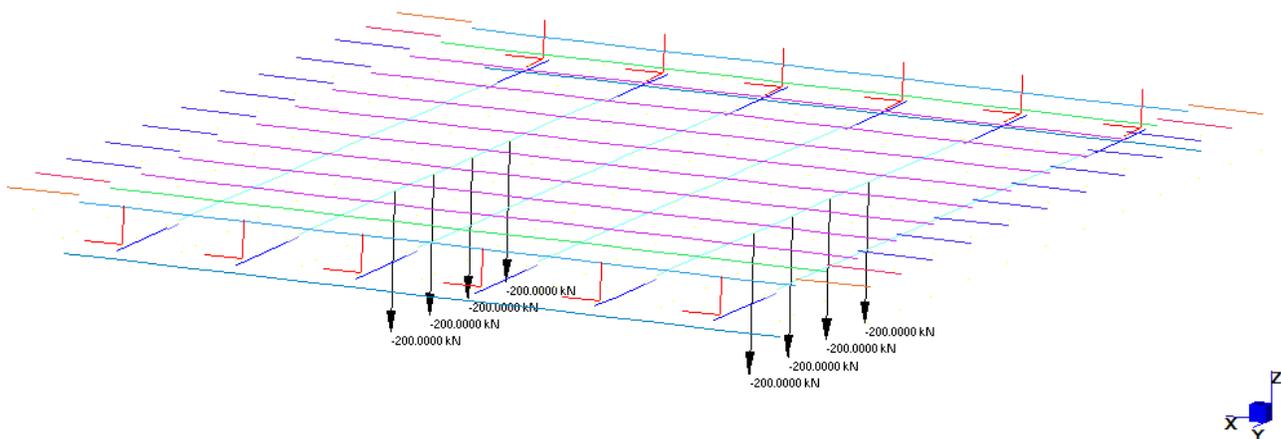


Figura 10.21 : Carichi mobili applicati nel modello

## 10.5 Verifica della trave

La precompressione delle travi dell'impalcato viene realizzata attraverso trefoli pre-tesi, ubicati nelle posizioni appresso specificate:

POS. 1 – n. 12 trefoli da 0.6" posti ad una  $\perp$  istanza di 5 cm dall'intradosso della trave;

POS. 2 – n. 12 trefoli da 0.6" posti a 10 cm dall'intradosso della trave;

POS. 3 – n. 2 trefoli da 0.6" posti a 118 cm dall'intradosso della trave;

POS. 4 – n. 4 trefoli da 0.6" posti a 123 cm dall'intradosso della trave.

La tensione iniziale di tesatura è di 1400 Mpa per i trefoli delle posizioni 1 e 2, mentre è di 1200 Mpa per le altre due posizioni. Tutti i trefoli della posizione 1 sono inoltre inguainati alle due estremità per un tratto pari a 1.50 m. L'area del singolo trefolo è di 139 mmq. La precompressione degli elementi avviene totalmente in stabilimento.

Nelle seguenti figure si riportano la sezione della trave con indicate le posizioni dei trefoli e la sezione corrente impiegata nella verifica, con la numerazione delle barre e dei cavi.

n.12+12+2+4 trefoli 0.6"

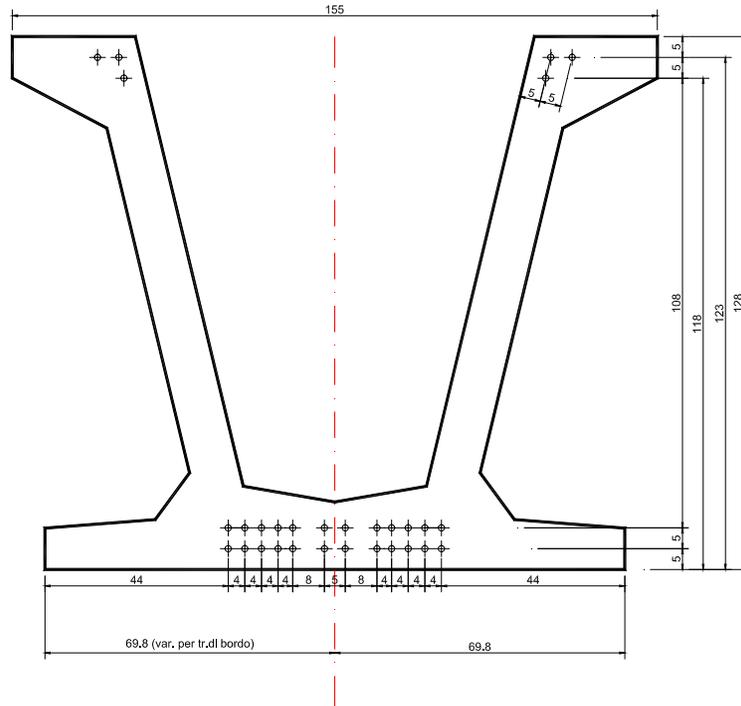


Figura 10.22

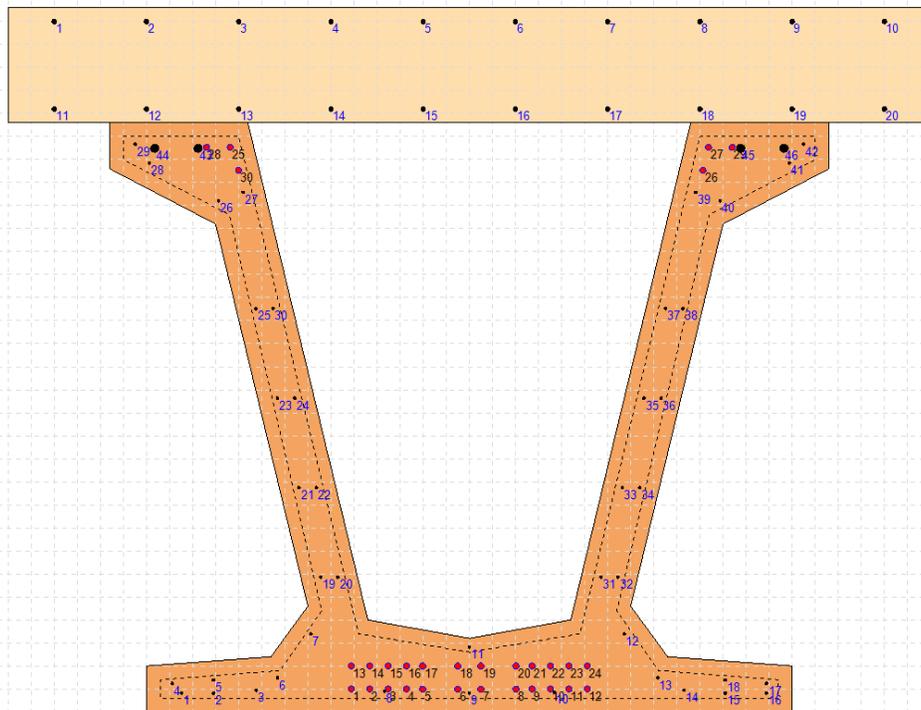


Figura 10.23

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 10.5.1 Ripartizione dei carichi sulla trave

Dopo aver effettuato il calcolo dell'intero impalcato, si vuole andare a verificare la resistenza delle travi alle varie caratteristiche di sollecitazione a cui esse sono soggette. E' necessario dunque scegliere la trave maggiormente caricata e sottoporre quest'ultima a verifica.

La verifica della trave viene condotta tenendo conto di tutte le otto fasi realizzative viste in precedenza, compresa quella in fase finale, quando cioè l'impalcato è soggetto all'azione dei carichi. A questo scopo è necessario tener conto della ripartizione dei carichi sulle singole travi effettuata dalla soletta e dai traversi di estremità. Dunque, in fase di verifica della singola trave, bisogna applicare ad essa, per ogni condizione di carico, un carico equivalente che determini un momento analogo a quello che le compete quando si effettua il calcolo dell'intero impalcato.

Tutto ciò non vale per il peso proprio, in quanto esso viene valutato direttamente dal software di verifica della trave in c.a.p..

Si è scelto di verificare la trave immediatamente adiacente a quella di bordo, che, essendo direttamente soggetta all'azione dei carichi mobili, è sottoposta ad un momento flettente maggiore, come si evince dall'immagine di seguito riportata, in cui vengono riportati i momenti flettenti che si hanno per effetto di tali carichi.

	MIN	MAX
BM2(kN.m)	-99.2697	1165.3692
	[Bm.250]	[Bm.29]

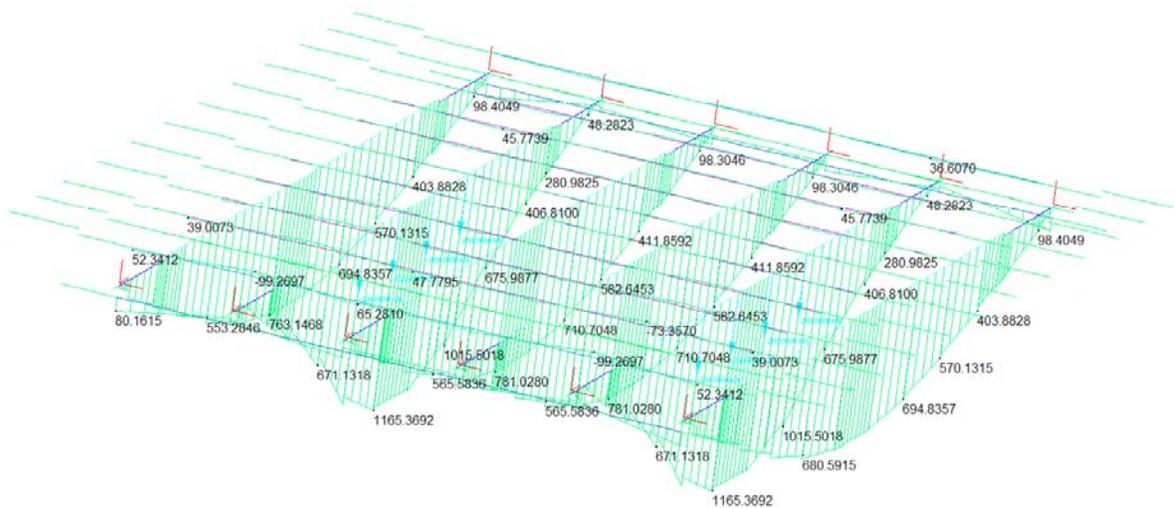


Figura 10.24 : Diagramma dei momenti per carichi mobili

Assumendo quindi un momento di 1165.37 kNm, il carico che produce sulla trave un momento equivalente ad esso e dunque da applicare sulla trave consiste in quattro assi da 86.70 kN. Tali

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

carichi vengono applicati una volta in campata, per massimizzare il momento flettente, e una volta all'appoggio, per massimizzare il taglio.

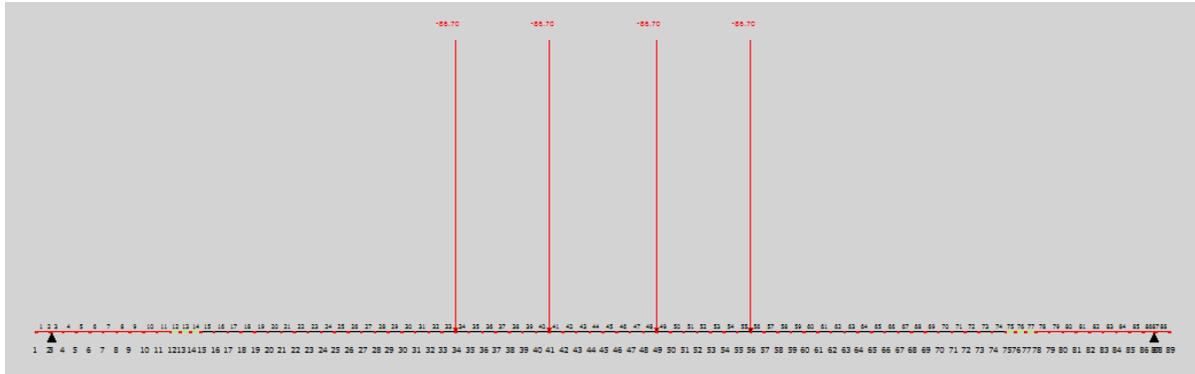


Figura 10.25 : Carichi mobili equivalenti applicati sulla trave in campata

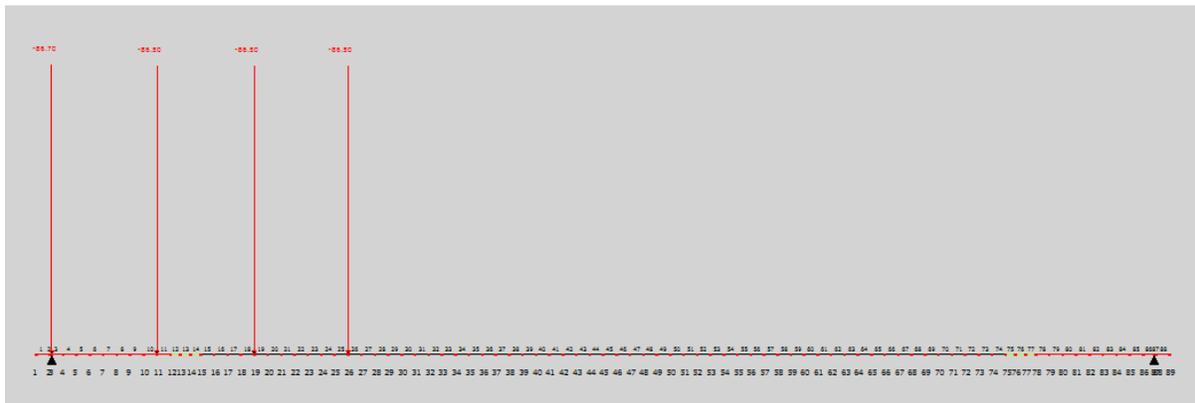


Figura 10.26 : Carichi mobili equivalenti applicati sulla trave all'appoggio

In corrispondenza della stessa trave si valuta poi il momento prodotto dai permanenti portati G2, e si determina il carico corrispondente da applicare sulla trave.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

	MIN	MAX
BM2(kN.m)	-23.2291	245.1714
[Bm.119]	[Bm.11]	

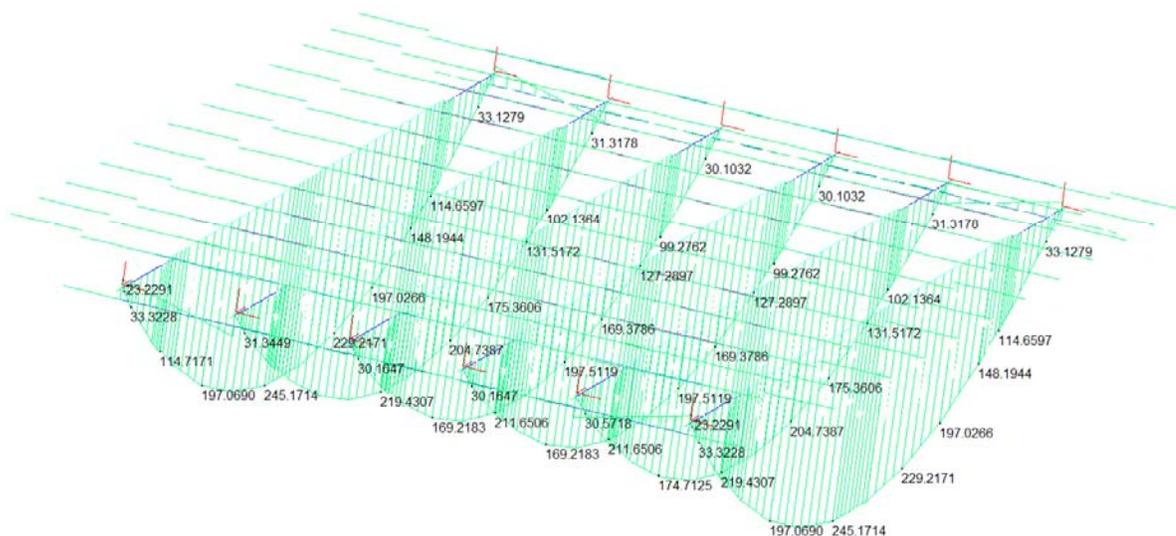


Figura 10.27 : Diagramma dei momenti per carichi permanenti portati G2

Avendo un momento di 219.43 kNm, si determina il carico che produce sulla trave un momento equivalente ad esso e dunque da applicare sulla trave. Questo sarà pari a 6.50 kN/m.

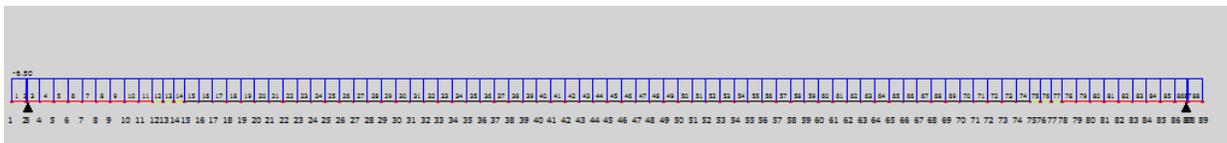


Figura 10.28 : Carichi permanenti portati G2 applicati sulla trave

Le sollecitazioni prodotte dall'azione del vento sono invece di modesta entità, e quindi si ritiene plausibile la possibilità di trascurare il loro effetto.

### 10.5.2 Combinazioni di carico

Il codice utilizzato per le verifiche della trave in cap tiene conto delle diverse fasi attraversate dalla trave durante la realizzazione dell'impalcato, e che influiscono sui parametri che ne caratterizzano i materiali. Tali fasi sono riportate nel paragrafo 10.2.

Per ognuna di queste fasi il programma individua le caratteristiche dei materiali, tenendo conto della loro diversità nel passaggio da una fase all'altra. In particolare la variabilità nel tempo dei

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

moduli elastici e delle resistenze di progetto viene esplicitata da opportuni grafici, come mostrato nell'immagine seguente.

### PROPRIETA' CLS(t) - RESISTENZA

*Simbologia adottata*

t = Tempo di misura

$\Delta t$  = Età del calcestruzzo al tempo di misura

$\beta_{cc}(\Delta t)$  = Coefficiente di riduzione

$E_{cm}(\Delta t)$  = Modulo elastico

$f_{cm}(\Delta t)$  = Resistenza media cilindrica a compressione

$f_{ck}(\Delta t)$  = Resistenza caratteristica cilindrica a compressione

$f_{ckj}$  = Resistenza caratteristica cilindrica a compressione

$f_{cdj}$  = Resistenza di progetto a compressione

$\alpha$  = Esponente per il calcolo di  $f_{ctm}(\Delta t)$

$f_{ct}(\Delta t)$  = Resistenza media cilindrica a trazione

$f_{ctj}$  = Resistenza caratteristica cilindrica a trazione

$f_{ctdj}$  = Resistenza di progetto a trazione semplice

$f_{cfdj}$  = Resistenza di progetto a trazione per flessione

### Calcestruzzo TRAVE: CLS TRAVE

FASE N°	t [gg] MPa]	$\Delta t$ [gg]	$\beta_{cc}(t)$	$E_{cm}(t)$ [MPa]	$f_{cm}(t)$ [MPa]	$f_{ck}(t)$ [MPa]	$f_{ckj}$ [MPa]	$f_{cdj}$ [MPa]	$\alpha$	$f_{ct}(t)$ [MPa]	$f_{cmj}$ [MPa]	$f_{ctdj}$ [MPa]
1	4 2.03	4	0.66	32188	35.55	27.55	27.55	15.61	1.00	2.54	2.54	1.69
2	5 2.18	5	0.71	32869	38.13	30.13	30.13	17.07	1.00	2.72	2.72	1.82
3	6 2.29	6	0.75	33381	40.14	32.14	32.14	18.21	1.00	2.87	2.87	1.91
4	15 2.80	15	0.91	35429	48.96	40.96	40.96	23.21	1.00	3.50	3.50	2.33
5	30 3.07	30	1.01	36509	54.11	46.11	45.65	25.87	0.67	3.85	3.83	2.55
6	36 3.07	36	1.03	36740	55.26	47.26	45.65	25.87	0.67	3.91	3.83	2.55

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>			
		<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>	<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

7	40	40	1.04	36865	55.89	47.89	45.65	25.87	0.67	3.94	3.83	2.55
	3.07											
8	46	46	1.06	37021	56.68	48.68	45.65	25.87	0.67	3.97	3.83	2.55
	3.07											
9	60	60	1.08	37292	58.07	50.07	45.65	25.87	0.67	4.04	3.83	2.55
	3.07											
10	30000	30000	1.27	39163	68.36	60.36	45.65	25.87	0.67	4.50	3.83	2.55
	3.07											

**Calcestruzzo SOLETTA: CLS SOLETTA**

FASE N°	t fcdj [gg] [MPa]	Δt [gg]	βcc(t)	Ecm(t) [MPa]	fcm(t) [MPa]	fck(t) [MPa]	fckj [MPa]	fcdj [MPa]	α	fct(t) [MPa]	fcmj [MPa]	fctdj [MPa]
8	46	1	0.34	24384	14.09	6.09	6.09	3.45	1.00	1.06	1.06	0.71
	0.85											
9	60	15	0.91	32731	37.60	29.60	29.60	16.77	1.00	2.83	2.83	1.89
	2.26											
10	30000	29955	1.27	36180	52.50	44.50	33.20	18.81	0.67	3.64	3.10	2.07
	2.48											

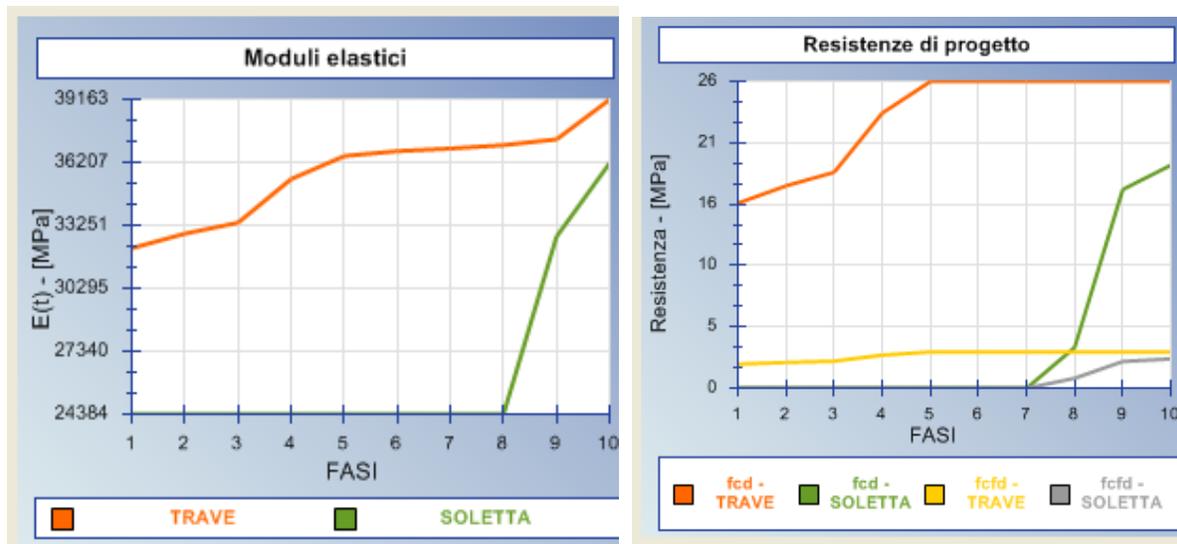


Figura 10.29

Tendo conto di queste fasi, è possibile definire le diverse combinazioni di carico agli stati limite ultimi e di esercizio:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA		Codice documento CZ0476_F0	Rev F0	Data 20/06/2011

	F2.SLU	F3.SLU	F4.SLU	F5.SLU	F6.SLU	F7.SLU	F8.SLU	F9.SLU	F2.SLE	F3.SLE
► FASE	2	3	4	5	6	7	8	9	2	3
VERIFICA	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
PRECOMPRESSIONE	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PP TRAVE	1.35	1.62	1.35	1.62	1.35	1.35	1.35	1.35	1	1.2
PP SOLETTA	0	0	0	0	0	1.35	1.35	1.35	0	0
PESO FINITURE	0	0	0	0	0	0	0	1.35	0	0
CARICHI MOBILI CAMPATA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CARICHI MOBILI APPOGGIO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabella 10.30

F4.SLE	F5.SLE	F6.SLE	F7.SLE	F8.SLE	F9.SLE	F10.SLU 1	F11.SLU 2	F12.SLE 1	F12.SLE 2
4	5	6	7	8	9	10	10	10	10
2	2	2	2	2	2	1	1	2	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1.2	1	1	1	1	1.35	1.35	1	1
0	0	0	1	1	1	1.35	1.35	1	1
0	0	0	0	0	1	1.35	1.35	1	1
0	0	0	0	0	0	1.35	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	1.35	0	1

Tabella 10.31

### 10.5.3 Parametri principali di calcolo della trave in CAP

#### GEOMETRIA IMPALCATO

Lunghezza travi in proiezione orizzontale	= [m] 16.90
Numero travi	= 6
Interasse tra le travi	= [m] 2.00
Larghezza carreggiata	= [m] 12.00
Larghezza cordolo sinistro	= [m] 1.25
Larghezza cordolo destro	= [m] 1.25
Altezza cordolo sinistro	= [m] 0.45
Altezza cordolo destro	= [m] 0.45
Spessore soletta	= [m] 0.25
Larghezza soletta collaborante	= [m] 2.00
Lunghezza testata sinistra	= [m] 2.00 - Cassero n°:5
Lunghezza rastremo sinistro	= [m] 0.45 - Cassero n°:4
Lunghezza svasatura sinistra	= [m] 0.00
Lunghezza tratto corrente	= [m] 12.00 - Cassero n°:3
Lunghezza svasatura destra	= [m] 0.00
Lunghezza rastremo destro	= [m] 0.45 - Cassero n°:4
Lunghezza testata destra	= [m] 2.00 - Cassero n°:5

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: center;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

## VINCOLI

Rilascio sinistro	= [m] 0.00
Rilascio destro	= [m] 0.00
Sollevamento sinistro	= [m] 0.23
Sollevamento destro	= [m] 0.23
Stoccaggio sinistro	= [m] 0.23
Stoccaggio destro	= [m] 0.23
Trasporto sinistro	= [m] 0.23
Trasporto destro	iniz. ralla = [m] 0.23    fin. ralla = [m] 0.23
Esercizio sinistro	= [m] 0.23
Esercizio destro	= [m] 0.23

## PARAMETRI GENERALI DI CALCOLO

Numero sezioni trave	= 89
Mesh trave automatica: densità	= [m] 0.2

### Verifiche tensionali:

Ampiezza strisce per le verifiche tensionali della trave	= [cm] 1
Ampiezza strisce per le verifiche tensionali della soletta	= [cm] 1
Numero massimo di iterazioni	= 100
Tolleranza	= 1E-05

### Aderenza armature di precompressione:

Lunghezza di aderenza: [diametri] 70

*Nel tratto di aderenza l'ancoraggio ha andamento lineare*

### Calcolo domini di resistenza:

Fattore di interpolazione:	= 3
Fattore di sicurezza calcolato a N costante	
Legame costitutivo adottato per il calcestruzzo:	PARABOLA - RETTANGOLO
Legame costitutivo adottato per l'armatura ordinaria:	ELASTO-PLASTICO
Legame costitutivo adottato per l'armatura di precompressione:	BILINEARE

### Parametri di verifica a deformazione:

Fattore di aderenza acciaio-clc:  $\beta_1 = 1$   
Fattore di fluage:  $\beta_2 = 0.5$

### Parametri di verifica a taglio:

Inclinazione massima bielle:  $\text{Cotg}\theta = 2.5$   
Coeff. di riduzione resistenza cls d'anima:  $v_1 = 0.5$   
Coprifermo nominale:  $c' = [\text{cm}] 3$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

#### 10.5.4 Sollecitazioni per combinazioni allo SLU

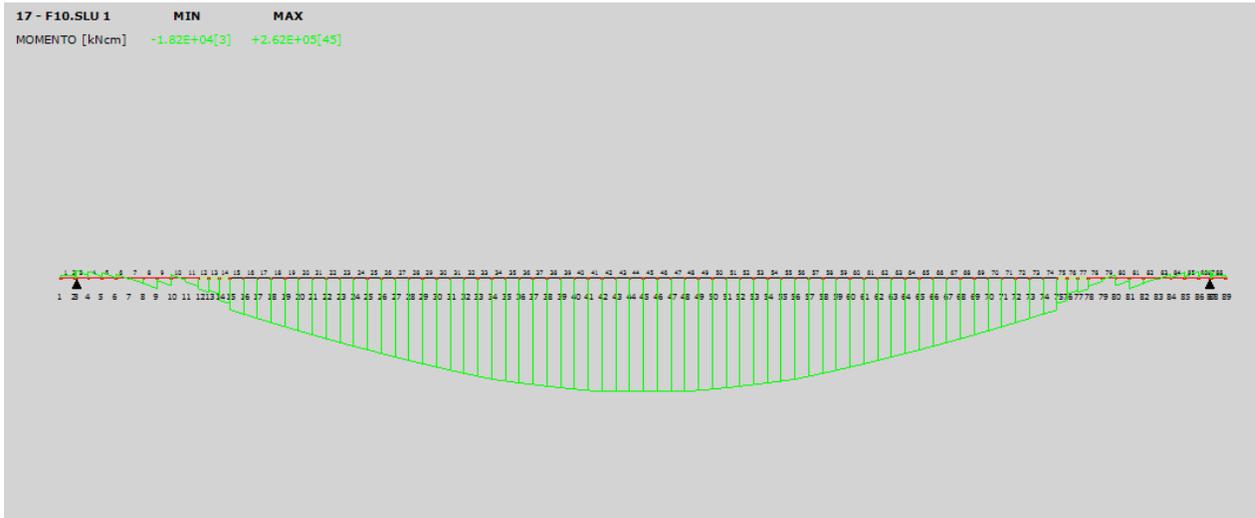


Figura 10.32 : Momento flettente per la combinazione F10.SLU 1

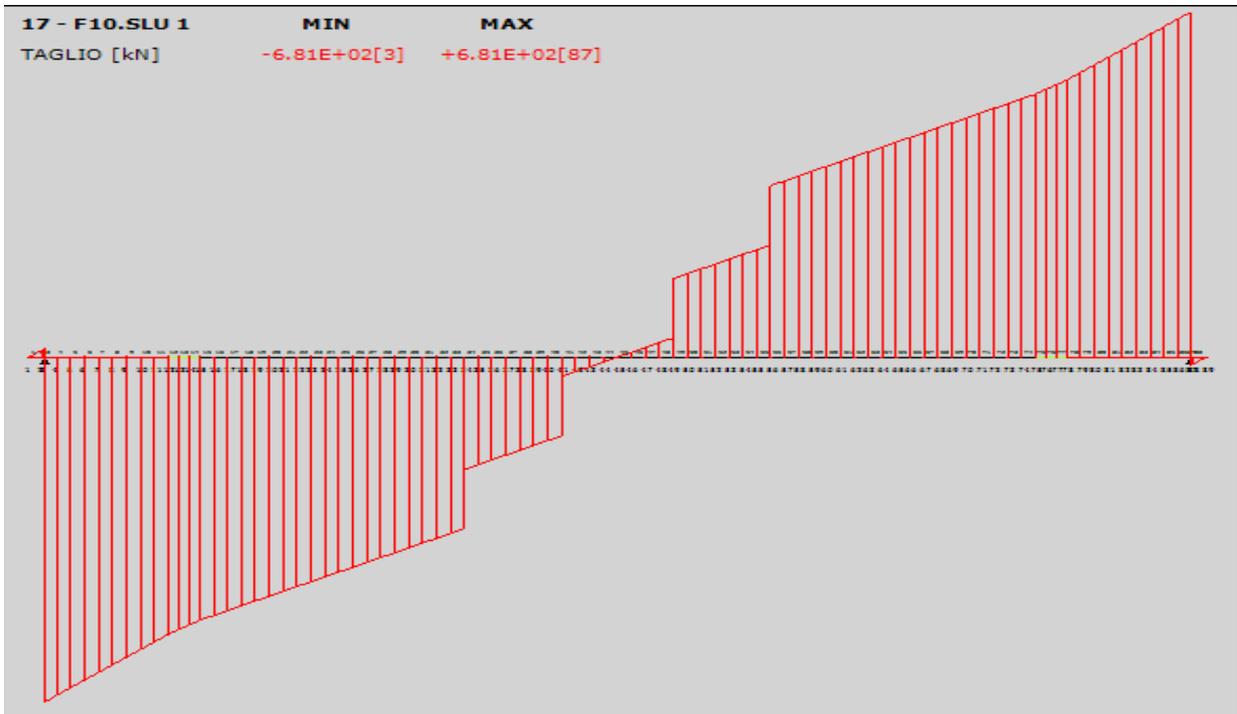


Figura 10.33 : Taglio per la combinazione F10.SLU 1

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0 <i>Data</i> 20/06/2011

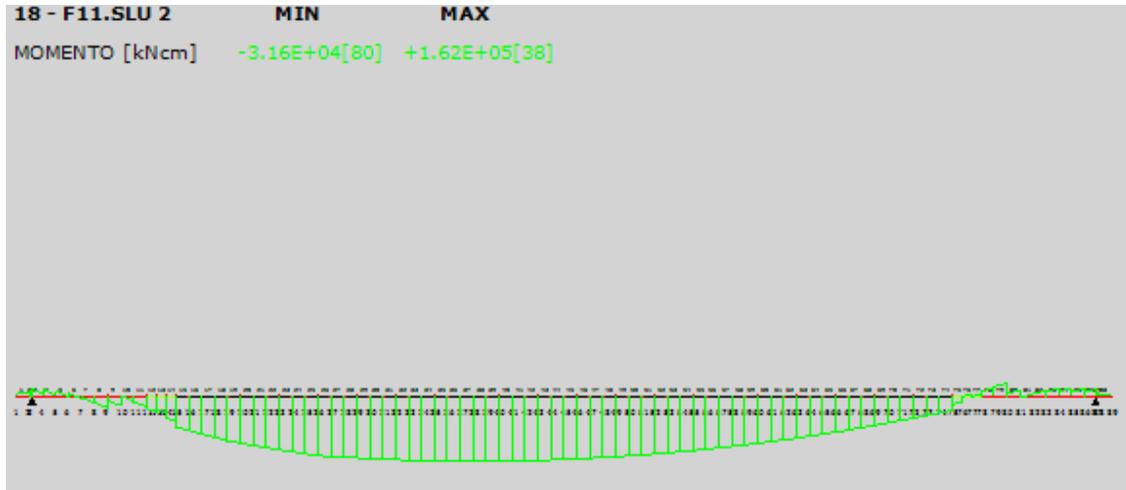


Figura 10.34 : Momento flettente per la combinazione F11.SLU 2

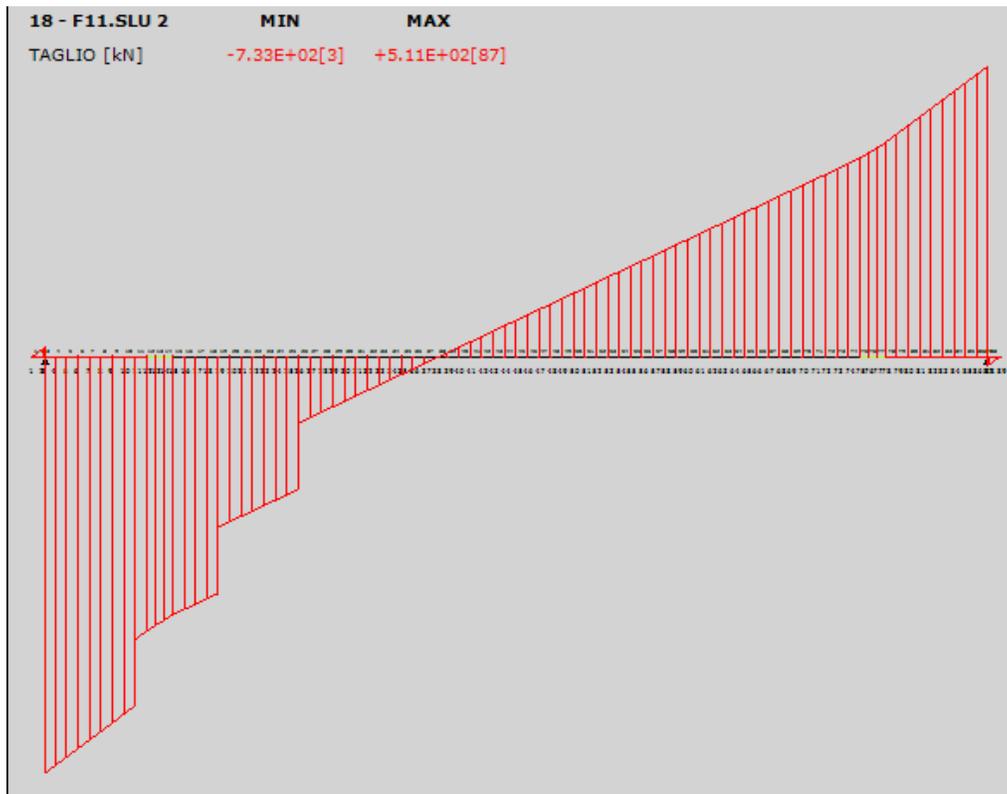


Figura 10.35 : Taglio per la combinazione F11.SLU 2

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 10.5.5 Verifiche allo SLU

Si riportano di seguito le verifiche allo SLU che vengono effettuate per pressoflessione e taglio. Le verifiche sono state effettuate per tutte le fasi di calcolo, ma in questo contesto vengono riportati solo i risultati ottenuti per l'ultima fase, la 10, cioè quella in cui la trave è sottoposta all'azione dei carichi esterni. Si rimanda ai tabulati di calcolo per i risultati delle verifiche in tutte le fasi precedenti.

#### VERIFICA A PRESSOFLESSIONE: SEZIONE IN CAMPATA – COMB.F10

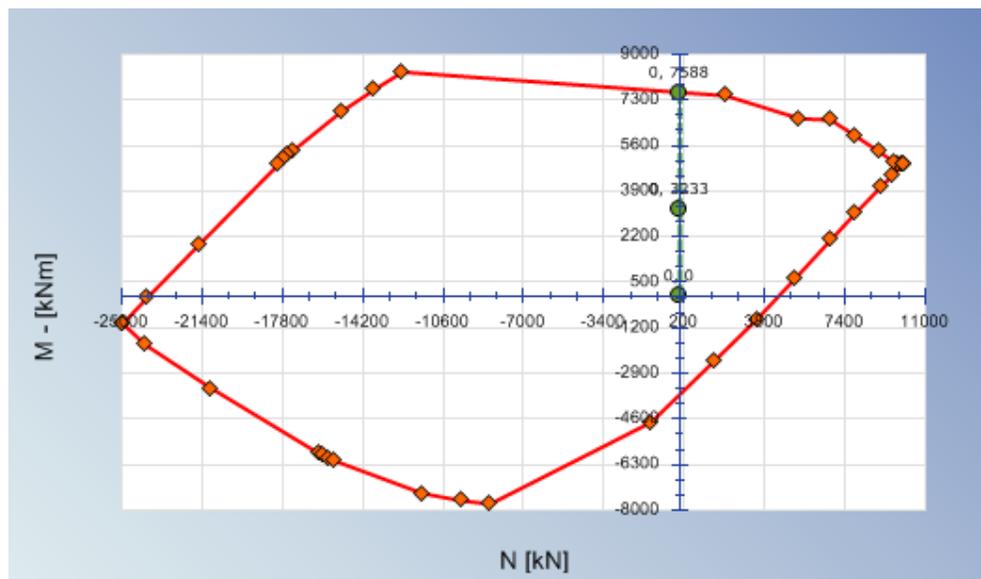


Figura 10.36

#### VERIFICA A PRESSO-TENSO FLESSIONE - SEZIONE [45] x = 8.45 m

-----  
Combinazione: F10.SLU 1 - Fase: 10 - Permanenti + accidentali di III fase

Azioni sollecitanti rispetto agli assi principali d'inerzia:

\* Momento dovuto ai soli carichi esterni:  $M = 3233.41 \text{ kNm}$

\* Sforzo normale dovuto ai soli carichi esterni:  $N = 0.00 \text{ kN}$

- SEZIONE PARZIALIZZATA -

Ordinata asse neutro:  $Y_n = 1.43E+2 \text{ cm}$

Azioni resistenti a rottura rispetto agli assi principali d'inerzia:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

\* Momento ultimo:  $M_u = 7588.26 \text{ kNm}$

\* Sforzo normale ultimo:  $N_u = 0.00 \text{ kN}$

Fattore di sicurezza a N costante: 2.35

### VERIFICA POSITIVA

#### VERIFICA A PRESSO-TENSO FLESSIONE: SEZIONE IN CAMPATA – COMB.F11

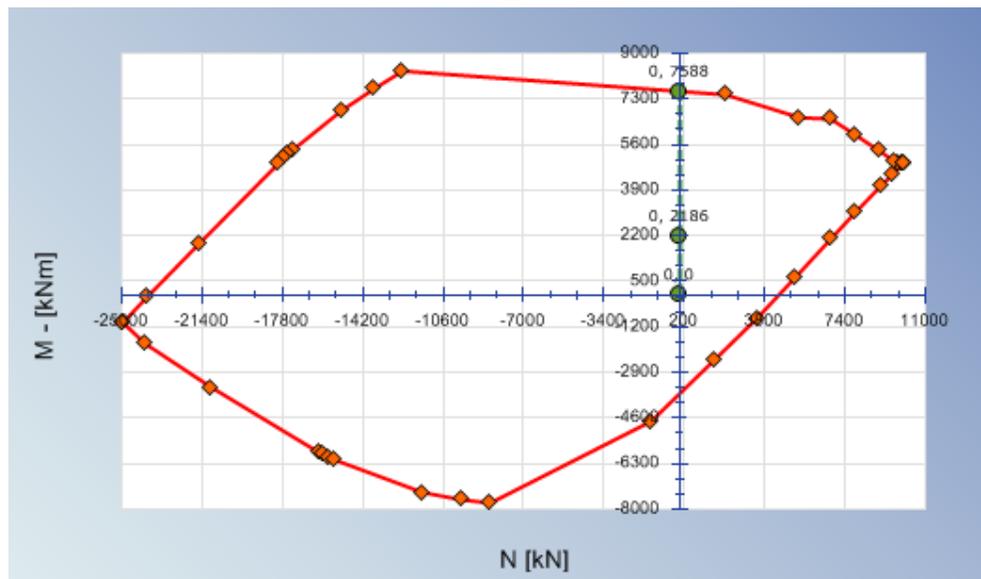


Figura 10.37

#### VERIFICA A PRESSO-TENSO FLESSIONE - SEZIONE [45] x = 8.45 m

-----  
Combinazione: F11.SLU 2 - Fase: 10 - Permanenti + accidentali di III fase

Azioni sollecitanti rispetto agli assi principali d'inerzia:

\* Momento dovuto ai soli carichi esterni:  $M = 2186.40 \text{ kNm}$

\* Sforzo normale dovuto ai soli carichi esterni:  $N = 0.00 \text{ kN}$

- SEZIONE PARZIALIZZATA -

Ordinata asse neutro:  $Y_n = 1.43E+2 \text{ cm}$

Azioni resistenti a rottura rispetto agli assi principali d'inerzia:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

\* Momento ultimo:  $M_u = 7588.26 \text{ kNm}$

\* Sforzo normale ultimo:  $N_u = 0.00 \text{ kN}$

Fattore di sicurezza a N costante: 3.47

VERIFICA POSITIVA

### VERIFICA AL TAGLIO: SEZIONE ALL'APPOGGIO – COMB.F10

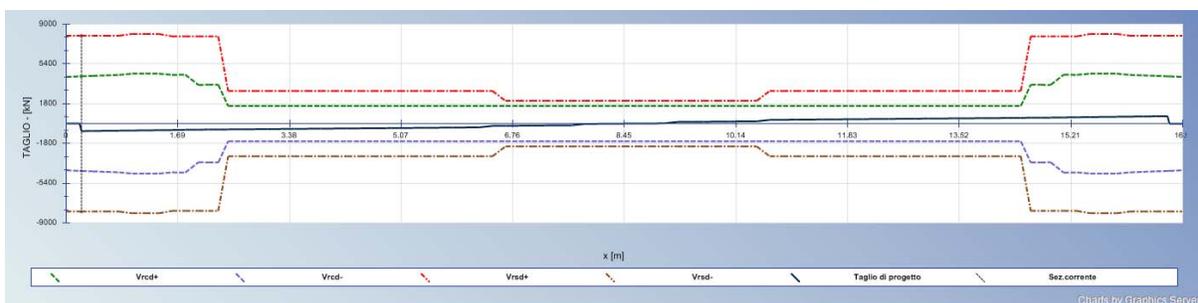


Figura 10.38

### VERIFICA A TAGLIO - SEZIONE [3]

Ascissa di calcolo:  $x = 0.23 \text{ m}$

Combinazione: n° 17

Fase costruttiva: 10 - Permanenti + accidentali di III fase

Altezza utile:  $d = 150.00 \text{ cm}$

Taglio di progetto:  $V_{Ed} = -680.62 \text{ kN}$

Larghezza minima della sezione:  $b_w = 70.24 \text{ cm}$

Resistenza di calcolo a compressione:  $f_{cd} = 2.59E+1 \text{ MPa}$

Coefficiente riduttivo della resistenza:  $v_1 = 0.5$

Tensione di snervamento staffe:  $f_{syd} = 3.91E+2 \text{ MPa}$

Forza di precompressione:  $N_p = 581.33 \text{ kN}$

Area della sezione di cls:  $A_c = 17109.21 \text{ cm}^2$

Tensione media di compressione:  $\sigma_{cp} = -3.40E-1 \text{ MPa}$

Coefficiente maggiorativo:  $\alpha_c = 1.0131$

Area staffe a metro:  $A_{sw/s} = 60.32 \text{ cm}^2/\text{m}$

Cotangente dell'angolo Theta:  $\text{Cotg}\theta = 2.5000$

### ROTTURA PER TAGLIO-COMPRESSIONE:

$$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot \text{ctg}\theta / (1 + \text{ctg}\theta^2) = 4284.81 \text{ kN}$$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

ROTTURA PER TAGLIO-TRAZIONE:

$$VR_{sd} = 0,9 \cdot d \cdot A_{sw/s} \cdot f_{syd} \cdot ctg\theta = 7965.99 \text{ kN}$$

$$VEd \leq \min(VR_{sd}, VR_{cd}) \Rightarrow \text{VERIFICA POSITIVA (Fs = 6.30)}$$

VERIFICA AL TAGLIO: SEZIONE ALL'APPOGGIO – COMB.F11

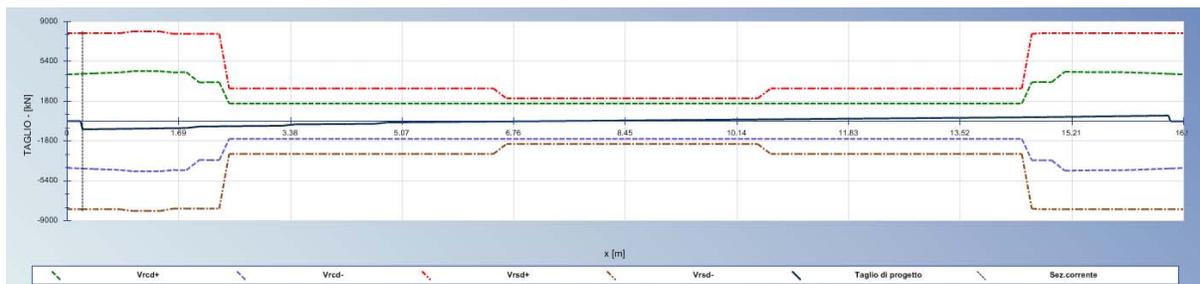


Figura 10.39

VERIFICA A TAGLIO - SEZIONE [3]

Ascissa di calcolo:  $x = 0.23 \text{ m}$

Combinazione: n° 18

Fase costruttiva: 10 - Permanenti + accidentali di III fase

Altezza utile:  $d = 150.00 \text{ cm}$

Taglio di progetto:  $VEd = -732.85 \text{ kN}$

Larghezza minima della sezione:  $b_w = 70.24 \text{ cm}$

Resistenza di calcolo a compressione:  $f_{cd} = 2.59E+1 \text{ MPa}$

Coefficiente riduttivo della resistenza:  $v_1 = 0.5$

Tensione di snervamento staffe:  $f_{syd} = 3.91E+2 \text{ MPa}$

Forza di precompressione:  $N_p = 581.33 \text{ kN}$

Area della sezione di cls:  $A_c = 17109.21 \text{ cm}^2$

Tensione media di compressione:  $\sigma_{cp} = -3.40E-1 \text{ MPa}$

Coefficiente maggiorativo:  $\alpha_c = 1.0131$

Area staffe a metro:  $A_{sw/s} = 60.32 \text{ cm}^2/\text{m}$

Cotangente dell'angolo Theta:  $Cotg\theta = 2.5000$

ROTTURA PER TAGLIO-COMPRESSIONE:

$$VR_{cd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot ctg\theta / (1 + ctg\theta^2) = 4284.81 \text{ kN}$$

ROTTURA PER TAGLIO-TRAZIONE:

$$VR_{sd} = 0,9 \cdot d \cdot A_{sw/s} \cdot f_{syd} \cdot ctg\theta = 7965.99 \text{ kN}$$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

$V_{Ed} \leq \min(VR_{sd}, VR_{cd}) \Rightarrow$  VERIFICA POSITIVA ( $F_s = 5.85$ )

### 10.5.6 Verifiche allo SLE

Si riportano di seguito le verifiche allo SLE che vengono effettuate relativamente allo stato tensionale e a quello de formativo in alcune delle fasi maggiormente significative, vale a dire il rilascio dei trefoli(fase 2), la messa in opera della trave(fase 6), e la fase finale in cui agiscono i carichi esterni. Si omettono invece le verifiche alla fessurazione in quanto, come si vedrà successivamente, la trave risulta sottoposta a trazione solo in alcuni punti, e in ogni caso la tensione normale di trazione nella fibra più sollecitata risulta inferiore al valore limite di formazione delle fessure, per il quale la normativa fissa il valore  $\sigma_t = f_{ctm}/1.2$ .

#### VERIFICA TENSIONALE IN FASE 2: RILASCIO ARMATURE – SEZIONE IN CAMPATA

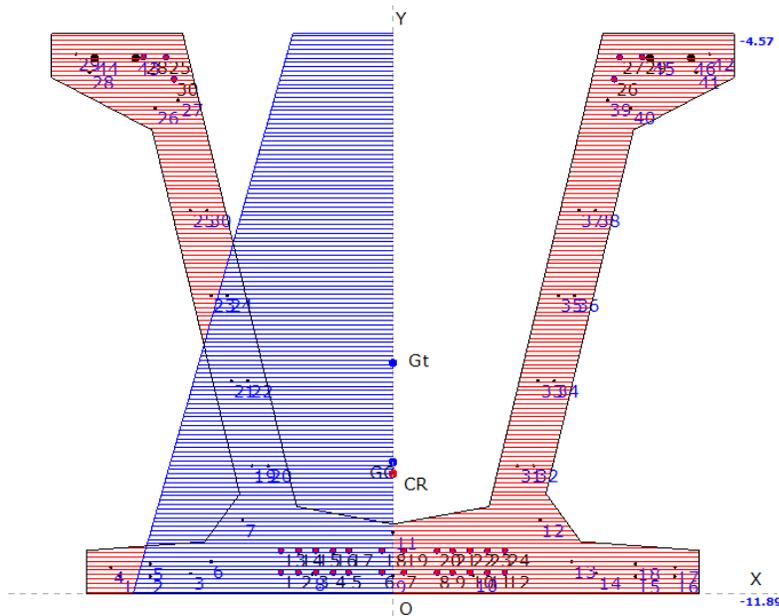


Figura 10.40 : Diagramma delle tensioni sulla sezione in mezzera

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

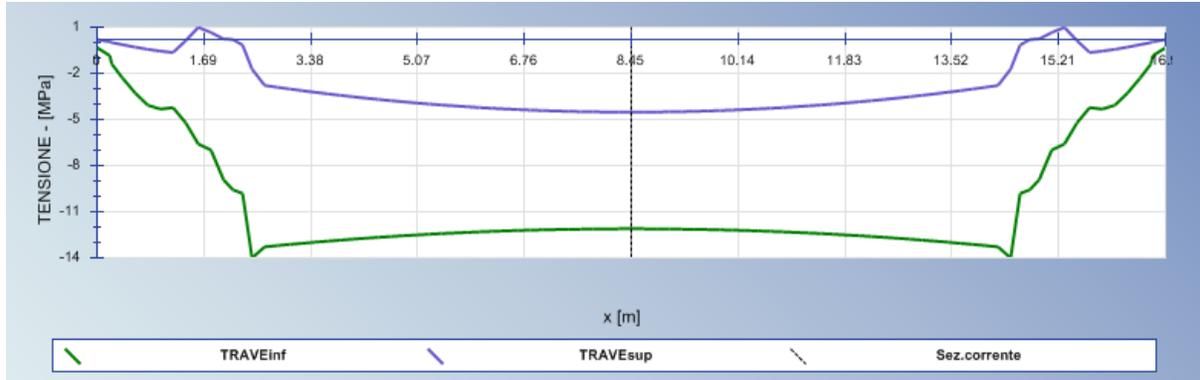


Figura 10.41 : Andamento delle tensioni lungo la trave

#### VERIFICA TENSIONALE - SEZIONE [45] x = 8.45 m

Combinazione: F2.SLE - Fase: 2 - Rilascio armature di precompressione

Azioni sollecitanti rispetto agli assi principali d'inerzia:

- \* Azione assiale di precompressione:  $N_p = -5254.54$  kN
- \* Momento di precompressione:  $M_p = -1330.42$  kNm
- \* Sforzo normale di progetto:  $N = -5254.53$  kN
- \* Momento flettente di progetto:  $M = -704.30$  kNm

Tensioni nel calcestruzzo:

- \* Tensione inf. trave:  $\sigma_{inf} = -11.89$  MPa
- \* Tensione sup. trave:  $\sigma_{sup} = -4.57$  MPa

$\sigma_{inf} \leq 0.7f_{ckj}$  - VERIFICA POSITIVA

$\sigma_{sup} \leq 0.7f_{ckj}$  - VERIFICA POSITIVA

Tensioni armatura ordinaria trave:

- \* Tensione massima:  $\sigma_{st\_max} = -30.65$  MPa ( 46 )
- \* Tensione minima:  $\sigma_{st\_min} = -73.03$  MPa ( 1 )

$\sigma_{st\_max} \leq 0.8f_{syk}$  - VERIFICA POSITIVA

Tensioni armatura di precompressione:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA	<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

\* Tensione massima:  $\sigma_{p\_max} = 1221.40 \text{ MPa}$  ( 24 )

\* Tensione minima:  $\sigma_{p\_min} = 1118.75 \text{ MPa}$  ( 30 )

$\sigma_{p\_max} \leq \min(0.85f_p(1)k, 0.75f_{ptk})$  - VERIFICA TREFOLO/TRECCIA POSITIVA

### VERIFICA TENSIONALE IN FASE 2: RILASCIO ARMATURE – SEZIONE ALL'APPOGGIO

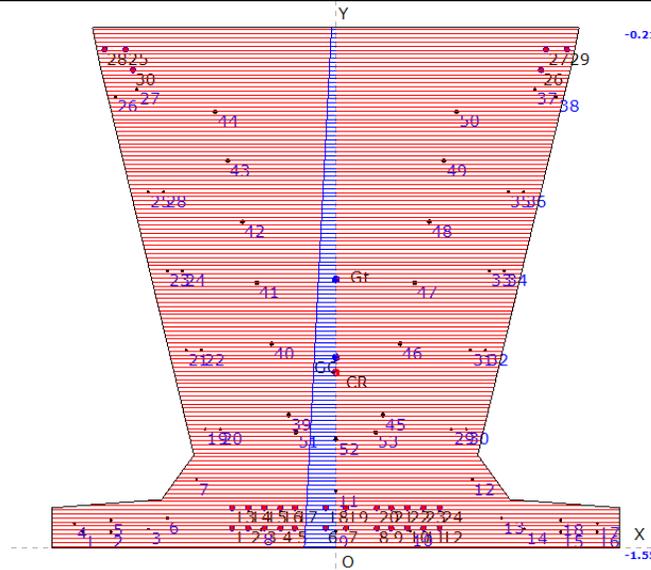


Figura 10.42 : Diagramma delle tensioni sulla sezione all'appoggio

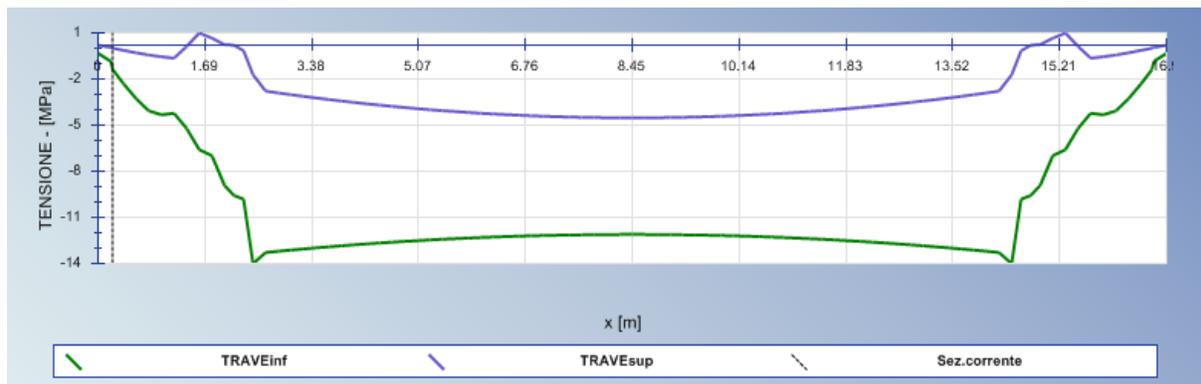


Figura 10.43 : Andamento delle tensioni lungo la trave

### VERIFICA TENSIONALE - SEZIONE [3] $x = 0.23 \text{ m}$

Combinazione: F2.SLE - Fase: 2 - Rilascio armature di precompressione

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Azioni sollecitanti rispetto agli assi principali d'inerzia:

- \* Azione assiale di precompressione:  $N_p = -809.44 \text{ kN}$
- \* Momento di precompressione:  $M_p = -184.97 \text{ kNm}$
- \* Sforzo normale di progetto:  $N = -1106.07 \text{ kN}$
- \* Momento flettente di progetto:  $M = -211.86 \text{ kNm}$

Tensioni nel calcestruzzo:

- \* Tensione inf. trave:  $\sigma_{t\_inf} = -1.55 \text{ MPa}$
- \* Tensione sup. trave:  $\sigma_{t\_sup} = -0.21 \text{ MPa}$

$\sigma_{t\_inf} \leq 0.7f_{ckj}$  - VERIFICA POSITIVA

$\sigma_{t\_sup} \leq 0.7f_{ckj}$  - VERIFICA POSITIVA

Tensioni armatura ordinaria trave:

- \* Tensione massima:  $\sigma_{st\_max} = -7.82 \text{ MPa}$  ( 53 )
- \* Tensione minima:  $\sigma_{st\_min} = -9.43 \text{ MPa}$  ( 1 )

$\sigma_{st\_max} \leq 0.8f_{syk}$  - VERIFICA POSITIVA

Tensioni armatura di precompressione:

- \* Tensione massima:  $\sigma_{p\_max} = 1361.46 \text{ MPa}$  ( 24 )
- \* Tensione minima:  $\sigma_{p\_min} = -39.25 \text{ MPa}$  ( 30 )

$\sigma_{p\_max} \leq \min(0.85f_{p(1)k}, 0.75f_{ptk})$  - VERIFICA TREFOLO/TRECCIA POSITIVA

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA		Codice documento CZ0476_F0	Rev F0	Data 20/06/2011

**VERIFICA TENSIONALE IN FASE 6: MESSA IN OPERA TRAVE – SEZIONE IN CAMPATA**

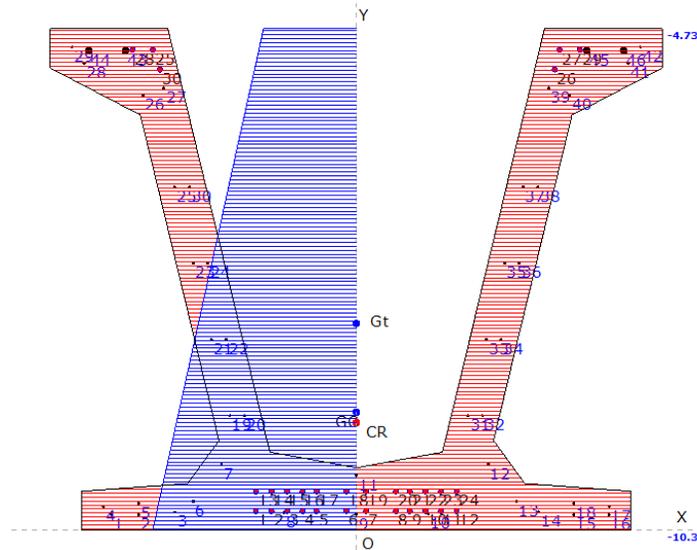


Figura 10.44 : Diagramma delle tensioni sulla sezione in campata

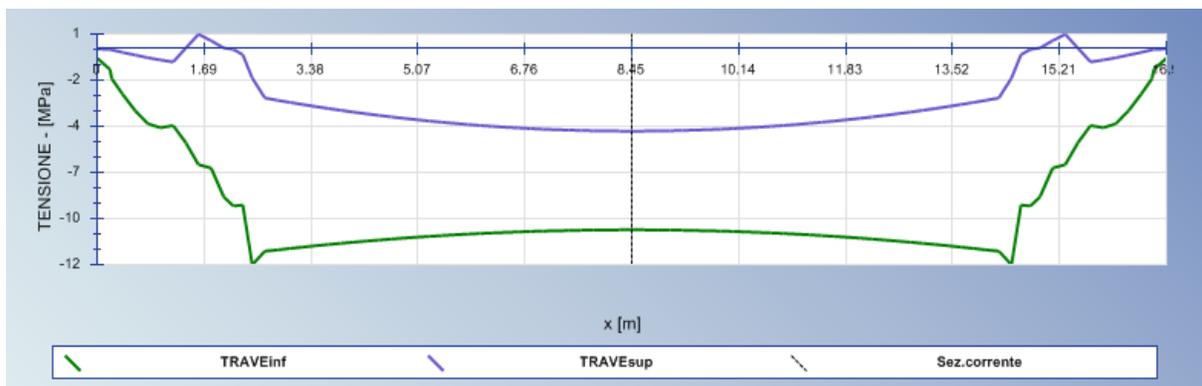


Figura 10.45 : Andamento delle tensioni lungo la trave

**VERIFICA TENSIONALE - SEZIONE [45] x = 8.45 m**

Combinazione: F6.SLE - Fase: 6 - Messa in opera della trave

Azioni sollecitanti rispetto agli assi principali d'inerzia:

\* Azione assiale di precompressione:  $N_p = -4184.04$  kN

\* Momento di precompressione:  $M_p = -1059.38$  kNm

\* Sforzo normale di progetto:  $N = -4184.02$  kN

\* Momento flettente di progetto:  $M = -475.12$  kNm

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Tensioni nel calcestruzzo:

\* Tensione inf. trave:  $\sigma_{t\_inf} = -10.38 \text{ MPa}$

\* Tensione sup. trave:  $\sigma_{t\_sup} = -4.73 \text{ MPa}$

$\sigma_{t\_inf} \leq \min(0.45f_{ck}(t), 0.7f_{ckj})$  - VERIFICA POSITIVA

$\sigma_{t\_sup} \leq \min(0.45f_{ck}(t), 0.7f_{ckj})$  - VERIFICA POSITIVA

Tensioni armatura ordinaria trave:

\* Tensione massima:  $\sigma_{st\_max} = -27.88 \text{ MPa}$  ( 46 )

\* Tensione minima:  $\sigma_{st\_min} = -57.20 \text{ MPa}$  ( 1 )

$\sigma_{st\_max} \leq 0.8f_{syk}$  - VERIFICA POSITIVA

Tensioni armatura di precompressione:

\* Tensione massima:  $\sigma_{p\_max} = 958.65 \text{ MPa}$  ( 24 )

\* Tensione minima:  $\sigma_{p\_min} = 950.06 \text{ MPa}$  ( 30 )

#### VERIFICA TENSIONALE IN FASE 6: MESSA IN OPERA TRAVE – SEZIONE ALL'APPOGGIO

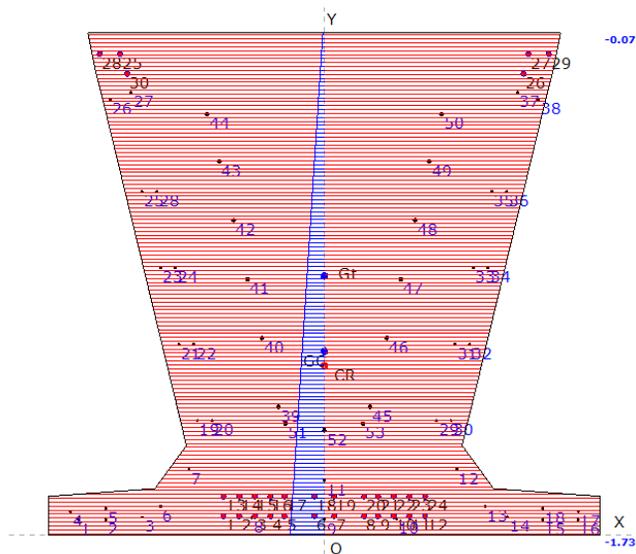


Figura 10.46 : Diagramma delle tensioni sulla sezione all'appoggio

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

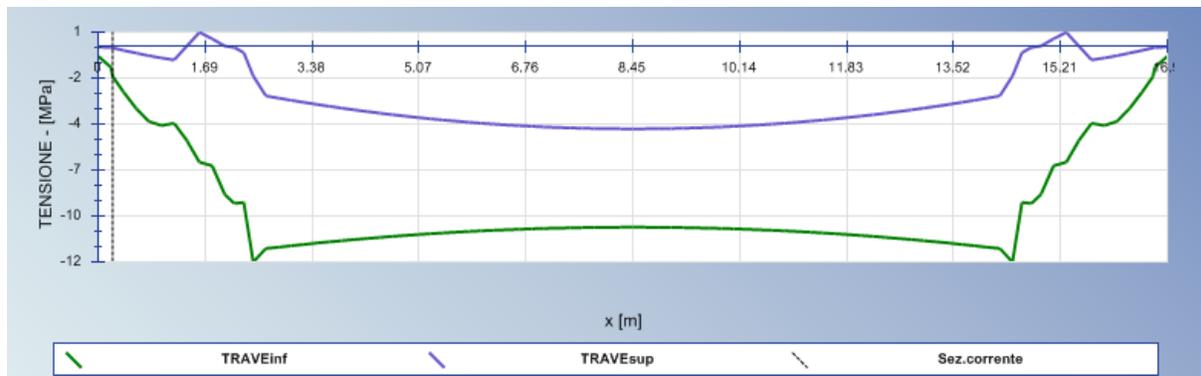


Figura 10.47 : Andamento delle tensioni lungo la trave

VERIFICA TENSIONALE - SEZIONE [3] x = 0.23 m

Combinazione: F6.SLE - Fase: 6 - Messa in opera della trave

Azioni sollecitanti rispetto agli assi principali d'inerzia:

- \* Azione assiale di precompressione:  $N_p = -737.46$  kN
- \* Momento di precompressione:  $M_p = -168.52$  kNm
- \* Sforzo normale di progetto:  $N = -1004.47$  kN
- \* Momento flettente di progetto:  $M = -230.51$  kNm

Tensioni nel calcestruzzo:

- \* Tensione inf. trave:  $\sigma_{t\_inf} = -1.73$  MPa
- \* Tensione sup. trave:  $\sigma_{t\_sup} = -0.07$  MPa

$\sigma_{t\_inf} \leq \min(0.45f_{ck}(t), 0.7f_{ckj})$  - VERIFICA POSITIVA  
 $\sigma_{t\_sup} \leq \min(0.45f_{ck}(t), 0.7f_{ckj})$  - VERIFICA POSITIVA

Tensioni armatura ordinaria trave:

- \* Tensione massima:  $\sigma_{st\_max} = -7.62$  MPa ( 53 )
- \* Tensione minima:  $\sigma_{st\_min} = -9.39$  MPa ( 1 )

$\sigma_{st\_max} \leq 0.8f_{syk}$  - VERIFICA POSITIVA

Tensioni armatura di precompressione:

- \* Tensione massima:  $\sigma_{p\_max} = 1224.09$  MPa ( 24 )

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

\* Tensione minima:  $\sigma_{p\_min} = -177.13 \text{ MPa}$  ( 30 )

VERIFICA TENSIONALE IN FASE 10: PERMANENTI+ACCIDENTALI DI III FASE – SEZIONE IN CAMPATA

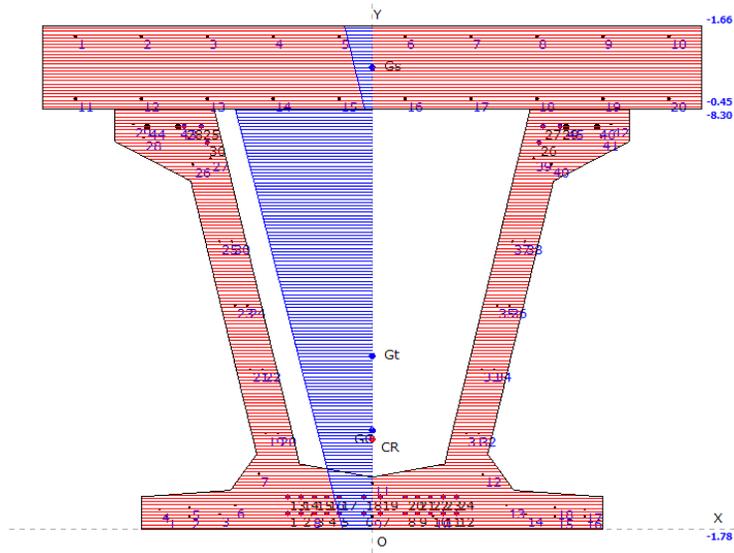


Figura 10.48 : Diagramma delle tensioni sulla sezione in campata

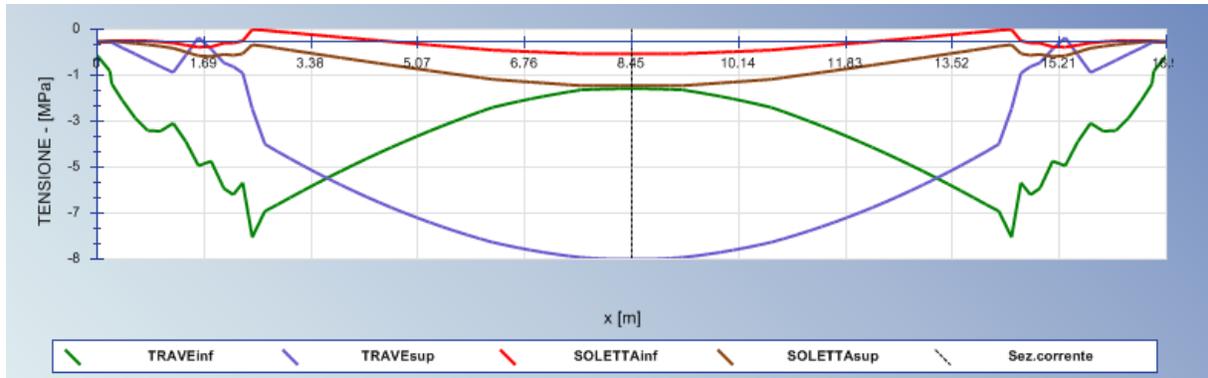


Figura 10.49 : Andamento delle tensioni lungo la trave

VERIFICA TENSIONALE - SEZIONE [45]  $x = 8.45 \text{ m}$

Combinazione: F12.SLE 1 - Fase: 10 - Permanenti + accidentali di III fase

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Azioni sollecitanti rispetto agli assi principali d'inerzia:

- \* Azione assiale di precompressione:  $N_p = -2408.58 \text{ kN}$
- \* Momento di precompressione:  $M_p = -609.84 \text{ kNm}$
- \* Sforzo normale di progetto:  $N = -2408.55 \text{ kN}$
- \* Momento flettente di progetto:  $M = 1785.29 \text{ kNm}$

Tensioni nel calcestruzzo:

- \* Tensione inf. trave:  $\sigma_{t\_inf} = -1.78 \text{ MPa}$
- \* Tensione sup. trave:  $\sigma_{t\_sup} = -8.30 \text{ MPa}$
- \* Tensione inf. soletta:  $\sigma_{g\_inf} = -0.45 \text{ MPa}$
- \* Tensione sup. soletta:  $\sigma_{g\_sup} = -1.66 \text{ MPa}$

$\sigma_{t\_inf} \leq 0.6f_{ckj}$  - VERIFICA POSITIVA per Comb. caratteristica rara  
 $\sigma_{t\_inf} \leq 0.45f_{ckj}$  - VERIFICA POSITIVA per Comb. quasi permanente  
 $\sigma_{t\_sup} \leq 0.6f_{ckj}$  - VERIFICA POSITIVA per Comb. caratteristica rara  
 $\sigma_{t\_sup} \leq 0.45f_{ckj}$  - VERIFICA POSITIVA per Comb. quasi permanente  
 $\sigma_{g\_inf} \leq 0.6f_{ckj}$  - VERIFICA POSITIVA per Comb. caratteristica rara  
 $\sigma_{g\_inf} \leq 0.45f_{ckj}$  - VERIFICA POSITIVA per Comb. quasi permanente  
 $\sigma_{g\_sup} \leq 0.6f_{ckj}$  - VERIFICA POSITIVA per Comb. caratteristica rara  
 $\sigma_{g\_sup} \leq 0.45f_{ckj}$  - VERIFICA POSITIVA per Comb. quasi permanente

Tensioni armatura ordinaria trave:

- \* Tensione massima:  $\sigma_{st\_max} = -42.17 \text{ MPa}$  ( 46 )
- \* Tensione minima:  $\sigma_{st\_min} = -42.42 \text{ MPa}$  ( 29 )

$\sigma_{st\_max} \leq 0.8f_{syk}$  - VERIFICA POSITIVA

Tensioni armatura ordinaria soletta:

- \* Tensione massima:  $\sigma_{sg\_max} = -44.47 \text{ MPa}$  ( 20 )
- \* Tensione minima:  $\sigma_{sg\_min} = -49.56 \text{ MPa}$  ( 1 )

$\sigma_{sg\_max} \leq 0.8f_{syk}$  - VERIFICA POSITIVA

Tensioni armatura di precompressione:

- \* Tensione massima:  $\sigma_{p\_max} = 628.88 \text{ MPa}$  ( 29 )

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

\* Tensione minima:  $\sigma_{p\_min} = 541.56 \text{ MPa} ( 30 )$

$\sigma_{p\_max} \leq 0.8fp(1)k$  - VERIFICA TREFOLO/TRECCIA POSITIVA

**VERIFICA TENSIONALE IN FASE 10: PERMANENTI+ACCIDENTALI DI III FASE – SEZIONE ALL'APPOGGIO**

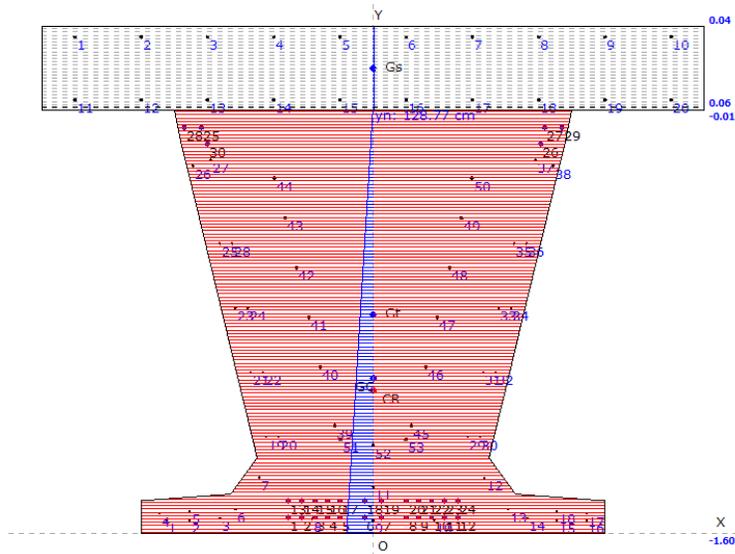


Figura 10.50 : Diagramma delle tensioni sulla sezione in campata

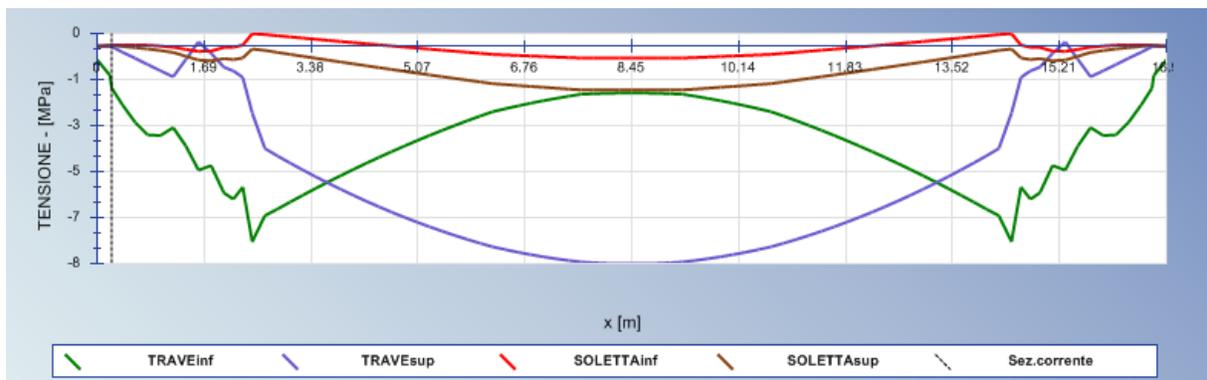


Figura 10.51 : Andamento delle tensioni lungo la trave

**VERIFICA TENSIONALE - SEZIONE [3] x = 0.23 m**

Combinazione: F12.SLE 1 - Fase: 10 - Permanenti + accidentali di III fase

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Azioni sollecitanti rispetto agli assi principali d'inerzia:

- \* Azione assiale di precompressione:  $N_p = -581.33 \text{ kN}$
- \* Momento di precompressione:  $M_p = -132.84 \text{ kNm}$
- \* Sforzo normale di progetto:  $N = -787.54 \text{ kN}$
- \* Momento flettente di progetto:  $M = -181.44 \text{ kNm}$

Tensioni nel calcestruzzo:

- \* Tensione inf. trave:  $\sigma_{t\_inf} = -1.60 \text{ MPa}$
- \* Tensione sup. trave:  $\sigma_{t\_sup} = -0.01 \text{ MPa}$
- \* Tensione inf. soletta:  $\sigma_{g\_inf} = 0.06 \text{ MPa}$
- \* Tensione sup. soletta:  $\sigma_{g\_sup} = 0.04 \text{ MPa}$

$\sigma_{t\_inf} \leq 0.6f_{ckj}$  - VERIFICA POSITIVA per Comb. caratteristica rara

$\sigma_{t\_inf} \leq 0.45f_{ckj}$  - VERIFICA POSITIVA per Comb. quasi permanente

$\sigma_{t\_sup} \leq 0.6f_{ckj}$  - VERIFICA POSITIVA per Comb. caratteristica rara

$\sigma_{t\_sup} \leq 0.45f_{ckj}$  - VERIFICA POSITIVA per Comb. quasi permanente

Tensioni armatura ordinaria trave:

- \* Tensione massima:  $\sigma_{st\_max} = -6.54 \text{ MPa}$  ( 53 )
- \* Tensione minima:  $\sigma_{st\_min} = -8.13 \text{ MPa}$  ( 1 )

$\sigma_{st\_max} \leq 0.8f_{syk}$  - VERIFICA POSITIVA

Tensioni armatura ordinaria soletta:

- \* Tensione massima:  $\sigma_{sg\_max} = 0.15 \text{ MPa}$  ( 20 )
- \* Tensione minima:  $\sigma_{sg\_min} = 0.15 \text{ MPa}$  ( 11 )

$\sigma_{sg\_max} \leq 0.8f_{syk}$  - VERIFICA POSITIVA

Tensioni armatura di precompressione:

- \* Tensione massima:  $\sigma_p\_max = 942.73 \text{ MPa}$  ( 24 )
- \* Tensione minima:  $\sigma_p\_min = -458.95 \text{ MPa}$  ( 30 )

$\sigma_p\_max \leq 0.8f_{p(1)k}$  - VERIFICA TREFOLO/TRECCIA POSITIVA

**STATO LIMITE DI DEFORMAZIONE IN FASE 2: RILASCIO ARMATURE**

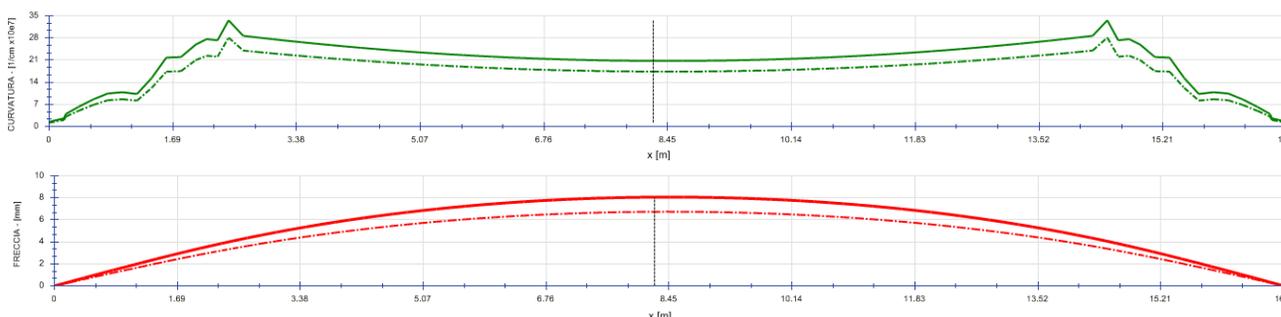


Figura 10.52

**STATO LIMITE DI DEFORMAZIONE - SEZIONE [45] x = 8.45 m**

Combinazione n° 9 Fase: 2 - Rilascio armature di precompressione  
 Sollecitazioni: M = -704.30 kNm N = -5254.53 kN

\* I STADIO - NON FESSURATO (Sezione interamente reagente)

Momento di inerzia baricentrico:  $I_{xg1} = 1.22E+7 \text{ cm}^4$   
 Ordinata del baricentro della sezione:  $y_{g1} = 52.71 \text{ cm}$   
 Area sezione omogeneizzata:  $A_{om1} = 5920.46 \text{ cm}^2$   
 Ordinata asse neutro:  $y_{n1} = 208.04 \text{ cm}$   
 Curvatura a breve|lungo termine:  $\chi_1 | \chi_1' = 1.74E-6 | 2.08E-6$

\* II STADIO - FESSURATO (Sezione parzializzata)

Momento di inerzia baricentrico:  $I_{xg2} = 1.22E+7 \text{ cm}^4$   
 Ordinata del baricentro della sezione:  $y_{g2} = 52.71 \text{ cm}$   
 Area sezione omogeneizzata:  $A_{om2} = 5920.46 \text{ cm}^2$   
 Ordinata asse neutro:  $y_{n2} = 208.04 \text{ cm}$   
 Curvatura a breve|lungo termine:  $\chi_2 | \chi_2' = 1.74E-6 | 2.08E-6$   
 Resistenza media cilindrica a trazione:  $f_{ctm} = 2.72 \text{ MPa}$   
 Massima tensione :  $\sigma = -4.57 \text{ MPa}$   
 Coefficiente di interpolazione:  $\zeta = 0.00$

- Curvatura finale a breve|lungo termine:  $\chi | \chi' = 1.74E-6 | 2.08E-6$   
 - Freccia finale a breve|lungo termine:  $\delta | \delta' = 0.675 \text{ cm} | 0.808 \text{ cm}$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### STATO LIMITE DI DEFORMAZIONE IN FASE 6: MESSA IN OPERA TRAVE

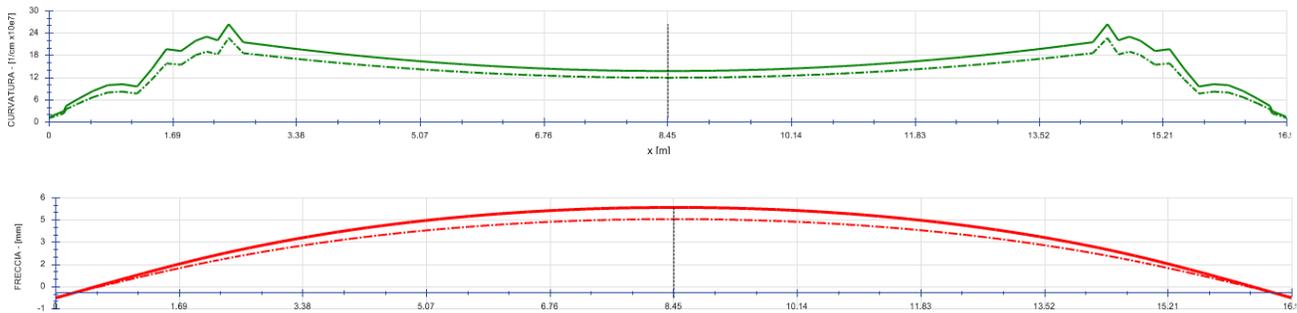


Figura 10.53

### STATO LIMITE DI DEFORMAZIONE - SEZIONE [45] x = 8.45 m

Combinazione n° 13 Fase: 6 - Messa in opera della trave

Sollecitazioni: M = -475.12 kNm N = -4184.02 kN

\* I STADIO - NON FESSURATO (Sezione interamente reagente)

Momento di inerzia baricentrico:  $I_{xg1} = 1.21E+7 \text{ cm}^4$

Ordinata del baricentro della sezione:  $y_{g1} = 52.72 \text{ cm}$

Area sezione omogeneizzata:  $A_{om1} = 5872.16 \text{ cm}^2$

Ordinata asse neutro:  $y_{n1} = 235.03 \text{ cm}$

Curvatura a breve|lungo termine:  $\chi_1 \mid \chi_1' = 1.20E-6 \mid 1.38E-6$

\* II STADIO - FESSURATO (Sezione parzializzata)

Momento di inerzia baricentrico:  $I_{xg2} = 1.21E+7 \text{ cm}^4$

Ordinata del baricentro della sezione:  $y_{g2} = 52.72 \text{ cm}$

Area sezione omogeneizzata:  $A_{om2} = 5872.16 \text{ cm}^2$

Ordinata asse neutro:  $y_{n2} = 235.03 \text{ cm}$

Curvatura a breve|lungo termine:  $\chi_2 \mid \chi_2' = 1.20E-6 \mid 1.38E-6$

Resistenza media cilindrica a trazione:  $f_{ctm} = 3.91 \text{ MPa}$

Massima tensione :  $\sigma = -4.73 \text{ MPa}$

Coefficiente di interpolazione:  $\zeta = 0.00$

- Curvatura finale a breve|lungo termine:  $\chi \mid \chi' = 1.20E-6 \mid 1.38E-6$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

- Freccia finale a breve|lungo termine:  $\delta \mid \delta' = 0.467 \text{ cm} \mid 0.541 \text{ cm}$

**STATO LIMITE DI DEFORMAZIONE IN FASE 10: PERMANENTI+ACCIDENTALI DI III FASE**

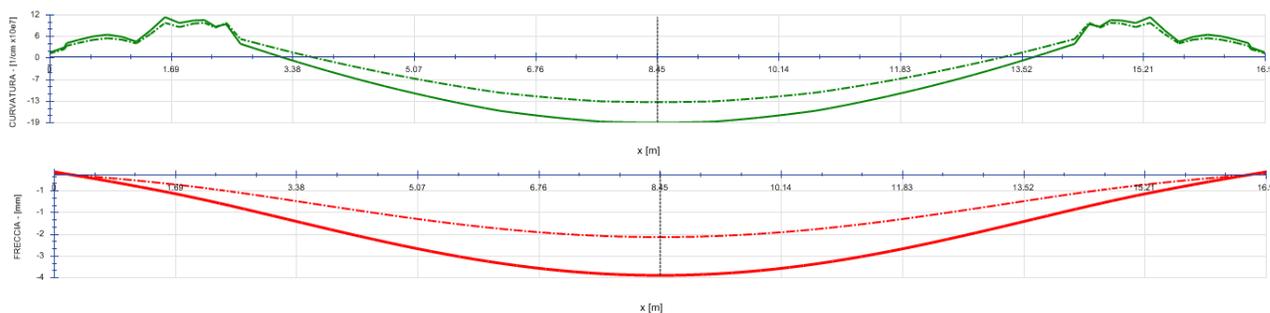


Figura 10.54

**STATO LIMITE DI DEFORMAZIONE - SEZIONE [45] x = 8.45 m**

-----  
Combinazione n° 19 Fase: 10 - Permanenti + accidentali di III fase  
Sollecitazioni: M = 1785.29 kNm N = -2408.55 kN

\* I STADIO - NON FESSURATO (Sezione interamente reagente)

Momento di inerzia baricentrico:  $I_{xg1} = 3.24E+7 \text{ cm}^4$   
Ordinata del baricentro della sezione:  $y_{g1} = 92.02 \text{ cm}$   
Area sezione omogeneizzata:  $A_{om1} = 10584.97 \text{ cm}^2$   
Ordinata asse neutro:  $y_{n1} = -34.85 \text{ cm}$   
Curvatura a breve|lungo termine:  $\chi_1 \mid \chi_1' = -1.30E-6 \mid -1.89E-6$

\* II STADIO - FESSURATO (Sezione parzializzata)

Momento di inerzia baricentrico:  $I_{xg2} = 3.24E+7 \text{ cm}^4$   
Ordinata del baricentro della sezione:  $y_{g2} = 92.02 \text{ cm}$   
Area sezione omogeneizzata:  $A_{om2} = 10584.97 \text{ cm}^2$   
Ordinata asse neutro:  $y_{n2} = -34.85 \text{ cm}$   
Curvatura a breve|lungo termine:  $\chi_2 \mid \chi_2' = -1.30E-6 \mid -1.89E-6$   
Resistenza media cilindrica a trazione:  $f_{ctm} = 4.50 \text{ MPa}$   
Massima tensione :  $\sigma = -1.78 \text{ MPa}$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Coefficiente di interpolazione:  $\zeta = 0.00$

- Curvatura finale a breve|lungo termine:  $\chi | \chi' = -1.30E-6 | -1.89E-6$

- Freccia finale a breve|lungo termine:  $\delta | \delta' = -0.236 \text{ cm} | -0.381 \text{ cm}$

## 11. Calcolo spalle

### 11.1 Analisi dei carichi

Una corretta progettazione di una struttura non può prescindere da una accurata ed attenta analisi dei carichi e delle azioni che interessano la stessa nel corso della vita utile. In questo paragrafo saranno analizzati nel dettaglio le azioni prese in considerazione nel dimensionamento delle spalle del cavalcavia.

#### 11.1.1 Peso proprio elementi strutturali

Il peso proprio degli elementi strutturali viene debitamente tenuto in conto automaticamente dal codice di calcolo utilizzato. Il peso di ciascun elemento viene valutato a partire dal volume di questo e dal peso specifico del materiale utilizzato. Per meglio rappresentare l'effettivo comportamento strutturale della trave di coronamento, che funge anche da pulvino, si è deciso di assegnare a questa una sezione rettangolare. Per tenere conto anche del peso e della massa del muro paraghiaia si è scelto di assegnare alle caratteristiche della trave-pulvino una massa che possa essere rappresentativa dell'effettivo peso del pulvino e del muro paraghiaia, tutto ciò mantenendo inalterata l'effettiva inerzia della trave.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

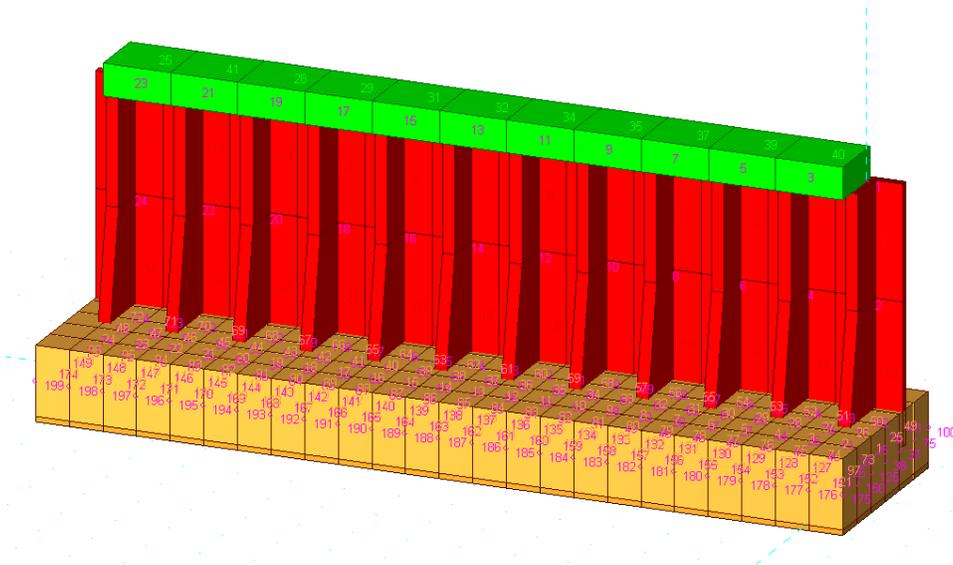


Figura 11.1 : Modello di calcolo della spalla

### 11.1.2 Azioni trasmesse dall'impalcato

Si è scelto, sia per ragioni tecniche che per ragioni economiche, e vista la natura temporanea dell'opera in oggetto, di utilizzare come elementi di appoggio delle strisce in materiale neoprenico. Questa scelta tecnica, accostata alla presenza di importanti travi di testata e della soletta collaborante dell'impalcato, si traduce in fase di calcolo della spalla nella possibilità di ripartire le azioni trasmesse dall'impalcato alla spalla in maniera uniforme sull'intera lunghezza del pulvino. Si è proceduto quindi con il calcolo delle reazioni vincolari dell'impalcato per le differenti condizioni di carico e nella successiva redistribuzione di queste su tutta la lunghezza del pulvino.

#### 11.1.2.1 Peso proprio

L'impalcato risulta simmetrico e simmetricamente vincolato, ne segue che le azioni trasmesse alle due spalle sono identiche. Per effetto del peso proprio strutturale le reazioni vincolari sono quelle riportate nella seguente figura.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> <b>CZ0476_F0</b>	<i>Rev</i> <b>F0</b>	<i>Data</i> <b>20/06/2011</b>

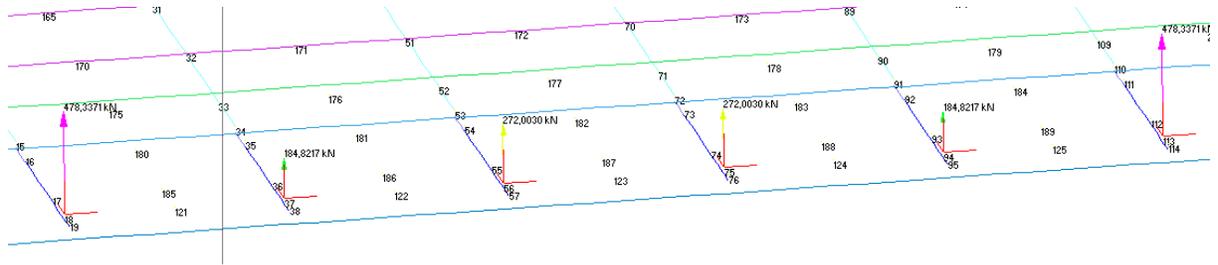


Figura 11.2 : Reazioni vincolari per peso proprio strutturale

Ne deriva che l'azione verticale complessiva trasmessa dall'impalcato alla spalla per effetto del peso proprio strutturale vale:

reazione nodo n° 18	478.33 kN
reazione nodo n° 37	184.82 kN
reazione nodo n° 56	272.00 kN
reazione nodo n° 75	272.00 kN
reazione nodo n° 94	184.82 kN
reazione nodo n° 113	478.33 kN

**Reazione verticale complessiva 1870.32 kN**

Ripartendo in maniera uniforme su tutta la lunghezza del pulvino tale azione si ottiene la forza trasmessa dall'impalcato alla spalla per effetto del peso proprio degli elementi strutturali:  
**1870.32/11=170.03 kN/ml**

### 11.1.2.2 PESO PERMANENTE PORTATO

Operando in maniera del tutto analoga a quanto fatto nel punto precedente e con le stesse considerazioni si ottiene quanto segue.

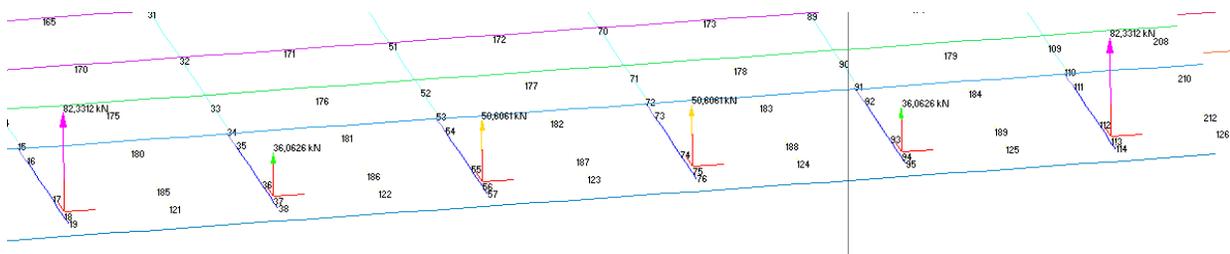


Figura 11.3 : Reazioni vincolari per pesi permanenti portati

reazione nodo n° 18 82.33 kN

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

reazione nodo n° 37	36.06 kN
reazione nodo n° 56	50.60 kN
reazione nodo n° 75	50.60 kN
reazione nodo n° 94	36.06 kN
reazione nodo n° 113	82.33 kN

**Reazione verticale complessiva** **338.00 kN**

Ripartendo in maniera uniforme su tutta la lunghezza del pulvino tale azione si ottiene la forza trasmessa dall'impalcato alla spalla per effetto del peso proprio degli elementi strutturali:  
**338.00/11=30.72 kN/ml**

Di seguito il modello di calcolo della spalla caricato con le azioni permanenti derivanti dall'impalcato.

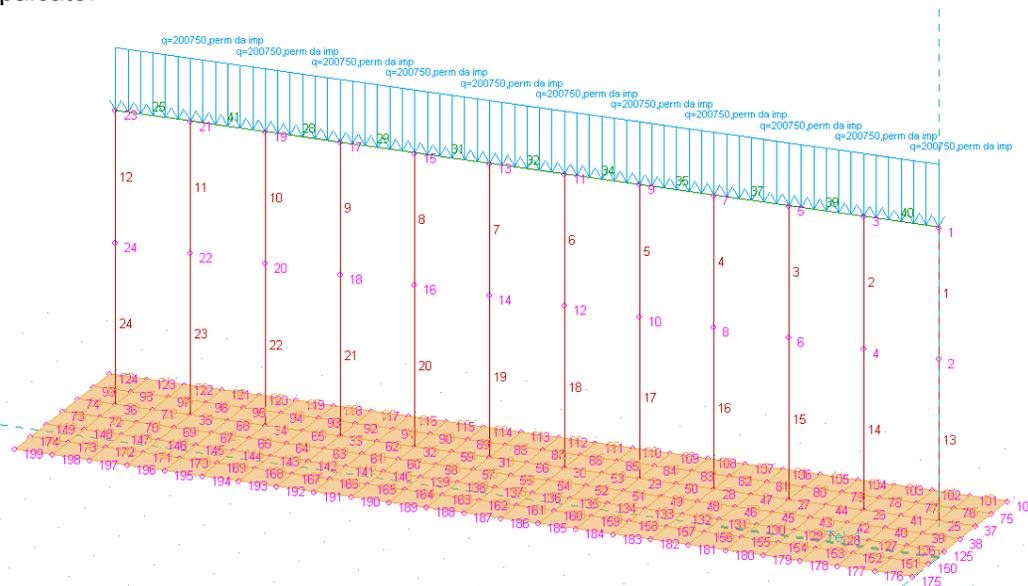


Figura 11.4 : Spalla caricata con azioni derivanti dal peso permanente portato dell'impalcato

### 11.1.2.3 Azione per effetto del sisma

L'azione del sisma viene tenuta in conto moltiplicando la massa dell'intero impalcato per l'accelerazione del terreno. Come si può vedere nel paragrafo relativo all'azione sismica di riferimento per l'area in oggetto si ottiene una **ag=0.2g** . La norma in vigore prevede che per i ponti la massa da tenere in considerazione per le azioni sismiche è quella derivante dal peso proprio

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

strutturale. Ne deriva che per l'impalcato in oggetto la massa da tenere in considerazione è quella legata al peso dello stesso valutato facendo ricorso alle reazioni di cui sopra:

Peso proprio elementi strutturali	1870.32 x 2 kN
Pesi permanenti portati	3308.00 x 2 kN

**Peso complessivo impalcato 4416 kN**

Da cui la forza sismica da applicare all'impalcato  $4416000 \times 0.2 = 883200 \text{ N}$ . Tale forza deve essere ripartita in maniera uniforme tra le due spalle e successivamente distribuita su tutta la lunghezza del pulvino. Si ottiene:  $883200/2/11 = 40145 \text{ N/m}$

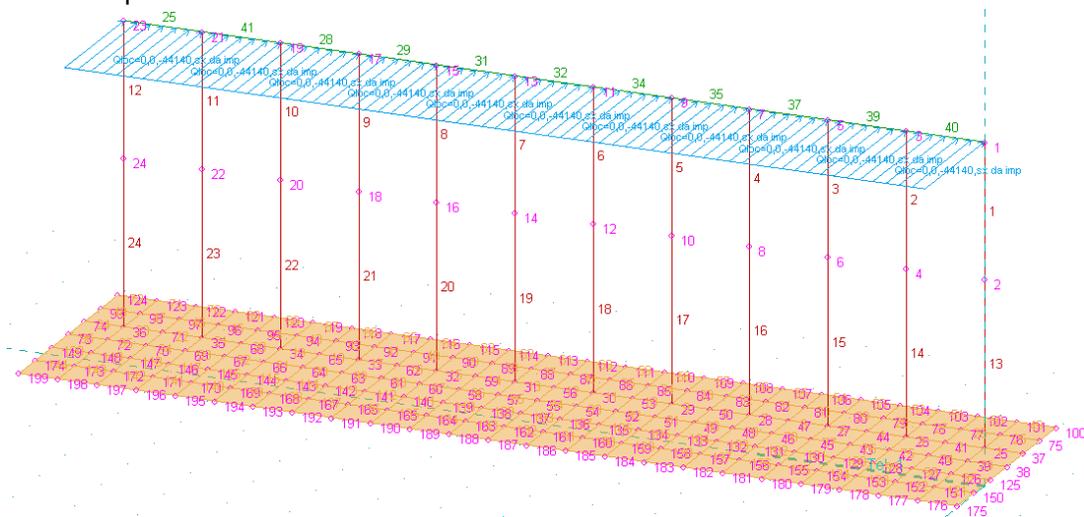


Figura 11.5 : Spalla caricata con azioni derivanti dall'impalcato per effetto del sisma

#### 11.1.2.4 Azione per effetto del carico mobile

Operando in maniera analoga a quanto fatto per i carichi permanenti si procede a distribuire le azioni indotte dai carichi mobili quando questi transitano sull'impalcato.

reazione nodo n° 18	53.03 kN
reazione nodo n° 37	262.18 kN
reazione nodo n° 56	84.78 kN
reazione nodo n° 75	84.78 kN
reazione nodo n° 94	262.18 kN
reazione nodo n° 113	53.03 kN

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### Reazione verticale complessiva

**800 kN**

Che ripartiti sullo sviluppo del pulvino comportano una azione verticale distribuita pari a:  
**800/11=72.72 kN.**

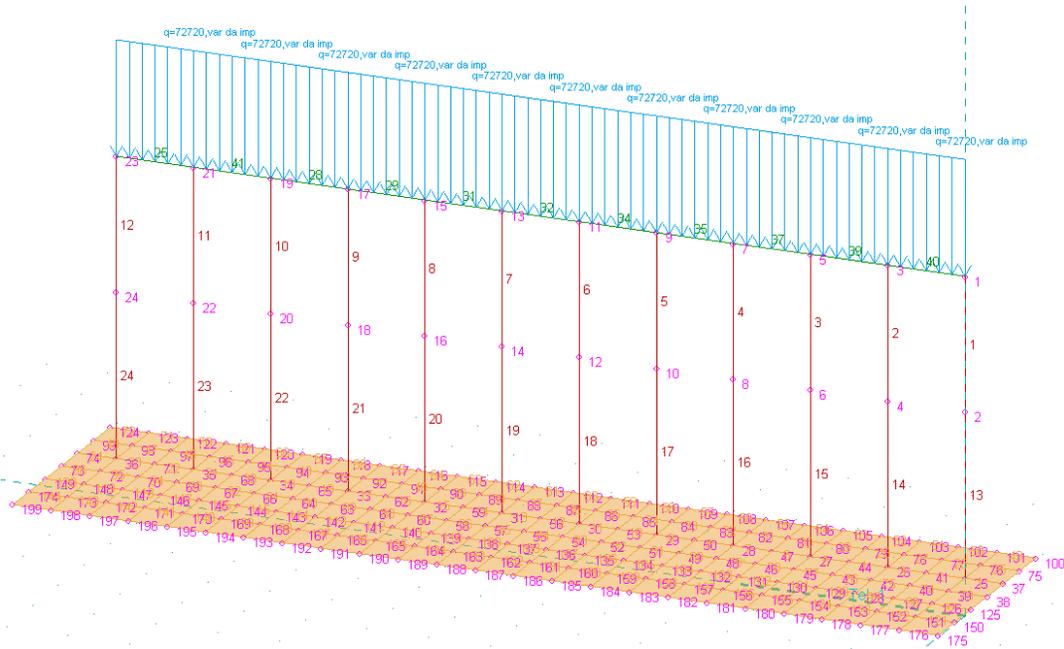


Figura 11.6 : Spalla caricata con azioni derivanti dall'impalcato per effetto del carico mobile

### 11.1.3 Spinta statica del terrapieno

In questo paragrafo sarà analizzato il calcolo della spinta statica sul paramento della spalla. Per meglio cogliere gli aspetti strutturali la spalla è stata suddivisa in tre elementi differenti: il paraghiaia, la parte superiore del paramento, modellato come un elemento beam a sezione costante, e la parte inferiore del paramento, modellato come un elemento beam a sezione variabile e connesso inferiormente alla platea di fondazione.

Il terreno col quale si realizza il rilevato è un terreno avente un angolo di resistenza al taglio pari a  $35^\circ$ . Ne deriva un coefficiente di spinta attiva pari a  **$ka=0.2710$** . Considerando il paraghiaia di altezza pari a 2.50 metri si ottiene una distribuzione di spinta triangolare nulla in sommità ed avente un valore di  $\gamma h ka=12.87 \text{ kN/ml}$  al piede del pulvino. Il pulvino è stato modellato come un elemento beam connesso in sommità agli elementi verticali con cui è realizzata la spalla. Tale elemento è stato caricato con una forza uniformemente distribuita pari alla spinta sul paraghiaia e da una coppia di trasporto necessaria a tenere conto dell'effettiva posizione della trave che modella il pulvino. La forza distribuita assume il valore  $12.87 \times 2.5 / 2=16.08 \text{ kN}$ , la coppia di trasporto il valore  $16.08 \times 2.5/3=13.34 \text{ kN.m}$ .

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

L'elemento beam che schematizza la parte superiore del paramento, tenuto conto che a ciascuno compete una porzione di 1.25 m, sarà soggetto ad una azione distribuita di forma trapezoidale che assume il valore **12.87 x 1.25=16.09 kN/ml** in sommità ed il valore **16.09+19 x 2.15 x 0.271 x 1.25=29.93 kN/m** all'estremo inferiore. Analogamente l'elemento che schematizza la parte inferiore del paramento sarà caricato con una azione di 29.93 kN/m in sommità ed una di **29.93 + 19 x 2.65 x 0.271 x 1.25= 46.98** all'estremo inferiore.

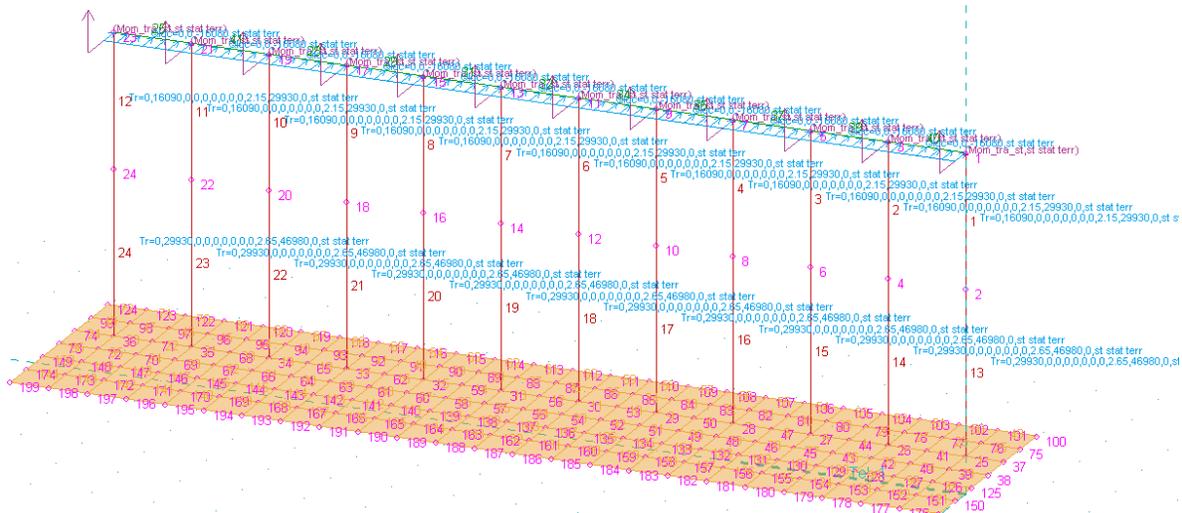


Figura 11.7 : Spalla caricata con le spinte del terreno in condizioni statiche

#### 11.1.4 Sovrappinta sismica del terrapieno

Per tenere conto della sovrappinta che il terrapieno esercita in fase sismica si fa ricorso al coefficiente di spinta sismica  $K_h$  ed alla formula di Mononobe e Okabe. Tenendo conto dei dati del territorio, riportati nella parte riguardante l'azione sismica, si ottiene un coefficiente di spinta attiva in presenza di sisma pari a  **$K_{as}=0.2874$** . Operando in maniera del tutto analoga a quanto fatto nel paragrafo precedente si ottiene la sovrappinta sismica da applicare al pulvino pari a **0.78kN/ml** ed una coppia di trasporto di **0.8 kN m**.

La sovrappinta da applicare all'elemento beam superiore sarà trapezoidale con valori: **0.78N/ml** in sommità, **1.61 kN/ml** all'estremo inferiore. L'elemento beam inferiore sarà sottoposto ad un carico distribuito di forma trapezoidale di valore **1.61 kN/ml** in sommità e **2.41 kN/ml** al piede.

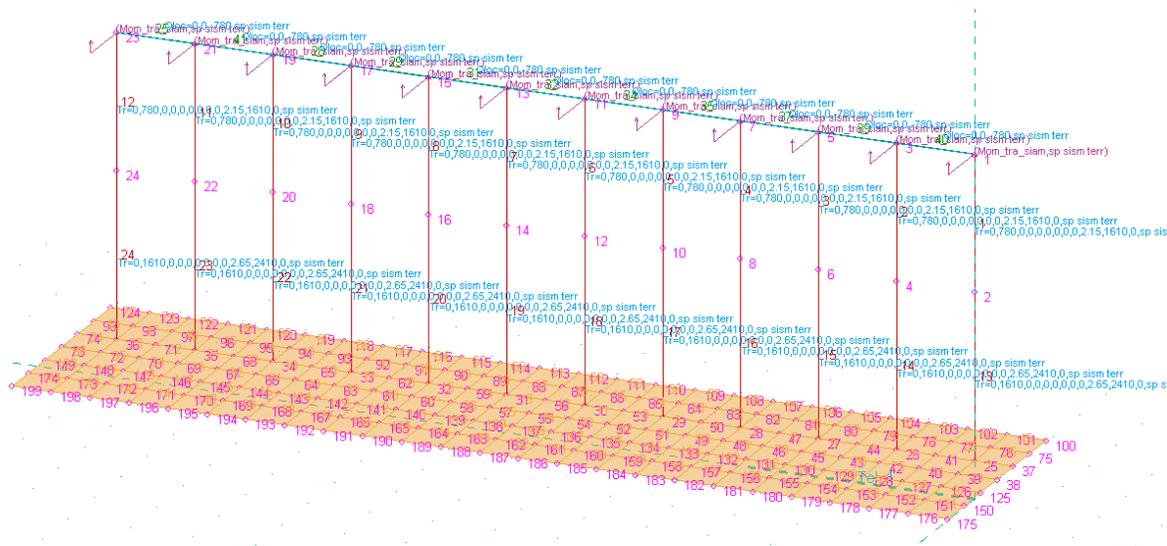


Figura 11.8 : Spalla caricata con le sovraspinta del terreno in condizioni sismiche

### 11.1.5 Spinta sul terrapieno per effetto del carico mobile

La spinta sul paramento indotta dal passaggio nel mezzo di cantiere in corrispondenza della spalla è stata valutata per mezzo di una raffinata analisi non lineare agli elementi finiti. Da questa analisi sono stati estratti i valori della pressione sul paramento della spalla. Anche in questo caso si è tenuto conto che a ciascun elemento beam che schematizza gli elementi prefabbricati della spalla compete la spinta agente su 1.25 metri di paramento. Dalle analisi condotte risulta che la spinta a cui è soggetto il paraghiaia ha una distribuzione trapezoidale con valore 54.11 kN/m in sommità e 62.12 kN/m al piede. L'elemento beam superiore è sottoposto ad una distribuzione di forza di forma trapezoidale con valore 62.12 kN/m in sommità e 76.45 kN/m inferiormente. L'elemento beam inferiore soggetto ad una distribuzione particolare. In particolare in sommità la forza assume il valore 76.45 kN/m, a 0.9 m aumenta al valore di 82.48 kN/m al piede decresca al valore di 53.33 kN/m.

L'impronta di carico del mezzo di cantiere ha una larghezza di 6 metri. Per tenere conto della diffusione del carico attraverso il rilevato si è decise di ripartire l'azione indotta dal mezzo su 6 elementi prefabbricati, ovvero su uno sviluppo di 7.5 m. La spinta sul paraghiaia risulta:  $(54.11+62.11)/2 \times 6=348.66$  kN/m da distribuire su 7.5 metri,  $348.66/7.5=46.48$  kN/m. la coppia di trasporto vale:  $348.66 \times 1.25/7.5=58.11$  kN m. Queste azioni saranno applicate solo ai 6 elementi centrali del modello. In modo analogo si determinano le azioni da applicare su gli elementi beam che modellano il paramento:  $62.12 \times 6/7.5=49.7$ ,  $76.45 \times 6/7.5=61.16$ ,  $82.48 \times 6/7.5=66.00$ ,  $53.33 \times 6/7.5=42.66$ .

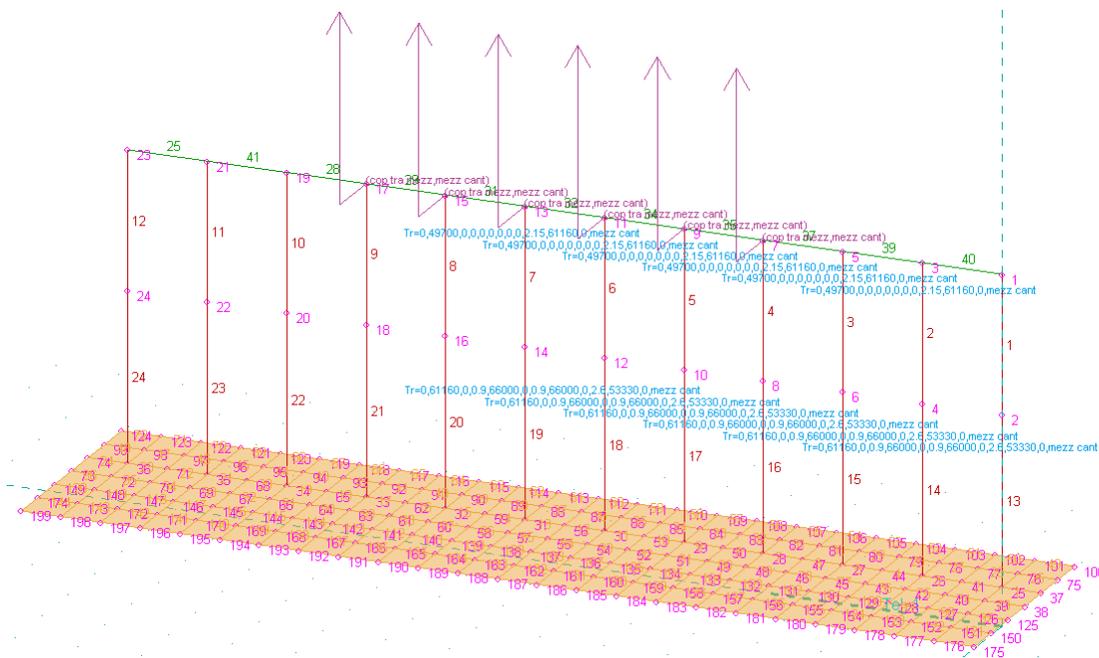


Figura 11.9 : Spalla caricata con la spinta del terreno indotta dal carico mobile

## 11.2 Modello di calcolo

Il modello di calcolo utilizzato è stato elaborato in maniera da rappresentare al meglio la realtà fisica del problema. In particolare sono stati utilizzati elementi tipo beam per la rappresentazione degli elementi prefabbricati di cui è realizzato il paramento e per la schematizzazione del pulvino. Vista la solidarizzazione tra gli elementi prefabbricati e la trave-pulvino la connessione tra questi elementi è quella di incastro. Gli elementi prefabbricati sono stati suddivisi in due elementi beam, quello inferiore di lunghezza 2.65m a sezione a T variabile e quello superiore avente sezione a T costante. La platea di fondazione è stata modellata con elementi tipo shell a cui è stato assegnato uno spessore di 1.35 m. Gli elementi shell sono stati connessi esternamente con delle molle a comportamento elastico capaci di rappresentare il terreno secondo un modello alla Winkler. Per la determinazione delle caratteristiche del modello alla Winkler si rimanda alla relazione geotecnica.

## 11.3 Calcolo delle sollecitazioni

Il codice di calcolo utilizzato consente di esplicitare le caratteristiche della sollecitazione per la singola condizione di carico o per assegnate combinazioni di carico. Di seguito si espongono i risultati delle analisi per combinazioni di carico. Le combinazioni di carico sono state definite in

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

modo da cogliere le combinazioni di carico più sfavorevoli per la struttura ma nello stesso tempo limitando il numero di analisi.

### 11.3.1 Combinazione di carico 1 allo slu

Tale combinazione tiene conto dei soli pesi permanenti. Come da normativa le azioni permanenti sopra analizzate sono state moltiplicate per il coefficiente  $\gamma_g=1.35$ . Le azioni permanenti a cui è sottoposta la struttura sono: le spinte del terreno, le azioni permanenti trasmesse dall'impalcato ed il peso proprio degli elementi strutturali che costituiscono la spalla oggetto di calcolo. Di seguito si riportano le caratteristiche della sollecitazione per la combinazione di carico in oggetto.

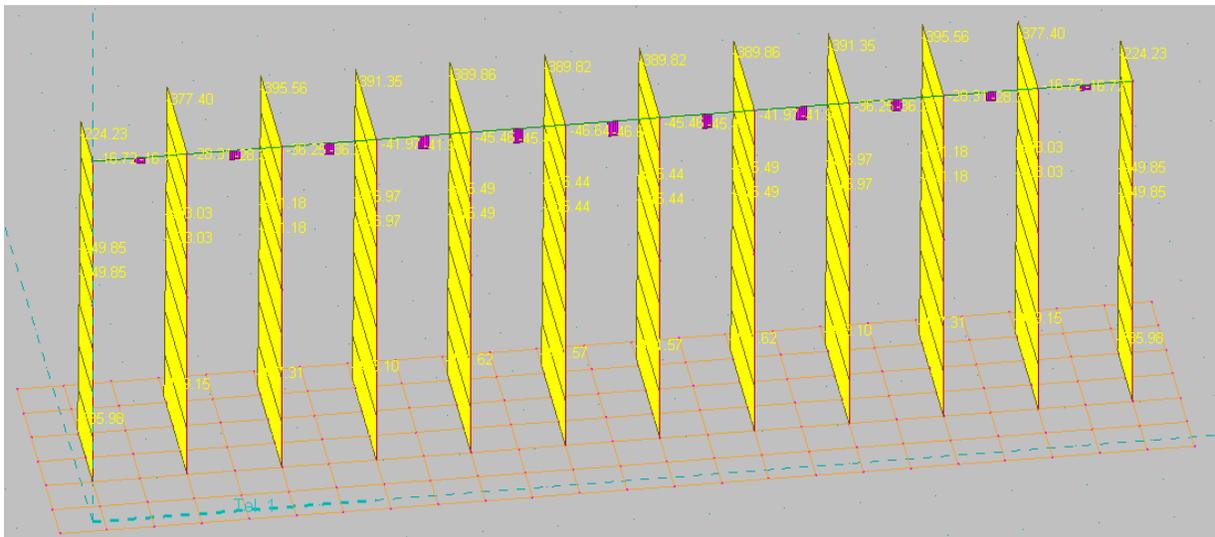


Figura 11.10 : Sollecitazione assiale per effetto della combinazione di carico 1

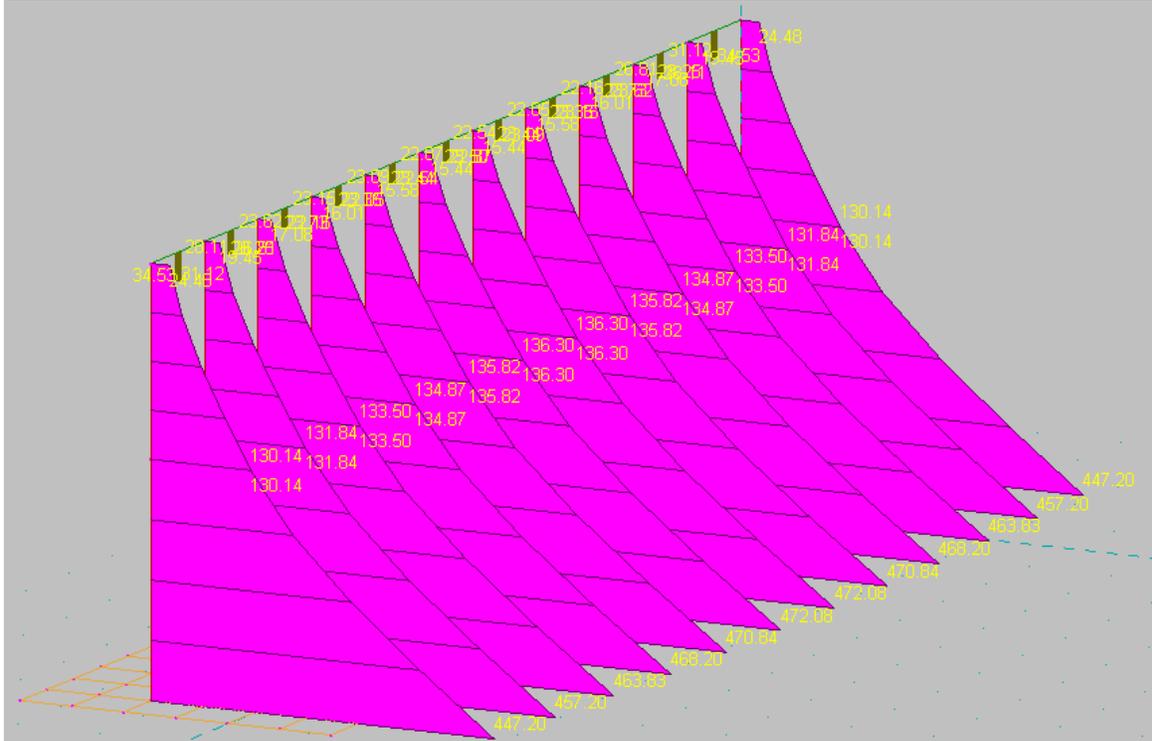


Figura 11.11 : Sollecitazione flettente per effetto della combinazione di carico 1

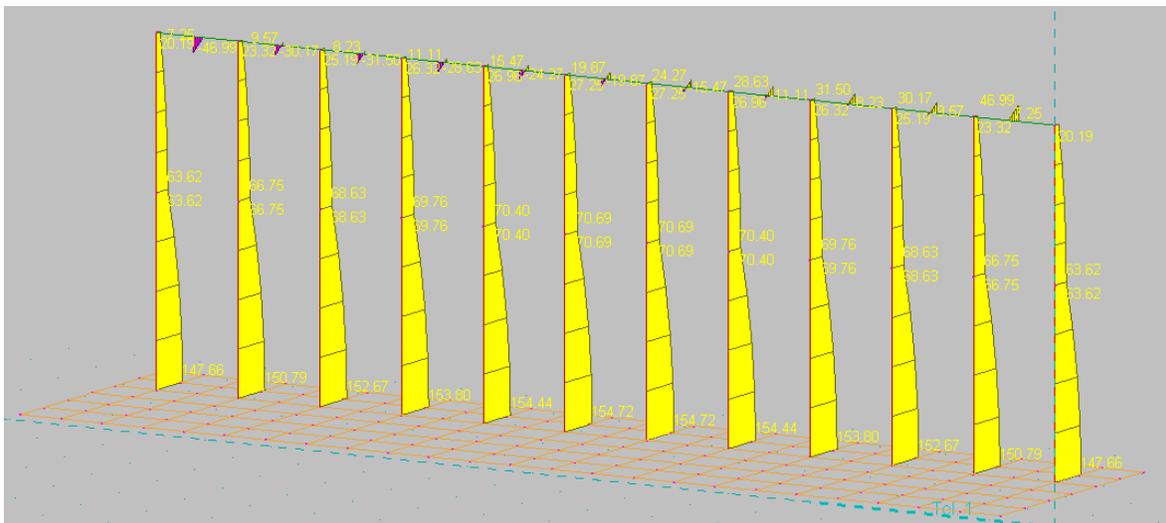


Figura 11.12 : Sollecitazione tagliante per effetto della combinazione di carico 1

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 11.3.2 Combinazione di carico 2 allo SLU

Tale combinazione tiene conto dei pesi permanenti e dei variabili. Come da normativa le azioni permanenti sopra analizzate sono state moltiplicate per il coefficiente  $\gamma_g=1.35$  e quelle variabili per il coefficiente 1.35 avendo una sola azione di natura variabile ed essendo questa assunta come principale. È il caso di notare che le azioni variabile indotte dal vento sono state trascurate perché non rilevanti per la struttura in esame. Le azioni permanenti a cui è sottoposta la struttura sono: le spinte del terreno, le azioni permanenti trasmesse dall'impalcato ed il peso proprio degli elementi strutturali che costituiscono la spalla oggetto di calcolo. L'azione variabile fa riferimento al transito del carico variabile sul cavalcavia. Di seguito si riportano le caratteristiche della sollecitazione per la combinazione di carico in oggetto.

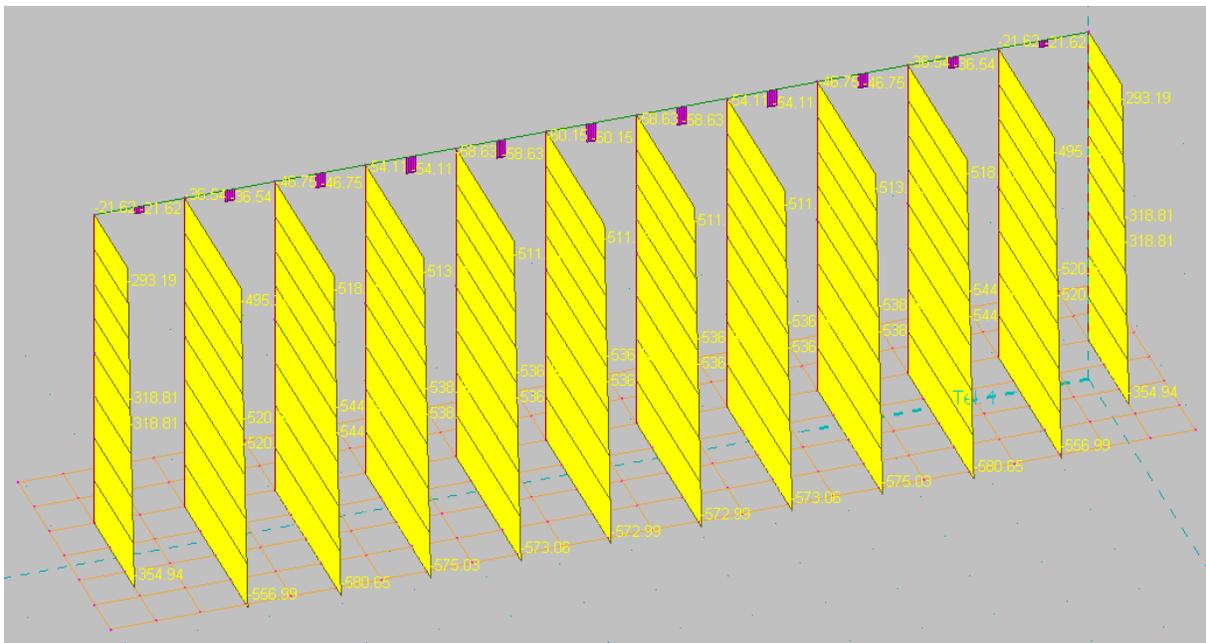


Figura 11.13 : Sollecitazione assiale per effetto della combinazione di carico 2

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

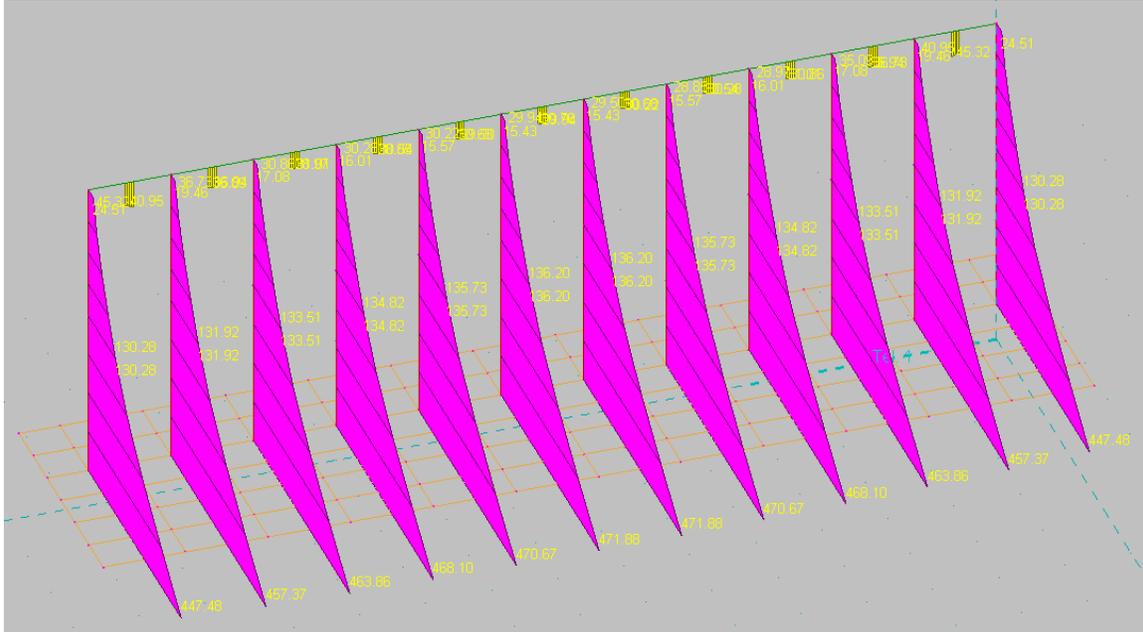


Figura 11.14 : Sollecitazione flettente per effetto della combinazione di carico 2

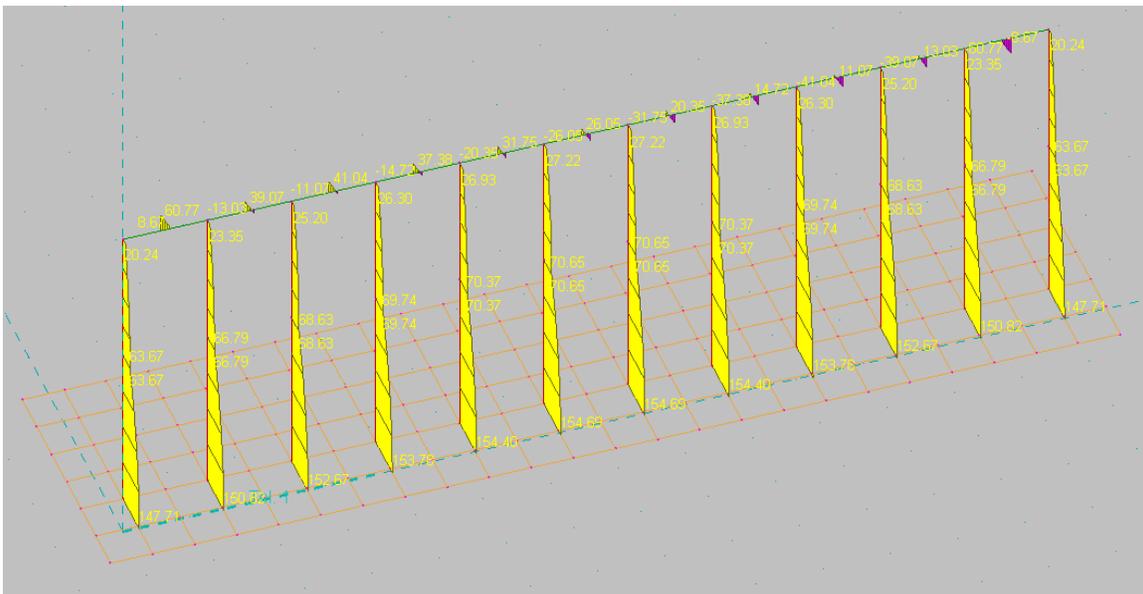


Figura 11.15 : Sollecitazione tagliante per effetto della combinazione di carico 2

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 11.3.3 Combinazione di carico 3 allo SLU

Tale combinazione tiene conto dei pesi permanenti e dei variabili. Come da normativa le azioni permanenti sopra analizzate sono state moltiplicate per il coefficiente  $\gamma_g=1.35$  e quelle variabili per il coefficiente 1.35 avendo una sola azione di natura variabile ed essendo questa assunta come principale. È il caso di notare che le azioni variabile indotte dal vento sono state trascurate perché non rilevanti per la struttura in esame. Le azioni permanenti a cui è sottoposta la struttura sono: le spinte del terreno, le azioni permanenti trasmesse dall'impalcato ed il peso proprio degli elementi strutturali che costituiscono la spalla oggetto di calcolo. L'azione variabile fa riferimento al transito del carico variabile sul rilevato in prossimità della spalla. Di seguito si riportano le caratteristiche della sollecitazione per la combinazione di carico in oggetto.

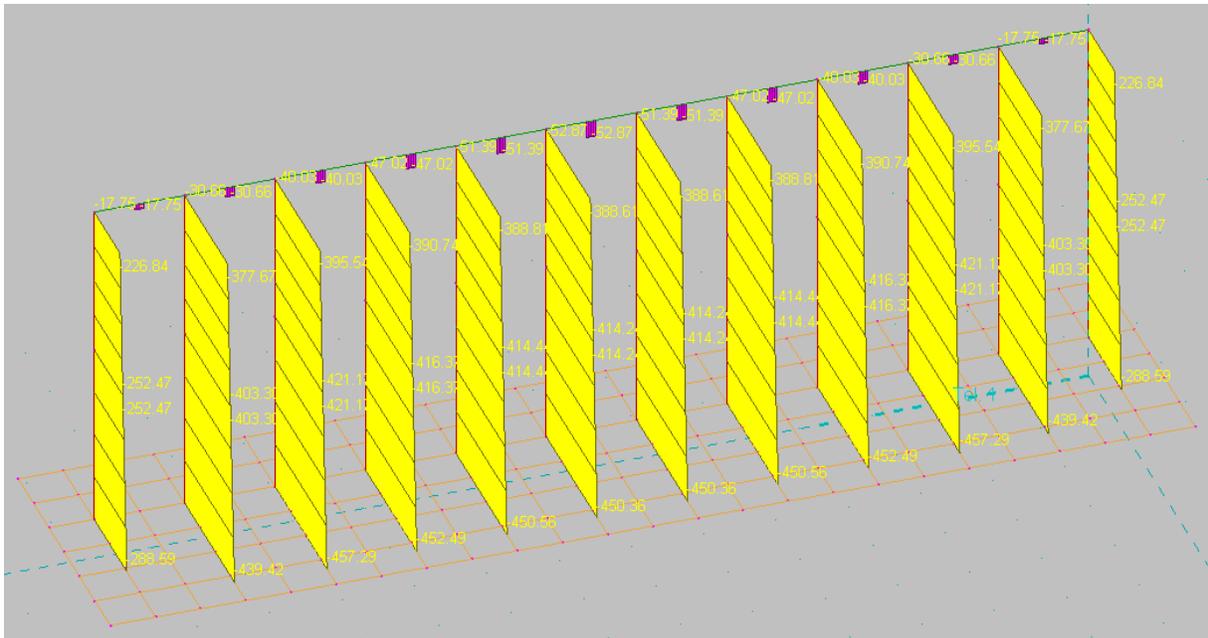


Figura 11.16 : Sollecitazione assiale per effetto della combinazione di carico 3

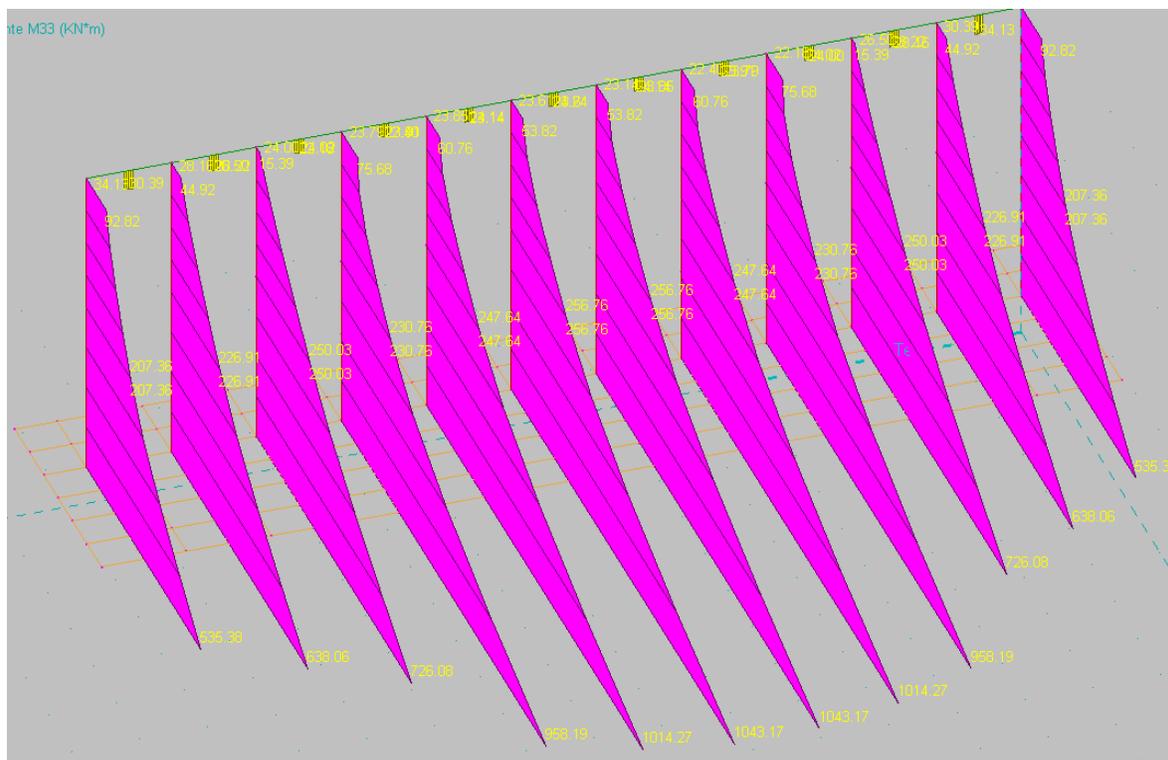


Figura 11.17 : Sollecitazione flettente per effetto della combinazione di carico 3

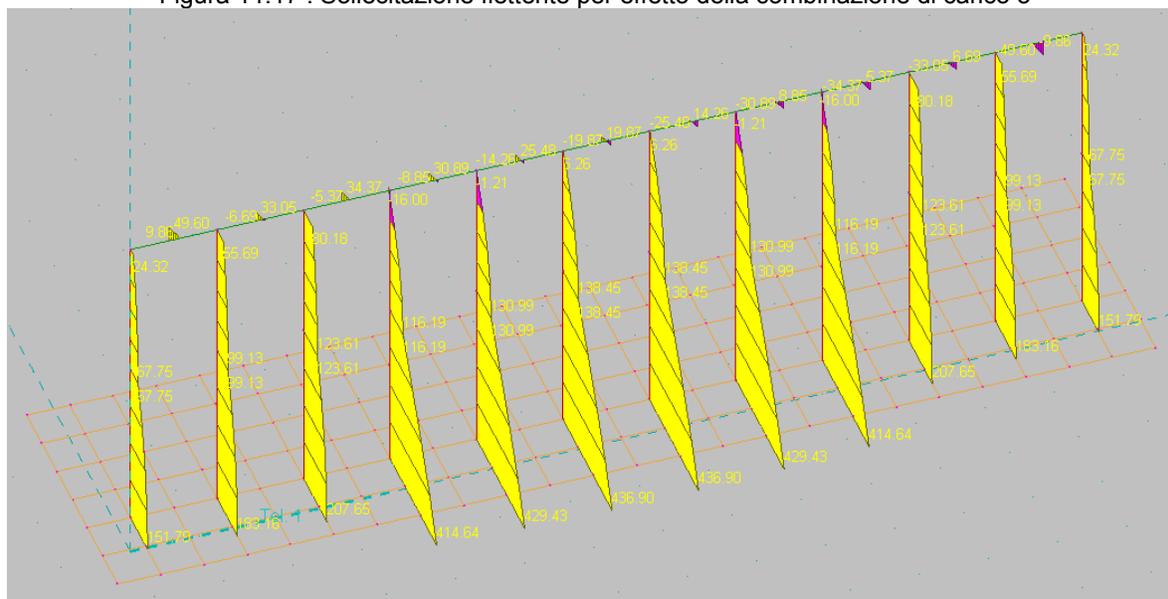


Figura 11.18 : Sollecitazione tagliante per effetto della combinazione di carico 3

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 11.3.4 Combinazione di carico 4 allo SLU

Tale combinazione tiene conto dell'effetto del sisma. In caso di sisma la norma vigente prevede che le azioni da considerare sono i pesi permanenti e quelle indotte dal sisma per effetto della massa legata ai soli pesi permanenti. Sia l'azione sismica che quella permanente si considera con il valore caratteristico. Di seguito si riportano le caratteristiche della sollecitazione per la combinazione di carico in oggetto.

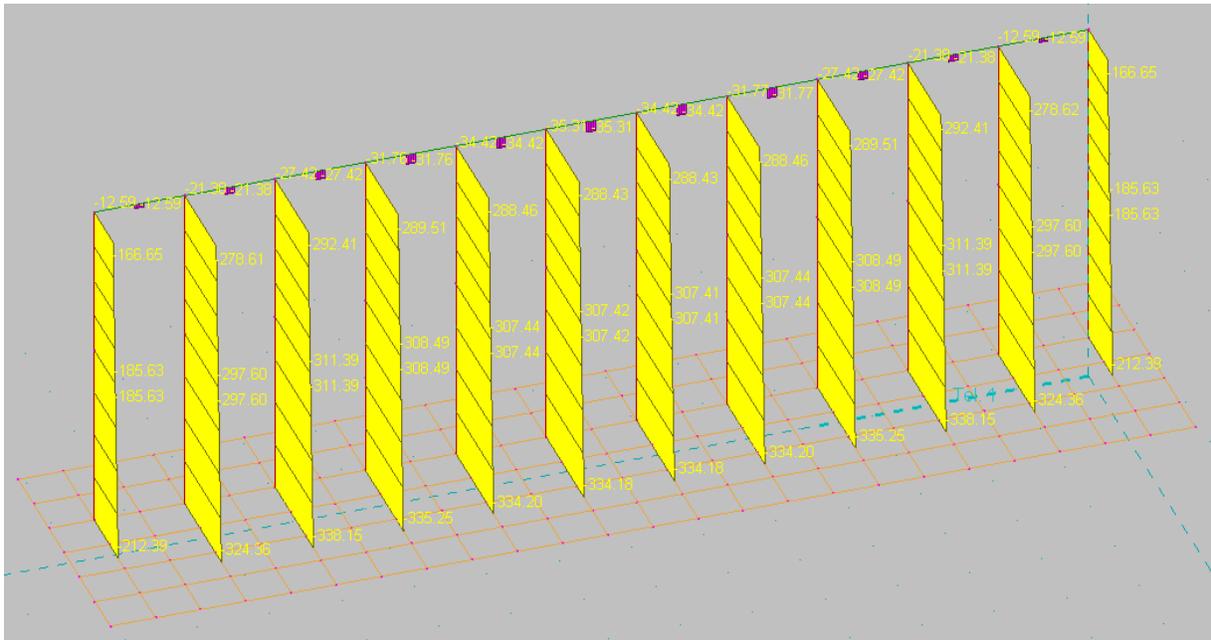


Figura 11.19 : Sollecitazione assiale per effetto della combinazione di carico 4

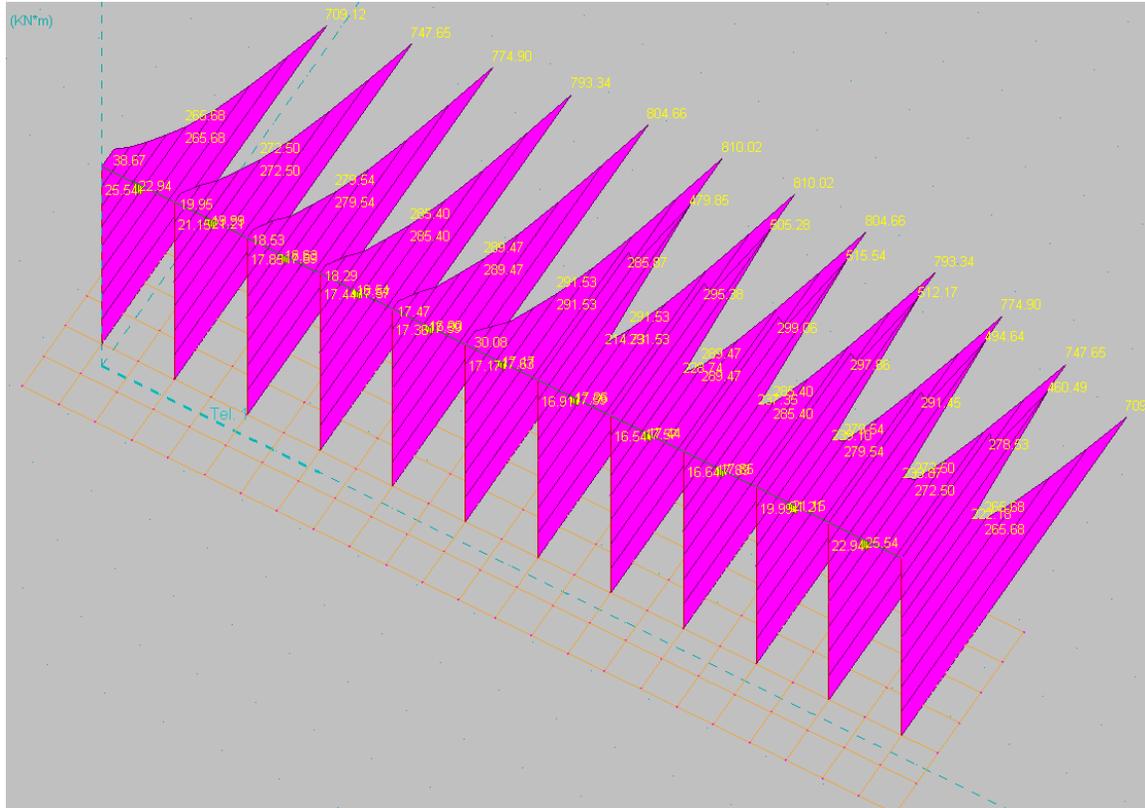


Figura 11.20 : Sollecitazione flettente per effetto della combinazione di carico 4

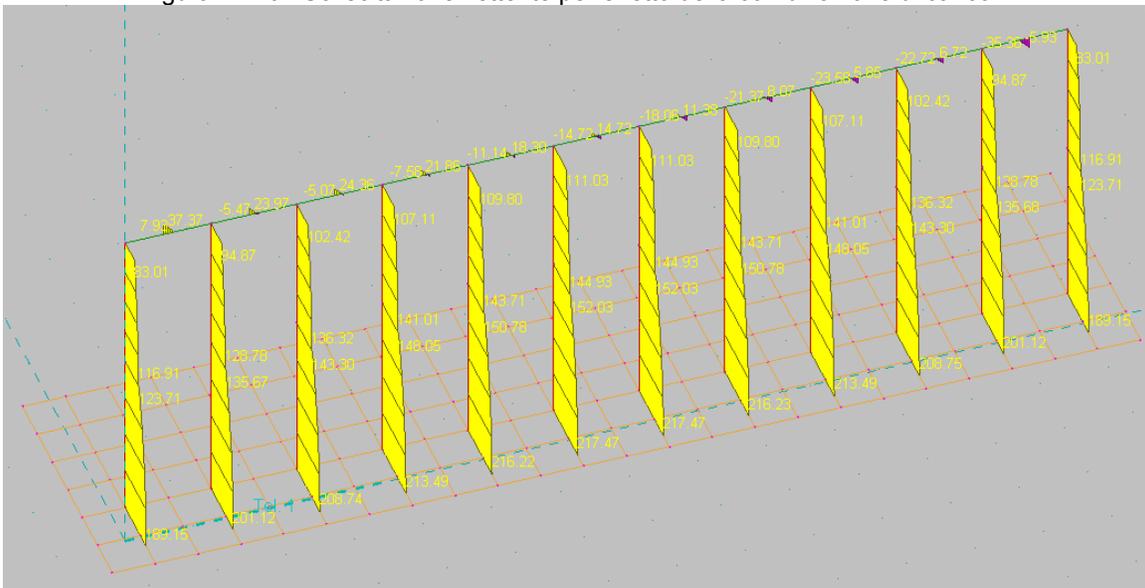


Figura 11.21 : Sollecitazione tagliante per effetto della combinazione di carico 4

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA	<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 11.4 Verifica delle sezioni

In questo paragrafo si affronterà la verifica allo stato limite ultimo delle sezioni degli elementi strutturali dell'opera in esame. Le verifiche di resistenza saranno condotte nelle sezioni maggiormente sollecitate e per le combinazioni di carico più gravose. Nel caso degli elementi costituenti il paramento della spalla saranno condotte le verifiche sia al piede, dove la sezione è maggiormente sollecitata e presenta la sezione maggiore, sia nel punto in cui l'elemento passa da una sezione variabile ad una costante. Per il pulvino si procederà ad effettuare una verifica in corrispondenza della sezione maggiormente sollecitata. Gli elementi prefabbricati presentano una armatura particolare che merita di essere chiarita. L'armatura che consente di resistere alle azioni flettenti è concentrata in corrispondenza degli estremi dell'anima dell'elemento a T. In particolare nella parte che sarà posta a tergo è presente una notevole presenza di armatura. Nella parte frontale l'armatura è integrata con diversi strati di rete elettrosaldada. La staffatura, pur se di forma particolare non presenta altre particolarità. Viste le dimensioni dell'elemento e i ridotti spessori si opta per armature di diametro pari a 26 mm. Di seguito una rappresentazione tipologica dell'armatura adottata.

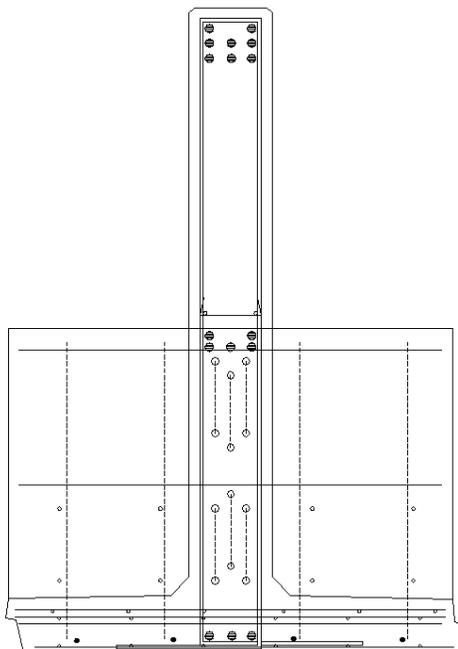


Figura 11.22 : Armatura elemento a T prefabbricato

Per la **sezione di base** la condizione più gravosa si verifica per la condizione di carico 3 a cui corrisponde un momento flettente pari a **1043 kN m**, uno sforzo normale di **457.29 kN** ed uno sforzo di taglio di **436.90 kN**. Trattandosi di elementi prefabbricati che seguono determinati

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

processi produttivi è stata ipotizzata una armatura standard per gli elementi in progetto e la stessa è stata sottoposta a verifica per le azioni in oggetto. I risultati del calcolo sono di seguito riportati.

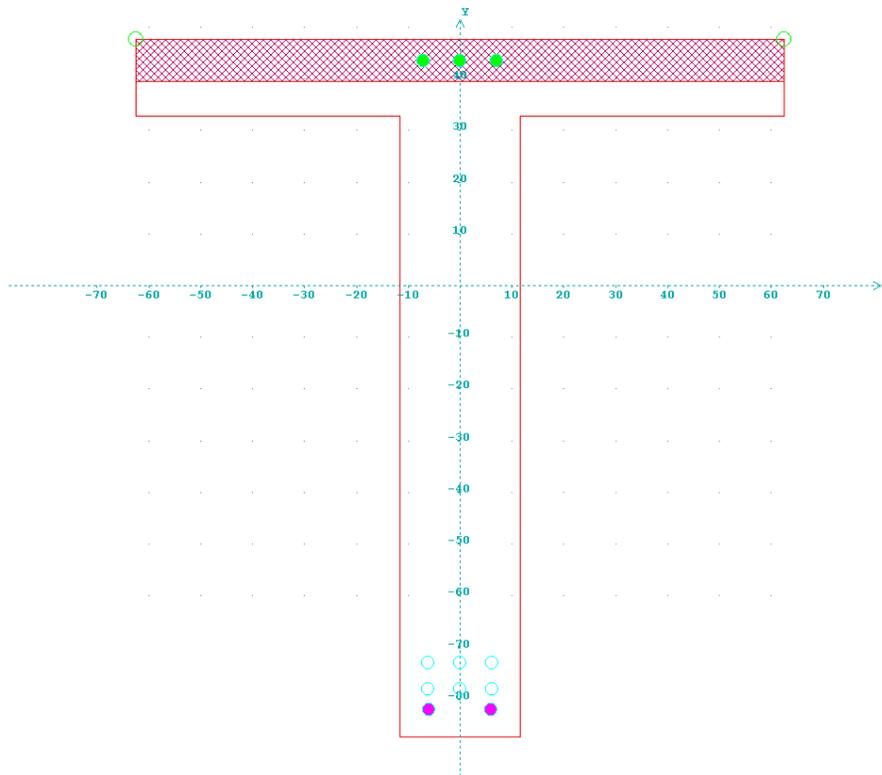


Figura 11.23 : Verifica allo SLU

**OPZIONI:**

Metodo di calcolo: Stati Limite; Normativa Tecnica: Norme Tecniche per le Costruzioni 2008;

**FORMA DELLA SEZIONE: A T**

Largh. anima:  $B_a=23.00$  cm; Altezza tot.:  $H=135.00$  cm  
Spessore soletta:  $H_s=15.00$  cm; Base superiore:  $B_s=125.00$  cm  
Rotazione:  $rot = 0.00$  gradi  
Area totale acciaio .....:  $A_{st} = 58.40$  cm<sup>2</sup>  
Coprifermo di progetto .....:  $c = 2.80$  cm  
Diametro staffe .....:  $d_s = 8$  mm

**GEOMETRIA DELLE MASSE SEZIONE IN CALCESTRUZZO:**

Area:  $A_{cls} = 4635.00$  cm<sup>2</sup>; Baricentro:  $X_{gCls} = 0.00$  cm;  $Y_{gCls} = 0.00$  cm  
Momenti d'inerzia:  $J_x = 8434231.49$  cm<sup>4</sup>;  $J_y = 2563076.25$  cm<sup>4</sup>;  $J_{xy} = -0.00$  cm<sup>4</sup>;  
Momenti principali d'inerzia:  $J_{csi} = 8434231.49$  cm<sup>4</sup>;  $J_{eta} = 2563076.25$  cm<sup>4</sup>;  
Angolo tra l'asse principale d'inerzia  $c_{si}$  e l'asse x:  $\Theta = 0.00$  rad;

**COMBINAZIONI DI CARICO:**

Azione normale (positiva se di compressione).

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Azioni rispetto x e y baricent. paralleli agli assi x e y (N, N\*m).

Combinazioni stati limite ultimi:

comb.	N	Mx	Tx	My	Ty	Mt
1	457290	1043170	0	0	436900	0

VERIFICA PRESSO-TENSOFFLESSIONE (comb. di carico N.ro 1):

Equaz. asse neutro  $ax+by+c=0$  :  $a=0.000000$ ;  $b=2000.000000$ ;  $c=-78868.336160$

Angolo asse neutro-asse x :  $\alpha=0.000000$  gradi sessadec. in senso antiorario

Deformazioni a rottura (valore positivo se di accorciamento)

Sezione parzializzata

Deformazione massima cls .....:  $\epsilon_c = 3.50000 / 1000$

Deformazione massima acciaio .....:  $\epsilon_f = -51.45758 / 1000$

Deformazione minima acciaio .....:  $\epsilon_f = 1.67797 / 1000$

Azioni sollecitanti rispetto agli assi principali d'inerzia (N, N\*m):

NS=457290.00; MxiS=1043170.00; MyiS=0.00; TxiS=0.00; TyiS=436900.00

Azioni resistenti a rottura rispetto agli assi principali d'inerzia (N, N\*m):

NR=457382.68; MxiR= 2414656.73; MyiR= 0.00

$Mxi0=38970.21$ ,  $Myi0=-0.00$  - Punto base nel grafico Mxi-Myi sul piano NS=cost.

$MR=((MxiR-Mxi0)^2+(MyiR-Myi0)^2)^{1/2}=2453626.94$ ;

$MS=((MxiS-Mxi0)^2+(MyiS-Myi0)^2)^{1/2}=1082140.21$

Fattore di sicurezza ad N costante:  $MR/MS = 2.2674 > 1$

VERIFICA POSITIVA

VERIFICA AZIONE ASSIALE MASSIMA

Comb. n.ro: 1; NS=457290.00 < Nrd=9982329.94 N VERIFICA POSITIVA

VERIFICA QUANTITA' ARMATURA LONGIT. ( $A_{fTot}=58.40 \text{ cm}^2$ ;  $A_{cls}=4635.00 \text{ cm}^2$ ;

$N_{sd}=457290.00 \text{ N}$ )

$0.10 \cdot N_{Ed}/f_{yd}=1.17 \text{ cm}^2$ ;  $A_{cls} \cdot 0.003=13.91 \text{ cm}^2$ ;  $A_{cls} \cdot 0.04=185.40 \text{ cm}^2$ ;

VERIFICHE POSITIVE

VERIFICA TRANCIAMENTO BARRE

Comb. N.: 1;  $V_{su}=436900.00 \text{ N}$ ;  $\tau_{MaxTr}=V_{su}/A_f=74.8088 < f_{yd}=391.3000 \text{ N/mm}^2$

VERIFICA POSITIVA

VERIFICHE TAGLIO comb. n.ro: 1; ( $f_{cd}=21.1600$ ,  $f_{ctd}=1.56$ ,  $f_{ck}=37.35 \text{ in N/mm}^2$ )

$V_{Ed}=436900.00 \text{ N}$ ;  $d=129.70 \text{ cm}$ ;  $b_w=23.00 \text{ cm}$ ,  $\alpha_c=1.0475$ ,  $\cot(\theta)=2.5000$ ,  $A_{sw/s}$

progettata= $4.00 \text{ cm}^2/\text{m}$

$VR_{cd} = 0.9 \cdot b_w \cdot d \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot 0.5 \cdot (\cot(90) + \cot(\theta)) / (1 + \cot(\theta)^2) = 1026039.27 \text{ N}$

$VR_{sd} = 0.9 \cdot d \cdot (A_{sw/s}) \cdot f_{yd\_st} \cdot (\cot(90) + \cot(\theta)) \cdot \sin(90) = 436900.00 \text{ N}$

$V_{Ed} < \min(VR_{sd}, VR_{cd}) \Rightarrow \text{VERIFICA POSITIVA}$

PROGETTO PASSO STAFFE. (N.ro bracci: Nb=2, Area singola staffa:  $A_{1s}=0.5027 \text{ cm}^2$ )

N.B. I bracci considerati sono quelli delle staffe e le legature dell'anima aventi l'angolo, con l'asse ort. all'asse neutro, inferiore a 45 gradi

Area staffe per il taglio (Comb. n.ro 1) ( $f_{ydSt}=373.91 \text{ N/mm}^2$ )

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

$V_{Ed}=436900.00 \text{ N}$ ;  $d=129.70 \text{ cm}$ ;  $b_w=23.00 \text{ cm}$ ,  $\cot(\theta)=2.5000$   
da  $V_{Ed}=0.9 \cdot d \cdot (A_{sw}/s) \cdot f_{yd} \cdot St \cdot \cot(\theta)$  si ottiene:  $A_{sw}/s=4.00 \text{ cm}^2/\text{m}$   
 $s=100 \cdot N_b \cdot A_{1s}/A_{sw}=25.11 \text{ cm}$   
 $s \leq 25 \text{ cm}$   
 $s \leq 12 \cdot \varnothing_{min}=12 \cdot 2.60=31.20 \text{ cm}$

Armatura staffe adottata:  $A_s=4.02 \text{ cm}^2/\text{m}$  -> 1Ø8 a 2 bracci ogni 25.00 cm

#### VERTICI SEZIONE:

Nv	X (cm)	Y (cm)	epsilon c x1000
1	-11.50	-87.31	-53.70
2	-11.50	32.69	-2.86
3	-62.50	32.69	-2.86
4	-62.50	47.69	3.50
5	62.50	47.69	3.50
6	62.50	32.69	-2.86
7	11.50	32.69	-2.86
8	11.50	-87.31	-53.70

#### BARRE LONGITUDINALI::

Nf	X (cm)	Y (cm)	diametro(mm)	epsilon f x1000
1	-0.00	43.39	26.00	1.68
2	7.00	43.39	26.00	1.68
3	-7.00	43.39	26.00	1.68
4	-6.00	-82.01	26.00	-51.46
5	6.00	-82.01	26.00	-51.46
6	6.20	-78.00	26.00	-49.76
7	0.00	-78.01	26.00	-49.76
8	-6.20	-78.00	26.00	-49.76
9	0.00	-73.00	26.00	-47.64
10	6.20	-73.00	26.00	-47.64
11	-6.20	-73.00	26.00	-47.64

#### INTERSEZIONI TRA ASSE NEUTRO E PROFILO DELLA SEZIONE :

Ni	X (cm)	Y (cm)
1	-62.50	39.43
2	62.50	39.43

Per la **sezione intermedia** la condizione più gravosa si verifica per la condizione di carico 4 a cui corrisponde un momento flettente pari a **291.51 kN m**, uno sforzo normale di **307.4 kN** ed uno sforzo di taglio di **152.03 kN**. I risultati del calcolo sono di seguito riportati.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

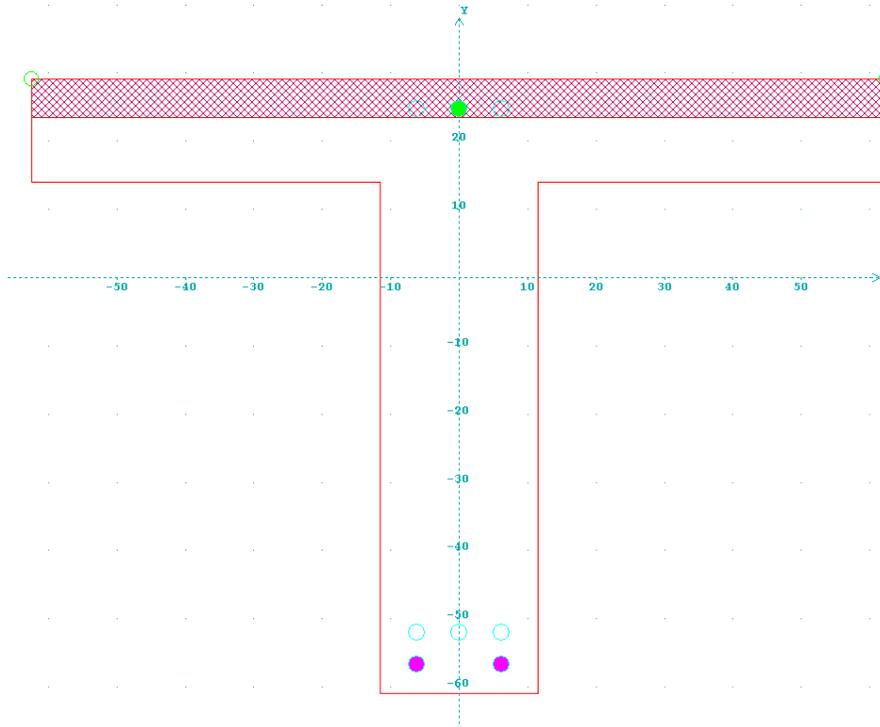


Figura 11.24 : Verifica allo SLU

**OPZIONI:**

Metodo di calcolo: Stati Limite; Normativa Tecnica: Norme Tecniche per le Costruzioni 2008;

**FORMA DELLA SEZIONE: A T**

Largh. anima:  $B_a=23.00$  cm; Altezza tot.:  $H=90.00$  cm

Spessore soletta:  $H_s=15.00$  cm; Base superiore:  $B_s=125.00$  cm

Rotazione:  $rot = 0.00$  gradi

Area totale acciaio .....:  $A_{st} = 42.47$  cm<sup>2</sup>

Copriferro di progetto .....:  $c = 2.80$  cm

Diametro staffe .....:  $d_s = 8$  mm

**GEOMETRIA DELLE MASSE SEZIONE IN CALCESTRUZZO:**

Area:  $A_{cls} = 3600.00$  cm<sup>2</sup>; Baricentro:  $X_{gCls} = 0.00$  cm;  $Y_{gCls} = 0.00$  cm

Momenti d'inerzia:  $J_x = 2663085.94$  cm<sup>4</sup>;  $J_y = 2517450.00$  cm<sup>4</sup>;  $J_{xy} = 0.00$  cm<sup>4</sup>;

Momenti principali d'inerzia:  $J_{csi} = 2663085.94$  cm<sup>4</sup>;  $J_{eta} = 2517450.00$  cm<sup>4</sup>;

Angolo tra l'asse principale d'inerzia  $csi$  e l'asse  $x$ :  $\Theta = -0.00$  rad;

**COMBINAZIONI DI CARICO:**

Azione normale (positiva se di compressione).

Azioni rispetto  $x$  e  $y$  baricent. paralleli agli assi  $x$  e  $y$  (N, N\*m).

**Combinazioni stati limite ultimi:**

comb.	N	Mx	Tx	My	Ty	Mt
1	307400	291510	0	0	152030	0

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_FA	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

VERIFICA PRESSO-TENSOFFLESSIONE (comb. di carico N.ro 1):  
Equaz. asse neutro  $ax+by+c=0$  :  $a=0.000000$ ;  $b=2000.000000$ ;  $c=-46908.566873$   
Angolo asse neutro-asse x :  $\alpha=0.000000$  gradi sessadec. in senso antiorario

Deformazioni a rottura (valore positivo se di accorciamento)  
Sezione parzializzata  
Deformazione massima cls .....:  $\epsilon_c = 3.50000 / 1000$   
Deformazione massima acciaio .....:  $\epsilon_f = -49.98434 / 1000$   
Deformazione minima acciaio .....:  $\epsilon'_f = 0.81644 / 1000$

Azioni sollecitanti rispetto agli assi principali d'inerzia (N, N\*m):  
NS=307400.00; MxiS=291510.00; MyiS=-0.00; TxiS=0.00; TyiS=152030.00  
Azioni resistenti a rottura rispetto agli assi principali d'inerzia (N, N\*m):  
NR=307477.28; MxiR= 994799.13; MyiR= 0.00

Mxi0=13676.54, Myi0=-0.00 - Punto base nel grafico Mxi-Myi sul piano NS=cost.  
 $MR = ((MxiR - Mxi0)^2 + (MyiR - Myi0)^2)^{1/2} = 1008475.67$ ;  $MS = ((MxiS - Mxi0)^2 + (MyiS - Myi0)^2)^{1/2} = 305186.54$   
Fattore di sicurezza ad N costante:  $MR/MS = 3.3045 > 1$   
**VERIFICA POSITIVA**

**VERIFICA AZIONE ASSIALE MASSIMA**  
Comb. n.ro: 1; NS=307400.00 < Nrd=7640313.12 N **VERIFICA POSITIVA**

**VERIFICA QUANTITA' ARMATURA LONGIT.** (AfTot=42.47 cm<sup>2</sup>; Acls=3600.00 cm<sup>2</sup>;  
Nsd=307400.00 N)  
 $0.10 \cdot N_{Ed} / f_{yd} = 0.79$  cm<sup>2</sup>;  $A_{cls} \cdot 0.003 = 10.80$  cm<sup>2</sup>;  $A_{cls} \cdot 0.04 = 144.00$  cm<sup>2</sup>;  
**VERIFICHE POSITIVE**

**VERIFICA TRANCIAMENTO BARRE**  
Comb. N.: 1; Vsu=152030.00 N;  $\tau_{MaxTr} = V_{su} / A_f = 35.7934 < f_{yd} = 391.3000$  N/mm<sup>2</sup>  
**VERIFICA POSITIVA**

**VERIFICHE TAGLIO** comb. n.ro: 1; (fcd=21.1600, fctd=1.56, fck=37.35 in N/mm<sup>2</sup>)  
VEd=152030.00 N; d=85.70 cm; bw=23.00 cm,  $\alpha_c = 1.0411$ ,  $\cot(\theta) = 2.5000$ ,  
Asw/s progettata=2.11 cm<sup>2</sup>/m  
 $VR_{cd} = 0.9 \cdot b_w \cdot d \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot 0.5 \cdot (\cot(90) + \cot(\theta)) / (1 + \cot(\theta)^2) = 673827.33$  N  
 $VR_{sd} = 0.9 \cdot d \cdot (A_{sw/s}) \cdot f_{yd\_st} \cdot (\cot(90) + \cot(\theta)) \cdot \sin(90) = 152030.00$  N  
VEd < min(VRsd, VRcd) => **VERIFICA POSITIVA**

**PROGETTO PASSO STAFFE.** (N.ro bracci: Nb=2, Area singola staffa: A1s=0.5027 cm<sup>2</sup>)  
N.B. I bracci considerati sono quelli delle staffe e le legature dell'anima aventi l'angolo,  
con l'asse ort. all'asse neutro, inferiore a 45 gradi  
Area staffe per il taglio (Comb. n.ro 1) (fydSt=373.91 N/mm<sup>2</sup>)  
VEd=152030.00 N; d=85.70 cm; bw=23.00 cm,  $\cot(\theta) = 2.5000$   
da  $V_{Ed} = 0.9 \cdot d \cdot (A_{sw/s}) \cdot f_{yd\_st} \cdot \cot(\theta)$  si ottiene:  $A_{sw/s} = 2.11$  cm<sup>2</sup>/m  
 $s = 100 \cdot N_b \cdot A_{1s} / A_{sw} = 47.68$  cm  
 $s \leq 25$  cm  
 $s \leq 12 \cdot \phi_{min} = 12 \cdot 2.60 = 31.20$  cm

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>P-SN1 – SOVRAPPASSI – RELAZIONE DI CALCOLO TIPOLOGICA</b>		<i>Codice documento</i> CZ0476_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Armatura staffe adottata:  $A_s=4.02 \text{ cm}^2/\text{m}$  -> 1Ø8 a 2 bracci ogni 25.00 cm

**VERTICI SEZIONE:**

Nv	X (cm)	Y (cm)	epsilon c x1000
1	-11.50	-60.94	-52.67
2	-11.50	14.06	-5.86
3	-62.50	14.06	-5.86
4	-62.50	29.06	3.50
5	62.50	29.06	3.50
6	62.50	14.06	-5.86
7	11.50	14.06	-5.86
8	11.50	-60.94	-52.67

**BARRE LONGITUDINALI::**

Nf	X (cm)	Y (cm)	diametro(mm)	epsilon f x1000
1	-6.20	24.76	26.00	0.82
2	-0.00	24.76	26.00	0.82
3	6.20	24.76	26.00	0.82
4	-6.20	-56.64	26.00	-49.98
5	6.20	-56.64	26.00	-49.98
6	-6.20	-52.00	26.00	-47.09
7	0.00	-52.00	26.00	-47.09
8	6.20	-52.00	26.00	-47.09

**INTERSEZIONI TRA ASSE NEUTRO E PROFILO DELLA SEZIONE :**

Ni	X (cm)	Y (cm)
1	-62.50	23.45
2	62.50	23.45

Per quanto concerne la verifica delle armature collocate negli elementi shell si è fatto ricorso ai metodi classici della tecnica delle costruzioni implementati in opportuno post processore di sap2000. Si è scelto di armare la platea con armatura avente diametro 20 mm in entrambe le direzioni. La stessa armatura è stata prevista sia all'intradosso che all'estradosso della platea. Di seguito una vista della sezione longitudinale della platea.