

# 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)

<p>IL PROGETTISTA Ing E.M.Veje <b>COWI</b> Dott. Ing. E. Pagani Ordine Ingegneri Milano n° 15408</p> 	<p>IL CONTRAENTE GENERALE  Project Manager (Ing. P.P. Marcheselli)</p>	<p>STRETTO DI MESSINA Direttore Generale e RUP Validazione (Ing. G. Fiammenghi)</p>	<p>STRETTO DI MESSINA  Amministratore Delegato (Dott. P. Ciucci)</p>
--	--	---	--

<p><i>Unità Funzionale</i> OPERA DI ATTRAVERSAMENTO <i>Tipo di sistema</i> SOVRASTRUTTURE <i>Raggruppamento di opere/attività</i> TORRI <i>Opera - tratto d'opera - parte d'opera</i> Generale <i>Titolo del documento</i> Torre – Relazione tecnica specialistica</p>	<p><b>PS0013_F0</b></p>
--	-------------------------

CODICE	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>C</td><td>G</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td> <td>P</td> <td>R</td><td>X</td> <td>D</td> <td>P</td> <td>S</td><td>V</td> <td>T</td><td>4</td> <td>0</td><td>0</td> <td>0</td><td>0</td> <td>0</td><td>0</td> <td>0</td><td>1</td> <td>F0</td> </tr> </table>	C	G	1	0	0	0	P	R	X	D	P	S	V	T	4	0	0	0	0	0	0	0	1	F0
C	G	1	0	0	0	P	R	X	D	P	S	V	T	4	0	0	0	0	0	0	0	1	F0		

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
F0	20-06-2011	EMISSIONE FINALE	CHSX	JJL	CHSX/LSJ



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

## INDICE

1	Relazione di Sintesi .....	7
1.1	Introduzione .....	7
1.2	Scopo.....	8
1.3	Materiali .....	8
1.4	Analisi Strutturale.....	8
1.5	Descrizione Generale .....	9
1.6	Gambe delle torri .....	10
1.6.1	Lamiere Longitudinali e Irrigidimenti .....	10
1.6.2	Giunzioni Trasversali in campo .....	15
1.6.3	Analisi di Dettaglio agli Elementi Finiti del Concio della Gamba della Torre.....	15
1.7	Trasversi .....	16
1.8	Ancoraggio di Base.....	19
2	Introduzione .....	23
2.1	Scopo.....	27
2.2	Struttura della relazione .....	27
2.3	Riferimenti.....	28
2.3.1	Specifiche di progetto.....	28
2.3.2	Normative di progetto.....	28
2.3.3	Specifiche dei materiali .....	29
2.3.4	Disegni .....	30
2.3.5	Relazioni complementari.....	31
3	Termini.....	31
4	Stati limite .....	33
5	Materiali .....	33
5.1	Acciaio Strutturale.....	33
5.2	Bulloni ad alta resistenza .....	33
5.3	Trefolo di post-tensione .....	33
6	Analisi Strutturale.....	34
6.1.1	Modello Globale .....	34
6.2	Modello locale .....	34
6.2.1	Collegamento del Trasverso alla Gamba della Torre.....	34
6.2.2	Analisi dell'Instabilità dell'Irrigidimento Trasversale e del Diaframma della Gamba della	

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Torre	35
6.2.3 Collegamenti dell'Irrigidimento Longitudinale all'Irrigidimento Trasversale della Gamba della Torre.....	35
6.2.4 Modello del Concio della Gamba della Torre .....	35
7 Verifiche Progettazione Torre .....	36
7.1 Descrizione Generale .....	36
7.2 Comportamento globale.....	37
7.2.1 Forme dei Modi .....	37
7.2.1.1 Modi di Vibrazione .....	37
7.2.1.2 Modi di Instabilità.....	40
7.2.2 Spostamenti massimi .....	41
7.3 Gambe della torre .....	42
7.3.1 Torre indipendente .....	43
7.3.2 Torre indipendente con Tie-Back.....	44
7.3.3 Ponte completato .....	47
7.3.3.1 Elementi longitudinali.....	47
7.3.3.2 Elementi trasversali .....	71
7.3.3.3 Analisi agli elementi finiti di dettaglio del concio della gamba della torre .....	90
7.3.3.4 Fatica.....	98
7.3.3.5 Scenari di carico accidentale .....	101
7.4 Trasversi .....	108
7.4.1 Elementi longitudinali .....	109
7.4.2 Elementi trasversali.....	120
7.4.3 Fatica .....	122
7.5 Ancoraggio di base .....	125
7.5.1 Tiranti di ancoraggio.....	126
7.5.2 Irrigidimento piatto.....	133
7.5.3 Piastra di base .....	135
7.6 Varie Considerazioni di Progetto .....	137
7.6.1 Accesso.....	137
7.6.2 Collegamento di componenti non strutturali.....	139
7.6.3 Interfacce elettriche e meccaniche.....	139
7.6.4 Deumidificazione.....	140

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

8	Sintesi .....	140
9	Allegato A: Confronto delle storie temporali ed effetti della forza sismica dello spettro di risposta .....	142
10	Appendice B: Effetti di forza della gamba della torre della Calabria .....	175
11	Appendice C: Valutazione degli effetti di forza dell'analisi del fascio delle storie temporali sismiche .....	179



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

# 1 Relazione di Sintesi

## 1.1 Introduzione

La presente relazione descrive il progetto dei seguenti elementi strutturali della torre:

- Gambe
- Trasversi
- Ancoraggio di base

Il progetto si basa su quanto indicato nel progetto redatto in sede di gara.

In questa fase del progetto è stato valutato vantaggioso introdurre le seguenti modifiche rispetto al progetto di gara:

- L'altezza della torre è stata aumentata da 382,6 m a 399 m al fine di compensare l'aumento di peso dell'impalcato;
- Gli irrigidimenti longitudinali a T delle gambe e dei trasversi delle torri sono stati sostituiti da elementi piatti di irrigidimento longitudinale;
- La disposizione degli irrigidimenti trasversali delle gambe delle torri è stata modificata per semplificare la costruzione e l'assemblaggio dei conci delle gambe stesse;
- La disposizione del diaframma trasversale delle gambe delle torri è stata modificata per ottimizzare la quantità di materiale;
- Nei trasversi i telai di controvento sostituiscono i telai di irrigidimento trasversale resistenti al momento;
- Al fine di semplificare e ridurre l'armatura nelle fondazioni della torre i bulloni di ancoraggio nell'ancoraggio di base della torre sono stati sostituiti da tiranti multi-trefolo di post-tensione, e
- Sono state modificate le specifiche degli smorzatori a massa risonante in base ai risultati delle prove nel tunnel del vento.

I calcoli sono in genere basati sul modello globale IBDAS versione 3.3

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

## 1.2 Scopo

La presente relazione descrive la progettazione degli elementi strutturali delle due torri principali, tra l'estradosso delle fondazioni in calcestruzzo (a quota +18.06) e l'intradosso delle selle dei cavi principali (a quota +384.415).

I dettagli della progettazione degli elementi non strutturali delle torri, come ad esempio il sistema di accessi e di attrezzature per la manutenzione e gli impianti meccanici ed elettrici sono descritti in altri documenti dedicati.

La presente Relazione Tecnica Specialistica si focalizza sulla sintesi della progettazione delle torri, inclusa la descrizione delle combinazioni di carico che governano la progettazione dei componenti delle torri e i risultati delle verifiche dei componenti stessi.

## 1.3 Materiali

Le lamiere degli elementi strutturali delle torri sono realizzate in acciaio strutturale di Classe S460ML, ad eccezione dei profili vuoti circolari laminati a caldo, ivi compresi le membrature di controventatura interne dei trasversi, la piastra di base della torre e gli irrigidimenti dell'ancoraggio della base che sono costituiti di acciaio strutturale di Classe S355ML. Quale eccezione rispetto alle prescrizioni standard delle norme NTC08 e EN 10025-4 le caratteristiche meccaniche dell'acciaio non cambieranno al variare dello spessore delle lamiere per spessori inferiori a 110 mm in caso di acciaio S460ML e inferiori a 150 mm per acciaio S355ML. E' stata confermata la possibilità di produrre acciaio delle caratteristiche richieste.

Per le giunzioni tra i conci delle gambe delle torri sono utilizzati bulloni strutturali ad alta resistenza di Classe 10.9, prodotti in accordo alla EN ISO 898.

Tutti i tiranti di post-tensione saranno conformi alle prescrizioni di EN 10138-3 e saranno caratterizzati da un carico di rottura di 1.860 MPa.

## 1.4 Analisi Strutturale

Il Ponte sullo Stretto di Messina è stato modellizzato e analizzato utilizzando il programma IBDAS (Integrated Bridge Design and Analysis System) di modellazione strutturale di proprietà della COWI. La progettazione strutturale delle torri descritta nella presente relazione è basata sui risultati della versione 3.3f del modello di calcolo.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Il modello di calcolo globale è stato integrato con le più dettagliate analisi locali dei seguenti elementi:

- Collegamento dei trasversi e le gambe delle torri;
- Irrigidimenti trasversali delle gambe e piatti dei diaframmi;
- Collegamenti degli irrigidimenti longitudinali delle gambe delle torri con gli irrigidimenti trasversali e
- Concio 6 della gamba delle torri lato Sicilia – analizzato considerando la geometria non lineare e i materiali e includendo gli effetti delle imperfezioni iniziali e delle sollecitazioni residue (utilizzato per verificare le procedure di progettazione).
- Segmento 17 della Gamba della Torre della Calabria,– analizzato considerando la geometria non lineare ed i materiali, inclusi gli effetti delle imperfezioni iniziali e delle sollecitazioni residue (per valutare il danno potenziale dovuto agli effetti di forza corrispondenti alla fascia dei risultati dell’analisi sismica di tutte le storie temporali).

## 1.5 Descrizione Generale

Le torri del Ponte sullo Stretto di Messina sono alte 381 m dall’estradosso delle fondazioni in calcestruzzo al cavo principale sulla sommità delle torri. Le torri sono costituite da tre componenti strutturali principali: le gambe, i trasversi e l’ancoraggio di base. Le gambe e i trasversi delle torri sono costituiti da sezioni chiuse di piatti d’acciaio irrigidite longitudinalmente e trasversalmente. L’ancoraggio di base comprende la piastra di base, i tiranti di ancoraggio di post-tensione e gli irrigidimenti di ancoraggio della gamba della torre.

Le torri sono verniciate sia esternamente che internamente, le superfici interne sono ulteriormente protette dalla corrosione mediante un sistema di deumidificazione.

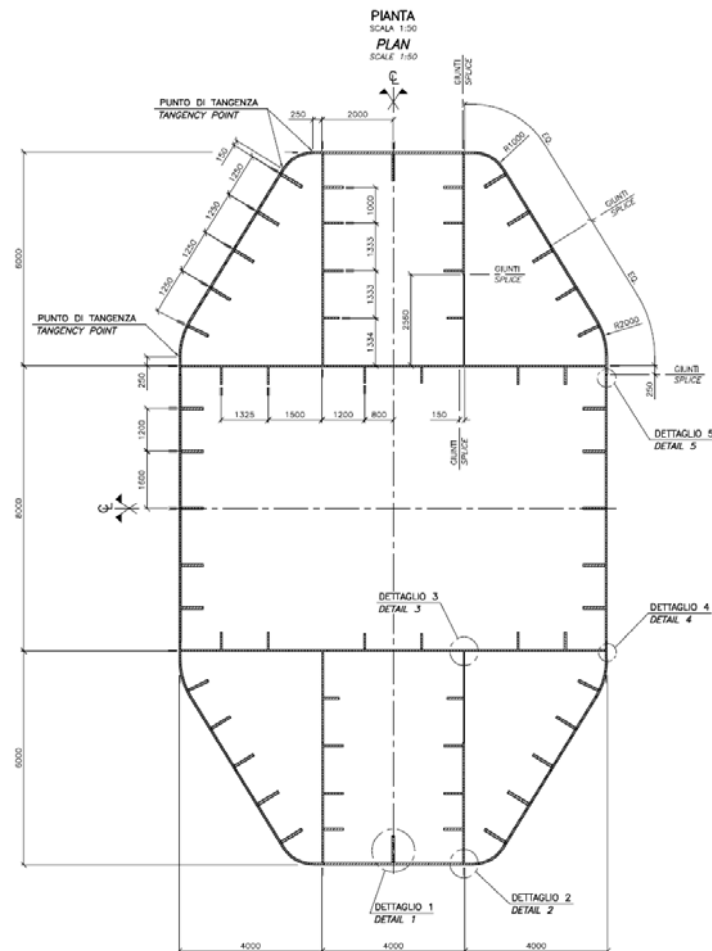
Le torri sono provviste di un sistema di accesso comprendente scale, scale a pioli, ascensori, montacarichi e carri ponte che consentono l’ispezione e la manutenzione di tutti gli elementi strutturali.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011	

## 1.6 Gambe delle torri

### 1.6.1 Lamiere Longitudinali e Irrigidimenti

Le gambe delle torri hanno sezione scatolare in acciaio costituite da pannelli irrigiditi longitudinalmente e trasversalmente. La sezione delle gambe delle torri è costante su tutta la lunghezza tra l'estradosso della piastra di base e l'intradosso della sella del cavo principale, con una larghezza in direzione perpendicolare all'asse del ponte pari a 12 m e una lunghezza in direzione parallela all'asse del ponte pari a 20 m. Una sezione trasversale tipica di una gamba



della torre è mostrata nella

Figura 1.1. Le gambe delle torri sono realizzate in officina in 21 conci a sezione completa aventi lunghezza variabile tra 10.15 m e 20 m. e un peso massimo di circa 1.525 tonnellate, ivi compresi gli smorzatori a massa risonante. I conci delle gambe delle torri sono collegati mediante giunti di costruzione che comprendono connessioni con bulloni ad alta resistenza dimensionate allo



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Le torri sono progettate per essere realizzate verticali (senza inclinazione) e con l'introduzione del tie-back prima dell'installazione del cavo principale. La forza di tie-back, o piuttosto lo spostamento, che viene introdotta durante la costruzione è determinata in maniera tale da lasciare le torri leggermente inclinate verso le campate laterali nella condizione di carico permanente di riferimento dopo la costruzione. L'inclinazione permanente delle gambe delle torri è determinata al fine di bilanciare meglio le massime sollecitazioni di compressione agenti sulle facce delle gambe delle torri (verso la campata principale e verso le campate laterali) a ponte completato.

Il dimensionamento delle gambe delle torri è governato dai carichi a cui le stesse sono soggette a ponte completato.

I piatti e gli irrigidimenti longitudinali sono stati dimensionati utilizzando il metodo della larghezza equivalente specificato nei capitoli 4.4 e 4.5 della EN 1993-1-5 e come ulteriormente descritto nei Principi Generali della Progettazione. Gli spessori dei piatti risultanti variano da 30 mm a 110 mm per entrambe le torri, lato Sicilia e lato Calabria. L'interasse tra gli irrigidimenti trasversali varia da 1.000 mm a 2.000 mm e le loro dimensioni variano da 425x43 a 750x75.

Lo spessore dei piatti e l'interasse degli irrigidimenti longitudinali è determinato in maniera tale da garantire l'efficienza necessaria a supportare le tensioni di compressione massime solo in determinati punti della sezione trasversale. L'efficienza è definita come il rapporto tra il limite di resistenza a compressione e il limite di snervamento non ponderato. Poiché le sollecitazioni massime di progetto sono una combinazione di compressioni assiali e di flessione, i piatti e gli irrigidimenti più lontani dal baricentro della sezione trasversale sono sottoposti alle tensioni maggiori, e quindi sono dimensionati per garantire la maggiore efficienza possibile. Piatti ed irrigidimenti vicini al baricentro della sezione non sono mai soggetti a tensioni pari alla tensione di snervamento di progetto e quindi possono essere più snelli senza influire sulla capacità di resistenza globale della sezione trasversale.

Le forze assiali agenti sulle gambe delle torri sono dominate dagli effetti dei carichi permanenti. La forza assiale generata dal carico permanente non ponderato è pari a circa 4 volte la maggiore forza assiale generata da qualsiasi altro componente di carico. I momenti longitudinali agenti sulle gambe delle torri sono pesantemente dominati dai carichi sismici, con il momento massimo che risulta circa 4 volte il maggiore generato da qualsiasi altro carico. I momenti trasversali sono governati dal carico del vento e dal carico sismico che generano entrambi valori dimensionanti a determinate quote. Il carico del vento, in genere, genera i momenti massimi appena sopra e sotto

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

ciascun trasverso, i carichi sismici, in genere, generano i momenti dimensionanti a metà altezza tra ciascuno dei trasversi a causa del modo di vibrare proprio della gamba della torre. In aggiunta agli effetti delle forze agenti sopra descritti, le gambe delle torri sono soggette a forze addizionali dovute all'instabilità globale della torre (come effetto delle imperfezioni equivalenti). I momenti generati dall'instabilità elastica globale rappresentano un contributo significativo nel determinare la richiesta di resistenza delle torri.

La progettazione strutturale delle gambe delle torri è basata sugli effetti generati da tutte le rilevanti combinazioni di carico. I coefficienti di utilizzo di tutti i punti della sezione trasversale sono inferiori o uguali a 1.0 per tutte le combinazioni di carico. Il dimensionamento delle gambe delle torri è in genere governato dalla combinazione di carico 7 allo SLU, che include il sisma e i carichi accidentali massimi simultanei. La combinazione di carico 6 allo SLU, che comprende il vento trasversale, governa generalmente il dimensionamento dello spessore dei piatti C, D e H e la grandezza degli irrigidimenti longitudinali vicino ai trasversi, dove i momenti trasversali sono massimi. I coefficienti di utilizzo per tutti i punti della sezione trasversale e i conci delle gambe delle torri per le combinazioni di carico dimensionanti sono mostrati nella Figura 1.2 e nella Figura 1.3, per le torri lato Sicilia e lato Calabria rispettivamente.

Per tutte le combinazioni di carico e tutti i conci della torre, le tensioni dimensionanti sono generalmente localizzate vicino agli angoli della sezione trasversale con il punto più sollecitato localizzato o nell'angolo non irrigidito o in corrispondenza dell'irrigidimento longitudinale adiacente all'angolo. Per tali punti della sezione, lo spessore del piatto e le dimensioni dell'irrigidimento sono state definite in maniera tale che la massima tensione di compressione ammissibile sia il più vicino possibile allo snervamento del materiale (alta efficienza). I coefficienti di utilizzo dimensionanti sono compresi tra 0.95 e 1.0 per tutti i conci di entrambe le torri.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

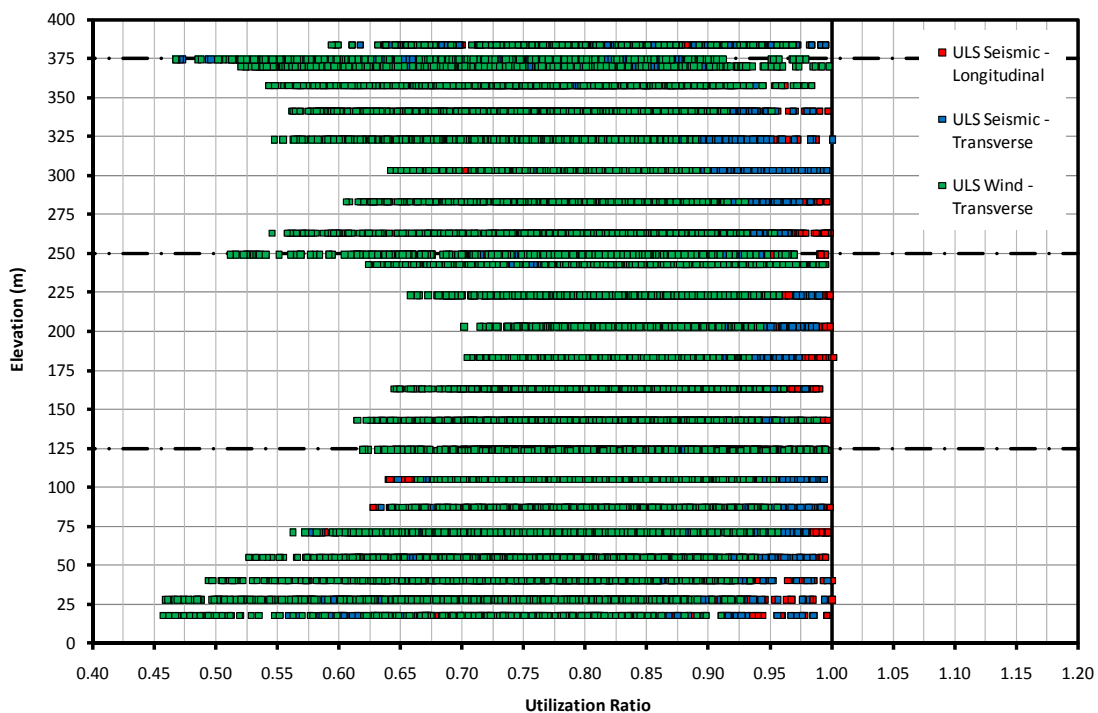


Figura 1.2 Coefficienti di utilizzo per il dimensionamento della gamba della torre Sicilia

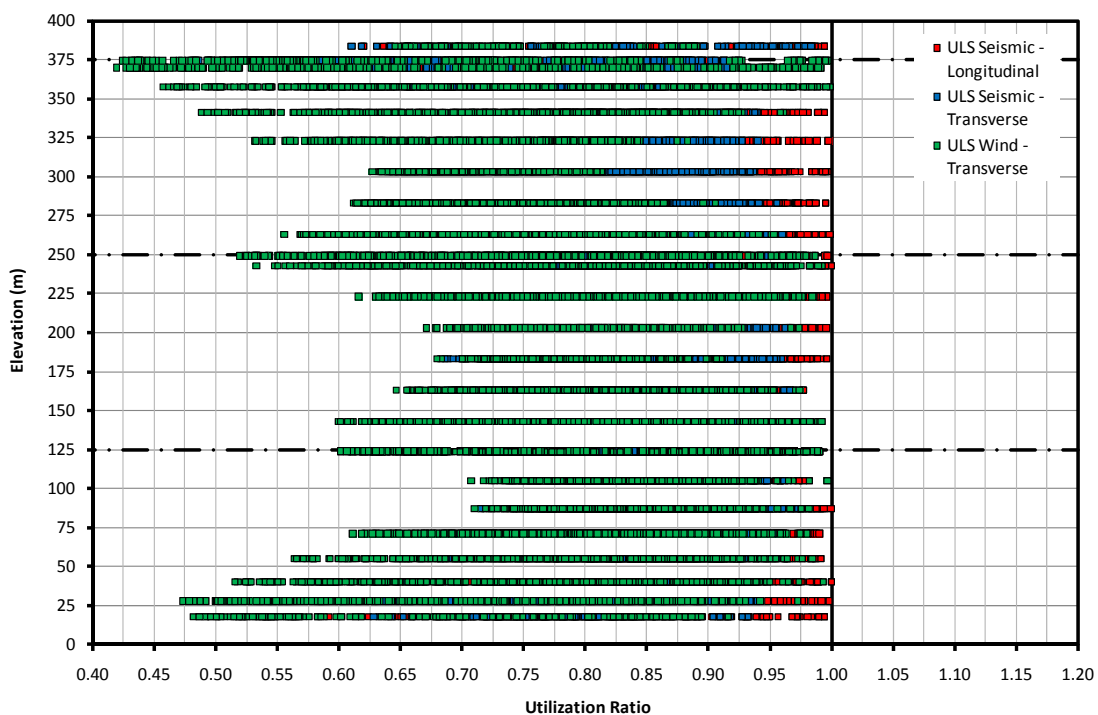


Figura 1.3 Coefficienti di utilizzo per il dimensionamento della gamba della torre Calabria

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

La progettazione delle gambe delle torri è regolata pesantemente dagli sforzi di compressione assili e flessionali. Le dimensioni della sezione trasversale e lo spessore dei piatti devono garantire una resistenza adeguata a tali effetti assicurando un eccesso di resistenza a taglio. L'interazione tra gli sforzi longitudinali di compressione e gli sforzi di taglio trasversali o longitudinali non deve essere presa in considerazione in quanto i coefficienti di utilizzo per gli sforzi di taglio agenti contemporaneamente ai massimi carichi assiali e flessionali sono inferiori a 0.5.

### 1.6.2 Giunzioni Trasversali in campo

Le giunzioni trasversali tra gli elementi delle gambe delle torri sono realizzate in campo mediante una combinazione di saldature a piena penetrazione sulle lamiere esterne e giunti bullonati sugli irrigidimenti longitudinali e sui piatti interni (anime longitudinali e trasversali). Al fine di garantire una rigidità simile a quella dei piatti esterni saldati, le giunzioni imbullonate sono verificate allo scorrimento allo stato limite ultimo e tutti i coprigiunti sono dimensionati con un'area maggiore dell'area del più piccolo dei piatti giuntati. Il tiro finale di tutti i bulloni nei giunti deve essere effettuato solo dopo il completamento delle saldature delle lamiere esterne. Saranno utilizzati bulloni M30 di Classe 10.9.

### 1.6.3 Analisi di Dettaglio agli Elementi Finiti del Concio della Gamba della Torre

È stato sviluppato un modello agli elementi finiti di un concio completo della gamba al fine di confermare l'adeguatezza delle resistenze calcolate applicando il Capitolo 4 della EN 993-1-5, che è la base per le verifiche di progetto della gamba della torre. Il modello ha preso in considerazione gli effetti della geometria non lineare, le proprietà non lineari dei materiali, le imperfezioni geometriche iniziali e le tensioni residue. Il concio 6 della gamba della torre Sicilia è stato modellizzato in quanto tale concio ha i piatti più sottili in confronto ai carichi assiali agenti rispetto agli altri conci, e quindi potrebbe risultare più sensibile agli effetti causati dall'instabilità a carico di punta.

L'analisi di dettaglio agli elementi finiti indica una capacità effettiva maggiore del 3% rispetto a quella calcolata applicando il capitolo 4 della EN 1993-1-5, ma tale dato potrebbe leggermente ridursi in quei conci caratterizzati da un rapporto tra il momento e lo sforzo assiale maggiore. Tale risultato conferma, in genere, che con il metodo di progettazione adottato si ottiene una struttura sufficientemente sicura ed economica al tempo stesso.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Un secondo modello di elemento finito del segmento della gamba della torre è stato effettuato per il segmento 17 della gamba della torre della Calabria al fine di valutare la potenziale portata del danno che potrebbe essere causato dagli effetti della forza corrispondenti alla fascia dei risultati dell'analisi di tutte le storie temporali (invece dei risultati medi dell'analisi delle storie temporali utilizzati per il progetto). Questo segmento è stato scelto per la valutazione dettagliata perché si è osservato che presentava il maggiore rapporto di utilizzo sotto la fascia di tutti gli effetti sismici, considerando tutti i fattori di sicurezza parziale pari a 1.0. L'analisi dettagliata ha confermato che una plasticità molto limitata si tradurrebbe in una sezione critica con sollecitazioni compressive massime approssimativamente pari alla resistenza allo snervamento nominale del materiale della piastra della gamba della torre e le massime deformazioni compressive poco meno di circa 0.00325, dove il materiale non è del tutto nel plateau di snervamento della relazione sollecitazione-deformazione. L'analisi ha previsto una capacità di sezione trasversale circa dell'11% maggiore di quella prevista dalle verifiche di progetto

## 1.7 Trasversi

I trasversi che collegano le due gambe di ciascuna torre sono localizzati approssimativamente alle quote +125 m, +250 m e +375m. Ciascun trasverso è largo 8 m e ha un'altezza variabile tra 11,5 m in corrispondenza della mezzera del ponte e circa 22 m, 20 m e 18 m in corrispondenza della faccia della gamba, per il trasverso 1, 2 e 3 rispettivamente. I trasversi comprendono i piatti in acciaio di irrigidimento longitudinale e trasversale delle anime e delle flange. Le sezioni trasversali tipiche del trasverso sono mostrate in Figura 1.4. Ciascun trasverso verrà fabbricato interamente in officina e varato come un pezzo unico in cantiere.

Il carico dimensionale per il trasverso è il vento allo SLU (statico + dinamico) agente in direzione trasversale rispetto all'asse del ponte per trasversi 1 e 2 e sismicità e vento allo SLU per il trasverso 3. I trasversi stabilizzano le gambe della torre rispetto all'instabilità trasversale, e quindi l'instabilità globale della torre (effetto delle imperfezioni equivalenti) si traduce in significativi momenti e sforzi di taglio aggiuntivi sul trasverso. I coefficienti di utilizzo per le tensioni di "von Mises" in tutti i punti della sezione trasversale dei trasversi 1, 2 e 3 sono mostrati rispettivamente alla Figura 1.5, Figura 1.6 e Figura 1.7. I coefficienti di utilizzo per le combinazioni di carico di vento allo SLU e SLIS sono rappresentati nelle suddette figure dalle linee rosse e blu, rispettivamente, i coefficienti di utilizzo per le combinazioni di carico sismico allo SLU sono



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

rappresentati dalle linee verdi. Il massimo coefficiente di utilizzo in ciascun trasverso varia da 0.8 a 0.9.

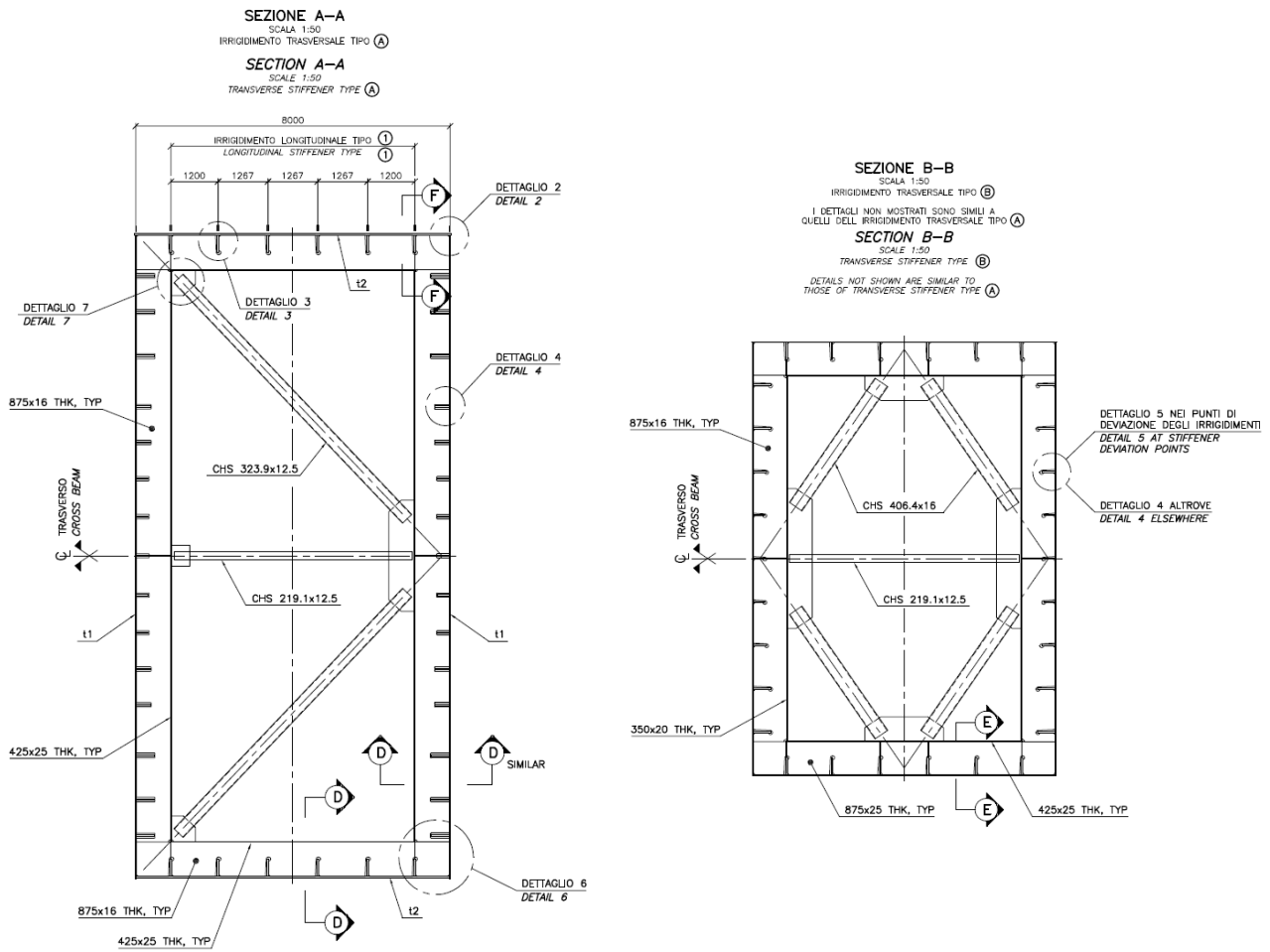


Figura 1.4 Sezioni trasversali tipiche del trasverso

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

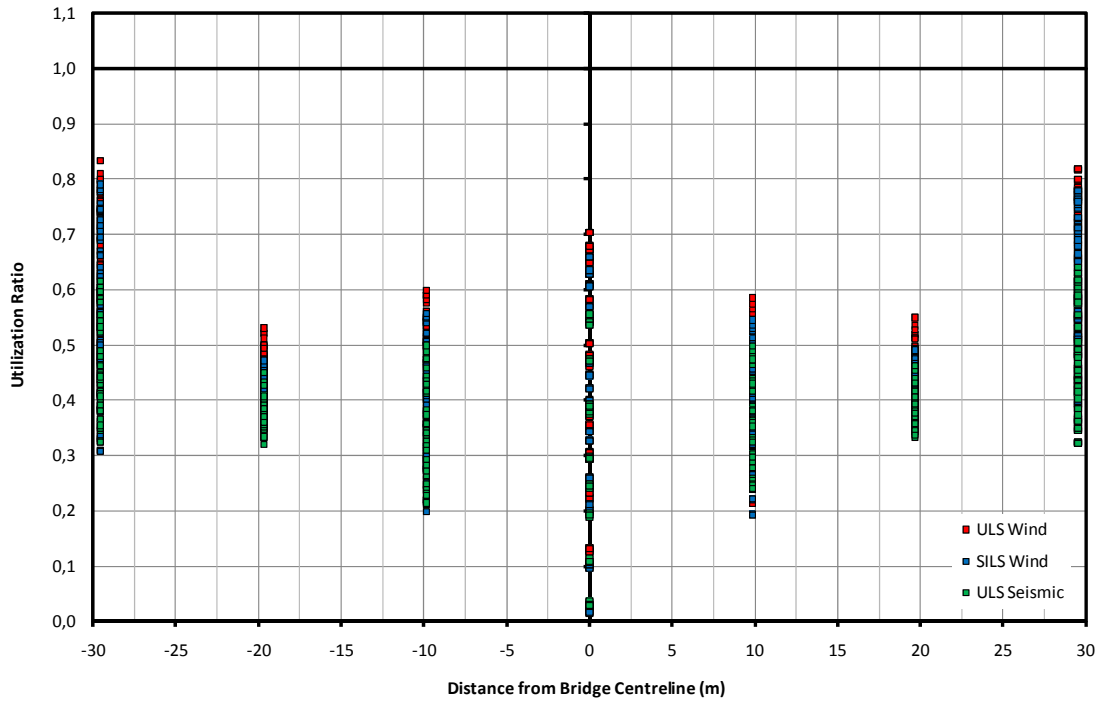


Figura 1.5 Coefficienti di utilizzo del trasverso 1 della torre Sicilia

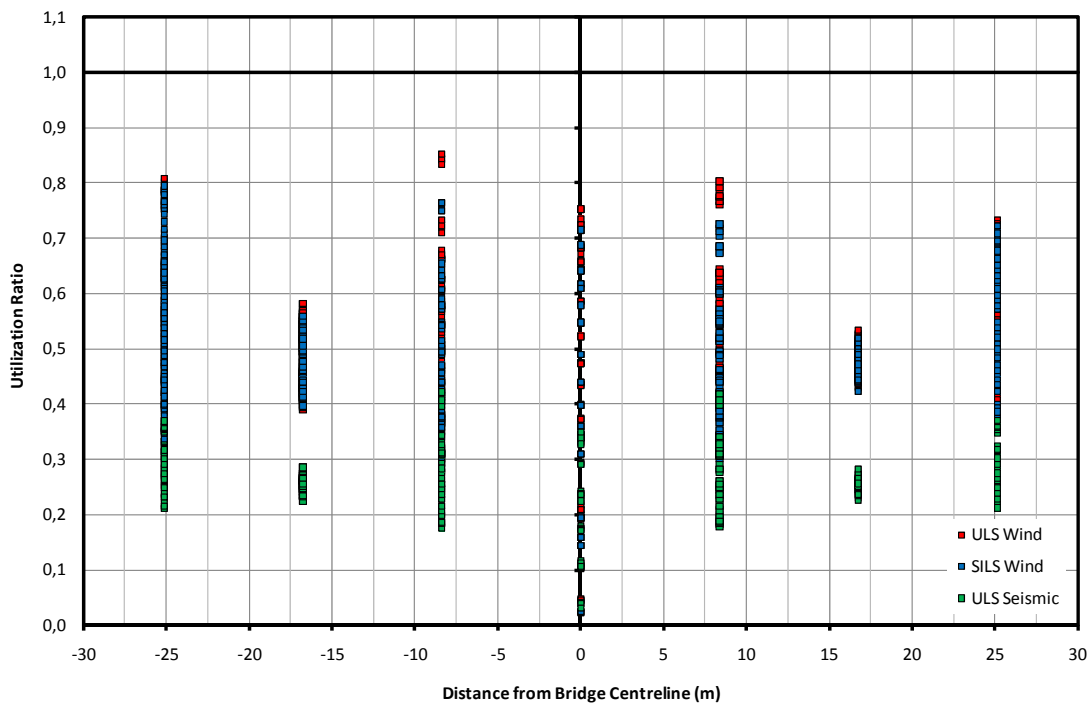


Figura 1.6 Coefficienti di utilizzo del trasverso 2 della torre Sicilia

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

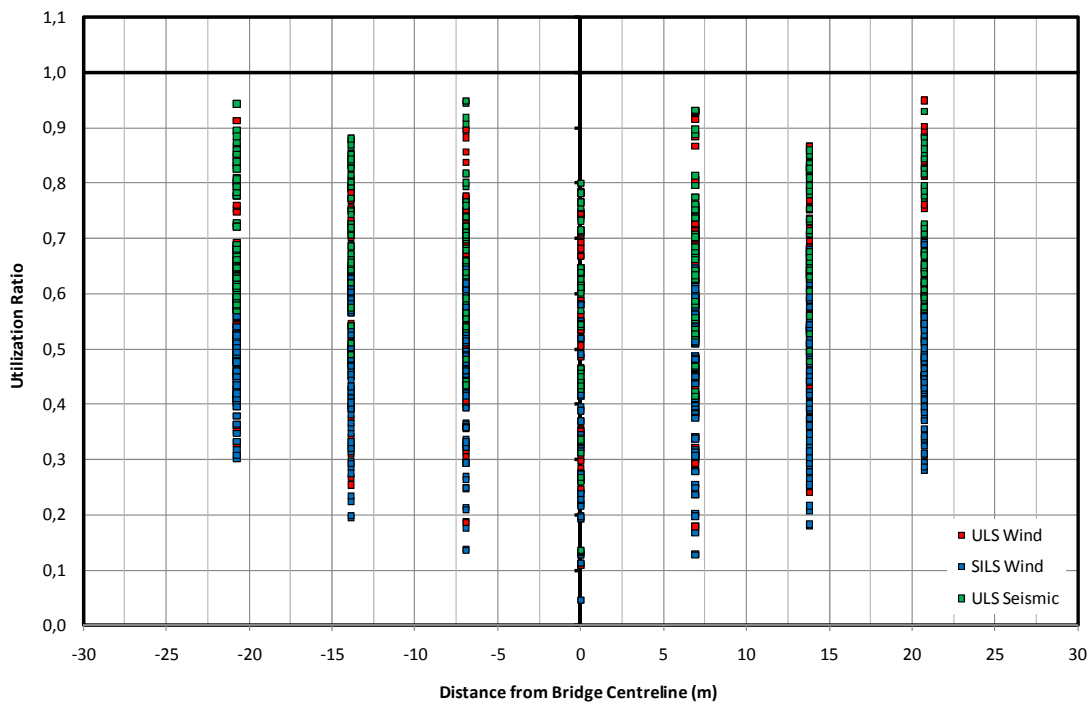


Figura 1.7 Coefficienti di utilizzo del trasverso 3 della torre Sicilia

## 1.8 Ancoraggio di Base

L'ancoraggio di base della torre è costituito dai tiranti di ancoraggio multi-trefolo di post-tensione, dalla piastra di base e dagli irrigidimenti locali della gamba della torre. L'ancoraggio di base attuale della torre è simile dal punto di vista concettuale a quanto sviluppato nel progetto di gara fatta eccezione per i bulloni di ancoraggio che sono stati sostituiti da tiranti di post-tensione al fine di ridurre il volume di armatura delle fondazioni. Una vista in pianta della base della torre che mostra la disposizione degli ancoraggi dei tiranti è riportata alla Figura 1.8.

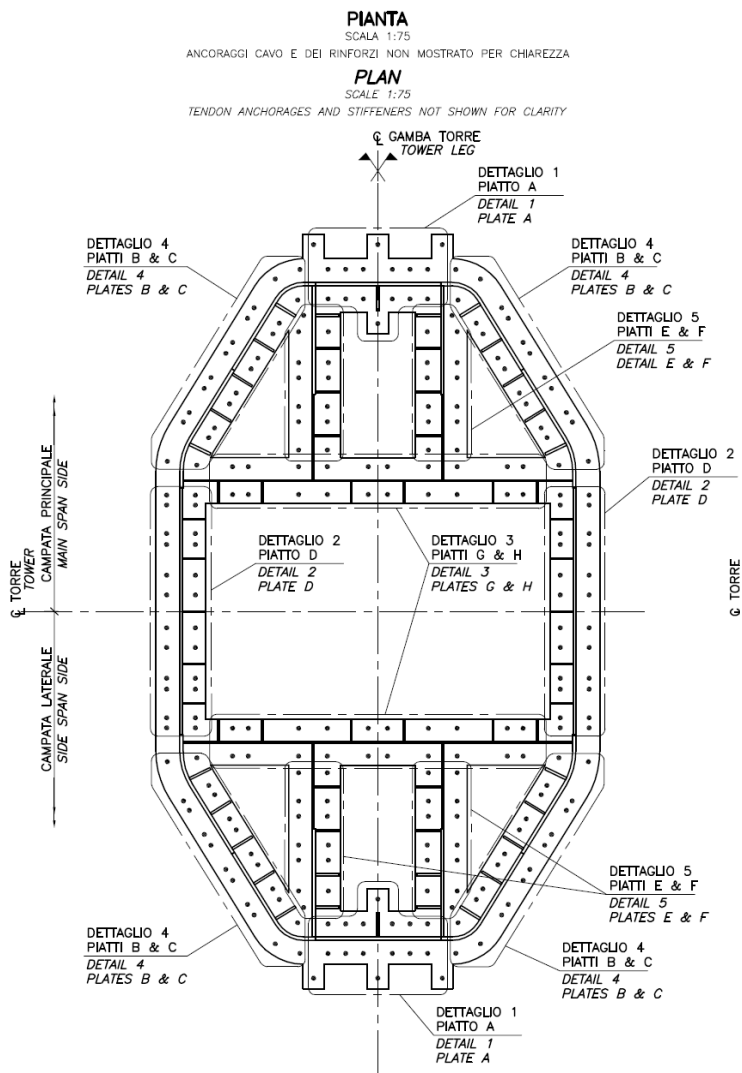


Figura 1.8 Disposizione del tirante di ancoraggio della base della torre

Il coppia dei tiranti di ancoraggio viene fatto passare attraverso le fondazioni in modo che gli ancoraggi di entrambe possano sostenere la richiesta di resistenza alla trazione in certi punti della base della torre. I tiranti che ancorano le piastre A, E, F, G e H sul lato della campata principale si collegano ai corrispondenti punti di ancoraggio sul lato della campata laterale della gamba della torre. I tiranti che ancorano le piastre B, C e D sul lato orientale della gamba della torre si collegano ai corrispondenti punti di ancoraggio sul lato occidentale della gamba della torre. Le uniche eccezioni a tale disposizione sono i tiranti che ancorano le aree agli angoli delle intersezioni delle piastre A, B e E, ancorate alla piastra B, ma si collegano nel mezzo delle

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

campate principali e laterali della gamba della torre. Una vista in pianta e una sezione trasversale tipiche dell'ancoraggio dei tiranti sono riportate alla Figura 1-.

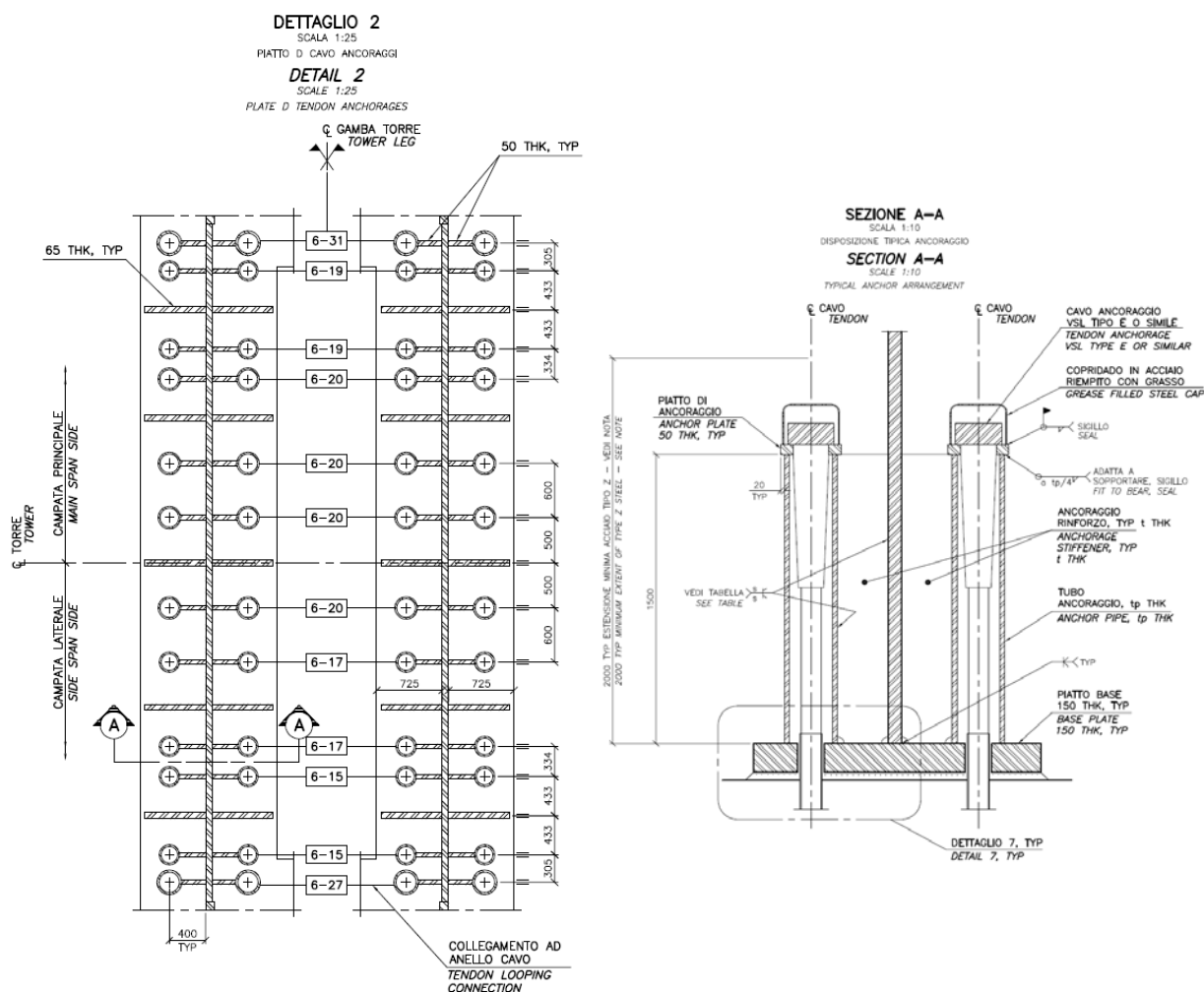


Figura 1-9: Vista in pianta e sezione trasversale degli ancoraggi del tirante della piastra D.

I tiranti consistono di trefoli galvanizzati singolarmente, lubrificati e ricoperti di una guaina in polietilene simili a quelli utilizzati nei cavi per stralli a trefoli paralleli. I trefoli hanno una superficie di  $150 \text{ mm}^2$  e una resistenza alla rottura di 1860 MPa. Le canaline dei tiranti non verranno inghisate così da permetterne la sostituzione. Gli ancoraggi dei trefoli saranno posti in coppette in acciaio riempite di grasso saldate all'estradosso della piastra di ancoraggio. Tale disposizione porta ad avere un tirante completamente incapsulato con barriere multiple anticorrosione. I tiranti variano

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

per dimensione da 9 a 55 trefoli e i tiranti più grandi sono generalmente concentrati lungo le piastre A, B e E dove sono maggiori le forze di trazione.

I tiranti sono dimensionati in modo da impedire la decompressione della base della torre sotto l'azione di combinazioni di carico allo SLU e SLIS nel corso della costruzione o a ponte completato. I tiranti sono dimensionati in base all'effettiva sollecitazione alla trazione a seguito di tutte le perdite di  $0.65 f_{pk}$ , divisa per un ulteriore fattore di sicurezza di 1.10. Le richieste di resistenza sul lato della campata principale della gamba della torre sono generalmente governate da carichi sismici o del vento su torre indipendente con tie-back; in ogni caso i carichi sismici allo SLU a ponte completato dimensionano le richieste di resistenza sulle fibre longitudinali estreme della gamba della torre dei piatti A, B e E e i carichi del vento allo SLIS a ponte completato dimensionano le fibre trasversali estreme della gamba del ponte sul piatto D. Le richieste di resistenza sul lato della campata laterale della gamba della torre sono generalmente governate da carichi del vento su torre indipendente, fatta eccezione per le richieste di resistenza sul piatto D che sono regolate dai carichi del vento allo SLIS a ponte completato.

Gli irrigidimenti della piastra di base della torre sono composti da irrigidimenti verticali della piastra di base e da irrigidimenti di ancoraggio. I componenti di irrigidimento della piastra sono progettati per sforzi di taglio e sollecitazioni di flessione combinati secondo EN 1993-1-5, Capitolo 10. Gli irrigidimenti sono dimensionati per sostenere unicamente le pressioni di contatto delle aree tributarie dovute a carichi applicati esternamente. Per gli irrigidimenti di ancoraggio si verifica pure che abbiano la resistenza di taglio necessaria a ritrasmettere la forza di trazione effettiva del tirante ancorato al piatto della gamba della torre.

La piastra di base è un piatto d'acciaio di 150 mm di spessore che distribuisce le forze verticali agenti su tutti i piatti della gamba della torre e sugli irrigidimenti longitudinali, nonché le forze di pre-tensionamento dei tiranti di ancoraggio in maniera pressoché uniforme sul baggio in malta di spessore di 40 mm che ha la funzione di trasmettere ulteriormente i carichi alla sottostante fondazione in calcestruzzo della torre. La geometria in pianta della piastra di base è stata determinata al fine di sostenere tutti gli irrigidimenti longitudinali e limitare le tensioni di contatto all'estradosso della fondazione in calcestruzzo a circa 60 MPa. La resistenza a taglio dell'ancoraggio di base è assicurata dall'attrito tra la piastra di base ed il sottostante baggio in malta. Il taglio massimo agente alla base della torre è uguale a 158 MN in corrispondenza della combinazione di carico sismica allo SLIS. Il taglio resistente dell'ancoraggio di base della torre è pari a 500 MN, che si traduce in un coefficiente di utilizzo massimo pari a 0.32.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

## 2 Introduzione

La presente relazione descrive la progettazione dei seguenti componenti strutturali della torre:

- Gambe
- Trasversi
- Ancoraggio di base

La progettazione si basa su quanto indicato nel progetto di gara.

In questa fase del progetto è stato valutato vantaggioso introdurre le seguenti modifiche rispetto al progetto di gara:

- L'altezza della torre è stata aumentata da 382,6 m a 399 m al fine di compensare l'aumento di peso dell'impalcato;
- Gli irrigidimenti longitudinali a T delle gambe e dei trasversi delle torri sono stati sostituiti da elementi piatti di irrigidimento longitudinale;
- La disposizione degli irrigidimenti trasversali delle gambe delle torri è stata modificata per semplificare la costruzione e l'assemblaggio dei conci delle gambe stesse;
- La disposizione del diaframma trasversale delle gambe delle torri è stata modificata per ottimizzare la quantità di materiale;
- Nei trasversi telai di controvento sostituiscono i telai di irrigidimento trasversale resistenti al momento;
- Al fine di semplificare e ridurre l'armatura nelle fondazioni della torre i bulloni di ancoraggio nell'ancoraggio di base della torre sono stati sostituiti da tiranti multi-trefolo di post-tensione, e
- Sono state modificate le specifiche degli smorzatori a massa risonante in base ai risultati delle prove nel tunnel del vento.

I calcoli sono in genere basati sul modello globale IBDAS versione 3.3

*Una pianta e una sezione in elevazione del ponte sono riportate alla Figura 2-1 e le sezioni in elevazione longitudinali e trasversali sono riportate alla*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<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: 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						

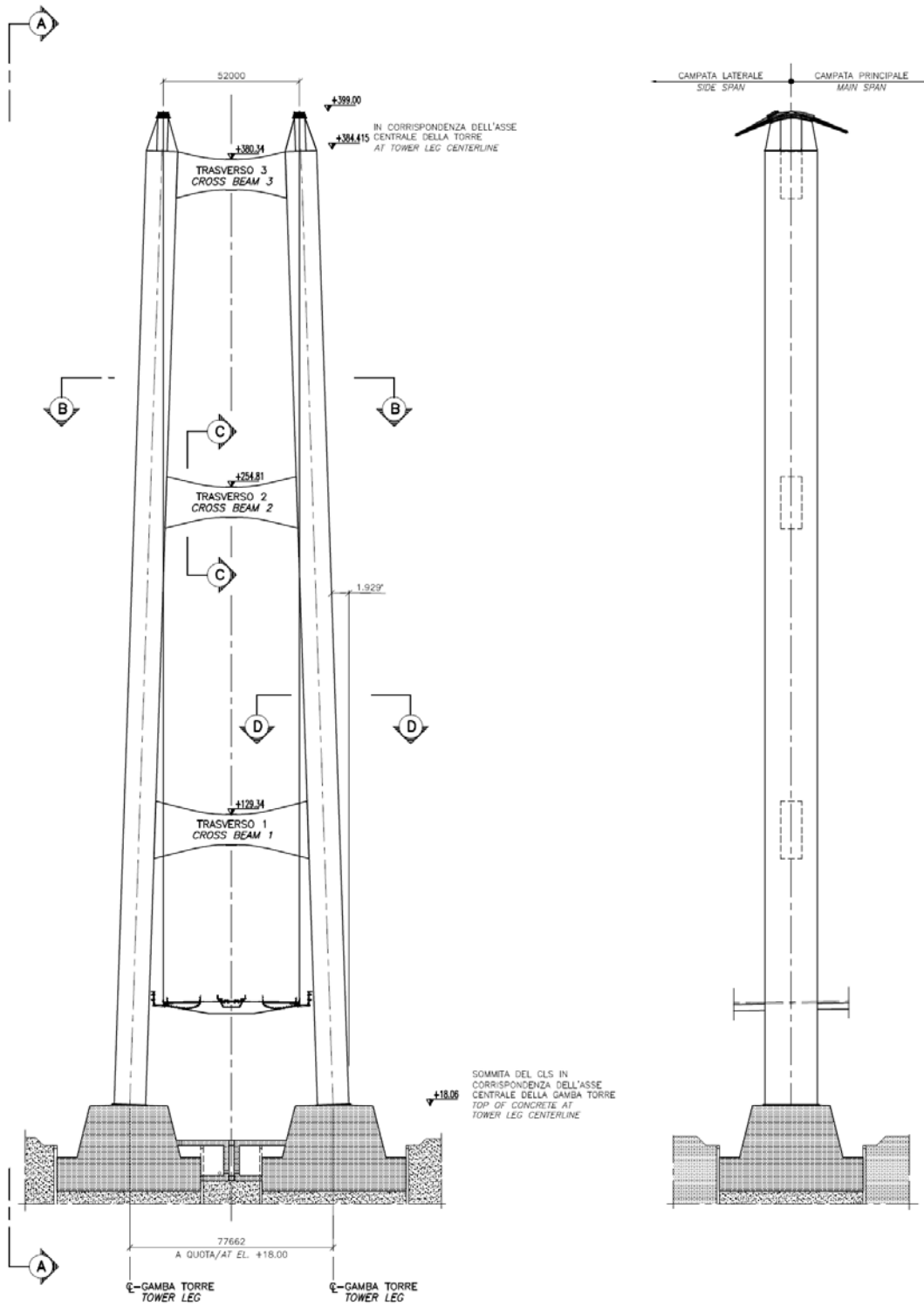


Figura 2-2.



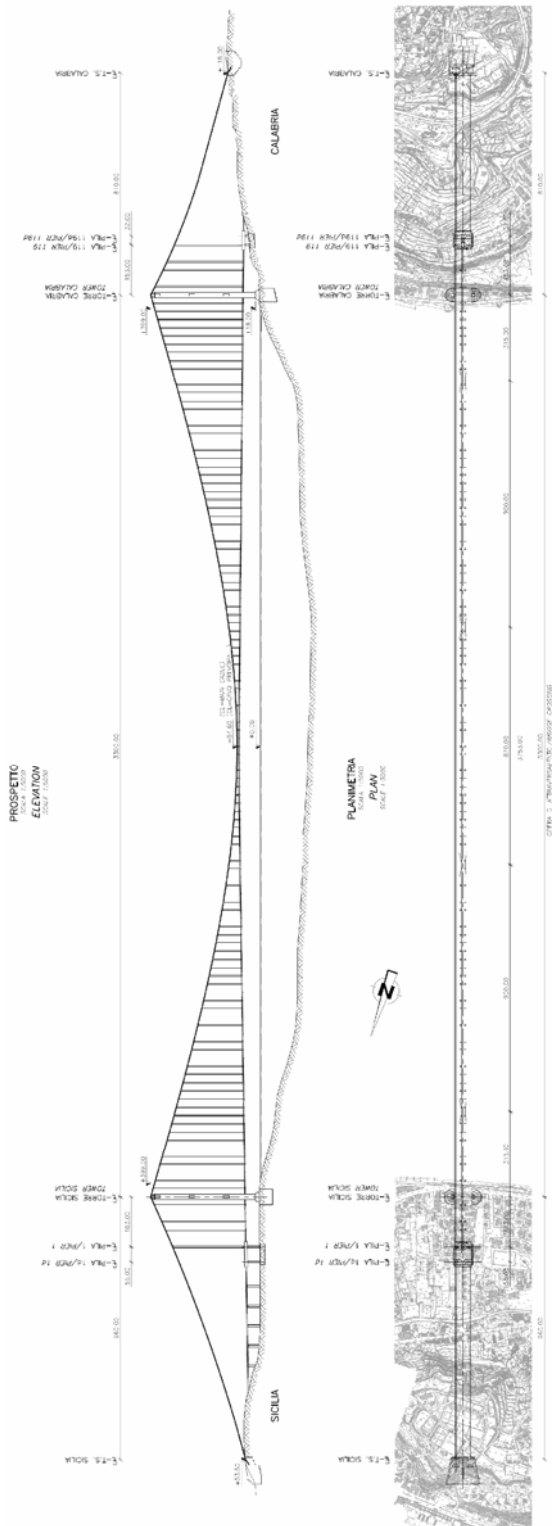


Figura 2-1: Sezione in elevazione e pianta del ponte.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

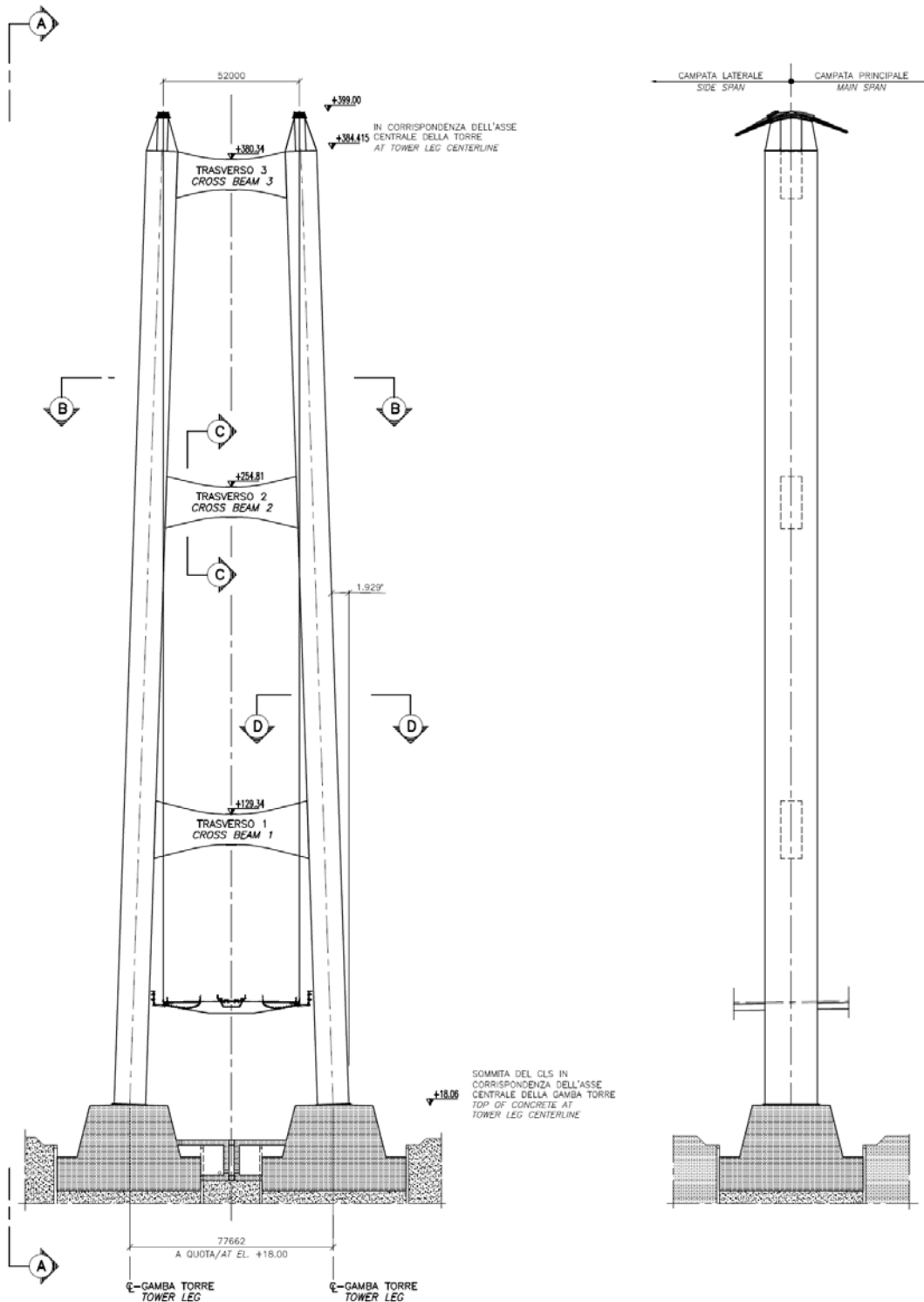


Figura 2-2: Sezioni in elevazione del ponte.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

## 2.1 Scopo

La presente relazione descrive la progettazione degli elementi strutturali delle due torri principali, tra l'estradosso delle fondazioni in calcestruzzo (a quota +18.06) e l'intradosso delle selle dei cavi principali (a quota +384.415).

I dettagli della progettazione degli elementi non strutturali delle torri, come ad esempio il sistema di accessi e di attrezzature per la manutenzione e gli impianti meccanici ed elettrici sono descritti in altri documenti dedicati.

La presente Relazione Tecnica Specialistica si focalizza sulla sintesi della progettazione delle torri, inclusa la descrizione delle combinazioni di carico che la governano e i risultati delle verifiche dei componenti stessi.

## 2.2 Struttura della relazione

La presente relazione consiste dei seguenti capitoli:

- Il Capitolo 1 riporta la Relazione di Sintesi;
- Il Capitolo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riporta la presente introduzione, fornisce un elenco dei materiali di riferimento, ivi comprese le specifiche di progettazione, le norme di progettazione, le specifiche dei materiali, i disegni di riferimento e le relazioni complementari;
- Il Capitolo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riporta le definizioni dei termini che vengono comunemente utilizzati in riferimento a determinati componenti della torre;
- Il Capitolo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** descrive i quattro stati limite presi in considerazione dal progetto della torre: operatività, ultimo, fatica e integrità strutturale;
- Il Capitolo 5 riporta le descrizioni dei materiali utilizzati per ogni componente della torre;
- Il Capitolo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riporta brevi descrizioni di particolari aspetti dell'analisi strutturale e della modellizzazione della torre;
- Il Capitolo 7 sintetizza le verifiche di progetto ultimate sui principali componenti strutturali, e

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

- Il Capitolo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riporta una sintesi del progetto della torre.

## 2.3 Riferimenti

### 2.3.1 Specifiche di progetto

GCG.F.04.01 “Engineering – Progettazione finale e di dettaglio: Principi Base e Livelli Prestazionali Previsti,” Stretto di Messina, 2004 Ottobre 27.

GCG.F.05.03 “Sviluppo del Progetto – Prescrizioni e Linee Guida,” Stretto di Messina, 2004 Ottobre 22.

GCG.G.03.02 “Opere in Acciaio Strutturale e Rivestimenti di Protezione” Stretto di Messina, 2004 Luglio 30.

CG.10.00-P-RG-D-P-GE-00-00-00-00-02 “Principi Base, Strutturali, Allegato” COWI (Revisione corrente).

### 2.3.2 Normative di progetto

“Norme tecniche per le costruzioni,” 2008 (NTC08).

EN 1991 Eurocodice 1: Azioni sulle strutture – Parte 2: Carichi da traffico sui ponti

EN 1993 Eurocodice 3: Progettazione delle strutture in acciaio - Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici

EN 1993 Eurocodice 3: Progettazione delle strutture in acciaio – Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l’incendio

EN 1993 Eurocodice 3: Progettazione delle strutture in acciaio – Parte 1-5: Elementi strutturali a lastra

EN 1993 Eurocodice 3: Progettazione delle strutture in acciaio – Parte 1-8: Progetto dei giunti

EN 1993 Eurocodice 3: Progettazione delle strutture in acciaio – Parte 1-9: Fatica

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

EN 1993 Eurocodice 3: Progettazione delle strutture in acciaio – Parte 1-10: Selezione dell'acciaio per resilienza e proprietà attraverso lo spessore

EN 1993 Eurocodice 3: Progettazione delle strutture in acciaio – Parte 2: Ponti in acciaio

EN 1998 Eurocodice 8: Progettazione delle strutture per resistenza al sisma – Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici

EN 1998 Eurocodice 8: Progettazione delle strutture per resistenza al sisma – Parte 2: Ponti

Rete Ferroviaria Italia - Istruzione No. 44F "Verifiche a fatica dei ponti ferroviari"

### **2.3.3 Specifiche dei materiali**

EN 10025-1:2004 Prodotti laminati a caldo di acciaio per impieghi strutturali – Parte 1: Condizioni di spedizione generali.

EN 10025-2:2004 Prodotti laminati a caldo di acciaio per impieghi strutturali – Parte 2: Condizioni tecniche di fornitura di acciai non legati per impieghi strutturali.

EN 10025-3:2004 Prodotti laminati a caldo di acciaio per impieghi strutturali – Parte 3: Condizioni tecniche di fornitura di acciai per impieghi strutturali saldabili a grano fine allo stato normalizzato /normalizzati

EN 10025-4:2004 Prodotti laminati a caldo di acciaio per impieghi strutturali – Parte 4: Condizioni tecniche di fornitura di acciai per impieghi strutturali saldabili ottenuti mediante laminazione termomeccanica.

EN 10164:2004 Prodotti in acciaio con caratteristiche di deformazione migliorate nella direzione perpendicolare alla superficie del prodotto – Condizioni tecniche di fornitura.

EN ISO 898-1:2009 Caratteristiche meccaniche degli elementi di collegamento in acciaio al carbonio e acciaio legato – Parte 1: Bulloni, viti e viti prigioniere.

EN 20898-2:1994 Caratteristiche meccaniche degli elementi di collegamento – Parte 2: Dadi con carichi di prova determinati – filettatura a passo grosso (ISO 898-2:1992).

UNI EN 14399:2005-3 Bulloneria strutturale ad alta resistenza a serraggio controllato - Parte 3: Sistema HR – Insiemi bullone a testa esagonale e dado.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

EN 10138-3:2006 Acciai per cemento armato precompresso – Trefoli

EN ISO 14555:1998 Saldatura ad arco di prigionieri di materiali metallici. Maggio 1995.

EN ISO 13918:1998 Saldatura – Prigionieri per saldatura ad arco dei prigionieri - Gennaio 1997.

### 2.3.4 Disegni

I disegni di riferimento per la progettazione della torre per la presente relazione sono elencati alla Tabella 2-1.

Titolo del Disegno	Numero del Disegno
Torre Sicilia – Insieme	CG.10.00-P-AX-D-P-SV-T4-TS-00-00-00-01_0
Tipologico - Gamba – Sezione trasversale e giunti verticali	CG.10.00-P-WX-D-P-SV-T4-TO-00-00-00-01_0
Torre Sicilia - Gamba – Sezioni e Spessori Lamiera	CG.10.00-P-WX-D-P-SV-T4-TS-00-00-00-01_0
Tipologico - Gamba – Diaframmi trasversali	CG.10.00-P-AX-D-P-SV-T4-TO-00-D0-00-01_0
Tipologico - Gamba – Diaframmi trasversali, Dettagli	CG.10.00-P-BX-D-P-SV-T4-TO-00-D0-00-01_0
Tipologico - Gamba – Giunti orizzontali	CG.10.00-P-AX-D-P-SV-T4-TO-00-00-00-01_0
Tipologico - Gamba – Giunti orizzontali, Dettagli	CG.10.00-P-BX-D-P-SV-T4-TO-00-00-00-01_0
Tipologico – Trasverso No. 1	CG.10.00-P-AX-D-P-SV-T4-TO-T0-00-00-01_0
Tipologico – Trasverso No. 2	CG.10.00-P-AX-D-P-SV-T4-TO-T0-00-00-02_0
Tipologico – Trasverso No. 3	CG.10.00-P-AX-D-P-SV-T4-TO-T0-00-00-03_0
Tipologico – Trasversi - Dettagli	CG.10.00-P-BX-D-P-SV-T4-TO-T0-00-00-01_0
Tipologico – Collegamento trasverso alla gamba della torre	CG.10.00-P-WX-D-P-SV-T4-TO-T0-00-00-02_0
Tipologico - Collegamento da cassone	CG.10.00-P-AX-D-P-SV-T4-TO-00-00-00-03_0
Tipologico – Sezione Base 1	CG.10.00-P-AX-D-P-SV-T4-TO-00-00-00-04_0
Tipologico – Sezione Base 2	CG.10.00-P-AX-D-P-SV-T4-TO-00-00-00-05_0
Tipologico - Sezione Base, Dettagli	CG.10.00-P-BX-D-P-SV-T4-TO-00-00-00-02_0
Tipologico – Sezione Superiore	CG.10.00-P-AX-D-P-SV-T4-TO-00-00-00-06_0
Tipologico – Smorzatori a massa risonante - Struttura di sostegno	CG.10.00-P-AX-D-P-SV-T4-TO-00-00-00-07_0

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Tipologico - Smorzatori a massa risonante	CG.10.00-P-AX-D-P-SV-T4-TO-00-00-00-08_0
Tipologico - Gamba – Modifiche Strutture in Acciaio 1	CG.10.00-P-BX-D-P-SV-T4-TO-00-00-00-04_0
Tipologico - Gamba – Modifiche Strutture in Acciaio 2	CG.10.00-P-BX-D-P-SV-T4-TO-00-00-00-05_0
Tipologico – Trasversi – Modifiche Strutture in Acciaio	CG.10.00-P-BX-D-P-SV-T4-TO-T0-00-00-06_0
Torre Calabria - Insieme	CG.10.00-P-AX-D-P-SV-T4-TC-00-00-00-01_0
Torre Calabria - Gamba – Sezioni e Spessori Piatto	CG.10.00-P-WX-D-P-SV-T4-TC-00-00-00-01_0

Tabella 2-1: Disegni di riferimento torre.

### 2.3.5 Relazioni complementari

Le relazioni di progettazione torre elencate alla Tabella 2-2 forniscono informazioni supplementari in merito ai principi che caratterizzano il progetto della torre e le relative verifiche.

Titolo della Relazione	Numero della Relazione
Principi Generali di Progettazione	CG.10.00-P-RG-D-P-SV-T4-00-00-00-00-01
Relazione di Progetto – Gambe torre, ivi compresi giunti e giunzioni	CG.10.00-P-CL-D-P-SV-T4-00-00-00-00-01
Relazione di Progetto – Trasversi	CG.10.00-P-CL-D-P-SV-T4-00-00-00-00-02
Relazione di Progetto – Base della Torre	CG.10.00-P-CL-D-P-SV-T4-00-00-00-00-03

Tabella 2-2: Relazioni di riferimento per il progetto torre.

## 3 Termini

Il presente capitolo fornisce le spiegazioni dei termini comunemente utilizzati in tutta la relazione per definire i diversi componenti della torre:

*Gambe* – gli elementi verticali delle torri che si estendono dall’estradosso dei piedistalli in calcestruzzo a quota +18.06 agli intradossi delle selle del cavo principale a quota +384.415.

*Trasversi* – le travi trasversali che collegano le gambe della torre alle quote +129.34 (Trasverso 1), +254.81 (Trasverso 2) e +380.34 (Trasverso 3). Le quote fornite si riferiscono all’estradosso del trasverso alla mezzeria del ponte.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

*Piatti esterni* – I piatti attorno al perimetro delle gambe della torre o i trasversi (piatti A, B, C e D delle gambe della torre e le anime e le flange dei trasversi).

*Anime trasversali* – i piatti trasversali verticali che collegano i due lati di ogni gamba della torre; piatti G e H. Anche definiti più genericamente come piatti interni.

*Anime longitudinali* – i piatti longitudinali verticali che collegano i piatti esterni della gamba della torre e le anime trasversali parallele all’asse del ponte; piatti F e E. Anche definiti più genericamente come piatti interni.

*Irrigidimenti longitudinali* – gli elementi del piatto longitudinale sono utilizzati per irrigidire i piatti verticali della gamba della torre e le flange e le anime dei trasversi.

*Diaframmi trasversali* – gli elementi di irrigidimento trasversali che tipicamente si trovano in ogni concio della torre a 1 m dal giunto di costruzione (Tipo 1), sui collegamenti delle flange superiore e inferiore del trasverso alle gambe della torre (Tipo 2 o Tipo 3) e alle quote dello smorzatore a massa risonante (Tipo 4).

*Irrigidimenti trasversali* – gli elementi di irrigidimento trasversali intermedi collegati a tutti gli elementi verticali della gamba della torre e gli elementi longitudinali del trasverso posti a intervalli regolari tra i diaframmi trasversali.

*Giunti strutturali* – I giunti collegati in campo tra i conci della torre.

*Ancoraggio di base* – tutti gli elementi di collegamento della gamba della torre e le fondazioni della torre, ivi compresi i piatti di irrigidimento, tubi di ancoraggio, piastre di base e tiranti multi-trefolo di post-tensione.

*Sella del cavo* – la struttura saldata in acciaio sulla quale passano i cavi principali e che distribuisce il carico del cavo sull’estradosso della gamba della torre.

*Tie-back* – lo spostamento longitudinale delle torri verso le campate laterali nelle condizioni di carico permanente di riferimento.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

## 4 Stati limite

I componenti strutturali della torre vengono verificati per Stati Limite di Operabilità (1 e 2), Stati Limite Ultimi, Stati Limite per Fatica e Stati Limite per Integrità Strutturale in accordo ai principi base di progetto GCG.F.04.01 e NTC08. Descrizioni dettagliate degli stati limite presi in considerazione per la progettazione della torre sono fornite in CG.10.00-P-RG-D-P-SV-T4-00-00-00-00-01 “Principi Generali di Progettazione.”

## 5 Materiali

I materiali di costruzioni utilizzati per i componenti strutturali della torre sono sintetizzati in questo capitolo. Descrizioni dettagliate delle caratteristiche dei materiali e i coefficienti parziali presi in considerazione per la progettazione della torre sono forniti in CG.10.00-P-RG-D-P-SV-T4-00-00-00-00-01 “Principi Generali di Progettazione.”

### 5.1 Acciaio Strutturale

I componenti strutturali della torre sono di norma realizzati in acciaio strutturale di Classe S460 ML, ad eccezione dei profili vuoti circolari laminati a caldo che comprendono le membrature di controventatura interne dei trasversi, la piastra di base della torre e gli irrigidimenti dell’ancoraggio della base che sono realizzati in acciaio strutturale di Classe S355 ML. Quale eccezione rispetto alle prescrizioni standard delle norme NTC08 e EN 10025-4 le caratteristiche meccaniche dell’acciaio non cambieranno al variare dello spessore delle lamiere per spessori inferiori a 110 mm in caso di acciaio S460ML e inferiori a 150 mm per acciaio S355ML. E’ stata confermata la possibilità di produrre acciaio delle caratteristiche richieste.

### 5.2 Bulloni ad alta resistenza

Per le giunzioni delle strutture della gamba della torre si utilizzano bulloni strutturali ad alta resistenza di Classe 10.9.

### 5.3 Trefolo di post-tensione

Tutti i trefoli di post-tensione saranno conformi alle prescrizioni della norma EN 10138-3 e saranno caratterizzati da un carico alla rottura di 1.860 MPa.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

## 6 Analisi Strutturale

### 6.1.1 Modello Globale

Il Ponte sullo Stretto di Messina è stato modellizzato e analizzato utilizzando il programma IBDAS (Integrated Bridge Design and Analysis System) di modellazione strutturale di proprietà della COWI. In generale, il modello del ponte e l'analisi strutturale sono descritti nella relazione "CG.10.00-P-RG-D-P-SV-00-00-00-00-01 Descrizione Modello Globale IBDAS".

La progettazione strutturale delle torri descritta nella presente relazione è basata sui risultati del Modello di calcolo 3.3f (numero di versione).

Il modello di analisi comprende gli smorzatori a massa risonante previsti per ridurre le vibrazioni da distacco dei vortici.

## 6.2 Modello locale

L'analisi del modello globale è stata integrata da un'analisi locale dei componenti selezionati di maggiore dettaglio.

### 6.2.1 Collegamento del Trasverso alla Gamba della Torre

Un modello semilocale dell'elemento shell è stato integrato nel modello globale IBDAS per valutare in modo chiaro il flusso delle forze in quest'area così pesantemente sollecitata. I risultati del modello sono stati utilizzati per confermare il rinforzo con un piatto aggiuntivo e l'irrigidimento richiesto nella gamba della torre all'interno dell'altezza del trasverso, cosa che non era indicata dai risultati del modello globale.

I dettagli della modellizzazione, l'analisi e i risultati sono forniti in CG.10.00-P-RG-D-P-SV-00-00-00-00-03 "Modello Semilocale IBDAS Model, Torri."

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

### **6.2.2      Analisi dell'Instabilità dell'Irrigidimento Trasversale e del Diaframma della Gamba della Torre**

Un modello locale dell'elemento shell degli irrigidimenti trasversali tipici della gamba della torre, un irrigidimento a T di 8 m di lunghezza e un diaframma triangolare con un intaglio circolare sono stati creati e analizzati con SAP2000 per dimensionare la flangia dell'irrigidimento a T e definire il necessario spessore del diaframma. Lo scopo del lavoro di modellizzazione è sintetizzato in CG.10.00-P-RG-D-P-SV-T4-00-00-00-01 "Principi Generali di Progettazione", mentre una descrizione di dettaglio del modello e dei risultati è fornita in CG.10.00-P-CL-D-P-SV-T4-00-00-00-01 "Relazione di Progetto – Gambe Torre, inclusi giunti e giunzioni". I risultati dell'analisi sono sintetizzati al Paragrafo 7.3.3.2 della presente relazione.

### **6.2.3      Collegamenti dell'Irrigidimento Longitudinale all'Irrigidimento Trasversale della Gamba della Torre**

Un modello locale dell'elemento shell dell'interfaccia tra gli irrigidimenti longitudinali della gamba della torre e gli irrigidimenti trasversali è stato creato e analizzato con SAP2000 per confermare che non sono necessari collegamenti tra gli irrigidimenti longitudinali e trasversali, nonché per dimensionare le saldature che collegano l'anima dell'irrigidimento trasversale al piatto esterno. Lo scopo del lavoro di modellizzazione è sintetizzato in CG.10.00-P-RG-D-P-SV-T4-00-00-00-01 "Principi Generali di Progettazione" e una descrizione dettagliata del modello e dei risultati è fornita in CG.10.00-P-CL-D-P-SV-T4-00-00-00-01 "Relazione di Progetto – Gambe Torre, inclusi giunti e giunzioni". I risultati dell'analisi sono sintetizzati al Paragrafo 7.3.3.2 della presente relazione.

### **6.2.4      Modello del Concio della Gamba della Torre**

Un modello locale dell'elemento shell di un concio completo della gamba della torre è stato creato e analizzato con ADINA in fine di verificare la correttezza dei metodi di progettazione utilizzati per dimensionare i piatti della gamba della torre e confermare le resistenze calcolate. Un modello simile è stato creato anche per valutare la potenziale portata del danno che potrebbe risultare dall'imposizione degli effetti della forza corrispondenti alla fascia dei risultati dell'analisi di tutte le storie temporali, invece che i risultati medi dell'analisi delle storie temporali utilizzati per il progetto. I modelli hanno preso in considerazione materiali e una geometria non lineari e hanno incluso gli effetti di imperfezioni geometriche e sollecitazioni residue. Lo scopo del lavoro di modellizzazione è sintetizzato in CG.10.00-P-RG-D-P-SV-T4-00-00-00-01 "Principi Generali di Progettazione" e

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

una descrizione dettagliata del modello e dei risultati è riportata in CG.10.00-P-CL-D-P-SV-T4-00-00-00-00-01 “Relazione di Progetto - Gambe Torre, ivi compresi giunti e giunzioni”. I risultati di questa analisi sono sintetizzati al Paragrafo 7.3.3.3 della presente relazione.

## 7 Verifiche Progettazione Torre

Questo capitolo sintetizza le combinazioni di carico dimensionanti e le verifiche di progetto completate per le parti strutturali della torre. I principi di progettazione sono descritti per quanto necessario a chiarire gli effetti delle combinazioni di carico dimensionanti e per la verifica dei risultati, in ogni caso, i Principi Generali di Progettazione (CG.10.00-P-RG-D-P-SV-T4-00-00-00-00-01) dovrebbero essere consultati per una descrizione di maggiore dettaglio e come base per le procedure di verifica.

### 7.1 Descrizione Generale

Le torri del Ponte sullo Stretto di Messina sono alte circa 381 m dall’estradosso della fondazione in calcestruzzo fino al punto di lavoro del cavo principale alla sommità della torre. La presente relazione descrive la progettazione di tutti i componenti della torre che si trovano tra le quote +18.06 e +384.415 sopra le quali si trova la sella del cavo principale che è descritta in documenti dedicati. Le torri sono costituite da tre componenti strutturali principali: le gambe, i trasversi e l’ancoraggio di base. Le gambe e i trasversi delle torri sono costituiti da sezioni scatolate di piatti d’acciaio irrigidite longitudinalmente e trasversalmente. L’ancoraggio di base comprende la piastra di base, i tiranti di ancoraggio di post-tensione e gli irrigidimenti dell’ancoraggio della gamba della torre.

Le torri sono verniciate sia esternamente che internamente, le superfici interne sono ulteriormente protette dalla corrosione mediante un sistema di deumidificazione.

Le torri sono provviste di un sistema di accesso comprendente scale, scale a pioli, ascensori, montacarichi e carri ponte che consentono l’ispezione e la manutenzione di tutti gli elementi strutturali. La presente relazione descrive l’apertura di accessi nella struttura in acciaio principale, ma il progetto dei sistemi di accesso è presentato in documenti dedicati.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

## 7.2 Comportamento globale

La notevole lunghezza della campata principale può far sì che una parte significativa della capacità portante della gamba della torre venga dedicata a sostenere il peso proprio del ponte. Alla base della torre circa metà delle sollecitazioni delle gambe che governano la progettazione sono dovute ai carichi assiali, mentre l'altra metà è causata da combinazioni di momenti trasversali e longitudinali. Sulla sommità della torre, quasi tutte le sollecitazioni di progetto sono causate da carichi assiali.

Longitudinalmente (parallelamente al ponte) la torre si comporta piuttosto come una trave a sbalzo appoggia, fissata alla fondazione rigida tramite l'ancoraggio di base e alla sommità dal cavo principale che a causa del carico notevole che sostiene risulta pure molto rigido. Trasversalmente la torre si comporta come un telaio a nodi mobili resistente al momento, benché il suo comportamento sia influenzato dal vincolo trasversale rappresentato dal cavo principale. Sebbene i cavi principali garantiscano trasversalmente una rigidità molto limitata in assenza di deformazione, assicurano una notevole forza di ripristino a ogni spostamento trasversale della sommità della torre.

### 7.2.1 Forme dei Modi

Le forme dei modi globali del ponte sono un buon metodo per analizzare il comportamento strutturale e l'adeguatezza del modello e sono contributi importanti per la valutazione degli effetti dell'instabilità globale, per l'analisi allo spettro della risposta sismica e l'analisi dell'azione dinamica del vento (buffeting). Nella progettazione della torre si sono considerati sia i modi di vibrazione e i modi di instabilità di Eigen per i diversi aspetti del progetto torre.

#### 7.2.1.1 Modi di Vibrazione

I modi di vibrazione della torre sono stati analizzati in dettaglio quale parte dell'analisi allo spettro della risposta sismica e nella valutazione dei metodi corretti da utilizzarsi nello sviluppo della curva di attenuazione di Rayleigh per l'analisi sismica alla Time-History. In base ai risultati dell'analisi allo spettro della risposta, i contributi ai momenti complessivi longitudinali e trasversali che governano la progettazione della gamba della torre Sicilia, derivanti da ciascun modo di vibrazione, sono stati classificati in ordine decrescente per diversi concetti della gamba della torre. I momenti longitudinali della gamba della torre sono più fortemente influenzati dai modi 101, 391, 995 e 347, vedi Figura

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

7-1,



Figura 7-2, Figura 7-3 e Figura 7-4 rispettivamente in ordine di contributo decrescente. I quattro modi hanno periodi che variano da 0,4 s e 2,49 s. Il momento longitudinale totale a una specifica sezione trasversale è tipicamente dominato da soli due o tre modi, mentre gli altri modi forniscono contributi insignificanti. La predominanza di modi isolati nella produzione dei momenti totali trasversali è molto meno evidente e c'è una maggiore differenza lungo l'altezza della gamba della torre nel modo che provoca il contributo massimo. In ogni caso i tre modi che più tipicamente contribuiscono ai momenti sismici trasversali totali sono i modi 395, 353 e 410 illustrati rispettivamente alle Figura 7-5, Figura 7-6 e Figura 7-7. Questi tre modi hanno periodi che variano da 0,74 s e 0,83 s.



Figura 7-1: Modo 101 - Periodo 2.49 s - Frequenza 0,40 Hz.

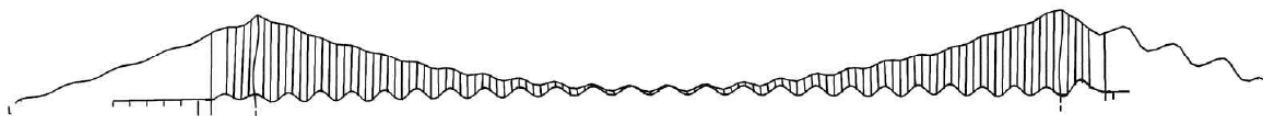


Figura 7-2: Modo 391 - Periodo 0,77 s - Frequenza 1,30 Hz.

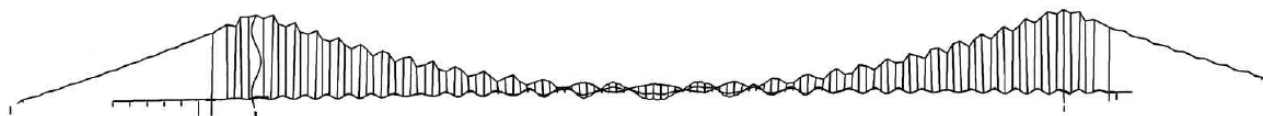


Figura 7-3: Modo 995 - Periodo 0,4 s - Frequenza 2,58 Hz.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



Figura 7-4: Modo 347 - Periodo 0,85 s - Frequenza 1,18 Hz.

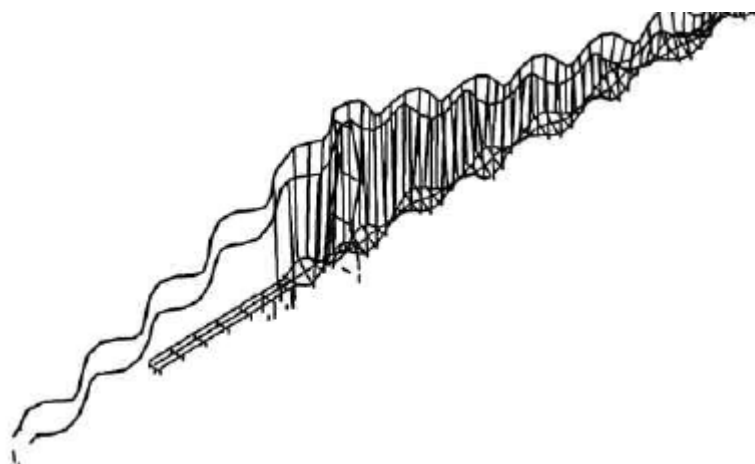


Figura 7-5: Modo 395 - Periodo 0,76 s - Frequenza 1,31 Hz (si vede la metà Sicilia del ponte).

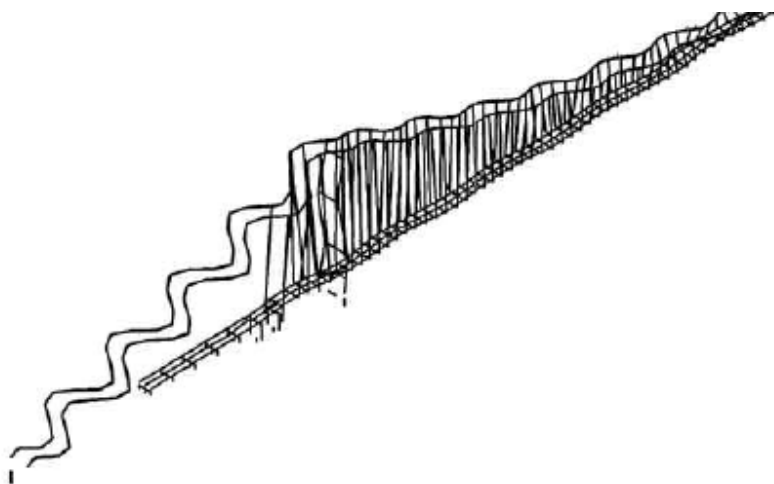


Figura 7-6: Mode 410 - Periodo 0,74 s - Frequenza 1,35 Hz (si vede la metà Sicilia del ponte).



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

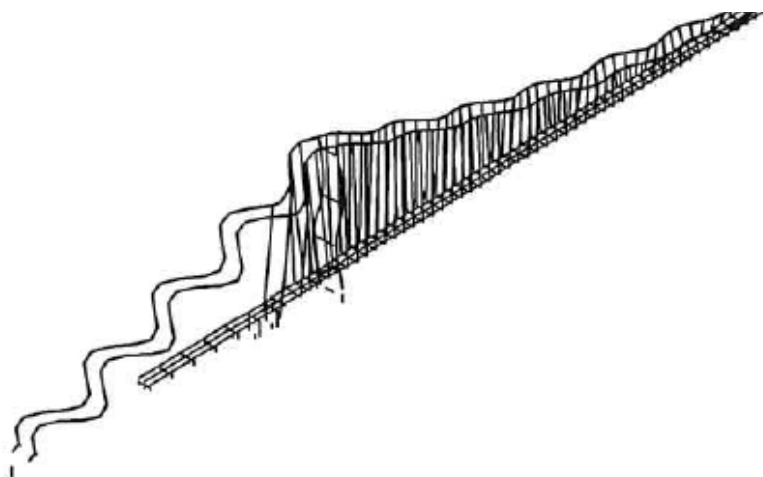


Figura 7-7: Modo 353 - Periodo 0,83 s – Frequenza 1,20 Hz (si vede la metà Sicilia del ponte).

#### 7.2.1.2 Modi di Instabilità

I modi di instabilità elastica determinati utilizzando l'analisi di instabilità di Eigen rappresentano la base per il calcolo dei carichi assiali, dei momenti e delle sollecitazioni dovute alle imperfezioni equivalenti che spiegano le tolleranze geometriche degli effetti e delle sollecitazioni residue nel progetto globale della gamba della torre. Le sollecitazioni delle imperfezioni equivalenti si basano sul primo modo di instabilità longitudinale riportato alla Figura 7-8 e sui primi due modi di instabilità trasversale indicati nella Figura 7-9. Il primo modo di instabilità elastica longitudinale ha un moltiplicatore della forza assiale del carico statico di riferimento di 7.66 che corrisponde a un carico assiale alla base di una delle gambe della torre di 10.330 MN. Il primo modo di instabilità elastica trasversale ha un moltiplicatore della forza assiale del carico statico di riferimento di 6,72 che corrisponde a un carico assiale alla base di una delle gambe della torre di 9.130 MN. Il secondo modo di instabilità elastica trasversale corrisponde a un moltiplicatore della forza assiale del carico statico di riferimento di 9,11, cioè a un carico assiale alla base di una delle gambe della torre di 12.470 MN.

Una descrizione dettagliata dei metodi utilizzati per calcolare gli effetti delle imperfezioni equivalenti è riportata nei Principi Generali di Progettazione (CG.10.00-P-RG-D-P-SV-T4-00-00-00-00-01).



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

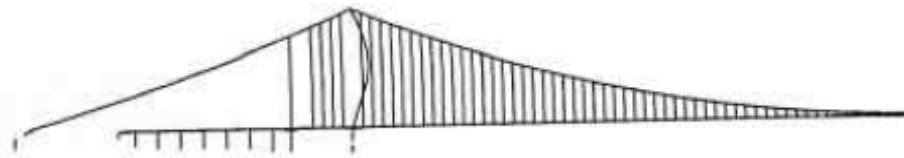


Figura 7-8: Primo modo di instabilità di Eigen longitudinale per la torre Sicilia (si vede la metà Sicilia del ponte).

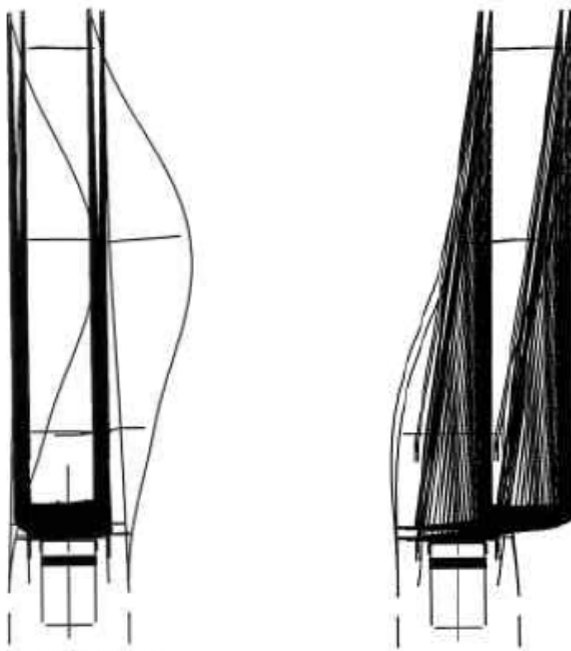


Figura 7-9: Primo e secondo modo di instabilità di Eigen trasversale per la torre Sicilia.

### 7.2.2 Spostamenti massimi

Gli spostamenti massimi longitudinali della sommità della torre sono causati da una combinazione di carichi sismici allo SLU. Gli spostamenti massimi trasversali della sommità della torre sono causati da carichi del vento trasversali allo SLIS. Gli spostamenti massimi assoluti e relativi della sommità della torre rispetto alla posizione di carico statico sono sintetizzati alla Tabella 7-1. Nella condizione di carico statico di riferimento le sommità delle torri Sicilia e Calabria si inclinano verso le campate laterali di circa 1.6 m.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

La torre Sicilia si sposta leggermente più longitudinalmente rispetto alla torre Calabria sia verso la campata laterale che principale. I movimenti trasversali della sommità della torre in entrambe le torri sono simili.

Torre	Longitudinale				Trasversale
	Assoluto		Relativo		
	Verso la campata laterale	Verso la campata principale	Verso la campata laterale	Verso la campata principale	
Sicilia	3.19	0.93	1.57	2.55	±1.98
Calabria	2.98	0.55	1.36	2.17	±1.92

Tabella 7-1: Spostamenti massimi della sommità della torre (m).

### 7.3 Gambe della torre

Le gambe della torre sono realizzate in profili scatolati in acciaio con pannelli irrigiditi longitudinali e trasversali. Le dimensioni della sezione trasversale della gamba della torre sono costanti per tutta l'altezza della torre dall'estradosso della piastra di base all'intradosso della sella del cavo principale con una larghezza perpendicolare all'asse del ponte di 12 m e una lunghezza parallela all'asse del ponte di 20 m. Una sezione trasversale tipica della gamba della torre e una sezione trasversale sulla quale sono previsti irrigidimenti longitudinali come illustrato dalla Figura 7-10. Le gambe delle torri sono realizzate in officina in 21 conci a sezione completa aventi lunghezza variabile tra 10,15 m e 20 m. e un peso massimo di circa 1.525 tonnellate, ivi compresi gli smorzatori a massa risonante. Le due gambe di ciascuna torre sono inclinate verso l'interno di 1.929° e hanno un interasse che varia da 77.662 m alla base a 52.000 m in corrispondenza del punto di lavoro del cavo principale. Le due gambe delle torri sono collegate da trasversi posti approssimativamente a quota +125 m, +250 m e +375 m. Ciascuna gamba della torre comprende otto smorzatori a massa risonante posti tra le quote 230 m e 260 m dedicati al controllo del distacco dei vortici indotto dalle oscillazioni previste in caso di velocità del vento di circa 40 m/s e 65 m/s. Sotto l'azione del carico permanente di riferimento del ponte completato, le gambe delle torri risultano inclinate verso le campate laterali di circa 1,6 m in sommità della torre. Le gambe delle torri sono fissate alle fondazioni in calcestruzzo da tiranti di ancoraggio di post-tensione.

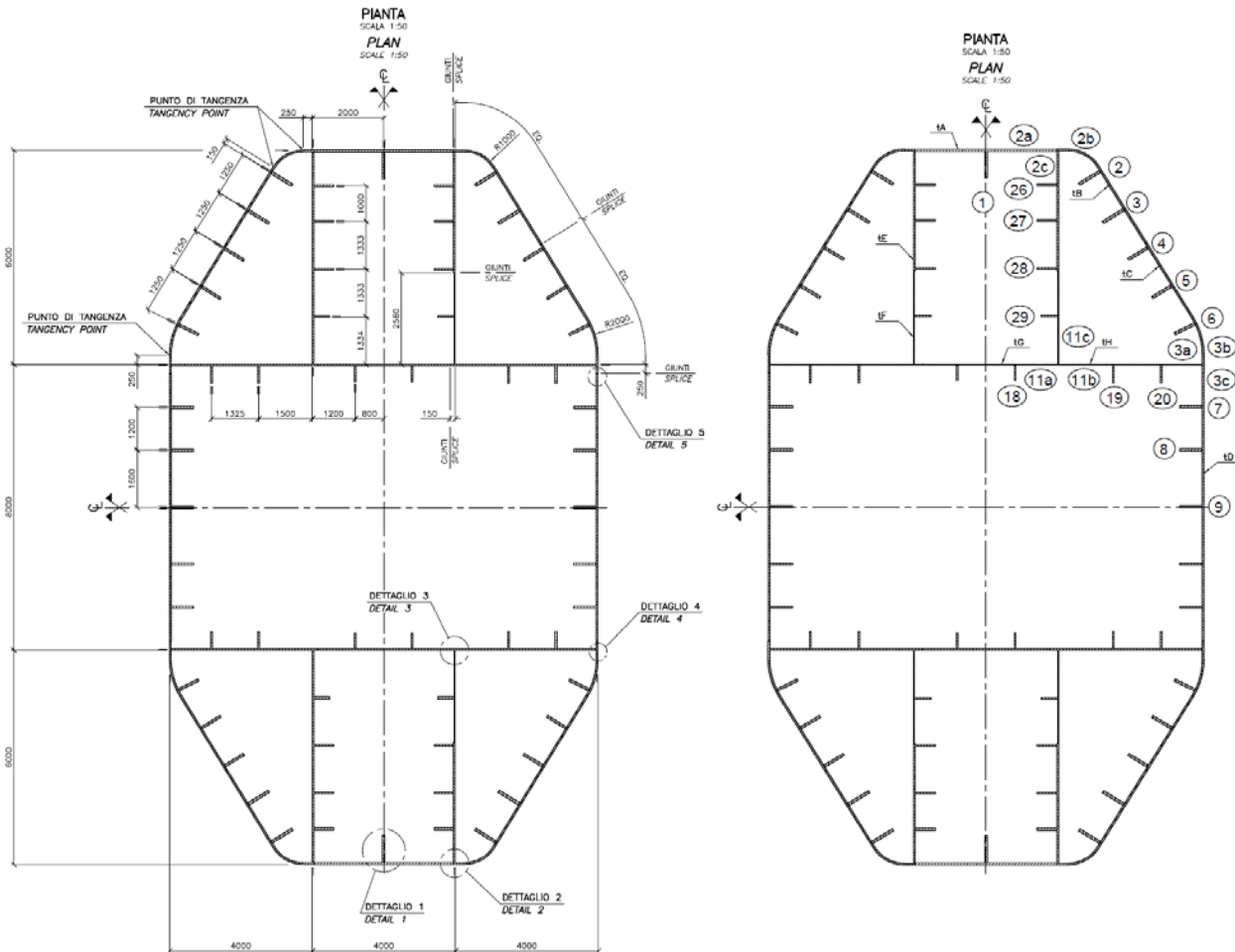


Figura 7-10: Sezione trasversale della gamba della torre e indicazioni piatto/irrigidimento..

### 7.3.1 Torre indipendente

Le richieste di resistenza all'azione del vento e sismica sulla torre indipendente sono state considerate in fase di gara e si è dimostrato che non sono dimensionanti per la gamba della torre o il trasverso. Nonostante l'altezza della torre sia stata innalzata rispetto alla fase di progetto di gara, le gambe della torre a ponte completo sono così dominate da sollecitazioni assiali di compressione che la compressione assiale minima presente nella torre indipendente assicura che questa non è una condizione dimensionante. Perciò nessun'altra indagine in merito alle richieste di resistenza sulle gambe della torre indipendente sono state eseguite nel Progetto Definitivo. In ogni caso, la condizione libera viene presa in considerazione nel progetto dell'ancoraggio di base come descritto al Paragrafo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

### 7.3.2 Torre indipendente con Tie-Back

Le torri sono progettate per essere realizzate verticali (senza inclinazione) e con l'introduzione del tie-back prima dell'installazione del cavo principale. La forza di tie-back, o piuttosto lo spostamento, che viene introdotta durante la costruzione è determinata in maniera tale da lasciare le torri leggermente inclinate verso le campate laterali nella condizione di carico permanente di riferimento dopo la costruzione. L'inclinazione permanente delle gambe delle torri è determinata al fine di bilanciare meglio le massime sollecitazioni di compressione agenti sulle facce delle gambe delle torri della campata principale e laterale a ponte completato. A ponte completato i momenti di inclinazione massimi verso la campata laterale delle gambe della torre sono accompagnati da carichi compressivi minimi (corrispondenti ai carichi statici e dinamici minimi della campata principale). I momenti di inclinazione massimi della campata principale sono di grandezza simile ai momenti di inclinazione verso la campata laterale, ma sono accompagnati da carichi compressivi massimi (corrispondenti ai carichi statici e dinamici massimi della campata principale). Ciò comporta sollecitazioni compressive massime molto maggiori sulla faccia della gamba della torre della campata principale a meno che la sezione trasversale della torre sia asimmetrica o lo stato di sollecitazione a carico permanente sia regolata dalla sequenza di costruzione come proposto.

Lo spostamento longitudinale della gamba della torre Sicilia nel corso della costruzione è mostrato dalla Figura 7-11, ove i valori negativi indicano lo spostamento verso la campata laterale. A torre ultimata il primo passo del processo di tie-back prevede l'installazione e il tensionamento dei cavi di tie-back che collegheranno la sommità della torre e l'ancoraggio del cavo principale. Il cavo di tie-back viene quindi portato alla massima tensione, spingendo la sommità della torre all'indietro per uno spostamento di circa 3,8 m. Una volta installati i cavi principali i cavi di tie-back verranno rimossi trasferendo la forza di tie-back ai cavi principali. Nel corso dell'installazione dell'impalcato una parte di incurvamento verso il basso viene rimossa dal cavo principale della campata laterale facendo sì che la sommità della torre si sposti verso la campata principale di circa 2,5 m. Al termine della costruzione la sommità della torre si inclina verso la campata laterale di circa 1,6 m. I movimenti della torre Calabria nel corso della costruzione saranno simili.

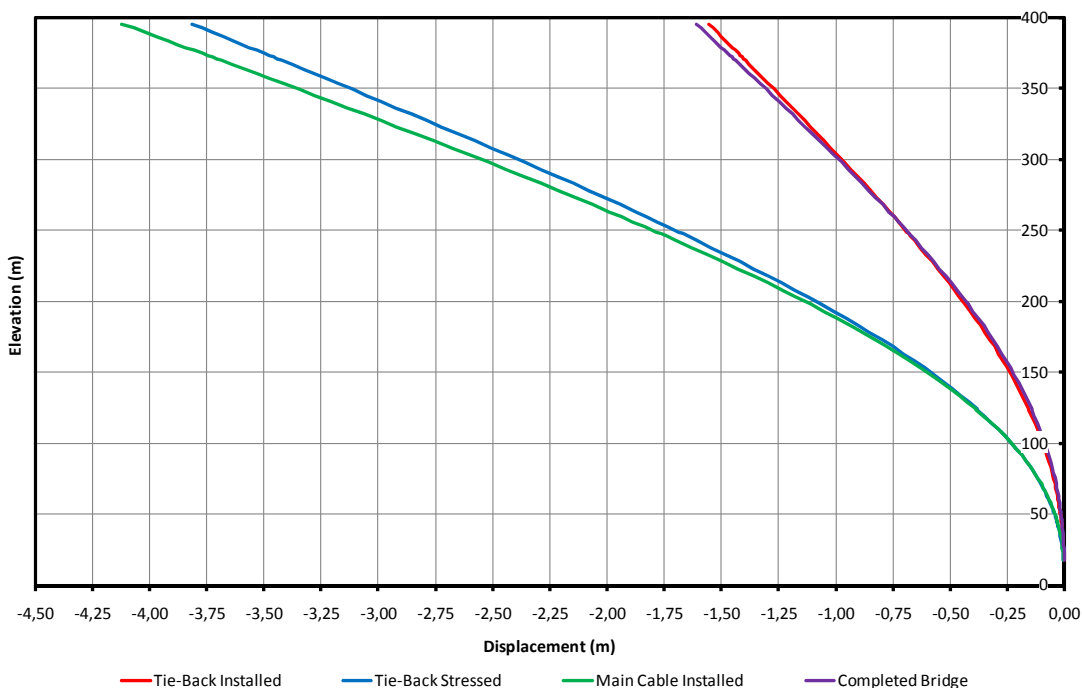
Le forze di taglio longitudinali della gamba della torre Sicilia nel corso della costruzione sono mostrate alla Figura 7-12. Le linee continue rappresentano le forze di taglio ottenute direttamente dal modello che si riferiscono all'asse dell'elemento deformato; le linee tratteggiate rappresentano la corrispondente forza di taglio orizzontale calcolata in base al taglio risultante dal modello e al carico assiale e all'inclinazione dell'elemento. Come previsto, poiché non ci sono carichi

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

longitudinali applicati tra la sommità e la base della torre, la forza di taglio orizzontale è costante per tutta l'altezza della torre.

I momenti longitudinali della gamba della torre Sicilia nel corso della costruzione sono mostrati alla Figura 7-13. Le linee continue rappresentano il momento longitudinale totale su un concio e le linee tratteggiate rappresentano il momento che è causato dalla forza di taglio orizzontale. La differenza crescente tra il momento totale e quello causato dalla forza di taglio orizzontale man mano che procede la costruzione indica il contributo crescente dei momenti di P-Delta rispetto al totale. Al termine della costruzione, la gamba della torre ha un momento di inclinazione verso la campata laterale di circa 2,000 MNm.

Benché la torre indipendente con tie-back sia importante da considerare per lo stato di sollecitazione a carico permanente a ponte completato, similamente alla torre indipendente, il progetto di gara ha dimostrato che il progetto della gamba della torre non è governato dalla condizione di costruzione data la relativa mancanza di compressione assiale; ciò è stato confermato nel Progetto Definitivo. In ogni caso la torre indipendente con tie-back governa in qualche punto la progettazione dei tiranti di post-tensione nell'ancoraggio della base come descritto al Paragrafo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011	

Figura 7-11: Spostamenti longitudinali della gamba della torre Sicilia nel corso della costruzione.

Quota (m)

Spostamento (m)

Tie-Back Installato

Tie-Back in Tensione

Cavo principale installato

Ponte completato

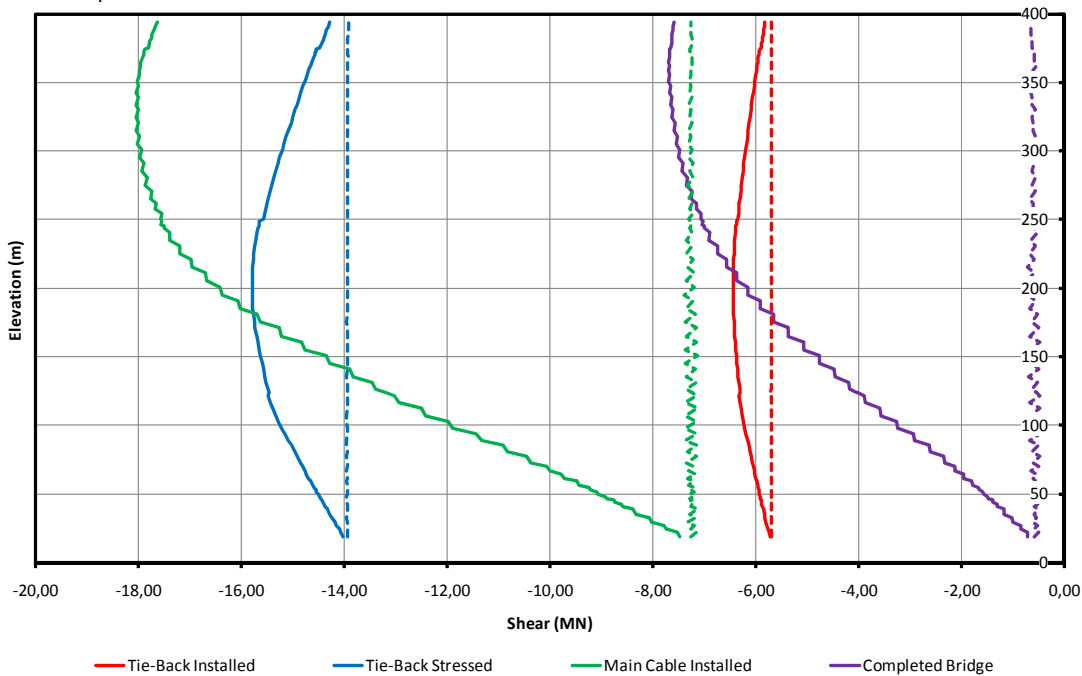


Figura 7-12: Forze di taglio longitudinali della gamba della torre Sicilia nel corso della costruzione (forze di taglio dell'elemento: linee continue, forze di taglio orizzontali corrette: linee tratteggiate).

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

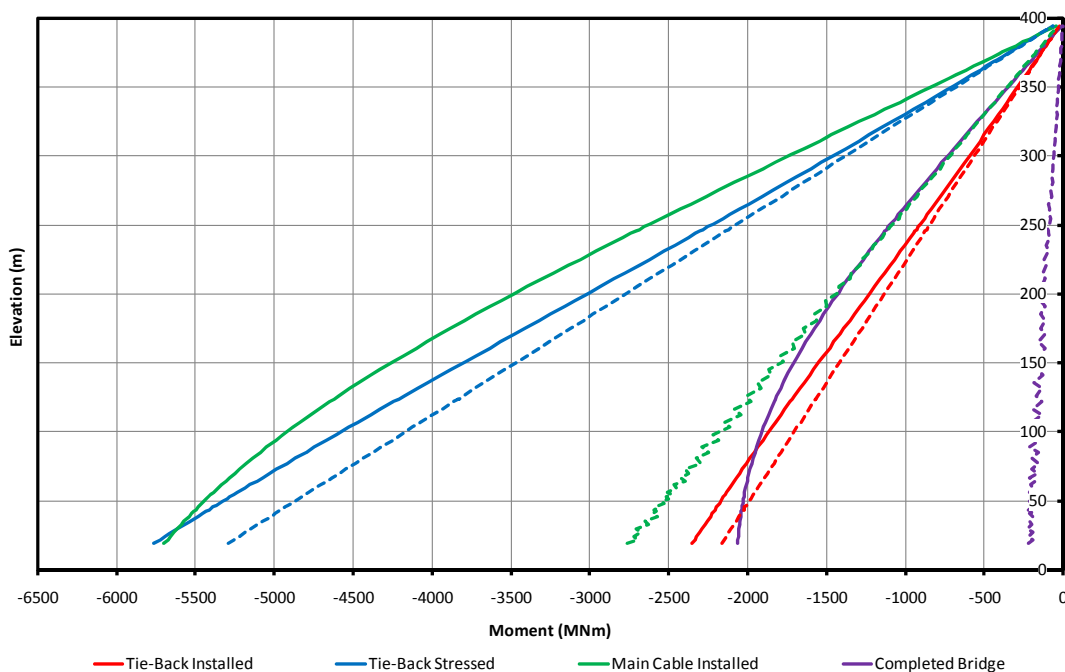


Figura 7-13: *Momenti longitudinali della gamba della torre Sicilia nel corso della costruzione (momenti elemento: linee continue, momenti basati sulle forze di taglio orizzontali: linee tratteggiate).*

### 7.3.3 Ponte completato

#### 7.3.3.1 Elementi longitudinali

La sezione trasversale della gamba della torre comprende i piatti esterni di perimetro, i piatti delle anime interne longitudinali e trasversali e gli irrigidimenti longitudinali. La disposizione degli irrigidimenti longitudinali si differenzia da quanto presentato nel progetto di gas per quanto riguarda gli irrigidimenti a T precedenti che sono stati sostituiti da irrigidimenti piatti e il numero degli irrigidimenti longitudinali che è diminuito da 64 a 60. La sezione trasversale dell'irrigidimento è stata modificata per semplificare il montaggio e il numero di irrigidimenti è stato ridotto sia per semplificare il montaggio che garantire un'ottimizzazione del materiale. I conci della gamba della torre sono uniti nelle giunzioni trasversali realizzate in campo che consistono di collegamenti imbullonati ad alta resistenza per i piatti interni e gli irrigidimenti longitudinali e di saldature a piena penetrazione per i piatti esterni. La progettazione dei piatti longitudinali della gamba della torre, gli irrigidimenti e le giunzioni realizzate in campo quali giunti di costruzione sono descritti nel presente

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

paragrafo.

#### **PIATTI E IRRIGIDIMENTI LONGITUDINALI**

I piatti e gli irrigidimenti longitudinali sono stati dimensionati utilizzando il metodo della larghezza equivalente definito nei Paragrafi 4.4 e 4.5 delle EN 1993-1-5 e come ulteriormente descritto nel documento CG.10.00-P-RG-D-P-SV-T4-00-00-00-01 “Principi Generali di Progettazione”. Gli spessori del piatto risultanti variano da 30 mm a 110 mm per entrambe le torri Sicilia e Calabria, come indicato nelle Tabella 7-2 e Tabella 7-3 rispettivamente; gli interassi degli irrigidimenti longitudinali variano da 1.000 mm a 2.000 mm come precedentemente mostrato dalla Figura 7-10, mentre le loro dimensioni variano da 425x43 a 750x75 come mostrato dalla Tabella 7-4 e Tabella 7-5 per le torri Sicilia e Calabria rispettivamente.



Concio	Spessore piatto (mm)							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	110	110	100	75	100	75	45	45
2	110	100	85	60	100	60	35	40
3	110	100	75	50	85	40	30	40
4	110	100	60	45	70	35	30	40
5	110	90	45	40	60	35	35	40
6	95	75	45	40	55	35	35	40
7	75	55	45	60	50	40	50	55
8	65	50	60	75	40	40	50	55
9	65	50	50	65	40	40	45	50
10	75	55	45	50	40	45	40	45
11	80	55	45	45	40	45	40	45
12	85	50	45	55	45	45	40	45
13	90	60	50	55	40	45	50	50
14	90	75	50	60	45	45	50	50
15	100	80	50	50	50	40	40	40
16	100	85	45	40	55	40	35	45
17	100	85	45	40	55	40	35	40
18	90	70	45	45	50	45	40	40
19	70	50	50	60	45	45	40	45
20	65	45	45	70	55	45	50	50
21	70	45	50	70	55	50	50	50

Tabella 7-2: Spessori del piatto della gamba della torre Sicilia

Concio	Spessore piatto (mm)							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	110	105	80	80	85	50	35	40
2	110	100	70	65	80	40	30	40
3	105	90	65	55	70	35	30	40
4	100	80	60	50	60	35	30	40
5	95	70	45	45	50	40	35	40
6	80	50	45	50	45	35	40	45
7	65	45	50	60	45	40	50	55
8	60	55	60	75	45	35	50	55
9	70	50	50	65	40	35	40	45
10	75	55	45	50	45	40	40	40
11	80	60	40	40	50	40	40	40
12	80	60	40	50	45	40	40	40
13	80	55	45	60	45	40	50	50
14	90	55	50	60	45	40	50	50
15	100	60	45	50	50	40	35	40
16	105	60	45	40	50	40	35	40
17	95	60	40	40	50	40	40	40
18	85	55	40	45	45	40	40	40
19	65	50	45	55	40	35	40	45
20	60	45	45	65	40	45	50	50
21	65	45	45	60	50	50	50	50

Tabella 7-3: Spessori del piatto della gamba della torre Calabria.

Concio	Spessore piatto (mm)							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	750 x 75	700 x 70	700 x 70	650 x 65	725 x 73	600 x 60	475 x 48	475 x 48
2	750 x 75	700 x 70	700 x 70	650 x 65	725 x 73	575 x 58	450 x 45	450 x 45
3	750 x 75	700 x 70	700 x 70	625 x 63	725 x 73	550 x 55	450 x 45	450 x 45
4	750 x 75	700 x 70	675 x 68	625 x 63	700 x 70	525 x 53	450 x 45	450 x 45
5	750 x 75	675 x 68	625 x 63	600 x 60	675 x 68	500 x 50	450 x 45	450 x 45
6	750 x 75	675 x 68	625 x 63	625 x 63	650 x 65	500 x 50	475 x 48	475 x 48
7	750 x 75	675 x 68	650 x 65	650 x 65	625 x 63	475 x 48	475 x 48	550 x 55
8	750 x 75	650 x 65	675 x 68	675 x 68	625 x 63	475 x 48	475 x 48	550 x 55
9	750 x 75	675 x 68	650 x 65	675 x 68	600 x 60	475 x 48	475 x 48	525 x 53
10	750 x 75	675 x 68	625 x 63	650 x 65	575 x 58	475 x 48	450 x 45	500 x 50
11	750 x 75	675 x 68	600 x 60	625 x 63	575 x 58	475 x 48	450 x 45	500 x 50
12	750 x 75	650 x 65	600 x 60	650 x 65	575 x 58	475 x 48	450 x 45	525 x 53
13	750 x 75	675 x 68	625 x 63	675 x 68	550 x 55	450 x 45	475 x 48	550 x 55
14	750 x 75	700 x 70	600 x 60	675 x 68	550 x 55	450 x 45	475 x 48	550 x 55
15	750 x 75	700 x 70	600 x 60	650 x 65	575 x 58	475 x 48	475 x 48	475 x 48
16	750 x 75	700 x 70	550 x 55	600 x 60	575 x 58	450 x 45	450 x 45	450 x 45
17	750 x 75	700 x 70	550 x 55	575 x 58	575 x 58	450 x 45	450 x 45	450 x 45
18	750 x 75	700 x 70	550 x 55	575 x 58	575 x 58	475 x 48	450 x 45	475 x 48
19	750 x 75	650 x 65	575 x 58	600 x 60	550 x 55	500 x 50	475 x 48	550 x 55
20	750 x 75	650 x 65	575 x 58	625 x 63	575 x 58	500 x 50	500 x 50	550 x 55
21	750 x 75	650 x 65	575 x 58	625 x 63	600 x 60	550 x 55	550 x 55	550 x 55

Tabella 7-4: Dimensioni dell'irrigidimento longitudinale della gamba della torre Sicilia.

Concio	Spessore piatto (mm)							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	750 x 75	700 x 70	675 x 68	675 x 68	650 x 65	500 x 50	450 x 45	475 x 48
2	750 x 75	700 x 70	650 x 65	650 x 65	600 x 60	500 x 50	450 x 45	450 x 45
3	750 x 75	675 x 68	625 x 63	625 x 63	600 x 60	475 x 48	450 x 45	450 x 45
4	750 x 75	675 x 68	625 x 63	600 x 60	600 x 60	475 x 48	450 x 45	450 x 45
5	750 x 75	675 x 68	625 x 63	600 x 60	600 x 60	475 x 48	450 x 45	450 x 45
6	750 x 75	650 x 65	600 x 60	600 x 60	575 x 58	475 x 48	450 x 45	475 x 48
7	750 x 75	625 x 63	625 x 63	625 x 63	575 x 58	475 x 48	475 x 48	550 x 55
8	750 x 75	625 x 63	650 x 65	650 x 65	550 x 55	475 x 48	475 x 48	550 x 55
9	750 x 75	625 x 63	650 x 65	650 x 65	550 x 55	475 x 48	425 x 43	525 x 53
10	750 x 75	650 x 65	625 x 63	625 x 63	550 x 55	475 x 48	425 x 43	500 x 50
11	750 x 75	675 x 68	625 x 63	600 x 60	575 x 58	475 x 48	425 x 43	500 x 50
12	750 x 75	675 x 68	600 x 60	650 x 65	600 x 60	475 x 48	425 x 43	500 x 50
13	750 x 75	675 x 68	600 x 60	650 x 65	600 x 60	475 x 48	475 x 48	550 x 55
14	750 x 75	675 x 68	625 x 63	650 x 65	600 x 60	475 x 48	475 x 48	550 x 55
15	750 x 75	700 x 70	625 x 63	625 x 63	600 x 60	475 x 48	425 x 43	475 x 48
16	750 x 75	700 x 70	600 x 60	625 x 63	600 x 60	475 x 48	425 x 43	475 x 48
17	750 x 75	675 x 68	575 x 58	575 x 58	600 x 60	475 x 48	425 x 43	475 x 48
18	750 x 75	675 x 68	600 x 60	600 x 60	575 x 58	475 x 48	425 x 43	450 x 45
19	750 x 75	625 x 63	600 x 60	625 x 63	550 x 55	475 x 48	425 x 43	475 x 48
20	750 x 75	600 x 60	600 x 60	650 x 65	575 x 58	500 x 50	500 x 50	550 x 55
21	750 x 75	600 x 60	600 x 60	625 x 63	600 x 60	550 x 55	550 x 55	550 x 55

Tabella 7-5: Dimensioni dell'irrigidimento longitudinale della gamba della torre Calabria.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Lo spessore dei piatti e l'interasse degli irrigidimenti trasversali è determinato in maniera tale da garantire l'efficienza necessaria a sopportare le tensioni di compressione massime solo in determinati punti della sezione trasversale. L'efficienza è definita come il rapporto tra il limite di resistenza a compressione e il limite di snervamento non ponderato. Poiché le sollecitazioni massime di progetto sono una combinazione di compressioni assiali e di flessione, i piatti e gli irrigidimenti più lontani dal baricentro della sezione trasversale sono sottoposti alle tensioni maggiori, e quindi sono dimensionati per garantire la maggiore efficienza possibile. Piatti e irrigidimenti vicini al baricentro della sezione non sono mai soggetti a tensioni pari al carico di snervamento di progetto e quindi possono essere più snelli senza influire sulla capacità di resistenza globale della sezione trasversale. Le efficienze dei piatti e degli irrigidimenti longitudinali sono rappresentate in termini di tensione di compressione massima ammissibile per ogni concio della torre Sicilia alla Figura 7-14. Nel grafico di ogni piatto la quota è rappresentata sul carico verticale e la tensione massima ammissibile è indicata in MPa sull'asse orizzontale. I numeri degli irrigidimenti e le identificazioni degli angoli corrispondono a quanto indicato in precedenza alla Figura 7-10. L'irrigidimento consiste dell'irrigidimento vero e proprio e l'area tributaria del piatto associato. L'angolo comprende l'area del piatto tributaria all'intersezione tra due o più piatti. Gli irrigidimenti e gli angoli si distinguono per il fatto che l'efficienza della regione dell'angolo non si riduce per un'instabilità del tipo colonna/piatto. In ogni grafico le quote del trasverso sono rappresentate da linee tratteggiate di colore nero.

L'efficienza del piatto della gamba della torre rappresentata in grafico dice molto del comportamento della gamba della torre in quanto mostra gli elementi della sezione trasversale che richiedono la maggiore resistenza a ogni quota. Per quanto riguarda le efficienze rappresentate in grafico si possono fare le seguenti osservazioni:

- Il piatto A è il più distante dal baricentro della sezione trasversale e perciò è soggetto alle sollecitazioni di compressione maggiori. Perciò il suo spessore viene scelto in modo che sia tipicamente pienamente efficace e possa raggiungere il limite.
- Il piatto B contribuisce significativamente alla resistenza al momento longitudinale, tuttavia solo l'estremità del piatto che collega il piatto A sarà soggetta alla sollecitazione massima della sezione trasversale e pertanto è accettabile un'efficienza leggermente ridotta, tipicamente tra 450 MPa e 460 MPa.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

- Il piatto C contribuisce a entrambe le resistenze al momento longitudinale e trasversale. La sua efficienza generalmente aumenta verso la base della torre e tipicamente varia da 440 MPa a 460 MPa.
- Il piatto D contribuisce principalmente alla resistenza al momento trasversale e deve perciò essere efficiente ove si hanno i momenti trasversali maggiori nelle regioni al di sopra e al di sotto di ciascun trasverso. La forma delle linee di efficienza di ciascun irrigidimento riproducono la forma del grafico del momento trasversale dimensionante della gamba della torre. Le efficienze degli irrigidimenti sul piatto D aumentano man mano che si distanziano dal baricentro della sezione trasversale poiché sono soggetti a sollecitazioni compressive maggiori dovute ai momenti longitudinali. Le efficienze variano da circa 390 MPa a 450 MPa con le regioni angolari capaci di raggiungere 460 MPa.
- Il piatto E contribuisce alla resistenza al momento longitudinale. Le efficienze dell'irrigidimento sul piatto E variano a seconda della distanza dal baricentro. Le parti del piatto E più vicine al piatto A sono quelle maggiormente sollecitate e così l'irrigidimento 26 è generalmente più efficiente degli irrigidimenti 27 e 28. Le efficienze variano da circa 420 MPa a 460 MPa vicino alla base della torre con la regione angolare capace di raggiungere 460 MPa.
- Il piatto F è relativamente vicino al baricentro della sezione trasversale e perciò efficienze tipicamente tra 380 MPa e 420 MPa sono accettabili.
- I piatti G e H sono tipicamente i piatti meno soggetti a tensione nella sezione trasversale poiché sono i più vicini al baricentro. Perciò basse efficienze fino a 360 MPa sono accettabili a determinate quote. In ogni caso sul trasverso i collegamenti sono soggetti a forze di taglio considerevoli nel piano che richiedono una maggiorazione dello spessore di circa 15-20 mm rispetto allo spessore richiesto solo per sostenere le sollecitazioni assiali applicate.

## PIATTO A

Irrigidimento 3

Angolo 2b

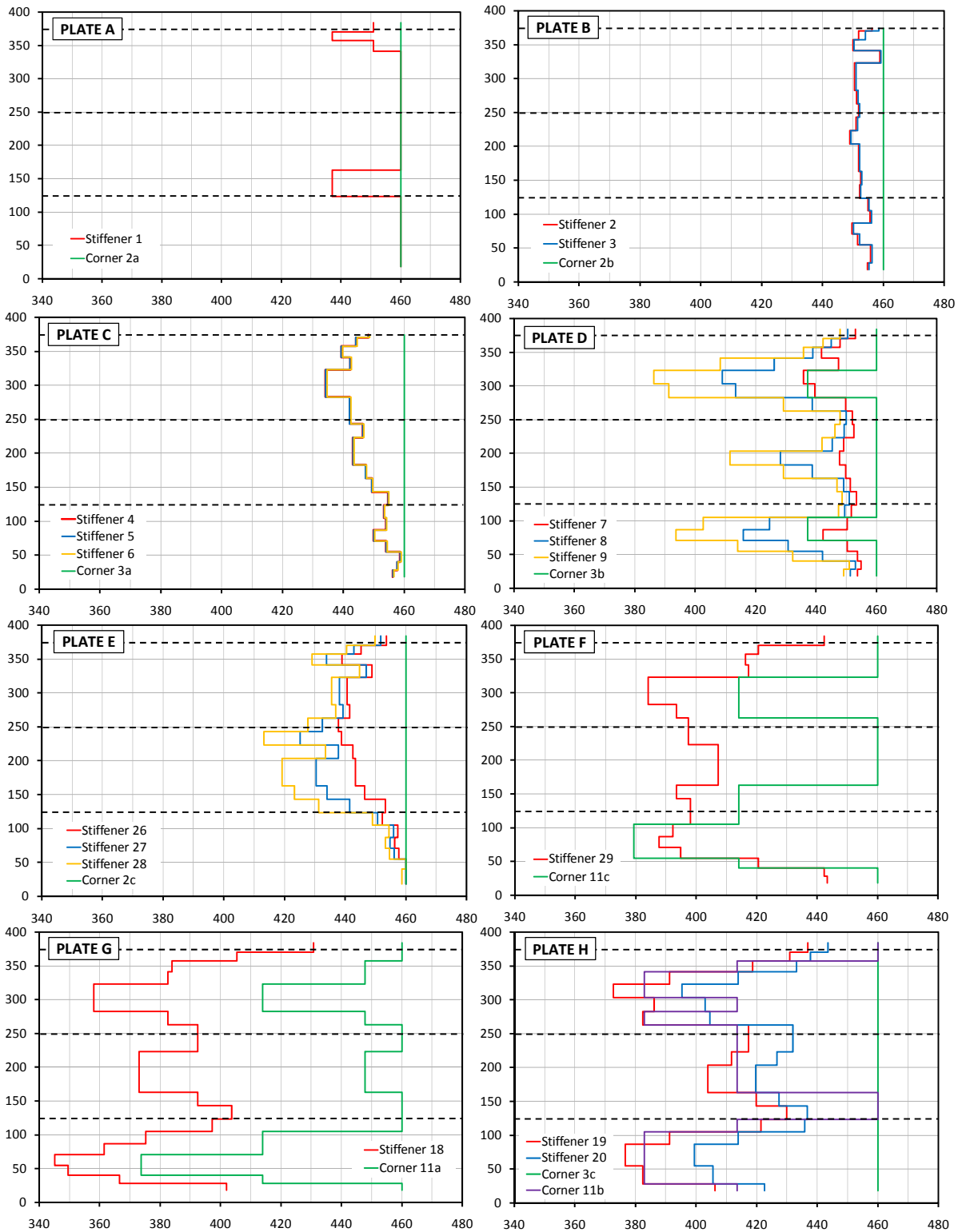


Figura 7-14: Sollecitazioni ammissibili non ponderate dell'irrigidimento longitudinale/piatto gamba

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

della torre Sicilia.

## **EFFETTI DELLE FORZE DI GOVERNO E COEFFICIENTI DI UTILIZZO**

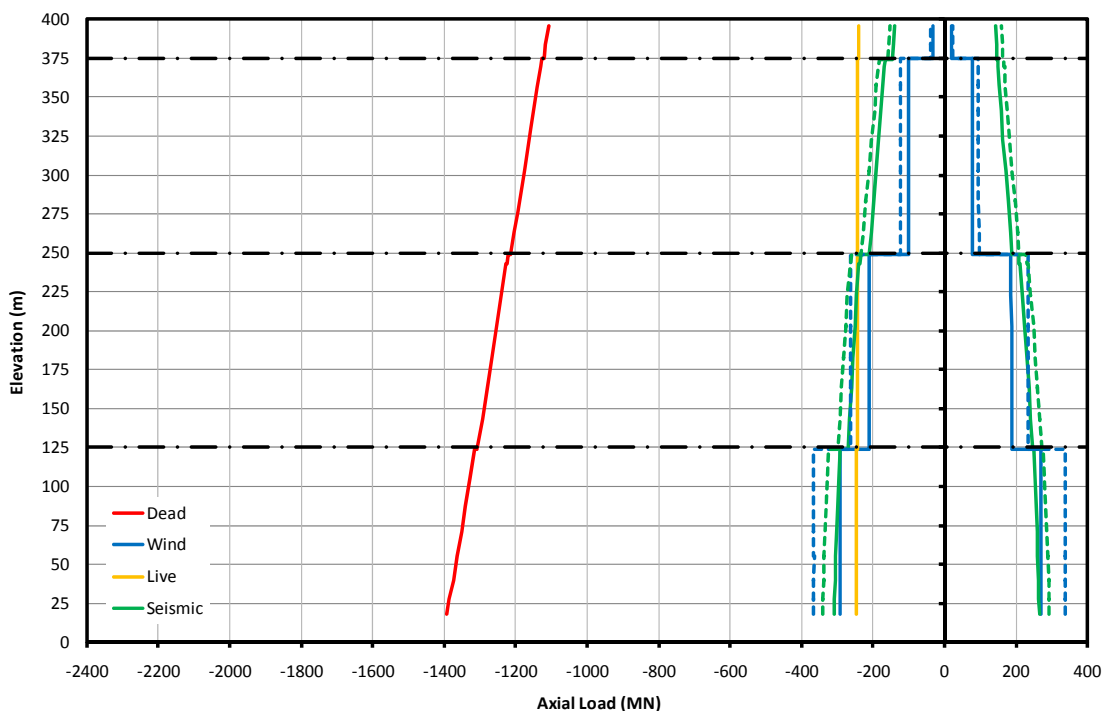
### Sollecitazioni di Compressione Assiali e Flessionali

*Le forze assiali della gamba della torre sono dominate dagli effetti del carico permanente come mostrato alla Quota (m)*

Carico assiale (MN)

Figura 7-15, in cui sono rappresentate per la gamba della torre Sicilia le forze assiali del carico permanente, del vento, dinamico e sismico non ponderate. Gli effetti della forza sismica utilizzati per il progetto della torre sono i risultati dell'effetto di forza media delle otto storie temporali di input analizzate. L'output dalle analisi delle storie temporali individuali è presentato nell'Appendice A ed è confrontato con i risultati dello spettro di risposta dell'analisi sismica. Una indagine aggiuntiva sugli effetti del fascio dei risultati delle analisi delle storie temporali sulle gambe delle torri è descritto nell'Appendice C. Le forze del carico del vento sono le massime o della risposta dinamica al vento (carichi del vento statici + dinamici) o della risposta al distacco dei vortici (carichi del vento statici + oscillazioni indotti dal distacco dei vortici). Le quote del trasverso sono rappresentate dalle linee di mezzera in nero alle quote +125 m, +250 m e +375 m. I corrispondenti effetti della forza per la torre Calabria sono presentati nell'Allegato B. La forza assiale del carico permanente non ponderato circa quattro volte la forza assiale maggiore di una delle altre componenti di carico.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



Quota (m)  
 Carico assiale (MN)

Figura 7-15: Forze assiali della gamba della torre Sicilia (SLU: linee continue, SLIS: linee tratteggiate).

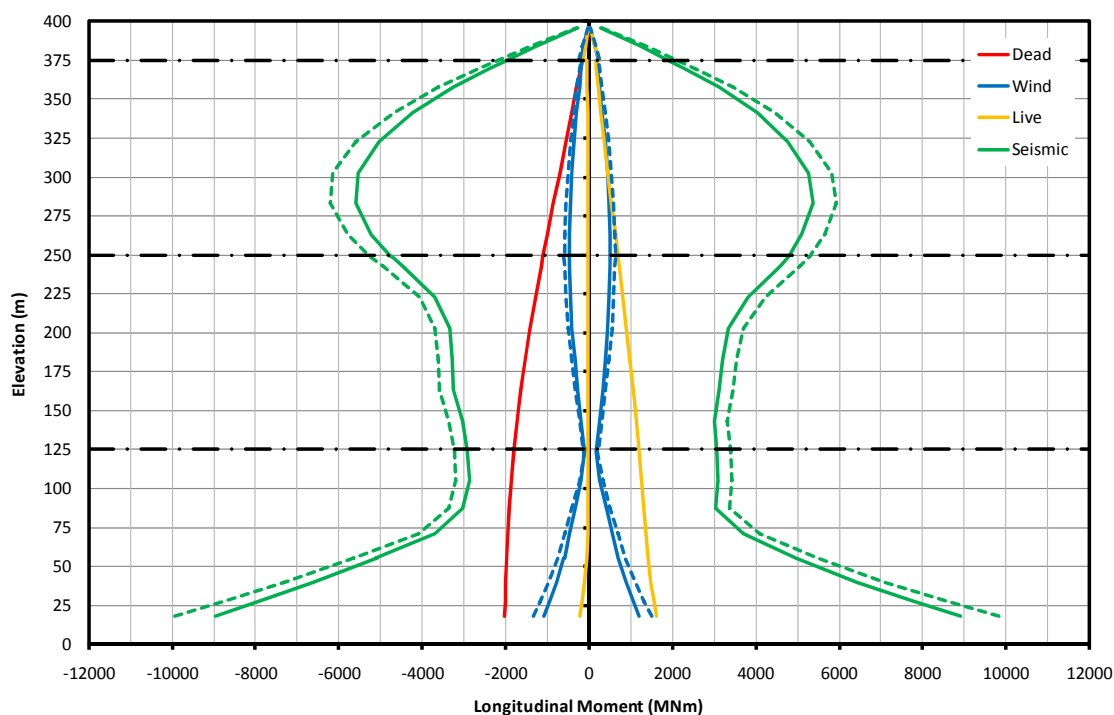
I momenti longitudinali della gamba della torre non ponderati sono mostrati alla Quota (m)

Momento longitudinale (MNm)  
 Permanente  
 Vento  
 Dinamico  
 Sismico

Figura 7-16 per carichi permanenti, carichi del vento, carichi dinamici e carichi sismici. I momenti negativi fanno sì che la torre penda verso la campata laterale e i momenti positivi fanno sì che la torre penda verso alla campata principale. La relativa mancanza di una campata laterale sostenuta da un cavo è evidente nel campo dei momenti dei carichi dinamici che sono quasi del tutto positivi. I momenti longitudinali del carico del vento agiscono con grandezze positive e negative approssimativamente uguali così come i moment sismici. I momenti longitudinali della gamba della torre sono pesantemente dominati dai carichi sismici con un momento massimo che è circa quattro volte il maggiore causato dalle altre componenti del carico. In presenza di carichi sismici e del vento la gamba della torre si comporta come una trave a sbalzo appoggiata con il momento massimo alla base fissa e il momento minimo a circa 70% dell'altezza della torre. Il punto di flesso

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

nel grafico del momento longitudinale si trova più o meno alla quota del trasverso 1, +125.00, o a circa un terzo dell'altezza della torre. I corrispondenti effetti della forza per la torre Calabria sono riportati nell'Allegato A.



Quota (m)  
 Momento longitudinale (MNm)  
 Permanente  
 Vento  
 Dinamico  
 Sismico

Figura 7-16: Momenti longitudinali della gamba torre Sicilia (SLU: linee continue, SLIS: linee tratteggiate).

I momenti trasversali della gamba della torre non ponderati per la torre Sicilia sono mostrati alla Quota (m)

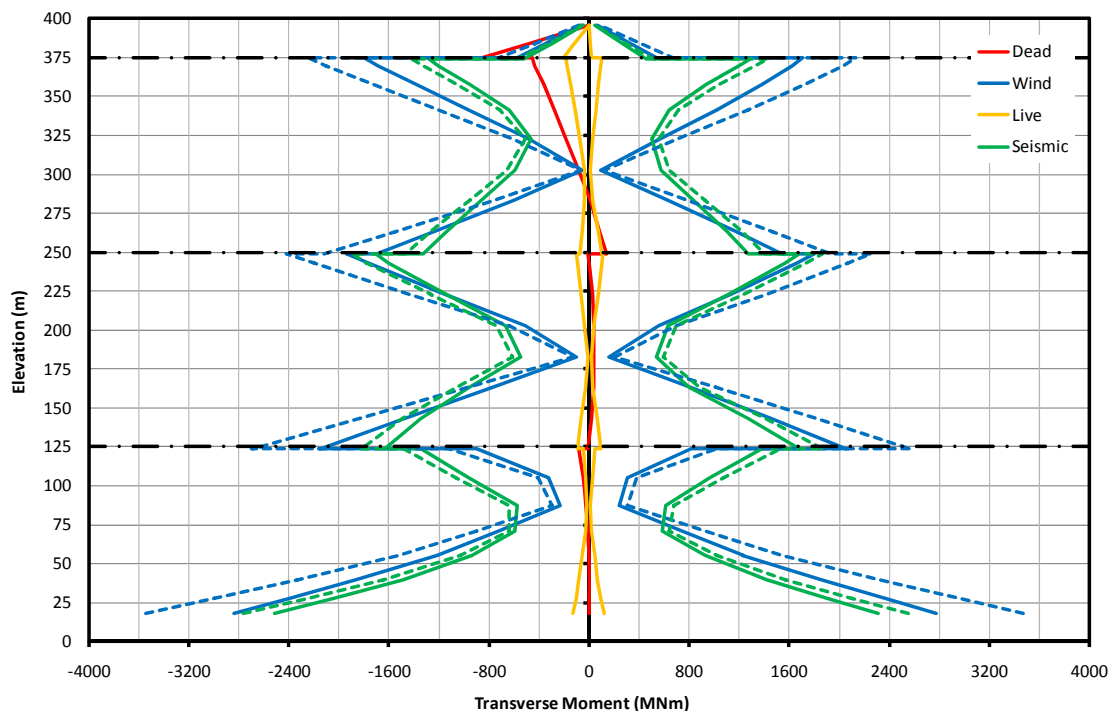
Momento trasversale (MNm)  
 Permanente  
 Vento  
 Dinamico  
 Sismico

Figura 7-17 per i carichi permanenti, carichi del vento, carichi dinamici e carichi sismici. Le reazioni del cavo principale della sommità della torre causano forze di taglio e momenti trasversali a causa delle travi a sbalzo della sella del cavo al di sopra dell'estradosso del trasverso 3 e anche perché



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

le reazioni verticali del cavo hanno una componente che agisce perpendicolarmente all'asse della gamba della torre inclinata. Al di sotto di quota +300, i momenti trasversali del carico permanente e dinamico sono insignificanti. I momenti trasversali sono dominati da carichi del vento e sismici, ciascuno dei quali produce valori che governano la progettazione ad alcune quote. I carichi sismici producono tipicamente i momenti maggiori a media altezza tra ogni trasverso a causa dell'effetto di autoreazione del peso della gamba della torre, mentre i carichi del vento producono tipicamente i momenti maggiori direttamente sopra e sotto ogni trasverso. I momenti del carico del vento riportati in grafico sono i massimi o della reazione dinamica al vento o della reazione al distacco dei vortici. Si è stabilito che i momenti trasversali del carico del vento sono governati dalla reazione dinamica al vento. Perciò gli effetti della forza dovuti alle oscillazioni indotte dal distacco dei vortici non influenzano in genere il progetto della torre. Gli effetti della forza corrispondenti per la torre Calabria sono riportati nell'Allegato A.



Quota (m)  
 Momento trasversale (MNm)  
 Permanente  
 Vento  
 Dinamico  
 Sismico

Figura 7-17: Momenti trasversali della gamba della torre Sicilia (SLU: linee continue, SLIS: linee tratteggiate).

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Oltre agli effetti della forza applicata presentati qui sopra, le gambe della torre subiscono le forze aggiuntive derivanti dall'instabilità globale (effetto delle imperfezioni equivalenti). Il metodo per definire gli effetti dell'instabilità globale è presentato in CG.10.00-P-RG-D-P-SV-T4-00-00-00-01 "Principi Generali di Progettazione". Vengono presi in considerazione gli effetti della forza di governo risultanti dal primo modo longitudinale e dal primo e secondo modo trasversale dell'instabilità globale. Gli effetti dei modi di instabilità multipli non devono essere combinati e il progetto della torre prende in considerazione unicamente gli effetti peggiori dei tre modi di instabilità a ogni sezione trasversale. Poiché l'instabilità globale può aversi in ogni direzione, tutte le forze vengono assunte come se avessero uguali grandezze positive e negative. I momenti longitudinali e trasversali dovuti a instabilità longitudinale e trasversale sono mostrati nelle

Quota (m)  
Momento longitudinale (MNm)

*Figura 7-18 e Quota (m)*

Momento trasversale (MNm)  
Primo modo di instabilità trasversale  
Secondo modo di instabilità trasversale

*Figura 7-19* rispettivamente. Le mezzerie di colore nero delle figure rappresentano le quote del trasverso. Questi effetti della forza si aggiungono ai risultati del modello globale presentati in precedenza. I momenti di instabilità longitudinale rappresentano approssimativamente il secondo maggiore contributo al momento longitudinale ponderato totale sulle gambe della torre. I momenti trasversali dell'instabilità variano dal 30% al 50% dei momenti massimi causati dagli altri componenti di carico. Benché non indicato c'è un piccolo carico assiale nelle gambe delle torri che corrisponde all'instabilità trasversale che viene pure preso in considerazione nel progetto.

Quota (m)

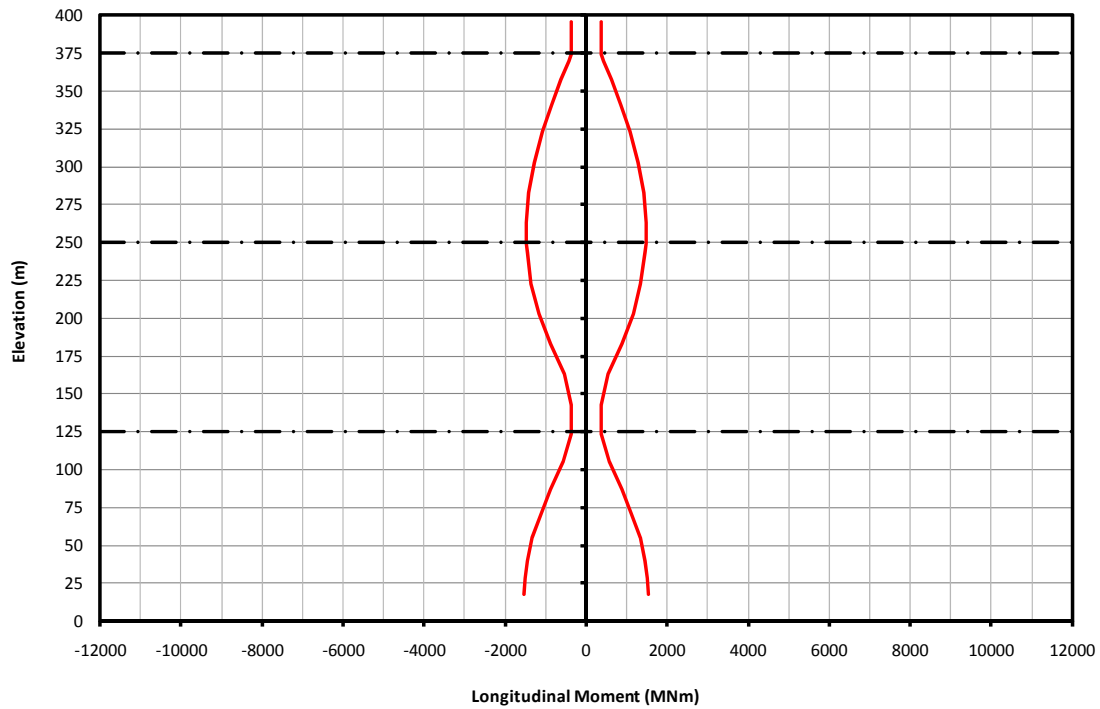
Momento longitudinale (MNm)

*Figura 7-18 e Quota (m)*

Momento trasversale (MNm)  
Primo modo di instabilità trasversale  
Secondo modo di instabilità trasversale

*Figura 7-19* mostrano i momenti di instabilità che si hanno per una singola combinazione di carichi. In realtà gli effetti dell'instabilità globale dipendono dalla forza assiale presente nella gamba della torre e cambiano leggermente per ogni combinazione di carico. Tale variazione è stata considerata nel progetto della torre. In ogni caso la forza assiale è dominata dal carico permanente e la variazione che si ha tra le varie combinazioni di carico è ridotta. Perciò le forze di instabilità presentate sono indicative della grandezza dei carichi considerati dal progetto.

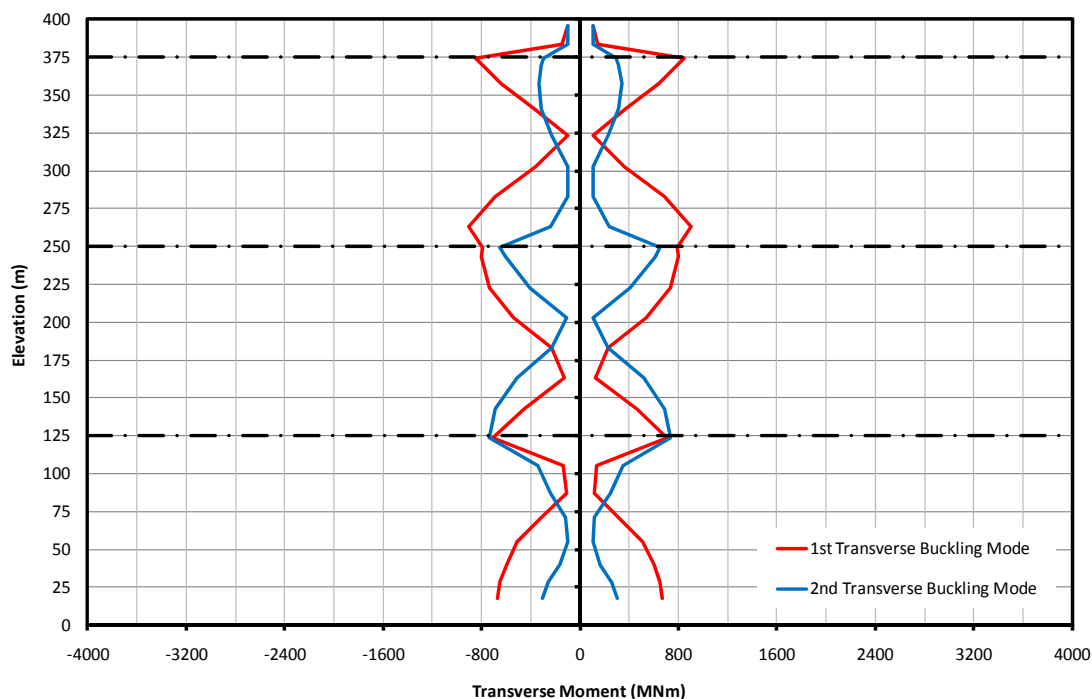
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



Quota (m)  
 Momento longitudinale (MNm)

*Figura 7-18: Momenti longitudinali dovuti a imperfezioni equivalenti.*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	



Quota (m)  
Momento trasversale (MNm)  
Primo modo di instabilità trasversale  
Secondo modo di instabilità trasversale

*Figura 7-19: Momento trasversale dovuto a imperfezioni equivalenti.*

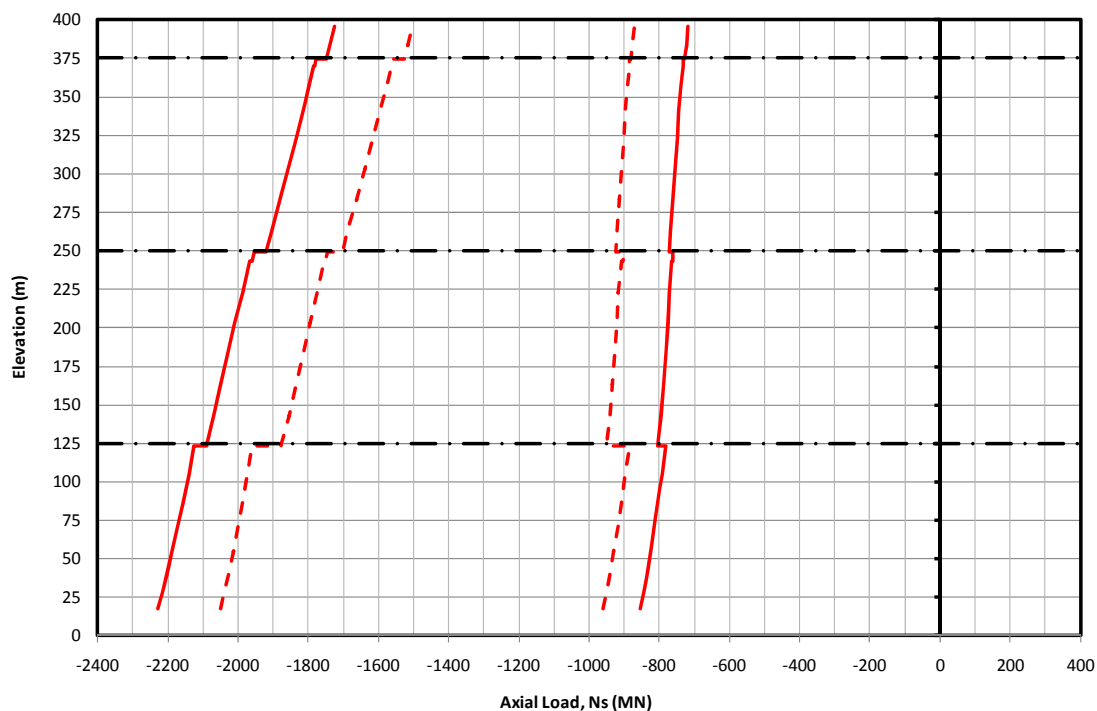
Il progetto della gamba della torre si basa sulle combinazioni di carico allo SLU e SLIS specificate nei principia di base del progetto. Gli involuppi dell'effetto della forza di progetto per la torre Sicilia, risultanti dalla combinazione delle singole componenti di carico presentate in precedenza sono mostrate alle figure che vanno dalla Figura 20 alla Figura 24. Le figure mostrano l'involuppo minimo e massimo di tutte le relative combinazioni di carico alla SLU e SLIS. Questi effetti non comprendono le forze derivanti dall'instabilità globale della torre mostrate in precedenza. Gli effetti della forza corrispondenti per la torre Calabria sono mostrati nell'Allegato B.

Il progetto della torre si basa sugli effetti di carichi multipli e prende in considerazione unicamente i carichi concomitanti. L'utilizzo dei soli effetti della forza minimo e massimo comporterebbe un progetto troppo conservativo in quanto l'effetto minimo e l'effetto massimo di ogni tipo di forza raramente si verificano simultaneamente. Perciò, benché gli involuppi degli effetti della forza presentati mostrino i valori minimo e massimo di un dato effetto, le sollecitazioni che governano la progettazione non possono derivare dal massimo o dal minimo di ogni singolo effetto. Per esempio, le sollecitazioni che governano la progettazione all'intersezione dei piatti A e B possono

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

essere causate da una combinazione che comprende il 90% del momento longitudinale massimo e il 90% del momento trasversale massimo. Le sollecitazioni della gamba della torre sono state valutate per:

- 1 I valori massimo e minimo di ogni effetto di carico con i valori concomitanti di altri effetti di carico (ad esempio la forza assiale massima con i momenti longitudinali e trasversali concomitanti); e
- 2 Le combinazioni lineari di effetti stabiliti da IBIDAS per trovare il modello di carico che produce le sollecitazioni massime e minime agli otto angoli della sezione trasversale sulla base delle reali caratteristiche della sezione della gamba della torre.



Quota (m)  
Carico assiale Ns (MN)

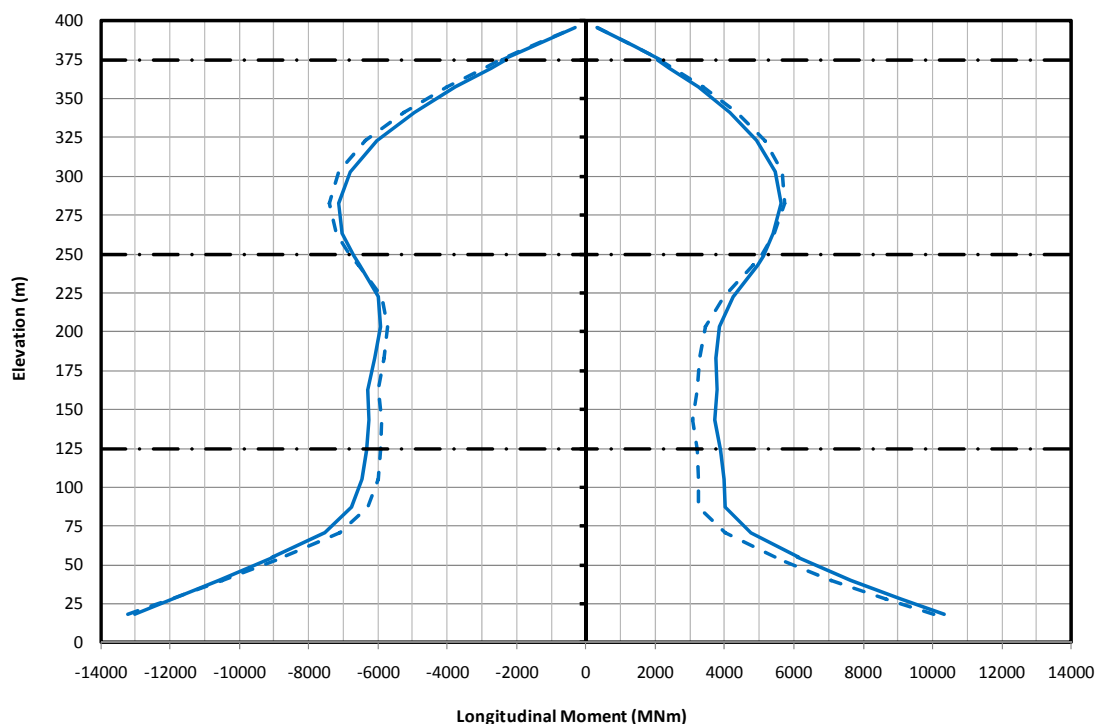
*Figura 7-20: Involuppo del carico assiale ponderato della gamba della torre Sicilia (SLU: linee continue, SLIS: linee tratteggiate).*

La combinazione che governa la progettazione per il carico assiale è generalmente il carico sismico in quanto i carichi assiali dovuti al sisma di solito superano quelli provocati dal vento. L'involuppo dell'effetto della forza del carico assiale della Figura 7-20 mostra che le combinazioni

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

di carico alla SLU producono maggiori carichi assiali delle combinazioni di carico allo SLIS. Questo è innanzitutto il risultato del ridotto carico dinamico considerato nella combinazione allo SLIS che utilizza un carico dinamico rarefatto QR invece del carico dinamico denso QA utilizzato nelle combinazioni allo SLU. Inoltre, per la combinazione di carico allo SLIS, per i componenti non strutturali è assunto un fattore di carico di 1.0 invece di 1.5 come utilizzato nelle combinazioni allo SLU, cosa che comporta un'ulteriore riduzione del carico assiale ponderato.

Gli involuppi del momento longitudinale della Figura 7-21 subiscono un'influenza simile, ove in molti casi i momenti allo SLU sono superiori ai momenti allo SLIS. Per i momenti massimi sono responsabili la ridotta intensità del carico dinamico e il ridotto coefficiente di carico permanente della componente non strutturale. I momenti minimi allo SLU sono leggermente maggiori per grandezza dei momenti minimi allo SLIS a causa del coefficiente del carico permanente della componente non strutturale leggermente più basso, 0,9 invece di 1.0. Per i momenti longitudinali massimo e minimo di tutti i punti risultano dimensionanti le combinazioni di carico con carico sismico poiché i momenti superano di molto i momenti longitudinali derivanti da carichi del vento o dinamici.

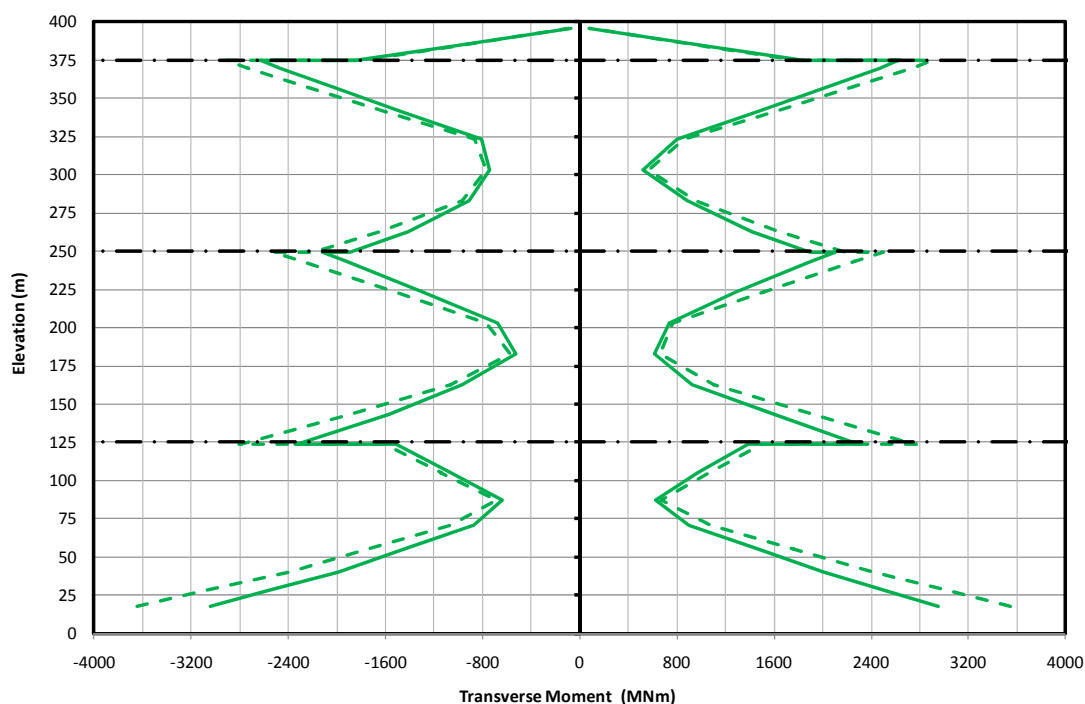


Quota (m)  
 Momento longitudinale (MNm)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

Figura 7-21: Inviluppo del momento longitudinale ponderato della gamba della torre Sicilia (SLU: linee continue, SLIS: linee tratteggiate).

Gli involuppi del momento trasversale sono disciplinati dal carico sismico e del vento e non sono influenzati significativamente dai carichi permanenti o dinamici. L'unica eccezione è la sommità della torre dove l'inclinazione trasversale delle gambe della torre rispetto al cavo principale comporta momenti flettenti trasversali. Per i momenti trasversali minimo e massimo sono generalmente dimensionanti i carichi del vento poiché questi sono leggermente superiori ai momenti trasversali a causa del carico sismico. Diversamente dalle forze assiali e dai momenti longitudinali, i momenti trasversali sono maggiori per le combinazioni di carico allo SLIS rispetto alle combinazioni di carico allo SLU. Poiché i momenti trasversali non sono influenzati in modo significativo dai carichi permanenti e dinamici, i momenti trasversali aumentano in modo proporzionale al carico del vento.



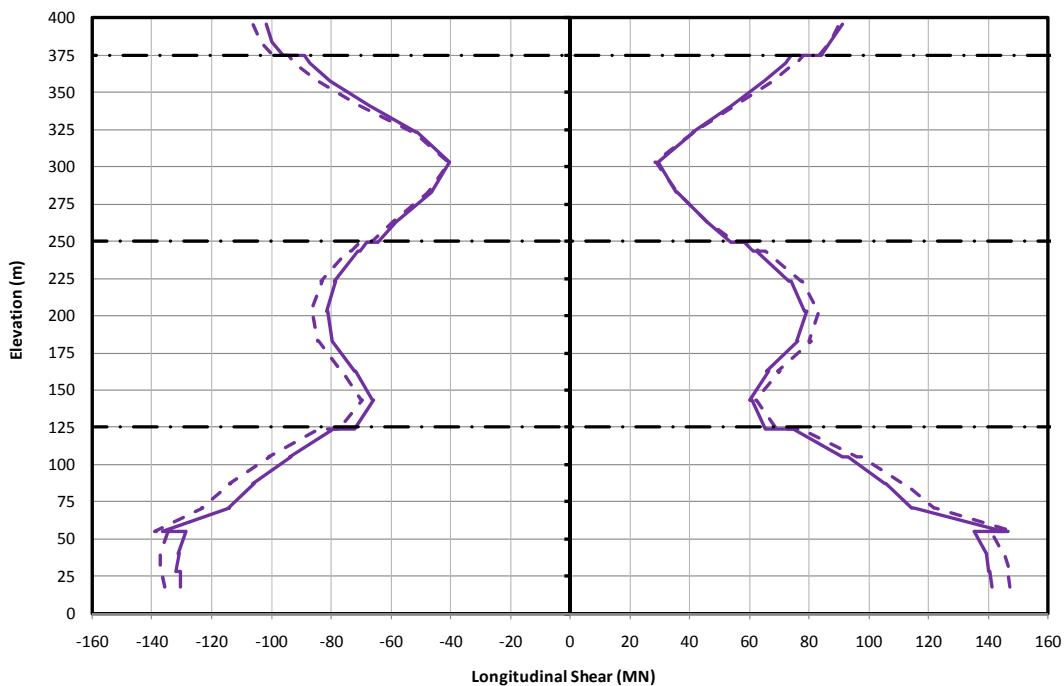
Quota (m)  
 Momento trasversale (MNm)

Figura 7-22: Inviluppo del momento trasversale ponderato della gamba della torre Sicilia (SLU: linee continue, SLIS: linee tratteggiate).

Gli involuppi della forza di taglio longitudinale e trasversale sono mostrati alle Figura 7-23 e Figura 7-24rispettivamente. Le forze di taglio longitudinale e trasversale non influenzano il progetto della

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

gamba della torre in quanto gli sforzi di taglio massimi concomitanti alle sollecitazioni longitudinali che governano la progettazione sono ben al di sotto del 50% della resistenza al taglio.

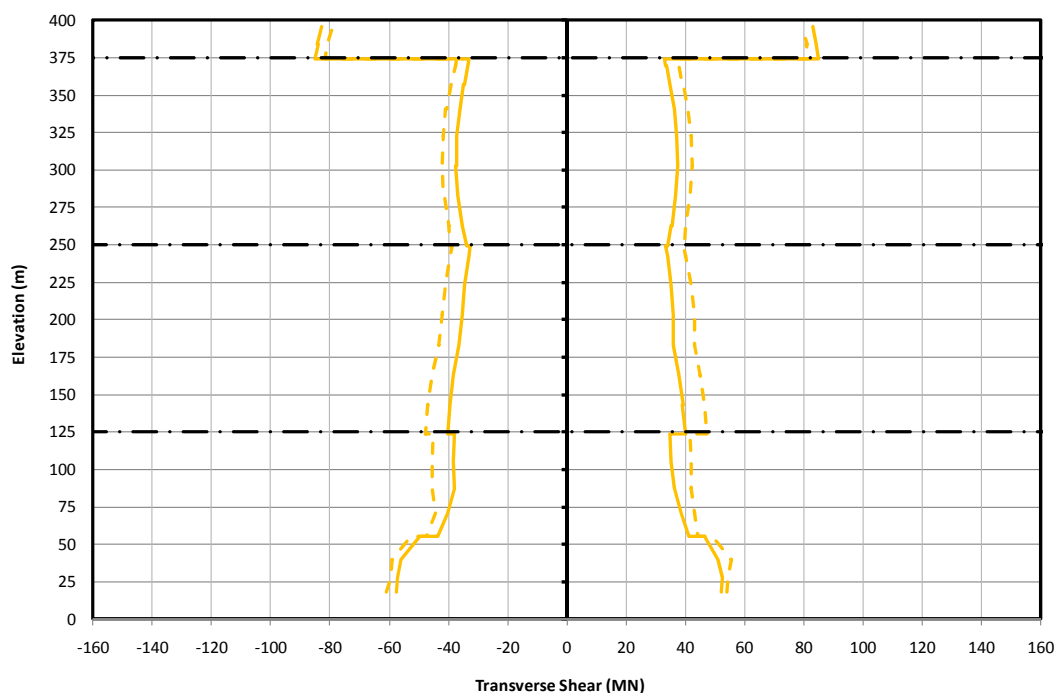


Quota (m)  
 Taglio longitudinale (MNm)

Figura 7-23: Involuppo del taglio longitudinale ponderato della gamba della torre Sicilia (SLU: linee continue, SLIS: linee tratteggiate).



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011	



Quota (m)  
 Taglio trasversale (MN)

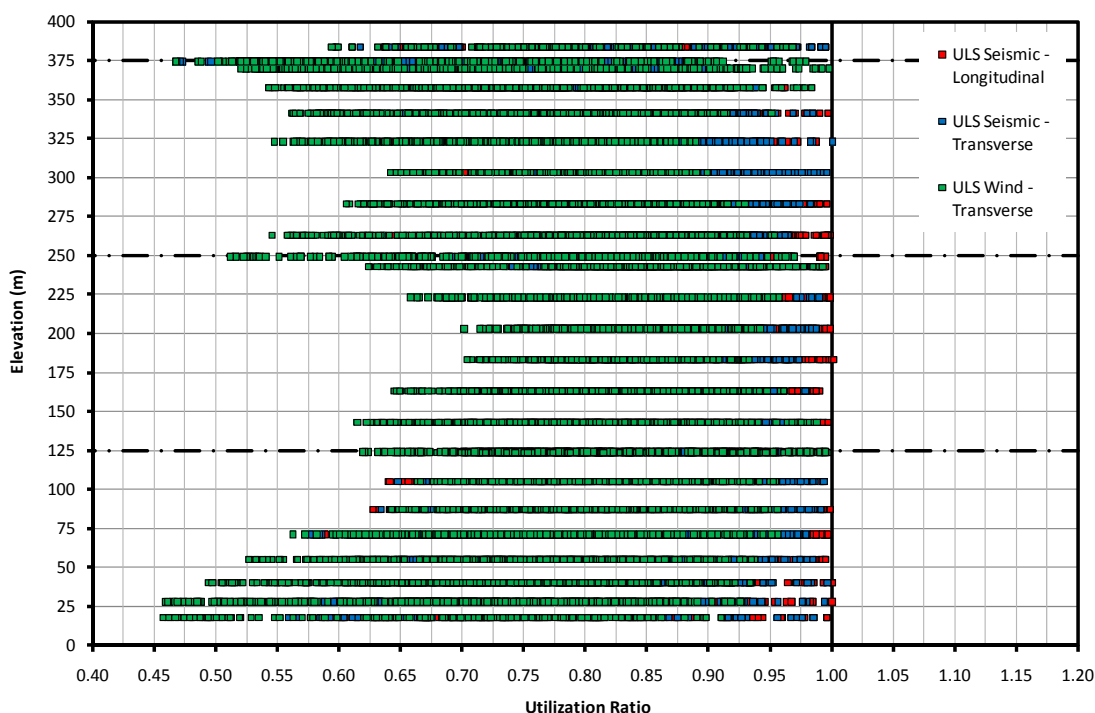
Figura 7-24: Involuppo della forza di taglio trasversale della gamba della torre Sicilia (SLU: linee continue, SLIS: linee tratteggiate).

Il progetto della gamba della torre si basa sugli effetti di tutte le relative combinazioni di carico secondo quanto descritto in precedenza. Per ogni combinazione di carico è stato ottenuto un coefficiente di utilizzo per ciascuno dei punti chiave della sezione trasversale identificati alla Figura 7-10 per ogni insieme di effetti primari e concomitanti e combinazioni lineari di effetti. I coefficienti di utilizzo per tutti i punti della sezione trasversale sono inferiori o uguali a 1.0 per tutte le combinazioni di carico. Le gambe delle torri sono in genere governate dalla combinazione di carico 7 allo SLU che comprende carichi concomitanti sismici e dinamici massimi. La combinazione di carico 6 allo SLU che comprende il vento trasversale, è dimensionante per gli spessori dei piatti C, D e H e le dimensioni dell'irrigidimento longitudinale vicino ai trasversi dove si hanno i maggiori momenti trasversali. I coefficienti di utilizzo per tutti i punti della sezione trasversale e i conci della gamba della torre per le combinazioni di carico che governano la progettazione sono mostrati alle Figura 7-10 e Figura 7-10, per le torri Sicilia e Calabria rispettivamente.

Per tutte le combinazioni di carico e i conci della torre, le sollecitazioni che governano la progettazione si trovano generalmente vicino agli angoli della sezione trasversale con il punto che

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

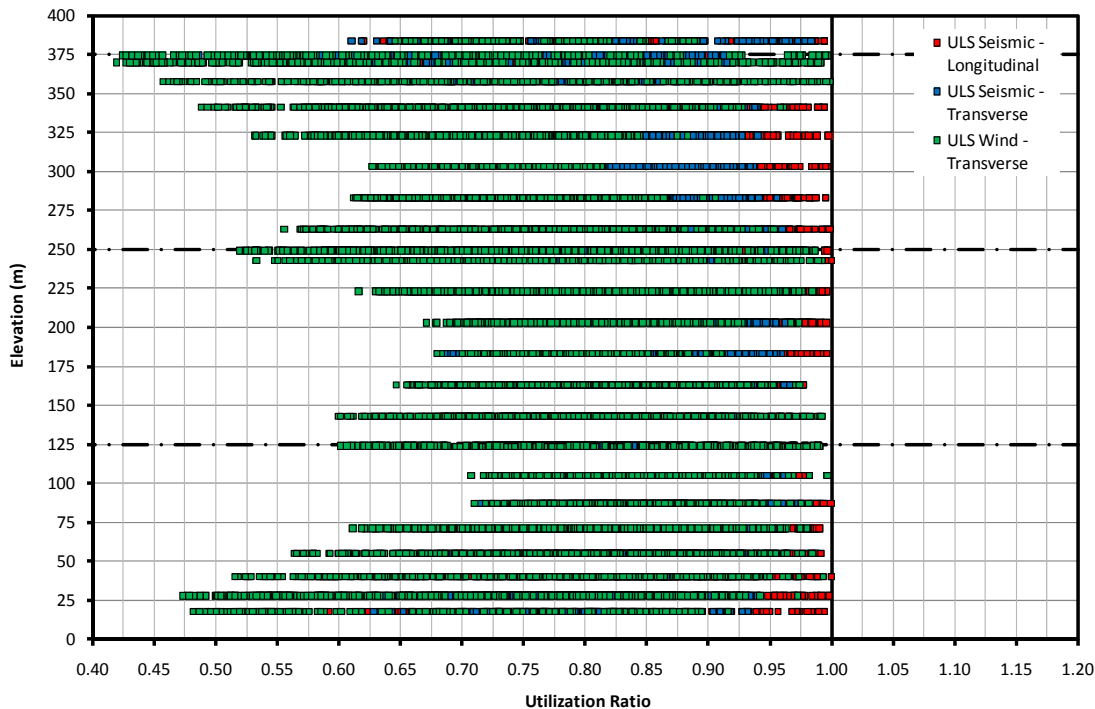
governa la progettazione rappresentato o dall'angolo non irrigidito o dall'irrigidimento longitudinale vicino all'angolo. Per questi punti lo spessore del piatto e la dimensione dell'irrigidimento sono stati dimensionati in modo che la sollecitazione di compressione massima ammissibile sia il più possibile vicina al limite di snervamento (alta efficienza). I coefficienti di utilizzo che governano la progettazione variano da 0,95 e 1.0 per tutti i conci di entrambe le torri.



Quota (m)  
 Coefficiente di utilizzo  
 Carico sismico allo SLU - Longitudinale  
 Carico sismico allo SLU - Trasversale  
 Trasversale allo SLU

Figura 7-25: Coefficienti di utilizzo che governano la progettazione della gamba della torre Sicilia.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011	



Quota (m)  
 Coefficiente di utilizzo  
 Carico sismico allo SLU - Longitudinale  
 Carico sismico allo SLU - Trasversa  
 Carico del vento alo SLU - Trasversale

Figura 7-26: Coefficienti di utilizzo che governano la progettazione della gamba della torre Calabria.

### Sforzi di taglio

Il progetto della gamba della torre è pesantemente governato dalle sollecitazioni assiali e di flessione. Le dimensioni della sezione trasversale e gli spessori del piatto necessari per assicurare un'adeguata resistenza a questi effetti assicurano una resistenza al taglio in eccesso. A conferma che gli effetti di taglio non necessitano di essere considerati con le sollecitazioni longitudinali, sono stati calcolati gli sforzi di taglio longitudinali e trasversali medi che accadono simultaneamente alle sollecitazioni longitudinali che governano la progettazione per tutta l'altezza della torre. Gli sforzi sono stati paragonati alla resistenza al taglio minima del piatto resistente alla maggiore sollecitazione.

Si è presupposto che i piatti A, B, C e D contribuiscano alla resistenza al taglio longitudinale. La sollecitazione al taglio longitudinale massima calcolata è 43,4 MPa e si ha vicino alla sommità della torre dove i piatti sono relativamente sottili per via dei ridotti momenti longitudinali. La

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

sollecitazione al taglio trasversale massima calcolata è di 33,8 MPa e pure si ha vicino alla sommità della torre.

Gli sforzi di taglio longitudinale maggiori si hanno sul piatto D che è tipicamente più sottile dei piatti B e C. Poiché il piatto D è progettato per essere pienamente efficace o quasi pienamente efficace nel sostenere le sollecitazioni assiali applicate non si ha né instabilità di taglio totale del pannello né instabilità del sottopannello più largo, quindi non è richiesta alcuna riduzione per instabilità al taglio. Pertanto la resistenza al taglio del piatto è uguale alla tensione di snervamento al taglio di progetto di 241 MPa che comporta un coefficiente di utilizzo al taglio di 0,18. In conformità alle EN 1993-1-5 Paragrafo 7.1 (1), l'interazione tra le tensioni di compressione longitudinale e le tensioni di taglio trasversali non devono essere prese in considerazione poiché il coefficiente di utilizzo al taglio è inferiore a 0,5.

Gli sforzi di taglio maggiori si hanno nel piatto G che, essendo il più vicino al baricentro della sezione trasversale e avendo uno spessore minimo di solo 30 mm, è tipicamente il piatto meno efficiente nella sezione trasversale. La norma EN 1993-1-5 Allegato A3 indica che la resistenza allo sforzo del piatto è governata dall'instabilità totale dell'intero pannello per il quale si applica un coefficiente di riduzione di 0.72. La resistenza al taglio è quindi  $0,72 \times 241 = 174$  MPa. Nonostante l'instabilità al taglio del pannello sia notevole, il coefficiente di utilizzo del taglio è ancora solo 0,19 e l'interazione tra gli effetti assiali e di taglio non necessita di essere presa in considerazione. Poiché l'instabilità al taglio è notevole per il piatto G, è ulteriormente confermato, in accordo a EN 1993-1-5 Paragrafo 9.3.3 (3), che gli irrigidimenti trasversali sul piatto G non devono essere progettati per nessuna forza assiale a causa dell'azione di campo di tensione nel pannello.

Data la grandezza dei coefficienti di utilizzo di taglio di cui sopra, le forze di taglio in genere non influenzano la progettazione dell'acciaio longitudinale della gamba della torre. Perciò, calcoli di resistenza al taglio più dettagliati non influenzano la progettazione dell'acciaio longitudinale della gamba della torre. Pertanto, in genere, non sono necessari calcoli della resistenza al taglio di maggiore dettaglio. In ogni caso nei punti del trasverso a livello locale alti sforzi di taglio influenzano la progettazione degli elementi longitudinali come descritto al Paragrafo 7.3.3.2.

#### **GIUNZIONI DI CAMPO DEI GIUNTI DI COSTRUZIONE**

I 21 conci della gamba della torre realizzati in officina vengono uniti da giunzioni in campo ai giunti di costruzione trasversali. Le giunzioni di campo sono realizzate ricorrendo a una combinazione di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011	

saldature a piena penetrazione sui piatti esterni e a giunti imbullonati sugli irrigidimenti longitudinali e i piatti interni (anime longitudinali e trasversali). Le quote di giunzioni imbullonate tipiche in un irrigidimento longitudinale e un piatto interno sono mostrate alla Figura 7-27 e Figura 7-28 rispettivamente. A ogni giunto trasversale, le giunzioni imbullonate devono condividere il carico con i piatti esterni saldati e, conseguentemente, tali giunti vengono classificati come connessioni ibride secondo le EN 1993-1-8 Paragrafo 3.9.3. Ciò richiede che le giunzioni imbullonate siano verificate allo scorrimento allo stato limite ultimo.

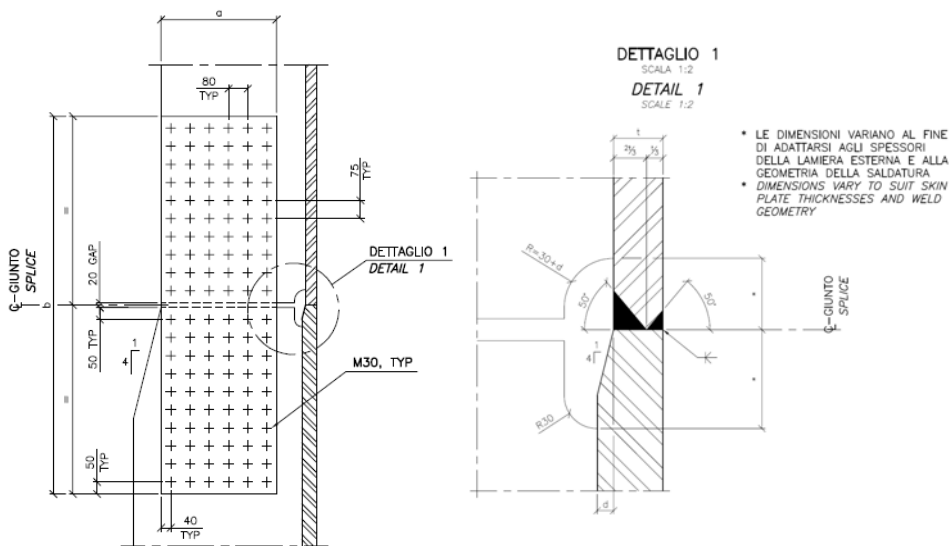


Figura 7-27: Dettaglio giunzione dell'irrigidimento longitudinale del piatto esterno.

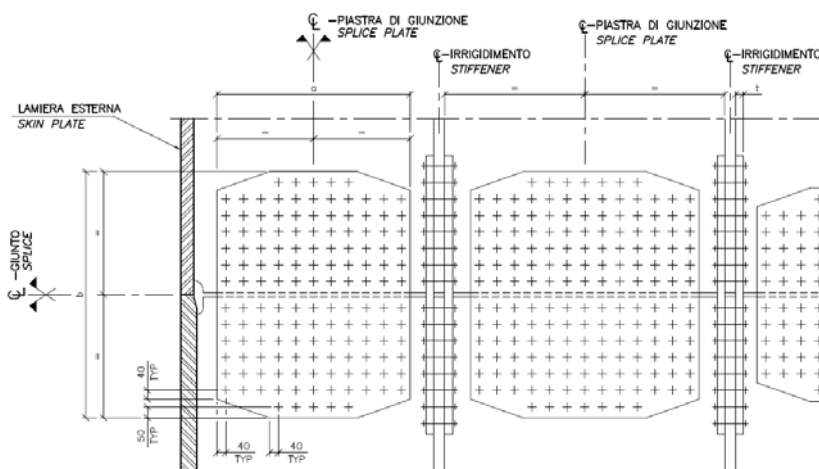


Figura 7-28: Dettaglio giunzione del piatto interno tipico.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Per raggiungere la resistenza richiesta i giunti imbullonati necessitano di una preparazione su tutte le superfici di attrito, ivi compresi i piatti di riempimento in modo da garantire un coefficiente di scorrimento minimo ( $\mu$ ) di 0,45. Inoltre il tiro finale di tutti i bulloni del giunto sarà effettuato solo una volta ultimate le saldature di giunzione del piatto esterno come richiesto dalla norma EN 1993-1-8 Paragrafo 3.9.3 per connessioni ibride. Tutti i bulloni devono essere M30 Classe 10.9 precaricati secondo le prescrizioni della norma EN ISO 898.

Le richieste sismiche allo SLU di norma governano la progettazione dell'acciaio verticale della gamba della torre con la maggior parte dei coefficienti di utilizzo molto vicini a 1.0 in compressione. Perciò per una giunzione tipica dell'irrigidimento longitudinale il numero di bulloni è stato scelto in modo da sviluppare la resistenza allo snervamento dell'irrigidimento giuntato. La progettazione ha previsto una disposizione dei bulloni semplice e compatta nel rispetto delle prescrizioni di interasse della norma EN 1993-1-8 Paragrafo 3.5. I piatti da giuntare sono stati dimensionati in modo da assicurare la resistenza alla compressione assiale, la rigidità assiale e la rigidità a flessione dell'irrigidimento disciplinante per tutta la giunzione. L'instabilità locale dei piatti da giuntare è stata verificata ove si ha la maggiore distanza tra i bulloni e la resistenza alla tensione della sezione della rete è stata controllata rispetto alla richiesta di resistenza alla tensione applicata presente nella sezione da giuntare.

Le giunzioni imbullonare sui piatti interni della gamba della torre sono state progettate per sviluppare la resistenza allo snervamento in compressione dei piatti interni da giuntare e per trasferire le richieste globali di resistenza al taglio dei piatti interni attraverso il giunto. Il gruppo di bulloni da ogni lato della mezzeria orizzontale della giunzione è stato così dimensionato per resistere alla combinazione di richieste di resistenza provenienti sia dal carico assiale che dal taglio. Sono state incluse le richieste aggiuntive di bulloni per resistere alla rotazione indotta dei piatti della giunzione generate da trasferimento della richiesta di resistenza al taglio attraverso la regione della giunzione. Come per le giunzioni degli irrigidimenti longitudinali il layout dei bulloni è stato scelto per assicurare una disposizione semplice e compatta in conformità alla norma EN 1993-1-8 2005, Paragrafo 3.5. I piatti della giunzione sono stati dimensionati per resistere alle sollecitazioni di von Mises derivanti dalle richieste di resistenza combinata alla compressione assiale e al taglio. L'instabilità locale dei piatti della giunzione tra i bulloni è stata verificata ove vi è l'interasse maggiore dei bulloni e la resistenza alla tensione della sezione della rete è stata verificata rispetto alla richiesta di resistenza alla tensione massima presente nella sezione del piatto interno da giuntare.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

In generale le larghezze del piatto della giunzione e i punti in cui vengono inseriti i bulloni sono stati verificati per garantire distanze sufficienti all'inserimento della chiave dinamometrica. Le lunghezze del piatto della giunzione assicurano una distanza idonea dai diaframmi trasversali posti a 1000 mm dall'estremità superiore di ogni concio della gamba della torre con le seguenti eccezioni: piatto E gamba torre Sicilia nei giunti tra i conci 1-2, 2-3 e 3-4, gamba torre Calabria per il piatto E nel giunto tra i conci 1-2. Questi lunghi piatti di giunzione sono necessari per il fatto che i pianti da giuntare sono piuttosto spessi. In questi giunti di costruzione la distanza del giunto dal diaframma di tipo 1 trasversale adiacente è stata aumentata per assicurare il necessario gioco.

La giunzione trasversale sulla sommità della torre tra il concio 21 e la sella del cavo principale è stata progettata similmente alle altre giunzioni trasversali; in ogni caso, poiché i piatti esterni B e C terminano alla sommità del trasverso 3, i piatti E, F e H diventano piatti esterni al di sopra di questo punto, quindi solo il piatto G deve essere considerato un piatto interno. I piatti E, F e H su questo giunto sono collegati tramite saldature a piena penetrazione allo stesso modo dei piatti A e D. I piatti di giunzione dell'irrigidimento longitudinale sono inclinati per adattarsi all'angolo dei piatti esterni del concio della sella e i bulloni presentano una disposizione leggermente più inclinata e densa per far posto a giochi più stretti pur nel rispetto delle prescrizioni di EN 1993-1-8 Paragrafo 3.5.

### 7.3.3.2 Elementi trasversali

Gli elementi trasversali della gamba della torre consistono di irrigidimenti trasversali e diaframmi di tipo 1, 2, 3 e 4. Gli elementi tipici dell'irrigidimento trasversale sono distanziati da 3 a 3,5 metri in ogni concio della gamba della torre. I diaframmi di tipo 1 sono tipicamente posti a 1 m al di sotto della giunzione trasversale eseguita in campo in ogni concio della gamba della torre. I diaframmi di tipo 2 sono posti alle connessioni delle flange superiore e inferiore del trasverso con le gambe della torre per un numero di cinque per ogni gamba. I diaframmi di tipo 3 sono posti alle connessioni della flangia superiore del trasverso 3 con la gamba della torre. I diaframmi di tipo 4 sono posti alle quote degli smorzatori a massa risonante.

### IRRIGIDIMENTI TRASVERSALI E DIAFRAMMI DI TIPO 1

La disposizione dell'irrigidimento trasversale del progetto di gara è stato modificato in questa fase al fine di ridurre i costi di realizzazione assicurando una procedura di montaggio della sezione trasversale semplificata e riducendo il numero degli elementi di irrigidimento trasversali che

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

vengono attraversati dagli irrigidimenti longitudinali. Lo spessore del piatto A è stato aumentato in modo che gli irrigidimenti trasversali regolari non fossero necessari e gli irrigidimenti trasversali verso i piatti B, C, E, F e H sono stati sostituiti da un piatto di diaframma triangolare che risulta più efficiente e deve essere intagliato per gli irrigidimenti longitudinali solo lungo i piatti B e C..

La sezione tipica dell'irrigidimento trasversale rivista consiste dei seguenti elementi strutturali:

- Irrigidimento a T di 4 metri di lunghezza sul piatto G;
- Irrigidimento a T di 8 metri di lunghezza sul piatto D; e
- I diaframmi del piatto nelle celle triangolari delimitate dai piatti B, C, E, F e H.

La disposizione dei diaframmi di tipo 1 è simile a quella degli irrigidimenti trasversali, ma si distingue per un irrigidimento a T più pesante sul piatto D e da un irrigidimento a T di 4 m di lunghezza sul piatto A. In questa fase si è notato che il tipico diaframma a piatto completo proposto nel progetto di gara non è necessario e che una sufficiente robustezza e rigidezza possono essere garantite grazie alle modifiche definite degli irrigidimenti trasversali tipici. La disposizione dell'irrigidimento trasversale e dei diaframmi di tipo 1 è mostrata alla Figura 7-29.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

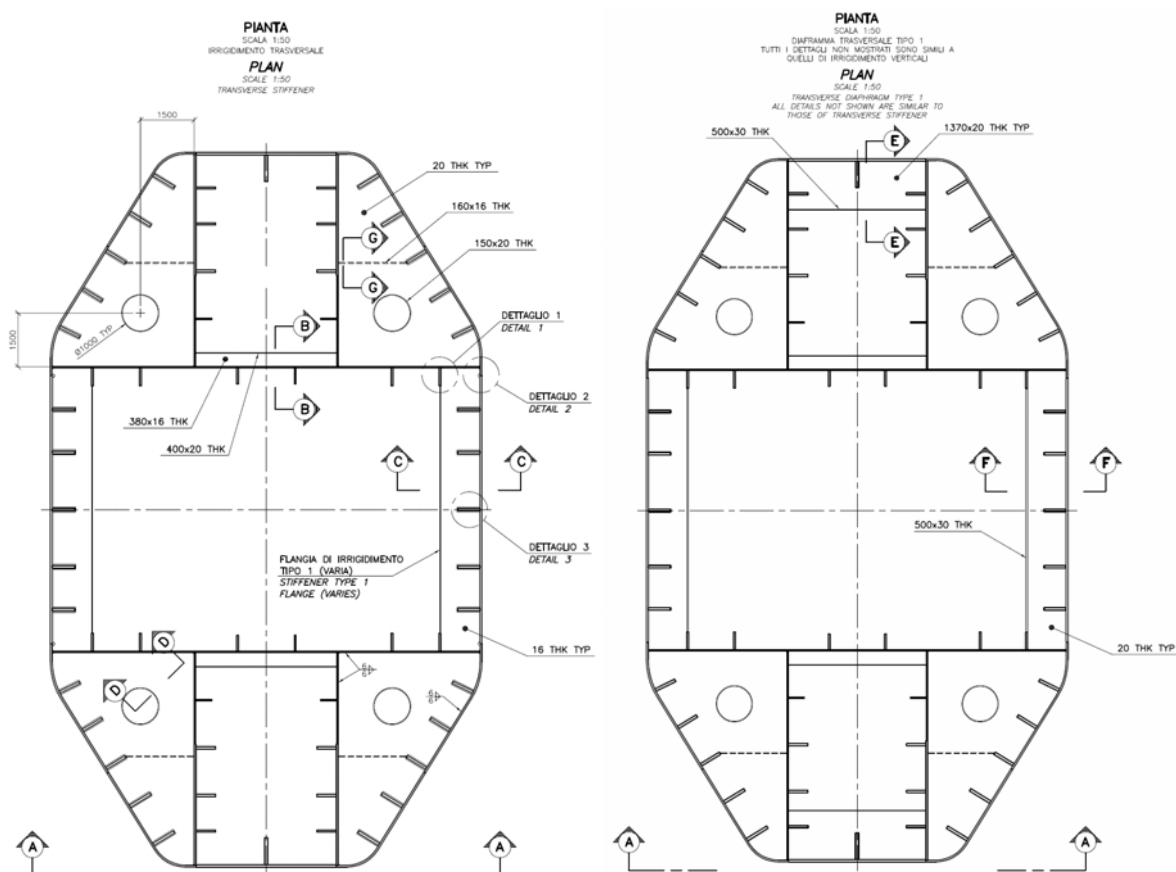


Figura 7-29: Irrigidimenti trasversali della gamba della torre e diaframmi di tipo 1.

Nella presentazione del concetto generale la flangia dell'irrigidimento trasversale del piatto D era controventata agli irrigidimenti longitudinali per evitare instabilità torsionale e tutti gli irrigidimenti longitudinali sono stati collegati agli elementi di irrigidimento trasversale tramite piatti a linguetta. I piatti a linguetta sono previsti per:

- Trasferire le forze di deviazione (forse “di spinta” dall’instabilità dei pannelli compressi adiacenti) dall’irrigidimento longitudinale all’irrigidimento trasversale; e
- Migliorare la stabilità laterale alla torsione della flangia dell’irrigidimento trasversale;

Entrambe queste connessioni tra gli irrigidimenti trasversali e longitudinali richiedono un intenso processo di costruzione e perciò non sono auspicabili. La rimozione di connessioni simili tra i sistemi di irrigidimento longitudinali e trasversali è stata riconosciuta accettabile per le torri Ponte Akashi Kaikyo Bridge grazie a indagini sia di tipo sperimentale che analitico. Perciò al fine di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

ridurre i costi di costruzione, è stata condotta un'ulteriore analisi agli elementi finiti di dettaglio sull'interfaccia tra gli irrigidimenti trasversali e longitudinali al fine di:

- 1 Stabilire la dimensione richiesta della flangia dell'irrigidimento trasversale per prevenire l'instabilità alla torsione laterale; e
- 2 Stabilire la necessaria dimensione della saldatura per collegare l'anima dell'irrigidimento trasversale al piatto esterno.

Lo stesso modello dell'elemento shell è stato utilizzato per analizzare la rimozione di entrambe le connessioni poiché ognuna di esse ha un effetto sull'altra. Il modello consiste di quanto segue:

- Una distanza degli irrigidimenti trasversali di 8,0 metri tra i piatti H con intaglio per permettere il passaggio degli irrigidimenti longitudinali;
- Il piatto esterno si estende per 3,5 metri sopra e sotto l'irrigidimento trasversale;
- Gli irrigidimenti longitudinali si estendono per 3,5 metri sopra e sotto;
- Il piatto confinante H si estende per 3,5 metri sopra e sotto (la presenza di irrigidimenti longitudinali sul piatto H viene ignorata in quanto su di essi non si può fare affidamento per assicurare stabilità in quanto il carico sulla gamba si avvicina allo stato limite ultimo e sono completamente sollecitati dai carichi longitudinali); e
- Una fila di elementi di rigidità a flessione estremamente bassa lungo l'anima dell'irrigidimento trasversale all'interfaccia con il piatto esterno; richiesta per rispettare le prescrizioni di EN 1993-1-5 Paragrafo 9.2.1(9) "non considerando un vincolo rotazionale del piatto".

Il modello è stato caricato con il carico di secondo ordine calcolato in conformità alla norma EN 1993-1-5 Paragrafo 9.2.1, applicato lateralmente alla faccia esterna del piatto esterno alla quota dell'irrigidimento trasversale. L'analisi parametrica è stata completata per valutare l'effetto dell'area del piatto D sulla dimensione richiesta della flangia dell'irrigidimento e la dimensione del cordone di saldatura.

L'analisi agli elementi finiti ha dimostrato che saldature a cordone d'angolo a doppia faccia di 5 mm che uniscono l'anima dell'irrigidimento trasversale al piatto esterno permettono la rimozione delle connessioni del piatto a linguetta per tutte le aree pannellate a condizione che i pannelli siano diritti

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011	

(cioè non ci sia cambiamento d'angolo lungo la lunghezza del pannello) e sono soggette unicamente alle forze di vincolo prese in considerazione (ad es. nessun carico fuori piano applicato esternamente). Le richieste di resistenza allo sforzo di taglio e diretto dell'anima dell'irrigidimento trasversale sono mostrate per carichi fuori piano di un piatto D di 85 mm di spessore alla Figura 7-30 e

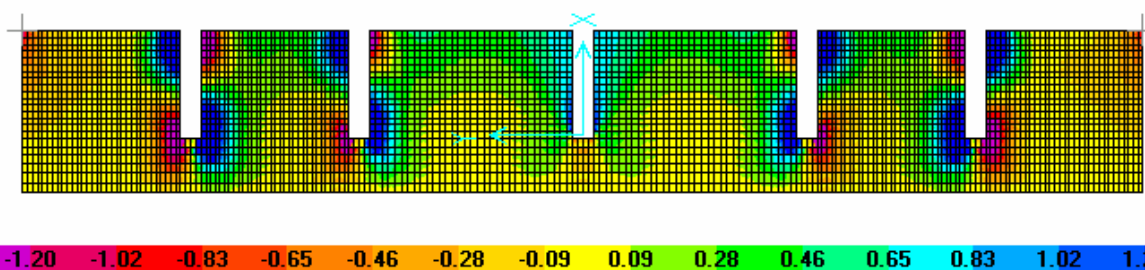


Figura 7-31 rispettivamente. Tale spessore è maggiore di qualsiasi spessore effettivo utilizzato per i piatti D di una qualsiasi delle torri e perciò comporta una stima conservativa delle richieste di resistenza massime della saldatura. Le richieste di resistenza allo sforzo sono indicate in kN/mm. Le figure mostrano una vista in pianta dell'anima dell'irrigidimento trasversale con intaglio per il passaggio degli irrigidimenti longitudinali.

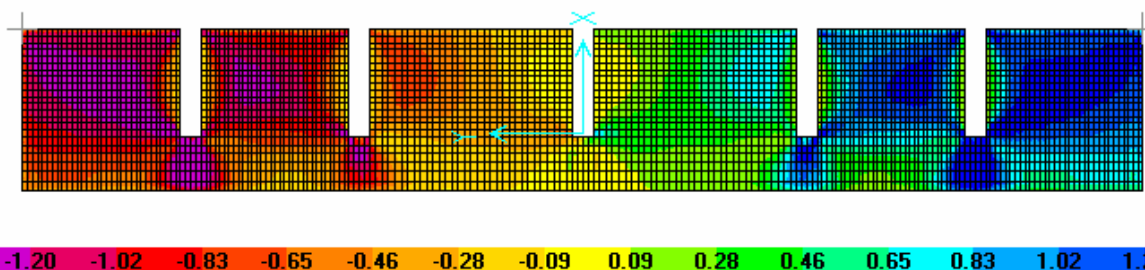


Figura 7-30: Contorni dello sforzo di taglio dell'anima dell'irrigidimento trasversale.

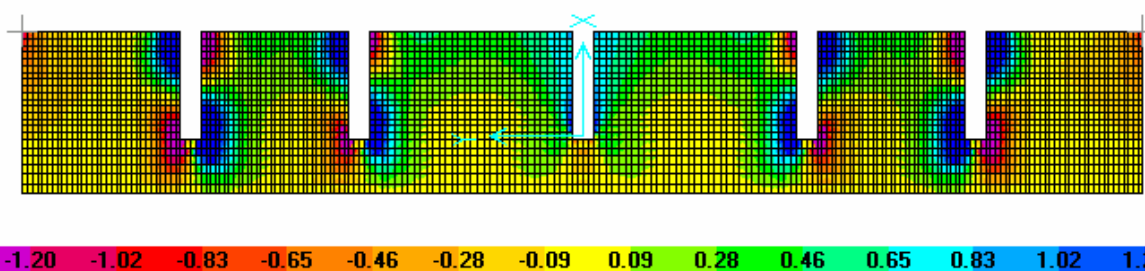
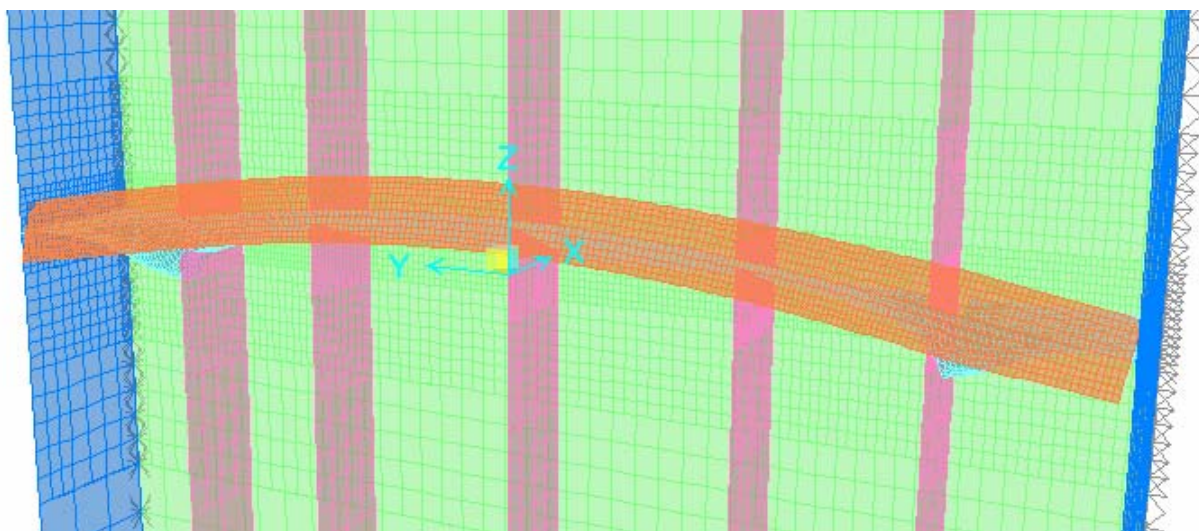


Figura 7-31: Contorni dello sforzo diretto dell'anima dell'irrigidimento trasversale.

L'analisi agli elementi finiti è stata anche utilizzata per definire la sollecitazione all'instabilità elastica critica dell'irrigidimento trasversale. L'analisi agli elementi finiti dà conto della variazione

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

della sollecitazione di flessione lungo l'irrigidimento garantendo una maggiore economia rispetto a quanto possa essere convenientemente possibile con calcoli manuali. L'analisi ha mostrato che la dimensione della flangia dell'irrigidimento trasversale di 360x20 potrebbe essere adottata per la maggior parte dei conci della gamba della torre, mentre una flangia di 420x25 potrebbe essere utilizzata per i conci della gamba della torre 1, 8 e 9. Il primo modo di instabilità per un irrigidimento trasversale con una flangia di 420x25 è mostrato alla Figura 7-32. Il carico fuori piano (perpendicolare al piatto D) sull'irrigidimento trasversale è quello causato da un piatto D di 85 mm di spessore con irrigidimenti longitudinali di 700x70 mm che, come descritto in precedenza, comporta una stima conservativa delle richieste di resistenza dell'irrigidimento.



*Figura 7-32: Forma instabile dell'irrigidimento trasversale con flangia 420x25.*

L'altezza dell'anima dell'irrigidimento trasversale del piatto D è stata scelta per soddisfare le prescrizioni di EN 1993-1-5 Paragrafo 9.2.4 (4) e assicurare la resistenza al taglio richiesta. L'anima di 16 mm di spessore è idonea per tutte le aree dei piatti D.

L'irrigidimento trasversale del piatto G è stato dimensionato inizialmente utilizzando le prescrizioni dell'Eurocodice in conformità a quanto descritto nel documento CG.10.00-P-RG-D-P-SV-T4-00-00-00-00-01 "Principi Generali di Progettazione." A causa della ridotta misura dell'irrigidimento e gli spessori relativamente piccoli del piatto G, il dimensionamento ha indicato che spessori del piatto da 8 mm a 10 mm sarebbero idonei per le anime e le flange. Tali piccoli spessori non sono considerati corretti per un componente strutturale su una struttura di queste dimensioni e così lo

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

spessore dell'anima è stata aumentato a 16 mm e lo spessore della flangia è stato aumentato a 20 mm per migliorare la robustezza e la rigidità quantificabili della sezione trasversale.

I diaframmi del piatto triangolare sono stati dimensionati utilizzando la norma EN 1993-1-5 Paragrafo 10 e Allegato B.1. Un'analisi agli elementi finiti di dettaglio è stata completata per definire l'instabilità elastica e i coefficienti ultimi. Il modello dell'analisi agli elementi finiti ha incluso:

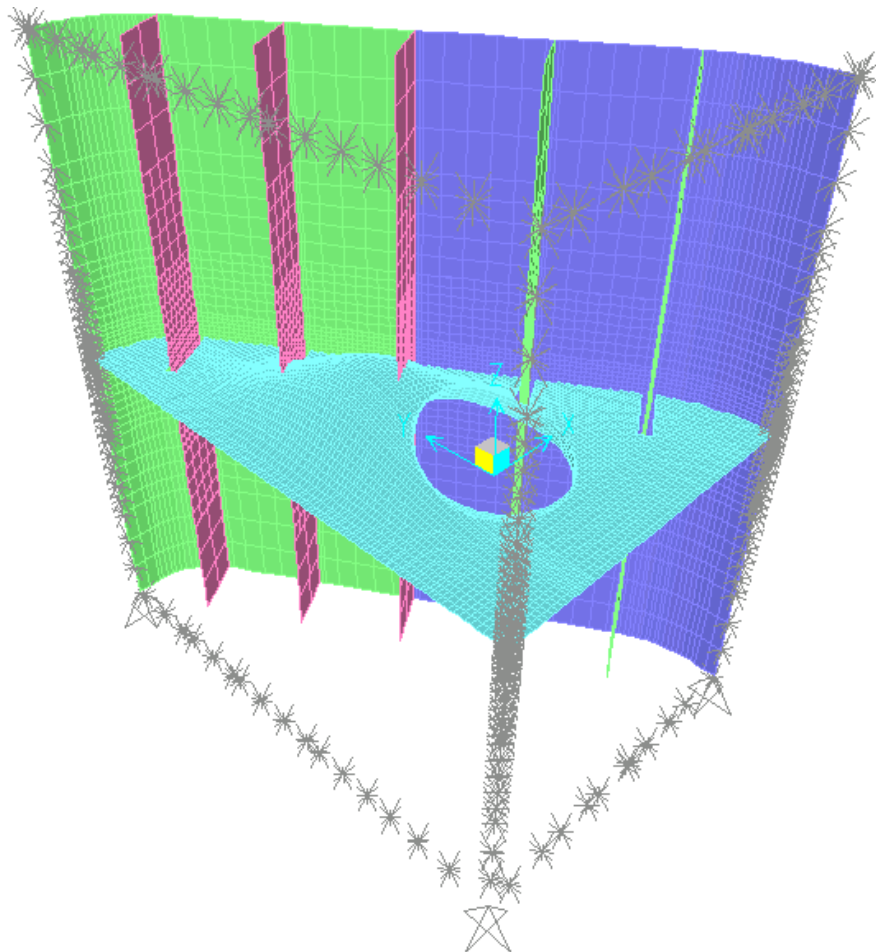
- Un diaframma piatto con intagli per permettere il passaggio degli irrigidimenti longitudinali e un'apertura circolare;
- Il piatto esterno che si estende per 3,5 metri al di sopra e al di sotto del diaframma;
- Irrigidimenti longitudinali che si estendono per 3,5 metri al di sopra e al di sotto; e
- I piatti confinanti B, C, E, F e H che si estendono per 3,5 metri al di sopra e al di sotto.

Il carico sia per l'analisi dell'instabilità che per l'analisi elementare è stato il carico in piano di secondo ordine calcolato in base alla EN 1993-1-5 Paragrafo 9.2.1, ma presupponendo nessun aumento dell'imperfezione a causa della rigidità diaframma.

Il modo di instabilità critica per il diaframma a piatto è mostrato alla Figura 7-33 (piatti E, F e H non sono mostrati per chiarezza). Il modo di instabilità critica è causato dai piatti B, C, E, F e H che sono tutti instabili verso il diaframma.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



*Figura 7-33: Modo di instabilità critica del diaframma a piatto triangolare.*

Il calcolo precedente fornisce un coefficiente di utilizzo di 0,97 per uno spessore del piatto di 20 mm considerando il carico in piano più pesante che possa essere applicato. Gli effetti di carichi verticali potenziali sul diaframma presi in considerazione aggiungendo l'irrigidimento circolare attorno all'apertura e l'irrigidimento trasversale di 160x16 sotto il diaframma.

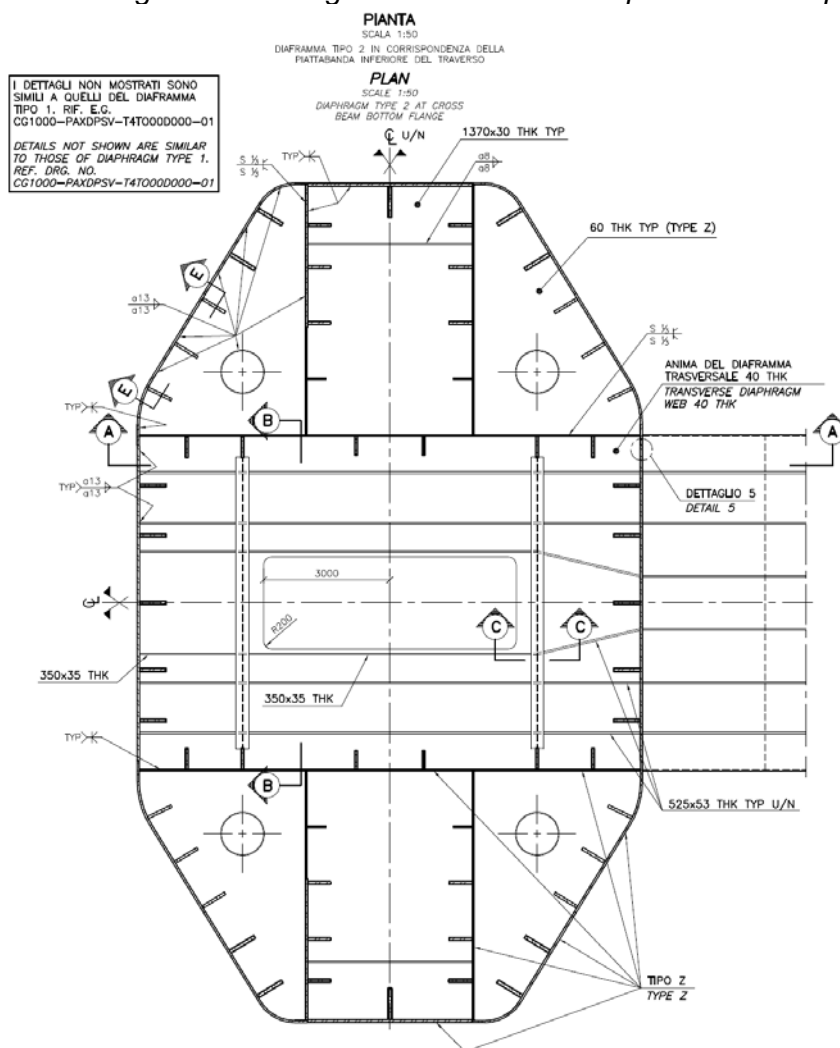
Descrizioni di maggiore dettaglio della modellizzazione e dell'analisi si trovano in CG.10.00-P-RG-D-P-SV-T4-00-00-00-01 "Principi Generali di Progettazione" e CG.10.00-P-CL-D-P-SV-T4-00-00-00-01 "Relazione di Progetto – Gambe della Torre comprendenti giunti e giunzioni".

### **CONNESSIONI TRA TRASVERSO E GAMBA DELLA TORRE – DIAFRAMMI DI TIPO 2 E 3**

*I diaframmi di tipo 2 sono posti alle quote ove le flange superiore e inferiore del trasverso 1 e 2 e*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

solo la flangia inferiore del trasverso 3 incontrano la gamba della torre. I diaframmi di tipo 2 distribuiscono le forze della flangia del trasverso attraverso la sezione trasversale della gamba della torre e all'interno dei piatti longitudinali della gamba della torre e gli irrigidimenti. I diaframmi di tipo 3 sono posti sulla sommità della torre ove la flangia del trasverso 3 incontra la gamba della torre e, oltre a distribuire la forza della flangia superiore alla gamba della torre, deve anche resistere alle spinte verso l'esterno che vengono applicate al diaframma dai piatti inclinati della sella del cavo principale. I diaframmi di tipo 2 consistono di un piatto di 40 mm di spessore nella cella centrale della gamba della torre con un intaglio di 6 m x 2,2 m per la scala d'accesso e piatti di 60 mm di spessore nelle celle triangolari con intagli di 1 m di diametro per le scale a pioli di

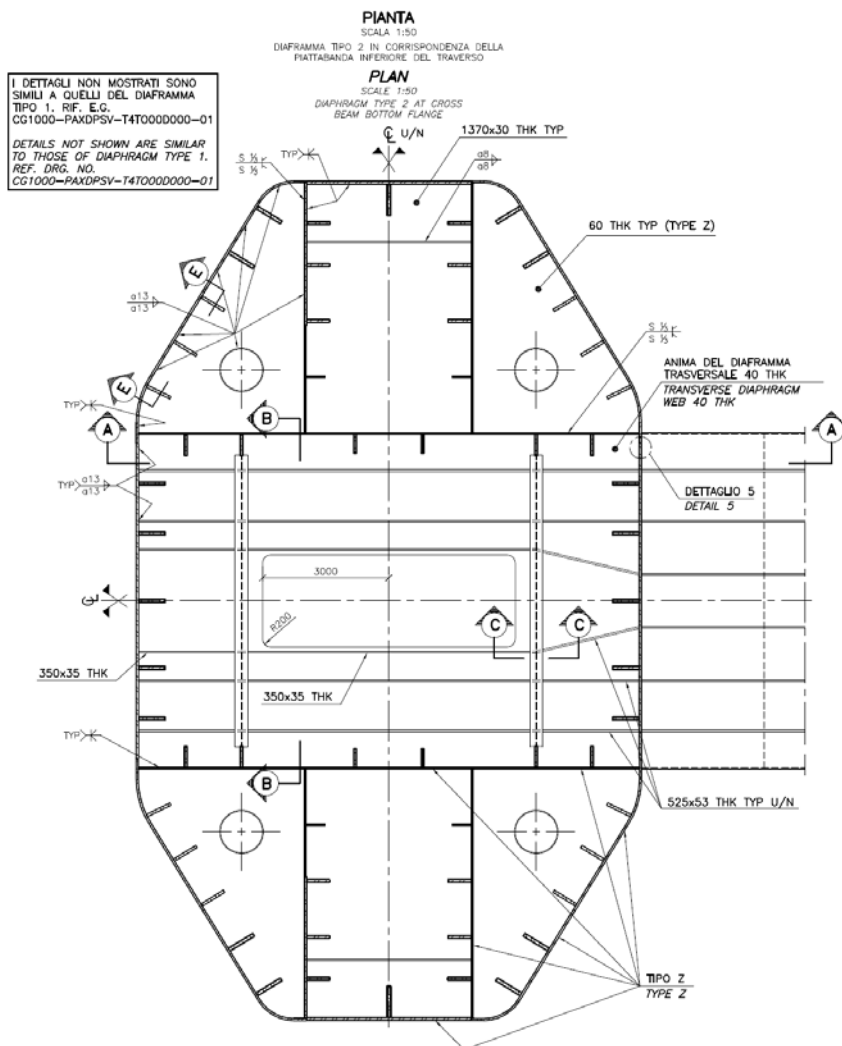


accesso come mostrato alla

Figura 7-34. Il piatto di diaframma nella cella centrale è irrigidito in parallelo e trasversalmente all'asse del ponte. I piatti di diaframma nelle celle triangolari non sono irrigiditi. I diaframmi del tipo

3 consistono di un piatto di 70 mm di spessore nella cella centrale con piccoli intagli di 0,6 m x 0,8 m per l'accesso alla sella del cavo e sottili piatti di 20 mm di spessore nelle celle triangolari come mostrato alla Figura 7-35. Il piatto di diaframma nella cella centrale è irrigidito similmente al diaframma di tipo 2. I piatti di diaframma di tipo 3 nelle celle triangolari formano anche la superficie esterna della gamba della torre poiché i piatti esterni B e C non fanno parte della sella del cavo principale. Come tali questi piatti sono inclinati al 5% per permettere il drenaggio.

Il dimensionamento dei diaframmi di tipo 2 e 3 e degli irrigidimenti aggiuntivi richiesti per le gambe della torre alle connessioni del trasverso è descritto in questa sezione.





		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Figura 7-34: Vista in pianta del diaframma di tipo 2.

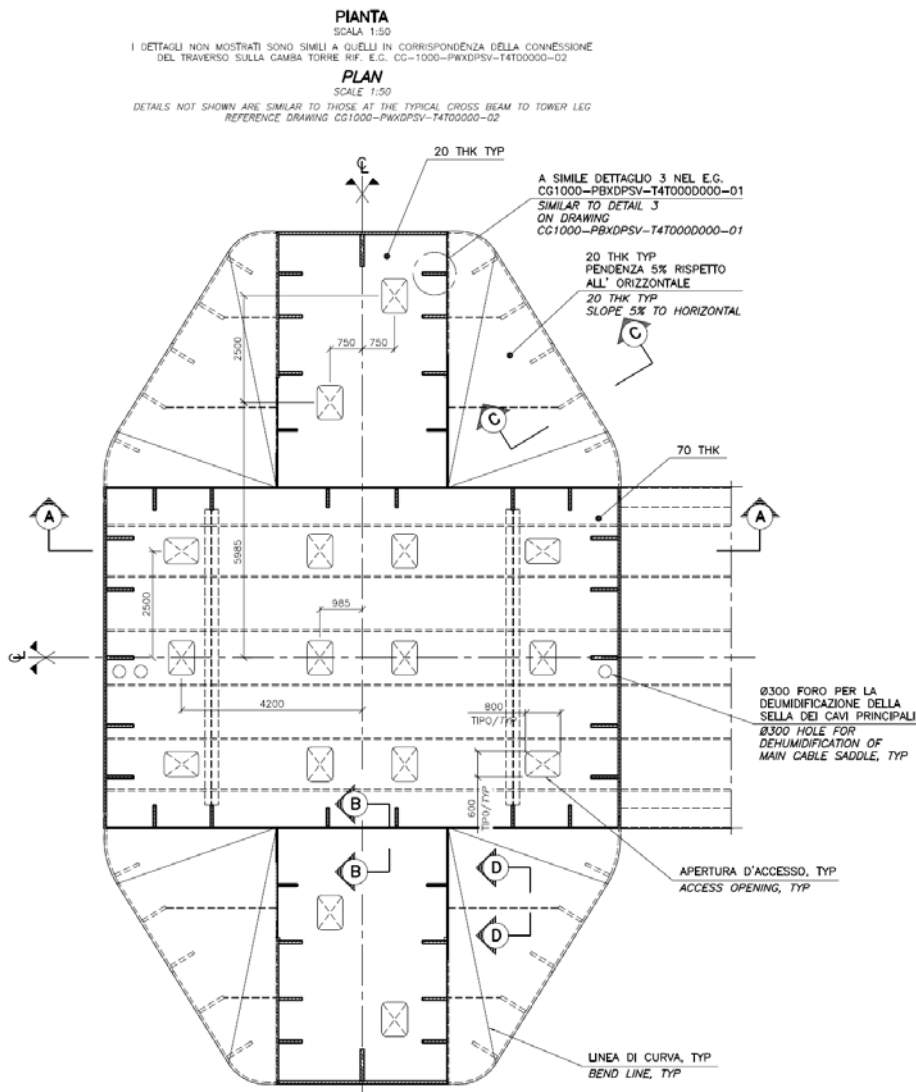


Figura 7-35: Vista in pianta del diaframma di tipo 3.

Le forze dovute alla flessione nelle flange superiore e inferiore del trasverso confluiscono direttamente nei diaframmi di tipo 2 all'estradosso e intradosso del trasverso. Le forze dovute alla flessione nelle anime del trasverso confluiscono direttamente nelle anime trasversali, i piatti H (interni), G e H (esterni). L'equilibrio trasversale nelle gambe della torre è mantenuto dai tagli, in primo luogo da un grosso taglio tra le flange superiore e inferiore del trasverso, ma anche tagli minori sopra e sotto il trasverso. Il taglio grande all'interno dell'altezza del trasverso è condiviso dai

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

due sistemi di piatti, le anime trasversali direttamente in linea con le anime del trasverso e i piatti esterni A, B e C su entrambi i lati del trasverso. La forza di taglio nei piatti A, B e C è trasmessa per la maggior parte dai diaframmi di tipo 2, ma alcune forze sono trasferite dai diaframmi/irrigidimenti trasversali sopra e sotto il trasverso.

Le anime trasversali della gamba della torre resistono a:

- 1 Le forze longitudinali nelle gambe;
- 2 Il taglio dai momenti di estremità del trasverso; e
- 3 Le forze trasversali dalle sollecitazioni di flessione nelle anime del trasverso.

La combinazione di forze dirette e tagli fornisce una sollecitazione molto alta e richiede di resistenza all'instabilità. Perciò gli irrigidimenti dell'anima del trasverso vengono prolungati all'interno delle gambe lungo il piatto H. Nel terzo centrale ed esterno delle anime trasversali della gamba della torre, i piatti G e H (esterni), le sollecitazioni trasversali sono ridotte e pertanto gli irrigidimenti vengono interrotti per economizzare al massimo la costruzione. Essi si interrompono dopo il piatto di attraversamento F così da avere un idoneo vincolo laterale alle loro estremità. Nel terzo centrale e esterno dei piatti trasversali, gli irrigidimenti longitudinali da soli forniscono stabilità per la combinazione di forze dirette e tagli.

Le connessioni del trasverso sono dimensionate ricorrendo a una combinazione sia di metodi classici ai sensi delle norme EN 1993-1-1 e EN 1993-1-5 e ai risultati del modello dell'elemento shell semilocale che è stato incorporato nel modello globale IBDAS (vedi CG.10.00-P-RG-D-P-SV-00-00-00-00-03 "Modello semilocale IBDAS, Torri"). I risultati del modello hanno riguardato sollecitazioni dirette, sforzi di tagli e sollecitazioni di von Mises. I calcoli sono stati completati per la connessione che presentava il carico maggiore che si trova sul trasverso 2. Il progetto della connessione del trasverso 2 è stato utilizzato per dimensionare le altre connessioni del trasverso con idonee modifiche per ogni ubicazione del trasverso.

#### Verifiche di progetto del Piatto H (interno)

Il piatto H è irrigidito longitudinalmente dai principali irrigidimenti della gamba della torre e trasversalmente dalla continuazione degli irrigidimenti dell'anima del trasverso. Il piatto è più spesso di quanto sarebbe richiesto in base alle sole forze longitudinali per via delle maggiori sollecitazioni trasversali e di taglio coesistenti. Il piatto viene verificato sia carico per snervamento

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

(utilizzando il criterio di von Mises in accordo a EN 1993-1-1 Paragrafo 6.2.1) per il taglio coesistente, compressione longitudinale e tensione trasversale e per instabilità (secondo EN 1993-1-5 Paragrafo 10) per taglio coesistente e sollecitazioni dirette.

#### Verifiche di progetto del piatto G

Il piatto G è irrigidito solo longitudinalmente (verticalmente), quindi la resistenza all'instabilità del piatto tra gli irrigidimenti è verificata per curvature in una direzione (similmente all'instabilità del montante) sulla base di EN 1993-1-5 Paragrafo 4.4 e per curvatura in due direzioni (imbutitura alternata) sulla base di EN 1993-1-5 Paragrafo 10. La stabilità dell'irrigidimento longitudinale è verificata sulla base di EN 1993-1-5 Paragrafo 9.2.1 spiegando (i) l'azione in qualità di "irrigidimenti trasversali" per sollecitazioni dirette orizzontali nel piatto G (derivanti dalle sollecitazioni di flessione dell'anima del trasverso) e (ii) la compressione verticale delle forze verticali della gamba della torre. In calcolo delle sollecitazioni presenti in questi irrigidimenti, l'imperfezione iniziale applicata alla compressione assiale è stata assunta pari a  $b/300$  (più oneroso della prescrizione di EN 1993-1-5 Paragrafo 9.2.1 di  $s/300$ ) poiché il carico è dominato dalla compressione assiale e l'equazione di stabilità dipende dalla rigidezza elastica.

#### Verifiche di progetto del piatto H (esterno)

Le sollecitazioni trasversali nel piatto H sul lato della gamba della torre opposto al trasverso sono decisamente inferiori rispetto al piatto G. Le verifiche del piatto esterno H sono simili alle verifiche del piatto G, eccetto per l'iniziale imperfezione applicata alla compressione assiale che è stata assunta quale valore medio di  $b/300$  e l'imperfezione corrispondente alla resistenza all'instabilità di EN 1993-1-5 Paragrafo 4.5.4 basata sul primo limite di snervamento (che è sempre più oneroso del requisito di EN 1993-1-5 Paragrafo 9.2.1 di  $s/300$ ). Ciò è stato fatto a riconoscimento che le sollecitazioni trasversali sono inferiori nel piatto esterno H e che man mano le sollecitazioni trasversali si avvicinano allo zero la resistenza dovrebbe essere in accordo a EN 1993-1-5 Paragrafo 4.5.4.

#### Verifiche del diaframma di tipo 2

I diaframmi di tipo 2 consistono di tre zone, due zone della trave a sbalzo nelle celle triangolari all'esterno delle anime trasversali interne e la zona centrale nella cella tra le anime trasversali. Il diaframma resiste al taglio in piano e alla flessione in piano, essendo sia la flessione totale derivante dai tagli nei piatti C/B/A/B/C e la flessione locale derivante dai tagli nei piatti C/B/A/B/C

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

sostenuta dall'azione della Vierendeel attraverso l'apertura dell'ascensore. In genere il piatto esterno della gamba della torre favorisce la resistenza a questi momenti flettenti, eliminando le sollecitazioni di flessione che altrimenti verrebbero generate nel piatto di diaframma. In ogni caso, nelle parti curve del piatto C vicino ai piatti D e H, la rigidità effettiva del piatto esterno viene ridotta dalla curvatura, pertanto vi sono alte sollecitazioni di flessione sulla stessa sezione come il taglio massimo. Lo spessore del piatto di diaframma nelle celle triangolari è stabilito dalle sollecitazioni presenti in questa sezione.

Il piatto di diaframma della cella centrale è verificato per resistenza alla forza derivante dalla flangia del trasverso. La resistenza dà conto di una ridotta efficacia dovuta alla diffusione del taglio attraverso lo spessore della cella di 8 m. Gli irrigidimenti longitudinali della flangia del trasverso vengono prolungati sul piatto del diaframma centrale in modo che le forze assiali della flangia possano diffondersi attraverso il piatto verso i piatti della gamba della torre verticale. Due irrigidimenti "trasversali" a T paralleli all'asse del ponte si estendono tra l'anima trasversale per stabilizzare il piatto di diaframma e permettere un inquadramento delle forze dirette orizzontali attraverso l'apertura delle scale.

### Verifiche del diaframma di tipo 3

I diaframmi di tipo 3 vengono verificati utilizzando metodi simili a quanto descritto per i diaframmi di tipo 2; in ogni caso, ulteriore attenzione viene posta alle spinte trasversali applicate dai piatti inclinati della sella del cavo principale che si aggiungono alla tensione derivante dalla flangia superiore del trasverso. Ciò comporta un piatto della cella centrale più spesso del diaframma di tipo 2. L'ascensore e le scale a pioli non raggiungono questo livello e quindi viene aggiunto un piatto di diaframma aggiuntivo nella cella delimitata dai piatti A, E, F e G e non si ha nessuna apertura nei piatti di diaframma della cella triangolare. Ciò elimina i momenti locali causati dall'azione della Vierendeel attorno alle aperture maggiori e consente di avere piatti più sottili rispetto a quanto richiesto per il diaframma di tipo 2.

### **DIAFRAMMI DI TIPO 4**

I diaframmi di tipo 4 sono previsti alle quote degli smorzatori a massa risonante e soddisfano il doppio scopo di assicurare un elemento di irrigidimento trasversale per i piatti della gamba della torre e un sostegno per gli smorzatori a massa risonante. I diaframmi di tipo 4 sono simili al diaframma di tipo 1, eccezione fatta per l'irrigidimento trasversale del piatto D che messo in

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

profondità per sostenere lo smorzatore a massa risonante come mostrato alla Figura 7-36. L'irrigidimento trasversale del piatto D messo in profondità consiste anche di due travi a T tra I piatti H che trasferiscono allo smorzatore a massa risonante il peso e i carichi orizzontali generati una volta attivo all'interno della struttura della torre.

### SMORZATORI A MASSA RISONANTE

Otto smorzatori a massa risonante sono previsti in ognuna delle gambe delle torri, centrali circa alla quota del trasverso 2. Ogni unità di smorzamento ha una massa di 35 tonnellate, una frequenza di 0,466 Hz e 11% smorzamento modale. Gli smorzatori a massa risonante consistono di una massa in acciaio sospesa dal telaio di sostegno in acciaio da quattro pendoli. La massa in acciaio è anche collegata al telaio di sostegno da due molle diagonali e due smorzatori orizzontali come

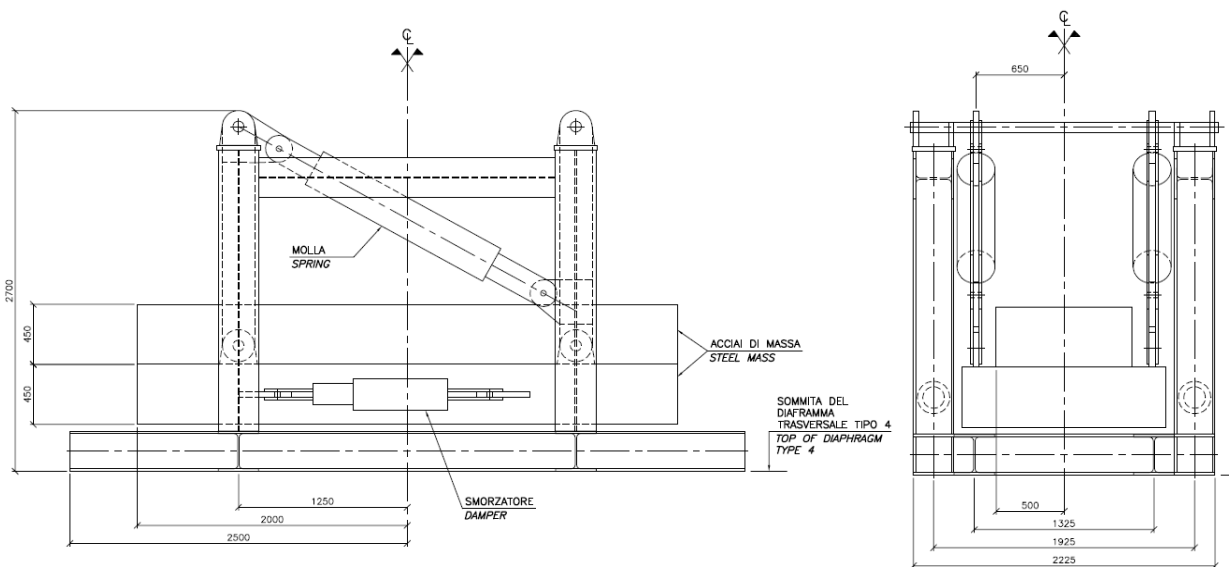


Figura 7-37.

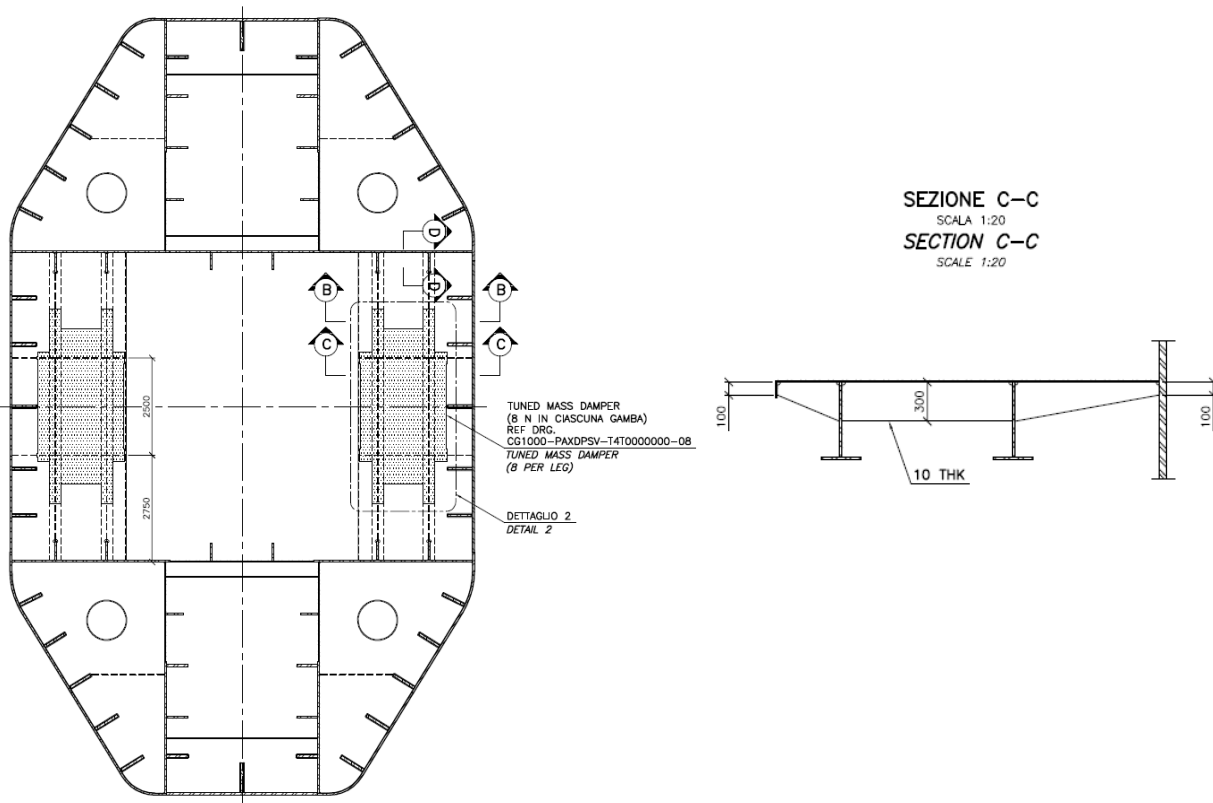
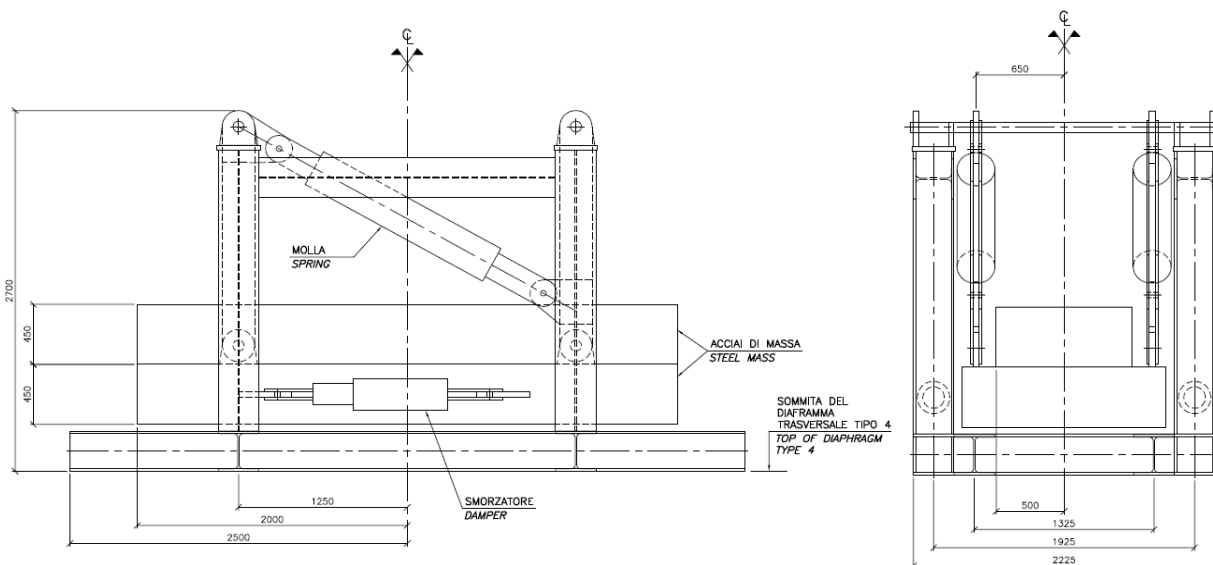


Figura 7-36: Vista in pianta del diaframma di tipo 4 e sezione attraverso l'irrigidimento trasversale del piatto D.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

*Figura 7-37: Quota e viste d'estremità dello smorzatore a massa risonante.*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

### CONNESSIONI DELL'AMMORTIZZATORE DELL'IMPALCATO

L'impalcato sospeso è delimitato da vincoli sia longitudinalmente che trasversalmente da ammortizzatori idraulici su entrambe le torri. Quattro ammortizzatori longitudinali sono incernierati a entrambe le gambe della torre e due ammortizzatori trasversali sono incernierati unicamente alla gamba della torre di nord-est. Gli ammortizzatori hanno una risposta alla deformazione da carico bilineare e agiscono per controllare le deformazioni e assorbire energia in caso di carico sismico. Le connessioni dell'ammortizzatore alle gambe delle torri consistono di spesse piastre incernierate all'esterno della sezione trasversale della gamba della torre e travi scatolate di trasferimento del carico poste tra le anime longitudinali nel caso degli ammortizzatori longitudinali e tra le anime trasversali per gli ammortizzatori trasversali. La larghezza della trave di trasferimento dell'ammortizzatore longitudinale (perpendicolare al carico) è di 3 m e l'altezza (parallela al carico) che è limitata dall'involuppo di luce richiesto per l'ascensore è 1.500 mm. La trave di trasferimento dell'ammortizzatore trasversale è alta 2.000 mm e larga 1.550 mm. Le viste in pianta e le sezioni trasversali attraverso le connessioni dell'ammortizzatore sono mostrate alla Figura 7-38.



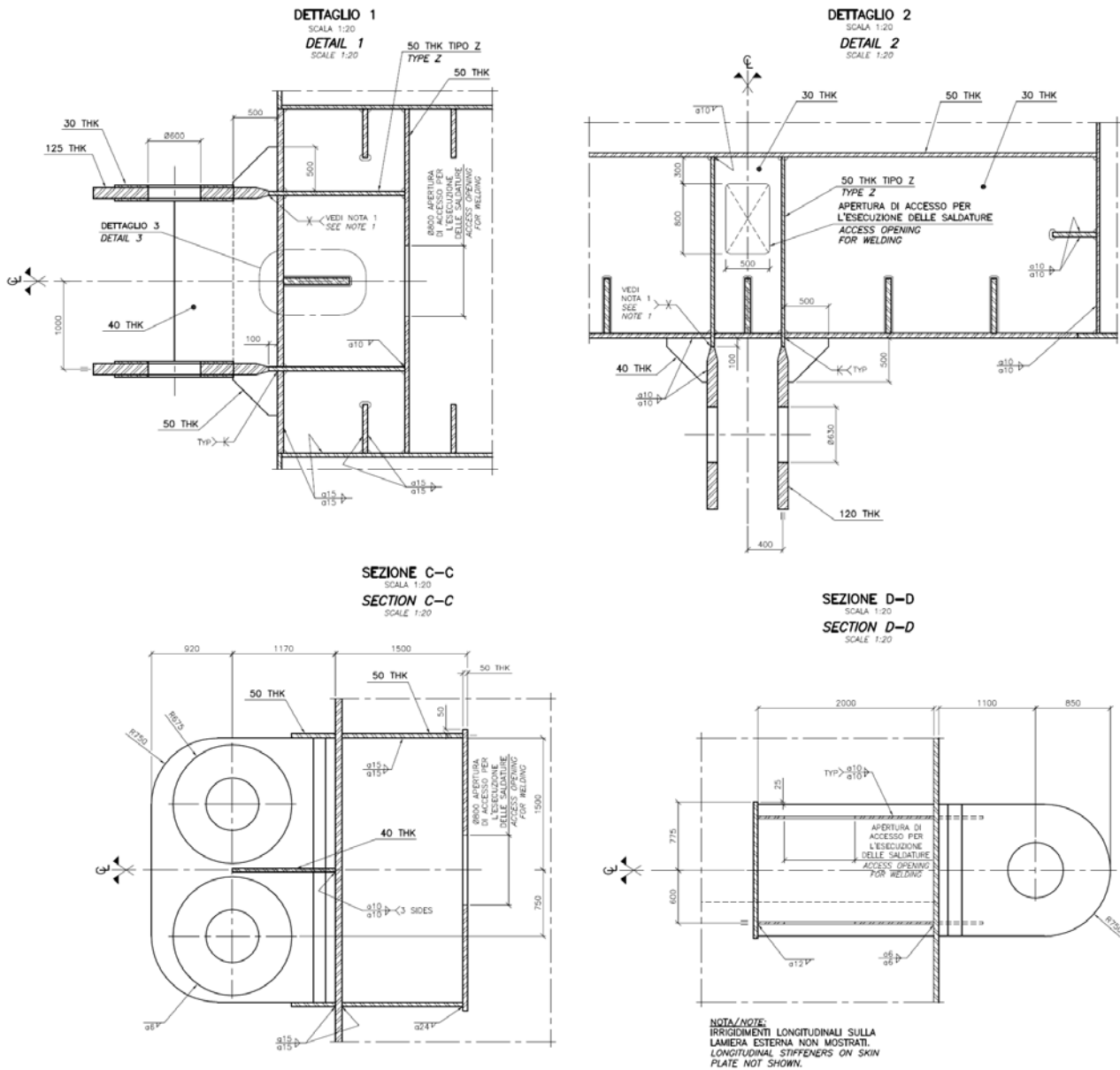


Figura 7-38: Dettagli della connessione dell'ammortizzatore dell'impalcato.

Le connessioni dell'ammortizzatore sono state dimensionate per il carico massimo di 10 MN che secondo il progetto ogni ammortizzatore deve sostenere piuttosto che i carichi risultanti dall'analisi. Questo risulta in carichi di progetto massimi totali di 40 MN e 20 MN sulle connessioni dell'ammortizzatore longitudinale e trasversale rispettivamente. Gli effetti concomitanti dei carichi assiali applicati e dello spostamento dell'impalcato, che causano tagli verticali e orizzontali

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

attraverso la faccia della connessione, sono stati considerati assumendo i carichi assiali massimi che possono essere applicati con un'inclinazione del 5% nel piano verticale o un'inclinazione del 2% nel piano orizzontale relativamente alla faccia della gamba della torre. In una successiva fase progettuale dovrebbero venire presi in considerazione gli effettivi spostamenti dell'impalcato e le forze dell'ammortizzatore concomitanti per meglio definire il progetto.

### 7.3.3.3 Analisi agli elementi finiti di dettaglio del concio della gamba della torre

#### IMPOSTAZIONE

Come indicato al Paragrafo 6.2.4 è stato fatto un modello agli elementi finiti di un concio completo della gamba per confermare la correttezza delle resistenze calcolate ricorrendo alla norma EN 1993-1-5 Paragrafo 4 che è la base delle verifiche del progetto della gamba della torre. Il modello ha considerato gli effetti della geometria non lineare, le caratteristiche dei materiali non lineari, le sollecitazioni residue e le iniziali imperfezioni geometriche, impercettibili, ma importanti fattori nel comportamento della gamba della torre che sono stati considerati solo implicitamente nelle prescrizioni di progetto semplificato di EN 1993-1-5 Paragrafo 4. Il concio 6 della gamba della torre Sicilia è stato modellizzato perché presenta piastre più sottili relativamente al carico assiale imposto rispetto ad altri segmenti e quindi può mostrare maggiore sensibilità agli effetti dell'instabilità. Gli spessori delle piastre modellate e le dimensioni dell'irrigiditore longitudinale, differiscono leggermente da quelli elencati in Tabella 7-2 e Tabella 7-4, rispettivamente, perché l'analisi è stata completata per una iterazione precedente del progetto della gamba della torre. Il modello di analisi differiva dalla configurazione finale della torre come mostrato alla Tabella 7-6. In tutti i casi, i modelli di analisi comprendevano elementi più fragili rispetto a quelli presenti della configurazione finale e dunque la configurazione finale non sarà più sensibile agli effetti di deformazione.

Parametro	Modellazione	Attuale
Piastra A spessore	85 mm	95 mm
Piastra B spessore	70 mm	75 mm
Piastra G irrigiditore longitudinale	450 x 45 mm	475 x 48 mm

Tabella 7-6: Differenza fra modello di analisi e configurazione finale della torre.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

Il modello è alto 18 metri e consiste di sei campate da 3 m di irrigidimenti longitudinali. Entrambi i piatti e gli irrigidimenti longitudinali sono modellizzati con elementi shell. Elementi a barra sono utilizzati per modellare gli irrigidimenti orizzontali e rappresentare il vincolo rappresentato dai diaframmi triangolari. Gli elementi a barra semplificano il modello e sono sufficienti. I momenti e le forze sono applicate alla parte superiore e inferiore del modello attraverso una “ragnatela” di elementi rigidi. Pianta e viste isometriche del modello sono mostrate alla

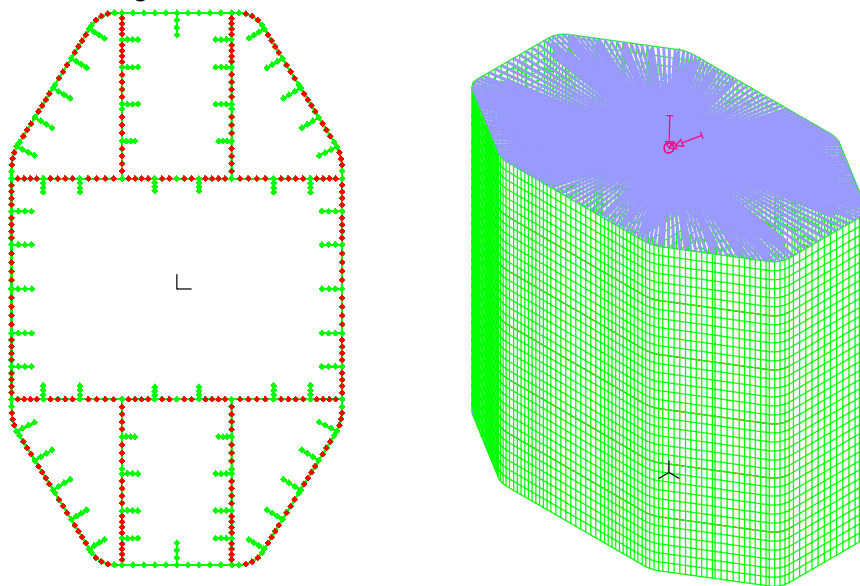
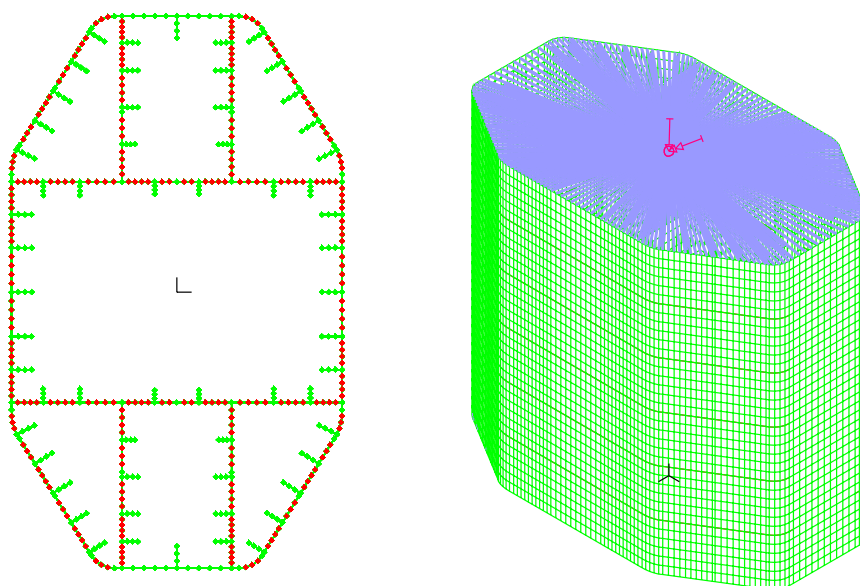


Figura 7-39.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

*Figura 7-39: Pianta e viste isometriche del modello agli elementi finiti del concio della gamba della torre.*

E' stato originariamente programmato per includere gli effetti delle imperfezioni modellizzando i piatti e gli irrigidimenti con le imperfezioni equivalenti specificate nella norma EN 1993-1-5 Allegato C utilizzando la forma geometrica dei modi di instabilità elastica dei pannelli alla base. Con questa impostazione si sono affrontati diversi aspetti:

- La "imperfezione equivalente" 1:400 specificata per gli irrigidimenti longitudinali nella norma EN 1993-1-5 Tabella C.2 non è maggiore della tolleranza di costruzione ammessa dalla norma EN 1090-2 Tabella D.1.6. Ciò significa che se i pannelli della gamba della torre sono stati costruiti secondo le tolleranze consentite, l'analisi avrebbe dovuto essere effettuata senza nessun margine per le sollecitazioni residue e perciò potrebbe risultare non conservativa;
- Le "imperfezioni equivalenti" specificate per un piatto tra irrigidimenti nella Tabella C.2 provocherà una riduzione della resistenza del piatto, laddove la norma EN 1993-1-5 Paragrafo 4 non indica nessuna riduzione della snellezza del piatto per i rapporti di larghezza su spessore utilizzati nella maggioranza dei pannelli delle gambe della torre;
- E' molto difficile trovare la disposizione più onerosa delle "imperfezioni equivalenti" per torsioni dell'irrigidimento in quanto sono possibili moltissime combinazioni diverse; e
- Non c'è nessun singolo modo di instabilità nei pannelli che dia grandezza di deformazione del pannello fuori piano simili a quanto specificato nella norma EN 1993-1-5 Tabella C.2, così è stato necessario un metodo alternativo per generare idonee imperfezioni iniziali.

Si è concluso che la valutazione della resistenza più realistica sarebbe stata ottenuta:

- Utilizzando imperfezioni geometriche fuori piano lungo gli irrigidimenti longitudinali nella forma che si ha quando si applicano carichi lineari uguali lungo ogni irrigidimento e accettando il piatto risultante tra gli irrigidimenti e le imperfezioni di torsione dell'irrigidimento quali valori corretti per tali imperfezioni iniziali; e
- Dare conto delle sollecitazioni residue direttamente (non tramite le imperfezioni equivalenti) utilizzando un idoneo diagramma di sforzo-deformazione.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Quale imperfezione geometrica massima di ogni pannello è stata assunta la tolleranza di costruzione dell'irrigidimento ammissibile pari a 1:400 come specificato nella norma EN 1090-2 Tabella D.1.6. Le sollecitazioni residue sono state incluse modificando il diagramma di sforzo-deformazione da bilineare elastico/plastico a multilineare così da rappresentare la risposta media di sforzo-deformazione dell'acciaio con sollecitazioni residue e includendo una deformazione irreversibile dello 0,2% che è prevista in caso di acciai con una maggiore resistenza quali S460ML.

#### INCERTEZZE

- Poiché in tutte le modellizzazioni e analisi si sono dovute fare presupposizioni per alcuni dati di immissione a causa della mancanza di informazioni disponibili. Queste incertezze possono in qualche influire sui risultati dell'analisi specifici; in ogni caso è improbabile che modifichino le conclusioni generali del lavoro. Non sono note le sollecitazioni residue derivanti dalla costruzione di piatti di Classe S460ML utilizzati nella torre e il modello della sollecitazione residua utilizzato parte dal un acciaio di maggiore resistenza. La sollecitazione compressiva residua massima ammontava al 26% dello snervamento. A causa dell'incertezza del modello di sollecitazione residua idoneo per i piatti di Classe S460ML, non sono state incluse le sollecitazioni aggiuntive derivanti dalla saldatura e dal taglio. Nel corso dell'analisi dei risultati, si è osservato che le imperfezioni derivanti da EN 1993-1-1 Paragrafo 5.3.2(11) utilizzate nella progettazione sono maggiori di quelle derivate dai risultati dell'analisi. Ciò suggerisce che l'Eurocodice si attende maggiori sollecitazioni residue e può indicare che le sollecitazioni residue utilizzate in questa analisi sono troppo basse. Sollecitazioni residue più alte ridurrebbero la resistenza della sezione trasversale. Si raccomanda che i modelli di sollecitazione residua effettivi in piatti S460ML da utilizzare per la torre siano esaminati prima della successiva fase di progettazione in modo che l'analisi prenda in considerazione gli effetti con maggiore precisazione.
- Non sono stati modellizzate imperfezioni di torsione realistiche negli irrigidimenti longitudinali. In ogni caso per i rapporti larghezza/spessore degli irrigidimenti e gli spessori del piatto ai quali sono saldati è improbabile che gli angoli di torsione realistici possano influire la resistenza.

#### RISULTATI

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Il risultato più sensazionale dell'analisi è la riduzione della rigidezza della sezione e, in particolare, della rigidezza alla rotazione man mano che aumenta il carico. Poiché la gamba è un elemento alto soggetto a compressione, la rigidezza dell'elemento ha un'influenza significativa sulla resistenza della struttura. Perciò la rigidezza del concio deve essere presa in considerazione assieme alla capacità di ottenere una valutazione affidabile dell'effetto complessivo sulla resistenza della torre.

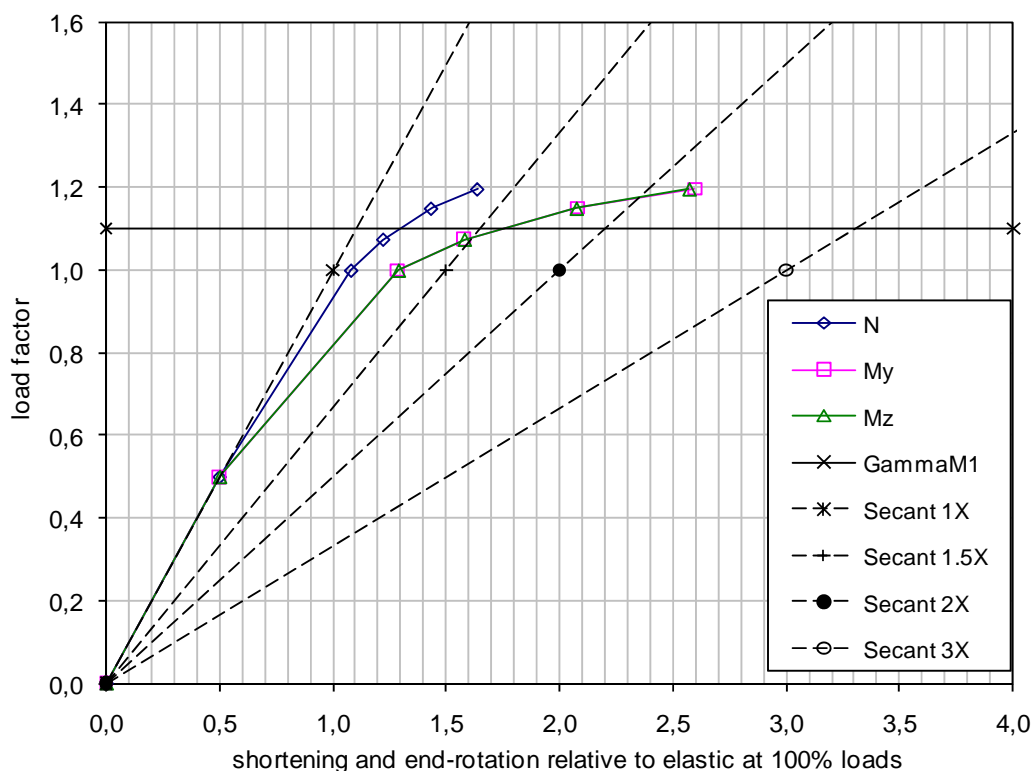
Il coefficiente di utilizzo più alto e la maggiore perdita di rigidezza si hanno con la combinazione lineare minima L002 combinazione di carico sismico. La risposta alla deformazione di carico del modello per la combinazione di carico che governa la progettazione è mostrata alla Figura 7-40 in cui la frazione dei carichi specificati è riportata sull'asse verticale e la frazione della deformazione elastica (riduzione e rotazione) sotto l'azione dei carichi specificati è riportata sull'asse orizzontale. La risposta alla deformazione da carico fino alla rottura per le forze assiali (N), i momenti longitudinali (My) e i momenti trasversali (Mz) è rappresentata rispettivamente dalle linee blu, rosa e verdi. I carichi specificati sulla sommità del concio, quelli che corrispondono ai coefficienti di carico di 1.0, presi in considerazione da questa analisi sono  $N = 2119$  MN compressione,  $M_y = 4382$  MNm e  $M_z = 404$  MNm. La resistenza della sezione dovrebbe essere almeno  $\gamma_{M1}$  (coefficiente parziale considerando l'instabilità) volte la richiesta per soddisfare le prescrizioni dell'Eurocodice per gli elementi di compressione. Ciò è confermato dall'uso di  $\gamma_{M1}$  nella norma EN 1993-1-1 Paragrafi 6.3 e 5.3.2(11) e EN 1993-1-5 Paragrafo 10 che è previsto per essere utilizzato con i risultati dei modelli computerizzati.

La figura 7-40 presenta una linea orizzontale a 1.1 sull'asse verticale (coefficiente di carico) che indica il coefficiente di carico che deve essere raggiunto. C'è una notevole non linearità della risposta a tutti e tre gli effetti della forza, come indicato dall'appiattimento delle curve a un coefficiente di carico di circa 1.0. Mentre una parte di ciò è dovuto a una non linearità geometrica, che è reversibile, il resto è dovuto a plasticità irreversibile che assorbirà un'energia significativa per carichi sismici che avvicinano la resistenza della sezione.

Al coefficiente di carico 1.1, la rigidezza secante alla flessione si è ridotta di un coefficiente di circa 1.5, così da aumentare gli effetti di secondo ordine e quindi innalzare i momenti flettenti al di sopra dei valori di progetto. Alla rottura la rigidezza secante è diminuita di un coefficiente di 2.17 (cioè, la rigidezza secante si ridotta al 46% del valore elastico).

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

La massima resistenza della sezione trasversale raggiunge  $1,197/1.1 = 1,09$  volte la resistenza richiesta sulla base dei valori di progetto delle forze e dei momenti. In ogni caso, a questi carichi la rigidezza secante è crollata tanto che i momenti effettivi risulterebbero maggiori rispetto ai valori di progetto e così l'aumento della resistenza effettiva è inferiore. I momenti totali incrementati erano stati calcolati separandoli in momenti incrementati da una rigidezza secante inferiore (carichi di instabilità) e carichi ridotti da una rigidezza secante inferiore (momenti derivanti dal vincolo della sommità della torre rappresentato dai cavi). Questi momenti sono stati quindi ponderati per permettere il modulo secante ridotto che ha comportato l'incremento più modesto del momento totale.



Coefficiente di carico  
 Riduzione e rotazione terminale per deformazione elastica al 100% dei carichi applicati  
 Gamma  
 Secante

Figura 7-40: Modello riduzione e rotazione terminale per deformazione elastica al 100% dei carichi applicati.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

La resistenza della sezione con questi momenti maggiori è stata calcolata utilizzando la deformazione media sulla mezzeria del piatto A quale criterio di governo della progettazione. La deformazione media è stata calcolata come:

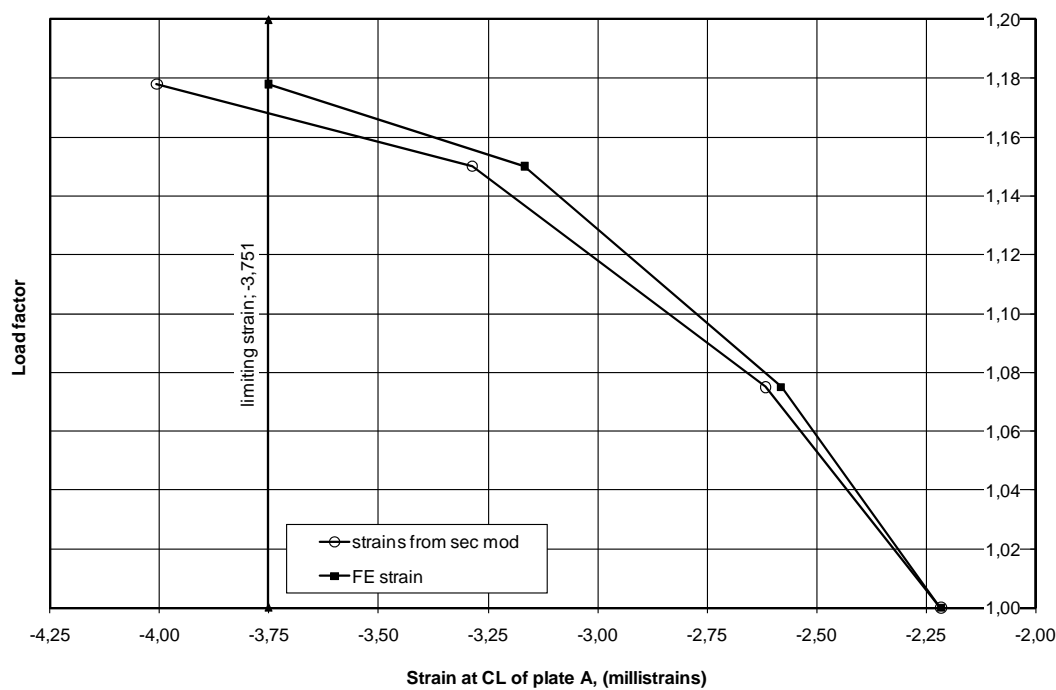
$$\frac{[riduzione + (rotazione terminale \times distanza dal baricentro al piatto A)]}{altezza}$$

Al carico massimo sostenuto dal modello, questa deformazione era  $-3.75 \times 10^{-3}$ . La deformazione derivante dai momenti incrementati (dovuti alla rigidità secante ridotta) è stata calcolata a partire dal rapporto dei momenti incrementati sui momenti applicati al modello per ogni coefficiente di carico. Tali deformazioni innalzate sono mostrate alla Figura 7.41. La deformazione media massima raggiunge il valore limite con un coefficiente di carico di circa 1,17. Perciò la resistenza di progetto massima =  $1,17/1,1 = 1,064$  volte la resistenza richiesta, in base ai valori di progetto delle forze e dei momenti, dando un coefficiente di utilizzo di 0,94.

Facendo riferimento alla norma EN 1993-1-5 Paragrafo 4 le gambe sono state progettate per coefficienti di utilizzo tra 0,98 e 1,0. Assumendo il valore medio di 0,98, il modello prevede una resistenza di  $0,99/0,94 = 1,05$  volte quanto previsto dalla EN 1993-1-5 Paragrafo 4, una resistenza incrementata solo del 5%. Ci si dovrebbe aspettare che questo sia leggermente inferiore nei conci in cui il momento flettente è maggiore (ad esempio alla base o nella regione vicino a quota 250 m) poiché i momenti flettenti in questi punti richiedono una resistenza totale maggiore ed è il momento flettente ad essere incrementato dalla rigidità secante ridotta.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



*Coefficiente di carico*  
Deformazione limitante  
Deformazione a CL del piatto A, (millistrains)  
Deformazioni da sec mod  
Deformazione FE

Figura 7-41: Deformazione mezzeria del piatto quale funzione del fattore di carico.

### EFFETTO DELLE SOLLECITAZIONI RESIDUE

Per valutare la grandezza delle sollecitazioni residue, i tre casi della massima forza assiale con momenti coesistenti e i momenti massimi con forza e momento assiali coesistenti sono stati anche analizzati utilizzando caratteristiche del materiale elastico/plastiche bilineari. Queste analisi sono state eseguite utilizzando un modello basato su una precedente iterazione del progetto della gamba della torre per il quale gli spessori del piatto erano leggermente diversi da quelli indicati nella Tabella 7-2; in ogni caso, le conclusioni delle analisi sono ancora valide. Le differenze tra gli spessori del piatto finali e quelli per cui queste analisi sono state condotte sono indicate nella Tabella 7-. In generale gli spessori del piatto nel modello utilizzato per queste analisi sono più sottili degli spessori del piatto finale. Le analisi hanno mostrato resistenze solo leggermente più grandi di quanto raggiunto considerando le sollecitazioni residue con 2% di maggiore resistenza per la combinazione di carico con il momento longitudinale maggiore e 4% di maggiore resistenza per la combinazione di carico con la massima compressione assiale. In ogni caso, le rotazioni

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

sono state dell'ordine del 50% in meno rispetto alle analisi che hanno utilizzato le sollecitazioni residue indicando così il notevole effetto che le sollecitazioni residue hanno sulla rigidità.

Piatto	A	B	C	D	E	F	G	H
Differenza di spessore (mm)	+5	-15	+5	+20	-10	0	0	-5

Tabella 7-7: Differenza tra gli spessori del piatto modellizzato e gli spessori del piatto finale.

## CONCLUSIONI

Le seguenti conclusioni si basano sui risultati di questa analisi:

- L'analisi agli elementi finite di dettaglio del concio 6 suggerisce una resistenza reale maggiore del 5% rispetto a quella calcolata dalla norma EN 1993-1-5 Paragrafo 4, tuttavia questa potrebbe risultare leggermente più bassa in conci con rapporti più alti del momento rispetto alla forza assiale. Questo in generale conferma che i metodi di progettazione scelti assicurano una struttura sufficientemente sicura ed economica.
- La parte di non linearità dovuta a plasticità assorbirà una parte dell'energia derivante dai carichi sismici che avvicinano la resistenza della sezione.

### 7.3.3.4 Fatica

Gli elementi e i particolari della torre sono verificati per i limiti di sollecitazione risultanti dallo Stato Limite per Fatica. Le sollecitazioni di fatica dirette nelle gambe delle torri sono essenzialmente causate dal carico rappresentato dal traffico ferroviario e stradale. La prova nel tunnel del vento ha mostrato che le oscillazioni indotte dal distacco dei vortici della gamba della torre accadono a velocità del vento di circa 40 m/s e 65 m/s. La fatica della gamba della torre causata dal distacco dei vortici non è un problema in quanto entrambe queste velocità del vento si avranno solo di rado (vedi Paragrafo 7.4.3 per un approfondimento della distribuzione della frequenza per velocità del vento sul fianco del ponte).

Le gambe della torre sono dominate da carichi permanenti combinati con carichi sismici e del vento e i limiti di sollecitazione dovuti a carichi dinamici sono una componente relativamente piccola delle sollecitazioni complessive. Perciò le durate a fatica di dettaglio sono verificate utilizzando un metodo approssimato e semplificato. Il metodo utilizzato è lo stesso che nel concetto era definito valutazione semplificata in 1993-2 Capitolo 9, in ogni caso, una somma di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Miner approssimata è utilizzata al posto dei coefficienti equivalenti di danneggiamento che sono previsti per rappresentare la somma di Miner. I limiti massimi di sollecitazione di fatica della gamba della torre possono essere definiti in modo approssimativo paragonando il carico di progetto al carico di fatica reale.

I carichi ferroviari di progetto prevedono treni di 750 m di lunghezza con un'intensità di carico di 88 kN/m, un peso totale di 66 MN e una massa totale di 6.728 tonnellate. Due treni per binario sono stati considerati con un intervallo minimo di 750 m. Il carico massimo ferroviario sulla torre deriva da questi quattro treni di progetto posti sulla campata principale. Il carico alla fatica si basa su RFI 44F che stabilisce che il traffico ferroviario deve essere assunto come un mix di traffico "standard" secondo quanto definito nella norma EN 1991-2 Tabella D.1 come riportato alla Tabella 7-.

Tenendo conto della lunghezza lineare di influenza della gamba della torre, il campo di sollecitazione dovuto ai carichi ferroviari dipenderà innanzitutto dalla massa totale o dal peso del treno e non risentirà della configurazione assiale del treno di fatica. Si presuppone che tutti i treni di fatica abbiano la massa del treno più pesante, tipo 5. Il treno di tipo 5 ha circa un terzo della massa del treno di progetto. Perciò può essere stabilita una relazione approssimativa tra il carico ferroviario di progetto e il carico di fatica di tipo 5.

Tipo di treno	Treni/giorno per binario	Massa del treno (tonnellate)	Peso del treno (MN)	Volume del Traffico (10 <sup>6</sup> tonnellate/anno)
1	12	663	6.5	2.90
2	12	530	5.2	2.32
3	5	940	9.2	1.72
4	5	510	5.0	0.93
5	7	2,160	21.2	5.52
6	12	1,431	14.0	6.27
7	8	1,035	10.2	3.02
8	6	1,035	10.2	2.27
<b>Totale</b>	<b>67</b>			<b>24.95</b>

Tabella 7-8: Mix di traffico ferroviario standard.

Se la posizione e la lunghezza dei treni erano irrilevanti, il campo di sollecitazione di un treno di progetto sarebbe uguale a un quarto del campo di sollecitazione dai carichi ferroviari di progetto totali. In ogni caso, poiché un treno singolo può essere posto in un luogo più critico sulla linea di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

influenza, si assume in via conservativa che il campo di sollecitazione dovuto a un treno di progetto sia uguale a metà del campo di sollecitazioni derivanti dai carichi ferroviari di progetto totali. Perciò il campo di sollecitazione dovuto a un treno di fatica di tipo 5 può essere definito approssimativamente come segue:

Campo di sollecitazione derivante da un treno di progetto = metà del campo di sollecitazione del carico ferroviario di progetto totale (fino a quattro treni)

Massa di un treno di fatica di tipo 5 = un terzo della massa di un treno di progetto singolo

Il campo di sollecitazione derivante da un treno di fatica di tipo 5 = 1/6 del campo di sollecitazione dei carichi ferroviari di progetto totale

Dal modello IDBAS globale il campo di sollecitazione massimo della gamba della dovuto ai carichi ferroviari di progetto risulta essere di 50 MPa. Sulla base del paragone stabilito in precedenza il campo di sollecitazione di fatica dovuto a un singolo treno di fatica di tipo 5 dovrebbe essere  $50/6 = 8,3$  MPa

Presupponendo che metà di tutti i treni di fatica si hanno in gruppi di due e l'altra metà dei treni si ha in gruppi di quattro, il numero di cicli per entrambi i gruppi di treni è:

Gruppo di quattro treni:

$$\# \text{ di cicli} = \frac{1}{2} * 67 \text{ treni/giorno} * 2 \text{ binari} * \frac{1}{4} * 365 \text{ giorni} * 200 \text{ anni} = 1,24 \times 10^6$$

$$\text{Campo di sollecitazione} = 8,3 \text{ MPa} \times 4 \text{ treni} = 33 \text{ MPa}$$

Gruppo di due treni:

$$\# \text{ di cicli} = \frac{1}{2} * 67 \text{ treni/giorno} * 2 \text{ binari} * \frac{1}{2} * 365 \text{ giorni} * 200 \text{ anni} = 2,41 \times 10^6$$

$$\text{Campo di sollecitazione} = 8,3 \text{ MPa} \times 2 \text{ treni} = 16,6 \text{ MPa}$$

La vita a fatica di un dato campo di sollecitazioni è stabilita dalla curva di resistenza alla fatica, EN 1993-1-9 Figura 7.1. Presupponendo una categoria di dettaglio di fatica molto bassa,  $\Delta\sigma_c$  di 36 MPa, i limiti di resistenza alla fatica per ogni tipo di carico di treno sono calcolati nel seguente modo:

Gruppo di quattro treni:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

$$N_R = 2,644 \times 10^6 \text{ cicli}$$

Gruppo di due treni:

$$N_R = 5.34 \times 10^7 \text{ cicli}$$

Il danneggiamento a fatica totale, calcolato utilizzando la somma di Miner e moltiplicando per  $\gamma_{mf} = 1.35$  è 0,7 che è ben sotto al limite di 1,0. Perciò la fatica non è un criterio di governo della progettazione per le gambe delle torri.

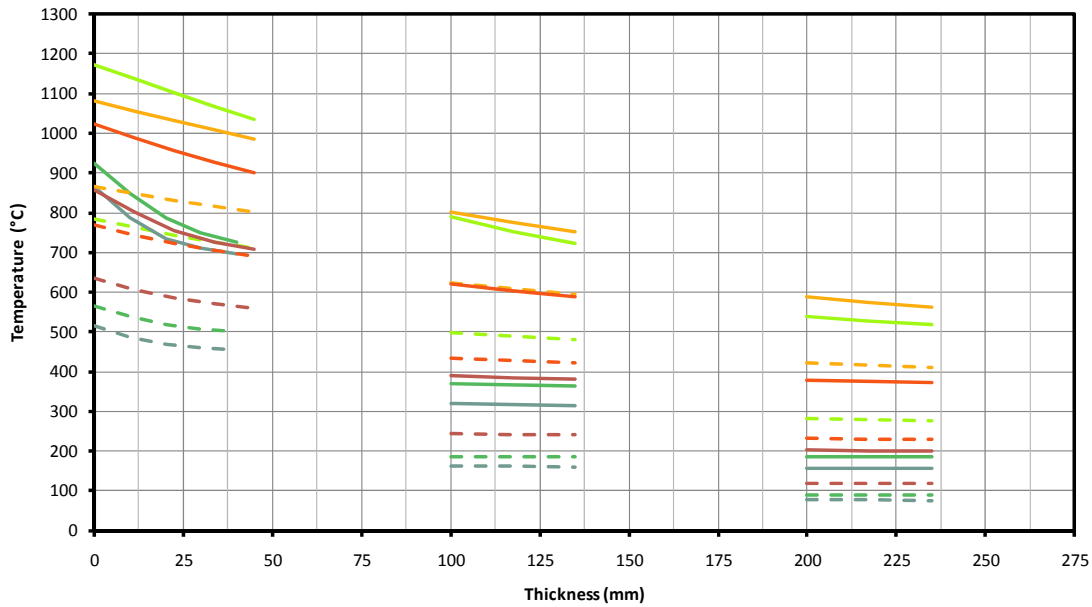
### 7.3.3.5 Scenari di carico accidentale

Come descritto nel documento CG.10.00-P-RG-D-P-SV-T4-00-00-00-01 “Principi Generali di Progettazione,” l’Analisi dei Rischi Operativi ha determinato le probabilità con cui si verificano i tre scenari di carico accidentale specificati nei Principi Base. Sulla base di queste probabilità di accadimento, i carichi d’incendio sono classificati come Scenari di Progetto per i quali la struttura deve essere sufficientemente protetta o progettata per resistervi e i carichi da impatto ed esplosione meno probabili sono classificati come Scenari di Valutazione che richiedono unicamente solo una valutazione delle probabili conseguenze.

### SCENARI DI PROGETTO - INCENDIO

I carichi d’incendio per i piatti B, C e D della gamba della torre, vicini alla strada, sono specificati come temperature massime dell’acciaio alle Figure 7-42, 7-43 e 7-44 rispettivamente. In ogni figura la temperature dell’acciaio è rappresentata sull’asse verticale e la distanza dalla superficie del piatto esposta è data sull’asse orizzontale. La temperatura dell’acciaio quale funzione dello spessore è rappresentata per gli scenari con getto di gas, radiazione e incendio da pozza considerando durate degli eventi tra 500 e 4.000 secondi. Gli intervalli dei grafici delle temperature dell’acciaio rappresentano il gioco tra i pannelli della gamba della torre e come tali le misure dello spessore sono valide sono all’interno di una linea continua. Per esempio alla Figura 7-44 per il piatto D, due segmenti di linea continua sono forniti per ogni scenario d’incendio; Il primo segmento di linea tra 0 mm e 40 mm rappresenta la variazione di temperatura attraverso lo spessore del piatto che è immediatamente adiacente alla strada; il secondo segmento di linea tra 100 mm e 140 mm rappresenta, di fatto, la variazione di temperatura attraverso lo spessore del piatto D sul lato opposto della gamba della torre e così 100 mm rappresentano la superficie più

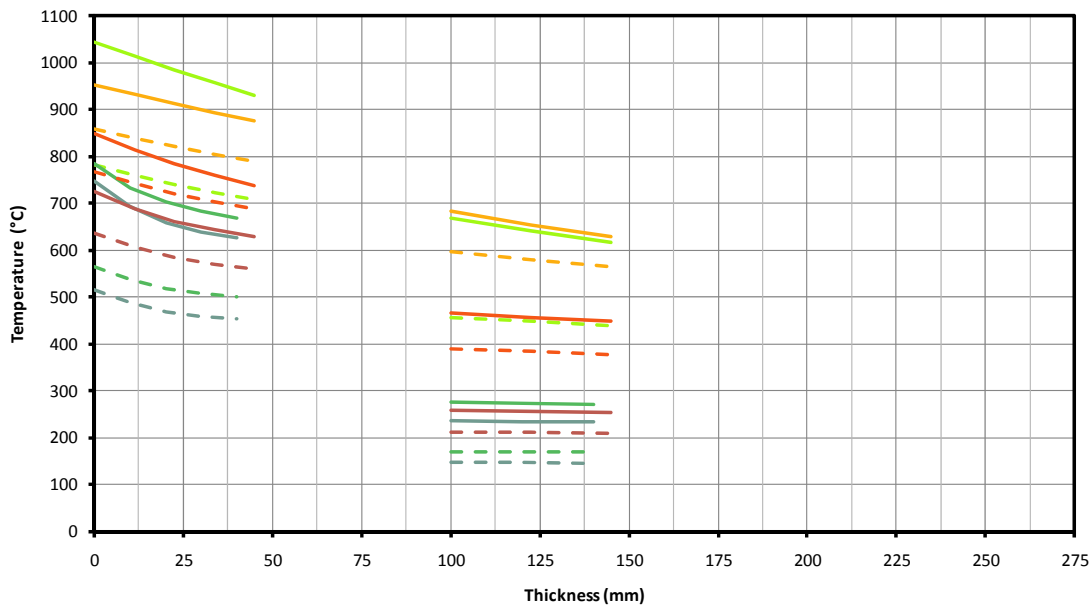




— Gas Jet, 2400 s    - - - Radiation, 2400 s    — Gas Jet, 600 s    - - - Radiation, 600 s    — Gas Jet, 500 s    - - - Radiation, 500 s  
— Pool Fire, 4000 s    - - - Radiation, 4000 s    — Pool Fire, 2000 s    - - - Radiation, 2000 s    — Pool Fire, 1000 s    - - - Radiation, 1000 s

Temperatura (°C)  
 Spessore (mm)  
 Getto gas                  Radiazione  
 Incendio da pozza      Radiazione

Figura 7-43: Temperatura dell'acciaio massime del piatto C.



— Gas Jet, 2400 s    - - - Radiation, 2400 s    — Gas Jet, 600 s    - - - Radiation, 600 s    — Gas Jet, 500 s    - - - Radiation, 500 s  
— Pool Fire, 4000 s    - - - Radiation, 4000 s    — Pool Fire, 2000 s    - - - Radiation, 2000 s    — Pool Fire, 1000 s    - - - Radiation, 1000 s

Temperatura (°C)  
 Spessore (mm)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Getto gas                      Radiazione  
Incendio da pozza      Radiazione

*Figura 7-44: Temperature dell'acciaio massime del piatto D.*

Per gli eventi più gravi presi in considerazione, la temperatura media attraverso lo spessore del piatto che si trova più vicino all'incendio è di circa 1000°C. Persino per gli eventi meno gravi presi in considerazione, la temperatura media attraverso lo spessore dei piatti più vicini all'incendio è di circa 500°C. Gli effetti potenziali di queste temperature sui pannelli della gamba della torre sono stati valutati utilizzando la variazione delle proprietà dell'acciaio a seconda della temperatura descritta nella norma EN 1993-1-2 Tabella 3.1. I pannelli in acciaio iniziano a perdere rigidità tra 100°C e 200°C, iniziano a perdere resistenza tra 400°C e 500°C e, man mano che la temperatura dell'acciaio aumenta, si incrementa il coefficiente di espansione termica. Gli scenari di incendio da pozza vengono ritenuti gli eventi più probabili tra quelli presi in considerazione; anche per l'incendio da pozza più breve con una durata di 1000 s, le temperature della superficie del piatto B, C e D variano approssimativamente tra 700°C e 800°C. A queste temperature l'acciaio ha mantenuto solo il 15% della sua resistenza originale e l'11% della sua rigidità originale.

Data la notevole lunghezza del ponte le torri utilizzano una parte sostanziale della loro portata solo per sostenere il peso del ponte e così c'è una portata di riserva ridotta per superare scenari di carico accidentali (che tipicamente sono considerati avere carichi dinamici ridotti) di quanto tipicamente si abbia in ponti più convenzionali.

I pannelli irrigiditi longitudinalmente e trasversalmente della gamba della torre sono molto sensibili a deformazioni fuori piano. A una temperatura relativamente bassa di 300°C la lunghezza non soggetta a sollecitazione di un pannello tipico di 3.500 mm di lunghezza aumenterà di 13 mm. Il pannello è improbabile che sia in grado di raggiungere questo allungamento semplicemente allungandosi in verticale poiché sarà limitato da un vincolo rappresentato dai pannelli adiacenti più freddi e dal carico compressivo dominante. Con maggiore probabilità raggiungerà l'allungamento deformandosi fuori piano. Un allungamento di 13 mm tra estremità fisse produce una deformazione verso l'esterno di 130 mm (per una forma deformata sinusoidale). Il pannello non sarà in grado di mantenere la sua resistenza date forme deformate come queste o anche più ridotte. A causa della sensibilità dell'acciaio alle alte temperature e l'uso di piatti di irrigidimento snelli, le torri sono estremamente intolleranti alle alte temperature anche in caso che perdurino per tempi relativamente brevi. In tal modo sarebbe impraticabile e non economico progettare torri che mantengano la propria resistenza per tutti gli eventi di incendio presi in considerazione e il rischio



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

che incendi sull’impalcato del ponte si propaghino alle torri deve essere ridotto grazie a un’idonea combinazione di quanto segue:

- Vernice intumescente;
- Pannelli isolanti di tipo rigido adiacenti alle gambe della torre;
- Tempi di intervento dei vigili del fuoco ridotti, e
- Impianti antincendio ad acqua polverizzata.

## SCENARI DI VALUTAZIONE

### Impatto

I Principi di Base al Paragrafo 5.4.2 hanno definito il carico da impatto come una massa di 10.000 kg alla velocità di 600 km orari. In assenza di specifiche si era presupposto che l’area soggetta al carico da impatto fosse di 7 m<sup>2</sup> o una cerchi di 3 m di diametro.

### *Effetti locali*

Il piatto D di 8 m di lunghezza della sezione trasversale della gamba della torre è il più sensibile all’impatto, quindi si è previsto che l’impatto accadesse su questi pannelli. L’analisi del danneggiamento “locale” è stata condotta utilizzando una forza derivata dal carico, presupponendo una frequenza costante di cambiamento del momento, dando una forza di 27,8 MN. L’applicazione di questa forza sul piatto D, centrato sull’irrigidimento trasversale, ha portato a coefficienti di utilizzo tra 5 e 10 per il taglio e momento dell’irrigidimento che indicato come questi non siano sufficientemente forti da circoscrivere il danno.

Appena gli irrigidimenti trasversali si danneggiano, il piatto D si deforma come una membrana. In ogni caso, la curvatura del piatto C, da entrambi i lati del piatto D, assicura una grande flessibilità nel piano per sollecitazioni orizzontali in piano e così l’azione della membrana si limita a sollecitazioni verticali in piano. Pertanto il meccanismo di resistenza “locale” è una catenaria che si estende in verticale. La deflessione del carico caratteristica di una catenaria è fortemente non lineare e quindi l’uso di una forza equivalente non è inidoneo e l’analisi è stata condotta per trovare una catenaria per cui l’energia di deformazione assorbita fosse uguale all’energia cinetica iniziale della massa impattante.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Viene anticipato che l'azione della catenaria si svilupperà per una lunghezza che varia da 20 a 40 metri al di sotto e al di sopra del punto di impatto. Ciò dipende da una serie di variabili, tra cui:

- La capacità delle giunzioni dei conci di resistere a forti sollecitazioni e alte velocità di deformazione senza fratturarsi;
- La capacità delle connessioni degli irrigidimenti trasversali di resistere al carico con forti deformazioni;
- La tensione di snervamento effettiva del piatto che solitamente è superiore del 15% rispetto alla nominale, e
- L'aumento della tensione di snervamento effettiva a causa delle alte velocità di deformazione.

Il danneggiamento probabilmente consisterà in una grave deformazione di 10 o 20 irrigidimenti trasversali, nella deformazione del piatto D nella gamba della torre per circa 4 metri, la flessione dei piatti C, nella probabile frattura delle saldature tra il piatto D e i piatti C e nell'accartocciamento dei piatti H dal lato dell'impatto.

#### *Effetti globali*

Gli effetti globali sono stati considerati per il caso di un impatto a media altezza tra due trasversi. Le caratteristiche della sezione assunte erano le proprietà lorde della gamba al netto dell'intero piatto D (ivi compresi gli irrigidimenti longitudinali) dal lato dell'impatto. La compressione assiale assunta nella gamba era il carico permanente ponderato più la forza di compressione assiale risultante dalla catenaria che resiste al danneggiamento locale, calcolato al 150% della forza di snervamento del piatto D, che consente un aumento dello snervamento effettivo data un'alta velocità di deformazione e rende probabile una tensione di snervamento al di sopra della tensione di snervamento nominale. Il momento flettente era calcolato a partire dalla componente orizzontale della forza della catenaria applicata 40 metri al di sopra e al di sotto del punto di impatto. Per la forza assiale combinata, il momento flettente derivante dall'instabilità globale dell'asse principale e il momento flettente laterale derivante dall'impatto è previsto per la gamba della torre un coefficiente di utilizzo è pari a 0,93; perciò ci si potrebbe aspettare che la torre sopravviva all'impatto qui specificato.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Questa analisi è approssimativa, ma è stata fatta in via conservativa senza presupporre alcuna redistribuzione dei carichi o attorno alla sezione della gamba della torre o verso l'alto e il basso della gamba della torre.

### Esplosione

Il carico di esplosivo sviluppato nel progetto di gara è stato mantenuto per il Progetto Definitivo. Il carico specificato è stato definito con un impulso di pressione di 190 MN/m<sup>2</sup> con una durata di 0,0013 secondi agente su un'area di 10 m x 10 m.

### *Effetti locali*

La pressione specificata è molto superiore alla resistenza dei piatti esterni e degli irrigidimenti trasversali. Perciò gli effetti del carico sono stati valutati considerando il movimento potenziale del piatto esterno e degli irrigidimenti connessi come se fossero liberi da vincoli e il corrispondente assorbimento dell'energia cinetica richiesta a tal scopo come se fossero il caso in questione.

Ci si aspettava che una tale alta pressione causasse deflessioni fuori piano superiori a 0,2 metri nella breve durata di un impulso che genererebbero alte sollecitazioni della membrana e la frattura del piatto esterno e degli irrigidimenti creando un'apertura sul lato della gamba della torre.

### *Effetti globali*

La pressione applicata è molto alta, ma di breve durata e il piatto esterno non sarebbe in grado di resistere alla pressione limitando gli effetti globali sulla torre. Data la grande massa e l'inerzia della torre, l'impulso non influisce sulla stabilità della torre se non per una riduzione dell'effettiva sezione trasversale della gamba della torre. Similmente ai risultati relativi all'impatto, la sezione della gamba verrebbe ridotta dalla rimozione di uno dei pannelli del piatto esterno. Ci si aspetta che la resistenza della gamba danneggiata sia simile a quella per il caso dell'impatto che ha dato 0,93 quale coefficiente di utilizzo approssimativo. L'impulso non produrrebbe la stessa catenaria di lunghezza e forza della membrana del caso dell'impatto, così la stabilità della torre risulterebbe meno influenzata. In ogni caso è possibile che parti della parete adiacente all'esplosione possano staccarsi e agire da proiettili che vanno a danneggiare il lato opposto della gamba. Se ciò accade, ci si aspetta che il danno possa essere molto più grave di quanto previsto per il caso dell'impatto.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011	

## 7.4 Trasversi

Le travi trasversali che collegano le due gambe della torre sono poste approssimativamente alle quote +125 m, +250 m e +375 m. Ciascun trasverso è largo 8 m e ha un'altezza che varia 11,5 m alla mezzeria del ponte a circa 22 m, 20 m e 18 m alla faccia della gamba della torre rispettivamente per i trasversi 1, 2 e 3. Una quota trasversale del trasverso 2 è mostrata alla Figura 7-45. I trasversi consistono di pannelli in acciaio irrigiditi longitudinalmente e trasversalmente per le anime e le flange. Allo stesso modo delle gambe della torre, gli irrigidimenti trasversali a T del progetto di gara sono stati sostituiti da irrigidimenti piani per semplificare il processo di costruzione. Gli irrigidimenti trasversali del tipo a telaio di resistenza al momento del progetto di gara sono stati sostituiti da irrigidimenti trasversali a telaio controventato per migliorare la resistenza ai modi di instabilità del tipo a nodi mobili delle anime. Le sezioni tipiche del trasverso sono mostrate alla Figura 7-46. Ogni trasverso sarà interamente realizzato in officina e montato come gruppo completo.

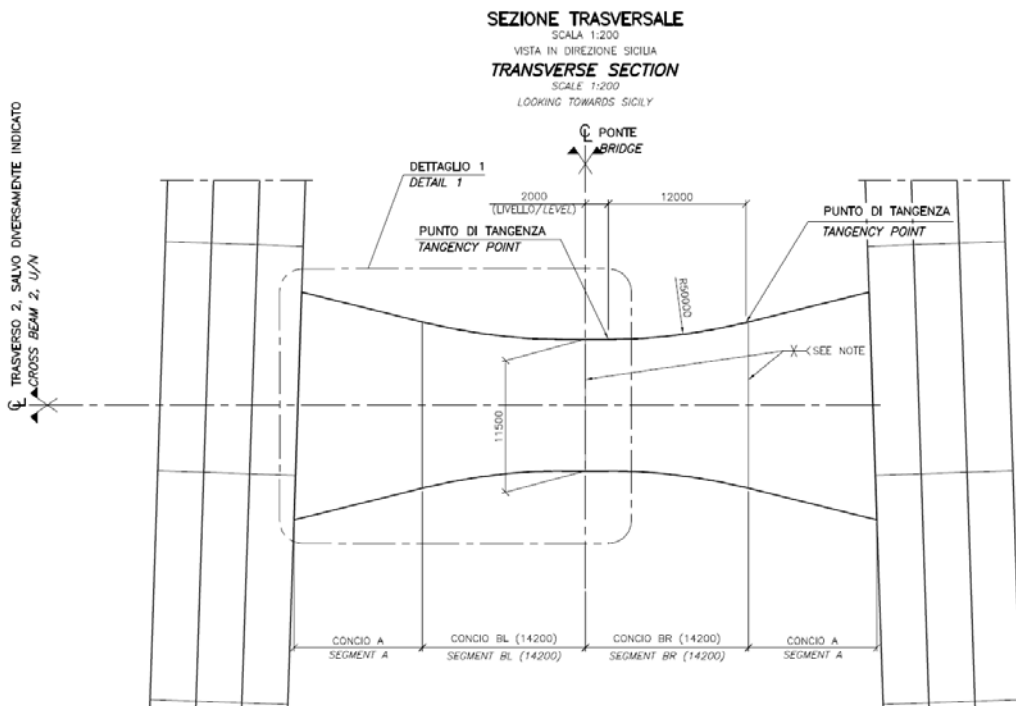


Figura 7-45: Quota trasversale della del trasverso 2.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Segmento	Trasverso 1		Trasverso 2		Trasverso 3	
	Anima	Flangia	Anima	Flangia	Anima	Flangia
A	30	25	40	35	35	40
B	35	25	45	25	40	30

Tabella 7-7: Spessori piatto trasverso(mm).

La maggior parte degli elementi del trasverso sono governati dalle sollecitazioni di von Mises dovute alle notevoli forze di taglio che coesistono con i momenti massimi. Similmente alle gambe della torre i trasversi sono progettati sulla base delle efficienze di ogni irrigidimento longitudinale e angolo della sezione trasversale. L'efficienza è definita quale rapporto tra il limite di sollecitazione compressiva e la tensione di snervamento non ponderata. Le efficienze sono state calcolate sia per le sollecitazioni compressive longitudinali che per il taglio. Quale resistenza al taglio in ogni punto è stata assunta la minore della resistenza all'instabilità di taglio dell'intero pannello dell'anima o il sottopannello tra gli irrigidimenti longitudinali. Per comodità quali punti di sollecitazione della sezione trasversale sono stati scelte le posizioni degli irrigidimenti longitudinali. Quale efficienza per l'instabilità del sottopannello nei punti in cui si trovano gli irrigidimenti è stata assunta approssimativamente la minore di due sottopannelli adiacenti.

I trasversi sono caratterizzati da tagli e momenti più o meno costanti che variano linearmente da un massimo alle gambe della torre a circa zero sulla mezzeria del ponte. Il progetto del trasverso, ivi compresa la distribuzione delle dimensioni del piatto e l'intervallo degli irrigidimenti, è stato ottimizzato per adattarsi alla distribuzione delle forze e all'altezza variabile del trasverso. Pertanto gli spessori del piatto d'anima nel Segmento B, il più vicino alla mezzeria del ponte, sono maggiori di quelli del Segmento A che si trova vicino alle gambe della torre poiché le forze di taglio sono costanti per tutta la lunghezza del trasverso e l'altezza dell'anima diminuisce verso la mezzeria del ponte. Lo spessore del piatto della flangia in genere si riduce vicino alla mezzeria del ponte per via dei momenti in rapida diminuzione. In ogni caso anche l'altezza della sezione si riduce nello stesso modo limitando la possibile diminuzione dello spessore della flangia.

L'intervallo e le misure dell'irrigidimento longitudinale vengono ottimizzate sulla base della distribuzione dei tagli e dei momenti presenti su tutta la lunghezza del trasverso. Il progetto raggiunge un coefficiente di utilizzo relativamente costante per tutta l'altezza dell'anima. Le aree vicine alla mezza altezza dell'anima subiscono gli sforzi di taglio maggiori, ma sono soggette a sollecitazioni di flessione longitudinali relativamente ridotte. Perciò una bassa efficienza è tollerabile per sollecitazioni longitudinali come indicato dall'uso di irrigidimenti longitudinali di 300 x

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

30. In ogni caso l'intervallo dell'irrigidimento longitudinale in tale regione deve essere relativamente piccolo per poter evitare riduzioni eccessive per l'instabilità di taglio dei sottopannelli tra gli irrigidimenti.

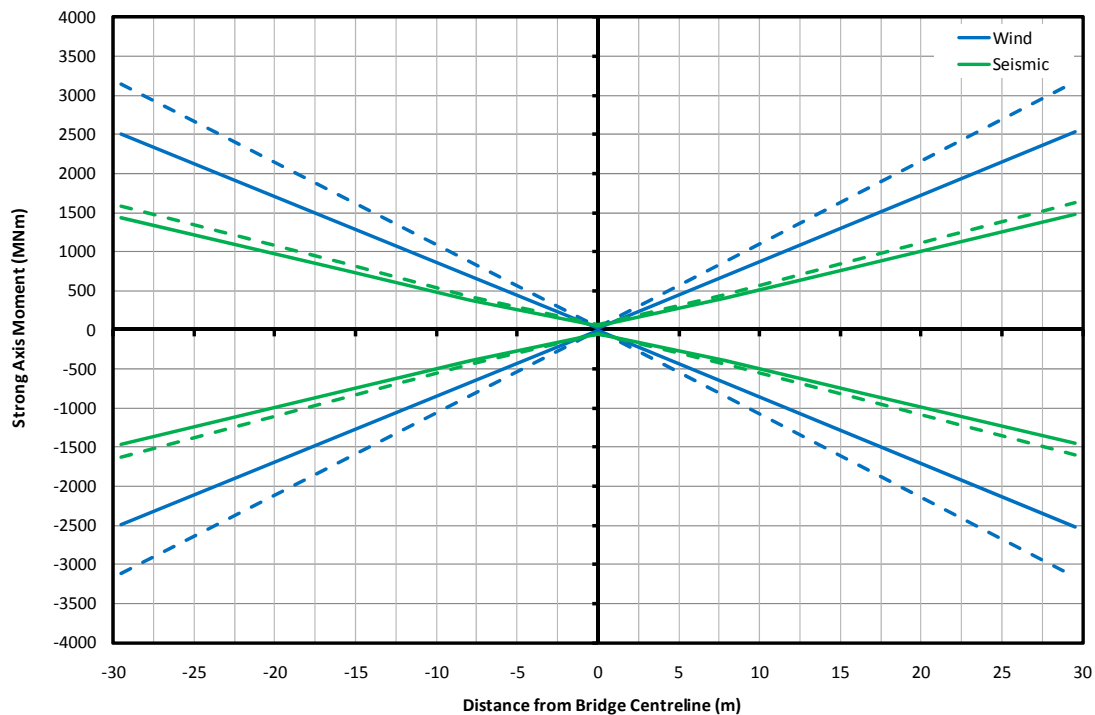
Similarmente irrigidimenti longitudinali più grandi e più frequenti sono stati utilizzati per le parti dell'anima vicino all'intersezione della flangia alla luce delle sollecitazioni longitudinali maggiori che si hanno in questa area. Gli irrigidimenti specificati della flangia sono gli stessi di quelli previsti per le parti superiori delle anime poiché le sollecitazioni di queste due zone sono simili. La spaziatura degli irrigidimenti longitudinali della flangia è pure influenzata dalla disposizione delle ruote del carroponete di ispezione/manutenzione. Sebbene il carico del carroponete sia relativamente piccolo, è preferibile che le ruote corrano direttamente sull'estradosso degli irrigidimenti longitudinali in modo da non influire sul progetto globale della flangia del trasverso.

I carichi di progetto del trasverso che governano la progettazione sono i carichi del vento allo SLU (statico + dinamico) che agiscono trasversalmente all'asse del ponte per i trasversi 1 e 2 e i carichi sismici e del vento allo SLU per il trasverso 3. I trasversi stabilizzano la gamba della torre dall'instabilità trasversale e così l'instabilità globale della torre (effetto delle imperfezioni equivalenti) causa significativi momenti e tagli aggiuntivi del trasverso. Questi vengono definiti quale parte dell'analisi della gamba della torre per gli effetti delle imperfezioni equivalenti come descritti al Paragrafo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..** I momenti del vento e sismici allo SLU e SLIS che governano la progettazione e le forze di taglio nei trasversi della torre Sicilia sono rappresentati alla Figura 7-47 e 7-48 per il trasverso 1, Figura 7-49 e 7-50 per il trasverso 2 e Figura 7-51 e 7-52 per il trasverso 3. I momenti rappresentati in grafico agiscono su un asse orizzontale parallelo al ponte e le forze di taglio rappresentate agiscono verticalmente. Gli effetti sismici allo SLU e SLIS sono molto simili e si differenziano per grandezza solo del 10% similmente all'incremento relativo nell'accelerazione di picco a terra ( $6,3 / 5,8 = 9\%$ ). Gli effetti del vento allo SLU e SLIS si differenziano approssimativamente del 25% che secondo quanto previsto corrisponde al quadrato della velocità del vento di riferimento maggiore del 11,6% allo SLIS. Il trasverso 2 è il trasverso maggiormente soggetto a carico per taglio e momento. Dato il diverso coefficiente parziale per il materiale assunto per SLU e SLIS (1,1 al posto 1,0) i maggiori effetti della forza non sempre producono i maggiori coefficienti di utilizzo.

Le figure 7-53 e 7-54 mostrano i momenti attorno all'asse forte del trasverso e le forze di taglio risultanti dall'instabilità globale trasversale delle torri. Gli effetti della forza del trasverso indotti

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011	

dall'instabilità della gamba della torre variano da circa un quarto a un terzo dell'effetto di progetto totale nei trasversi. Le forze del trasverso della torre Calabria sono simili per tutti i carichi.



Momento attorno all'asse forte (MNm)  
 Distanza dalla mezzeria del ponte (m)  
 Vento  
 Sismico

Figura 7-47: Momenti del trasverso 1 Sicilia (SLU: linee continue, SLIS: linee tratteggiate).

Taglio all'asse forte (MN)  
 Distanza dalla mezzeria del ponte (m)  
 Vento  
 Sismico



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011	

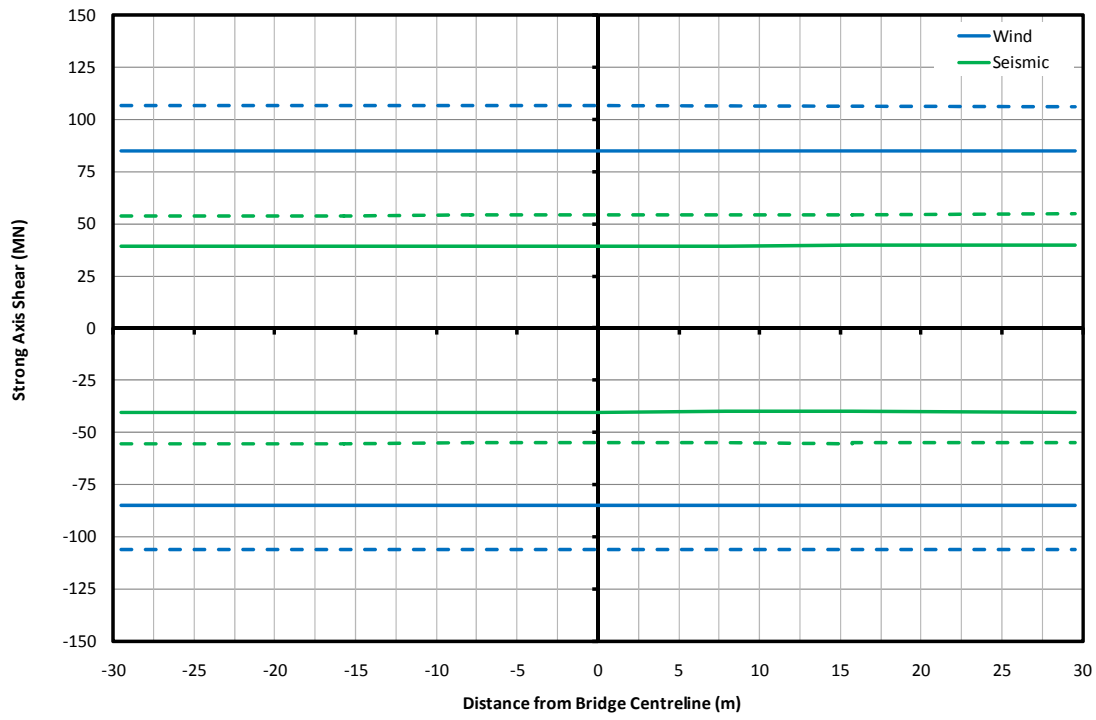
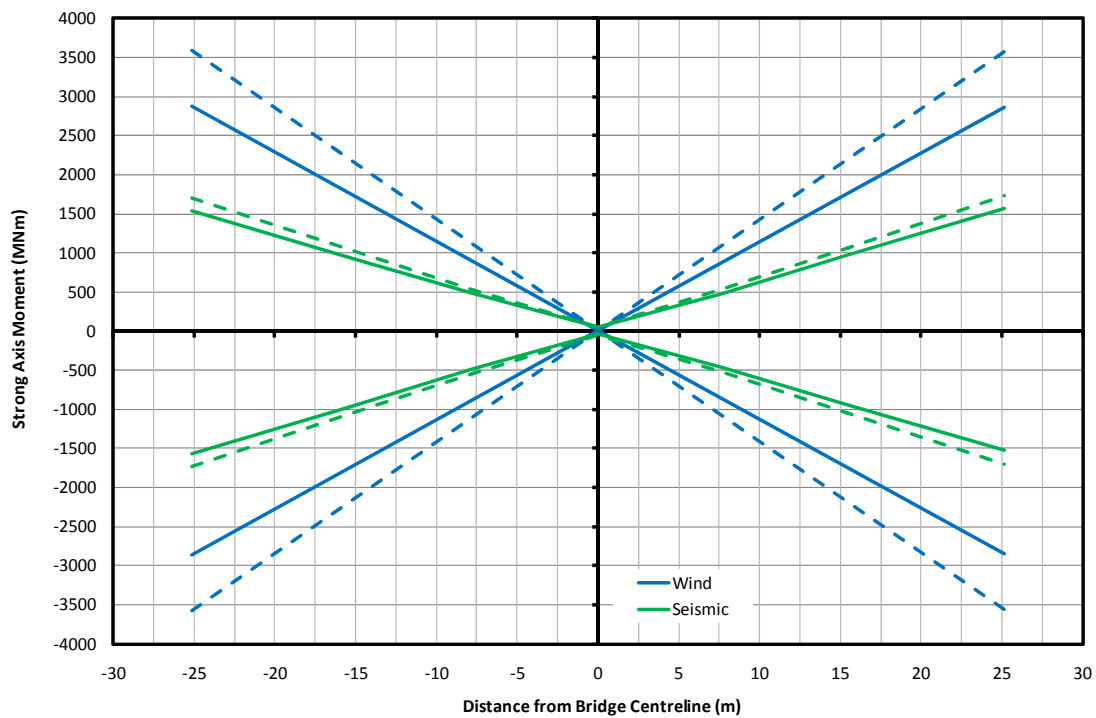


Figura 7-48: Forze di taglio del trasverso 1 Sicilia (SLU: linee continue, SLIS: linee tratteggiate).

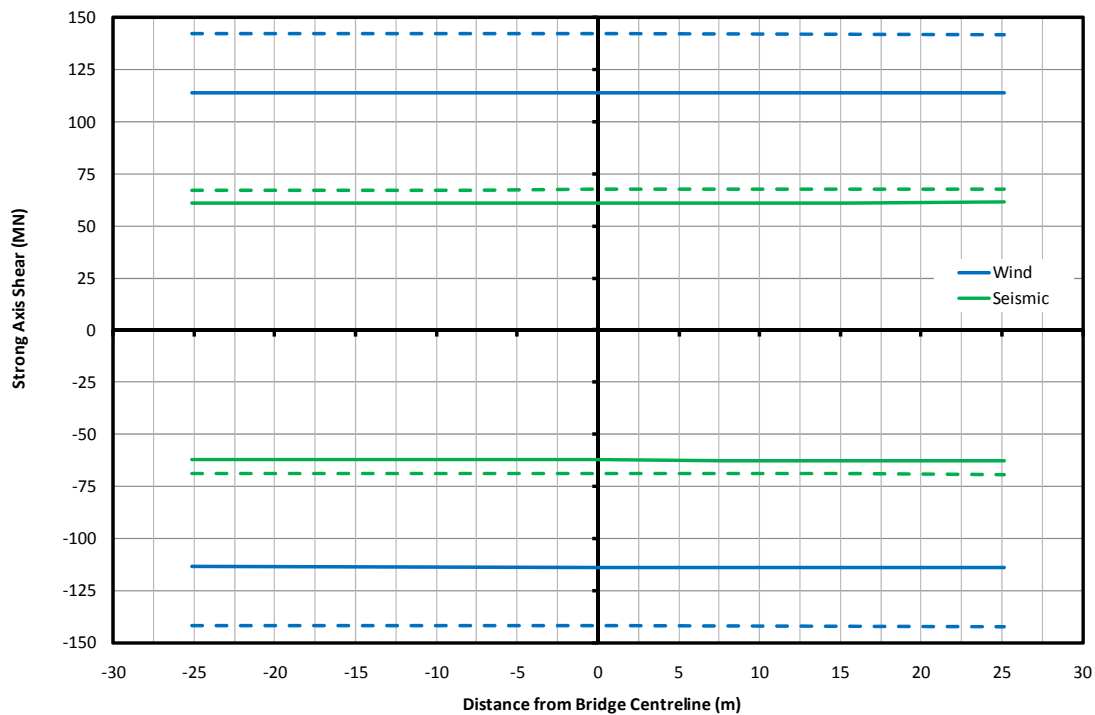


Momento attorno all'asse forte (MNm)  
 Distanza dalla mezzeria del ponte (m)  
 Vento

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

Sismico

Figura 7-49: Momenti trasverso 2 Sicilia (SLU: linee continue, SLIS: linee tratteggiate).



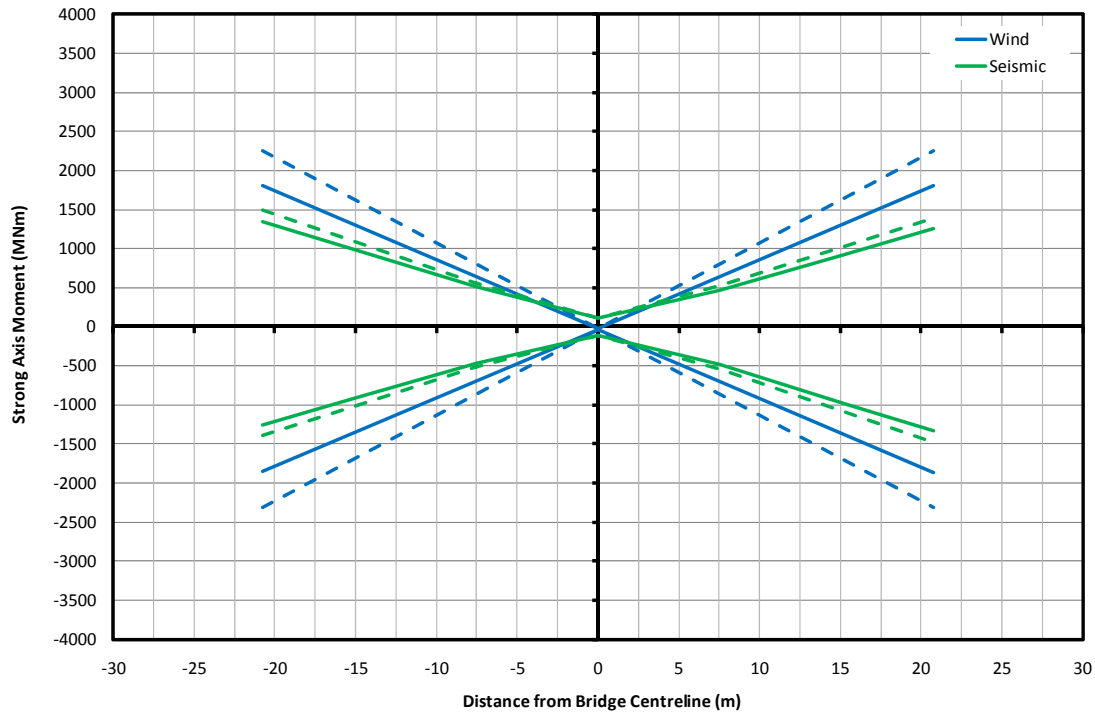
Taglio all'asse forte (MN)

Distanza dalla mezzeria del ponte (m)

Vento

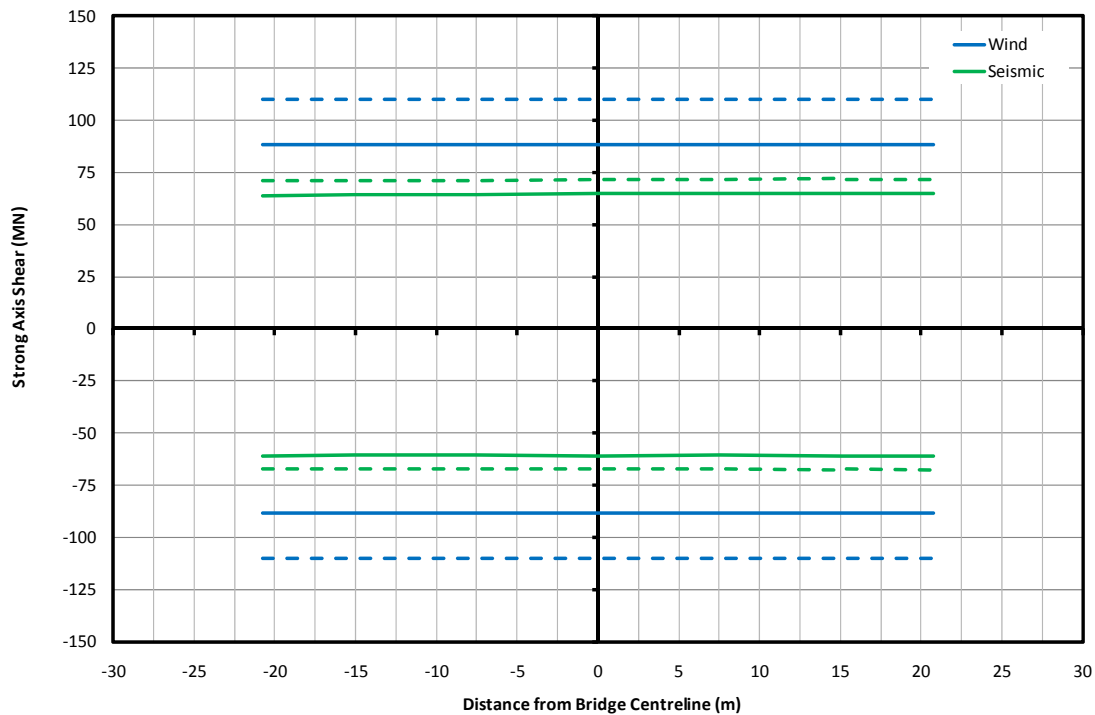
Sismico

Figura 7-50: Forze di taglio trasverso 2 Sicilia (SLU: linee continue, SLIS: linee tratteggiate).



Momento attorno all'asse forte (MNm)  
Distanza dalla mezzeria del ponte (m)  
Vento  
Sismico

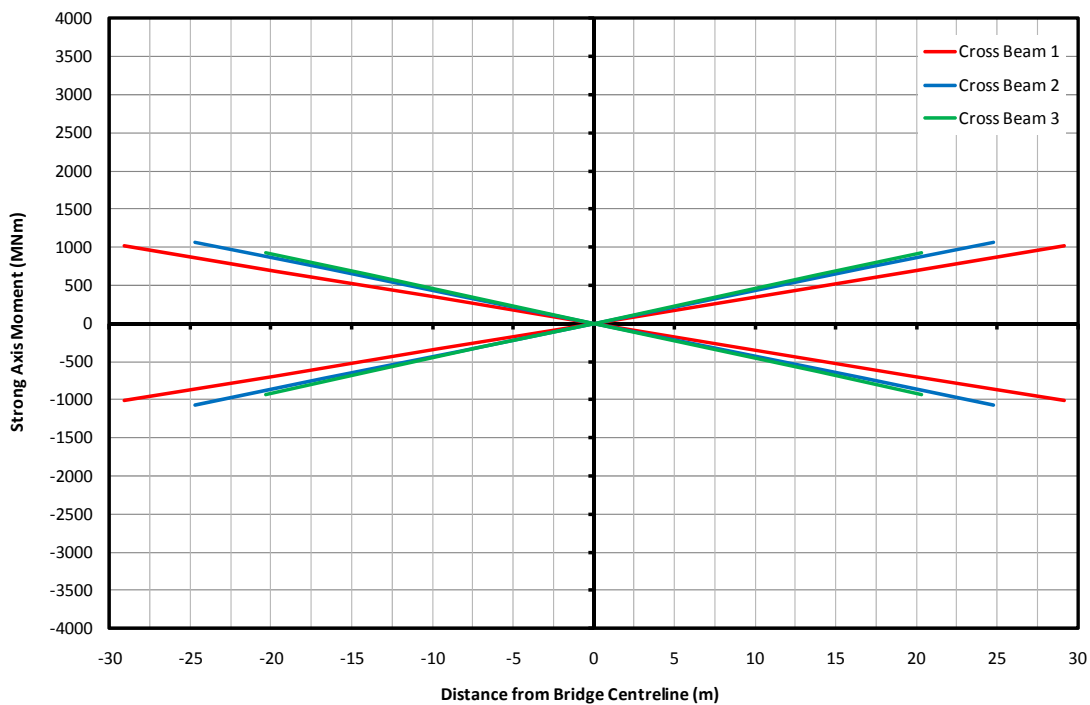
Figura 7-51: Momenti trasverso 3 Sicilia (SLU: linee continue, SLIS: linee tratteggiate).



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011	

Taglio all'asse forte (MN)  
 Distanza dalla mezzeria del ponte (m)  
 Vento  
 Sismico

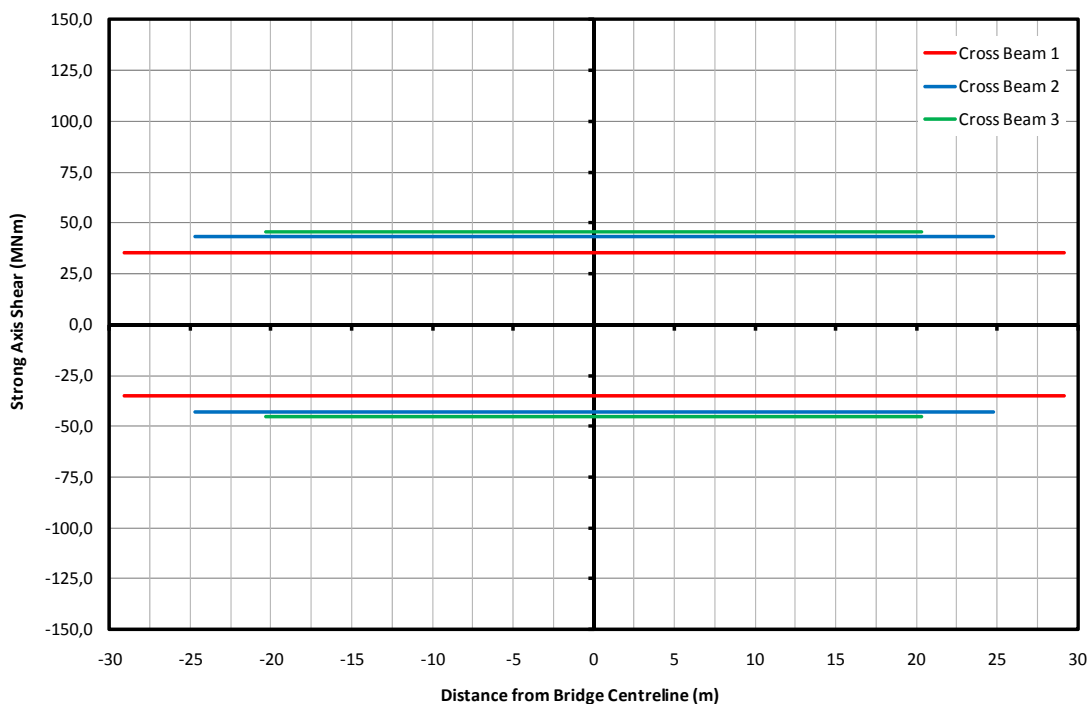
Figura 7-52: Forze di taglio trasverso 3 Sicilia (SLU: linee continue, SLIS: linee tratteggiate).



Momento attorno all'asse forte (MNm)  
 Distanza dalla mezzeria del ponte (m)  
 Trasverso 1

Figura 7-53: Momenti del trasverso dovuti a imperfezioni equivalenti della gamba della torre.

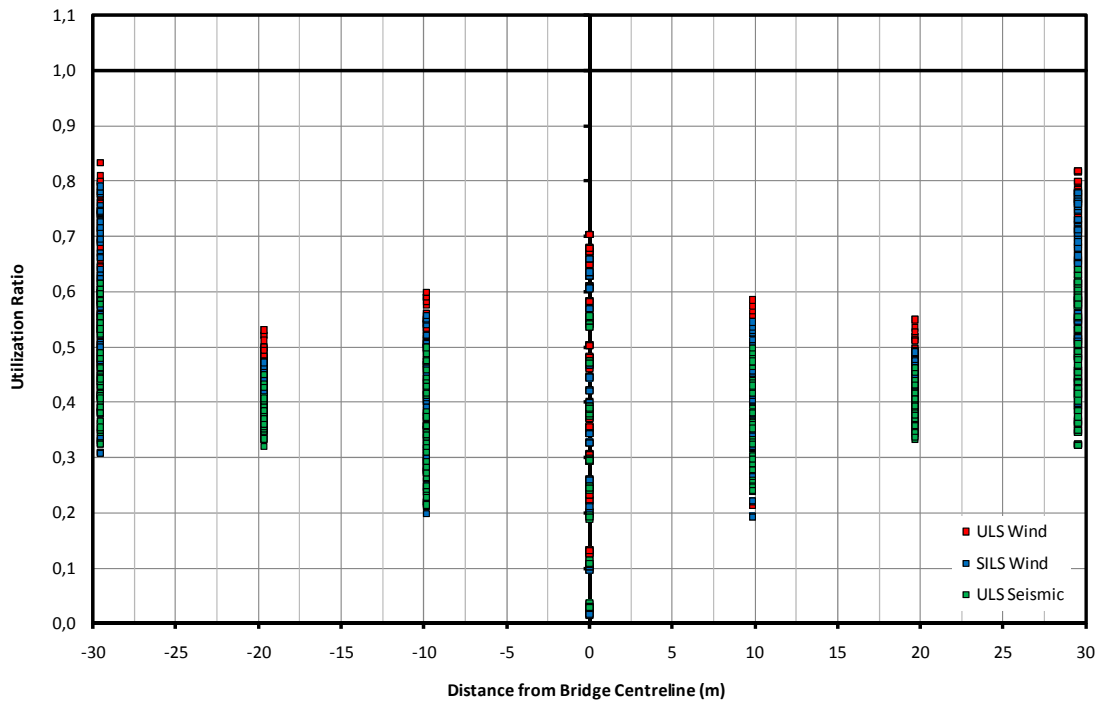
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	



Taglio all'asse forte (MN)  
 Distanza dalla mezzeria del ponte (m)  
 Trasverso 1

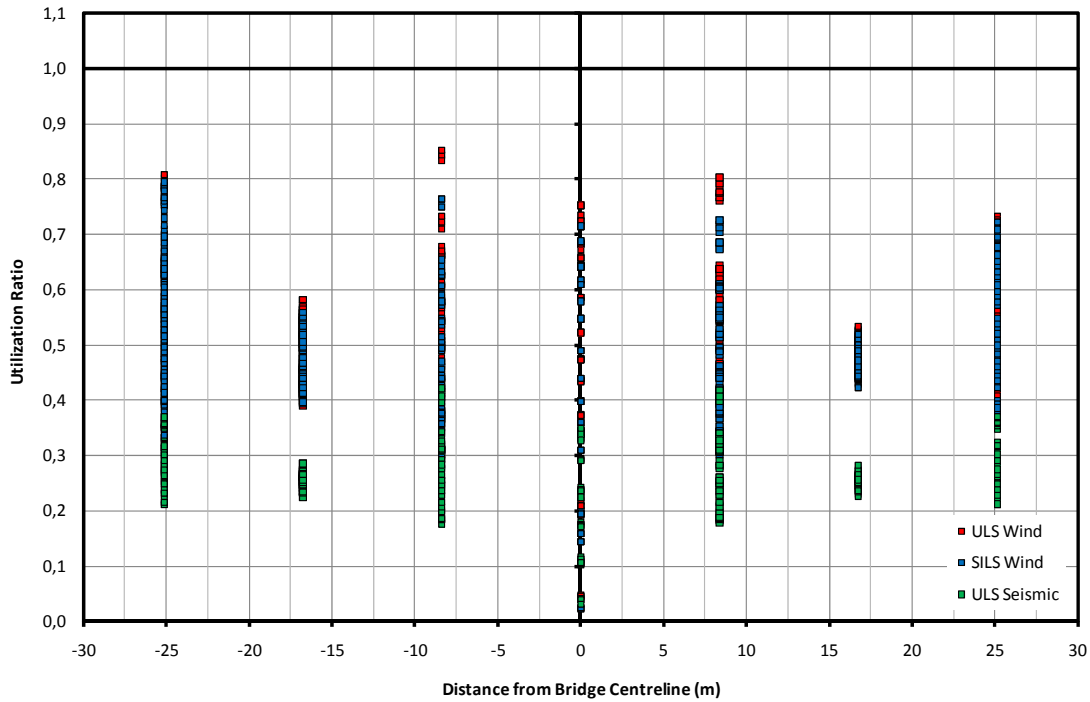
Figura 7-54: Forze di taglio del trasverso dovute a imperfezioni equivalenti della gamba della torre.

I coefficienti di utilizzo per le sollecitazioni di von Mises in tutti i punti della sezione trasversale per i trasversi 1, 2 e 3 sono mostrati rispettivamente alle Figure 7-55, 7-56 e 7-57. Per chiarezza sono mostrati solo i coefficienti di utilizzo per le combinazioni di vento allo SLU e SLIS che governano la progettazione e la combinazione sismica allo SLU. In ogni caso verifiche simili sono state eseguite per tutte le relative combinazioni di carico. I coefficienti di utilizzo che governano la progettazione per le sezioni del trasverso vicine alla torre tipicamente si hanno vicino all'intersezione dell'anima-flangia per via dell'alto taglio e momento coesistenti. Vicino alla mezzeria del ponte, il taglio è l'effetto dominante e i coefficienti di utilizzo che governano la progettazione si verificano vicino alla media altezza dell'anima ove si hanno le massime sollecitazioni di taglio. I coefficienti di utilizzo massimi di ogni trasverso variano da 0,8 a 0,9.



Coefficiente di utilizzo  
Distanza dalla mezzeria del ponte (m)  
Vento allo SLU  
Sismico allo SLU

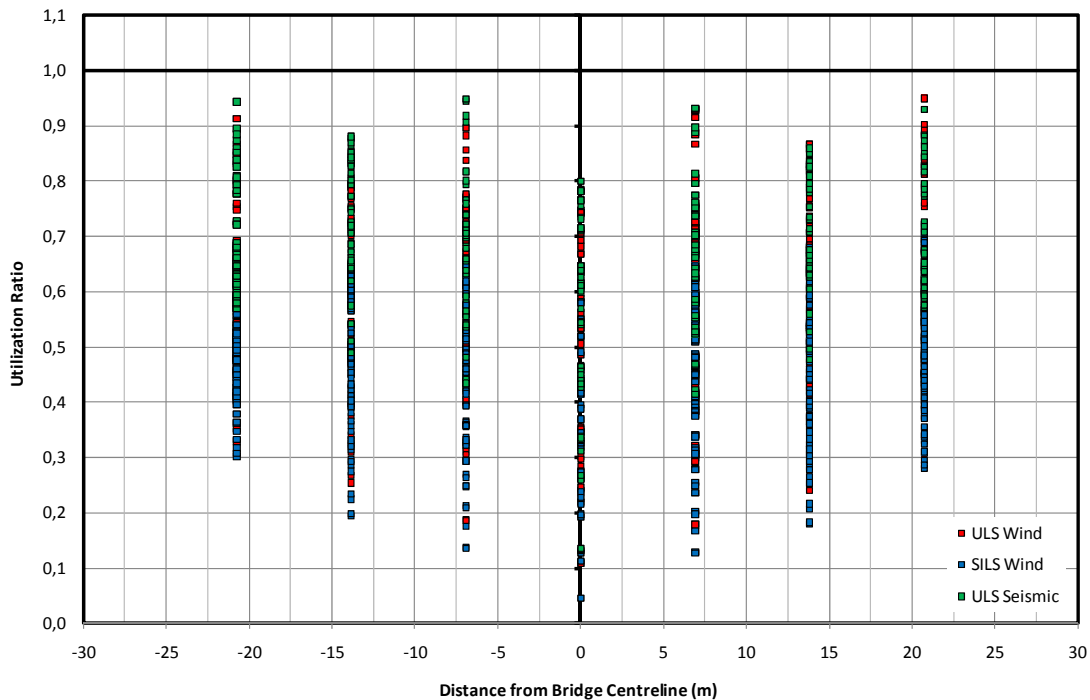
Figura 7-55: Coefficienti di utilizzo del trasverso 1 Sicilia.



Coefficiente di utilizzo  
Distanza dalla mezzeria del ponte (m)  
Vento allo SLU  
Sismico allo SLU

Figura 7-56: Coefficienti di utilizzo del trasverso 2 Sicilia.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



Coefficiente di utilizzo  
 Distanza dalla mezzera del ponte (m)  
 Vento allo SLU  
 Sismico allo SLU

Figura 7-57: Coefficienti di utilizzo del trasverso 3 Sicilia.

#### 7.4.2 Elementi trasversali

Similmente alle gambe della torre gli irrigidimenti trasversali del trasverso resistono a carichi fuori piano derivanti dall'instabilità dei piatti e irrigidimenti longitudinali. Per i trasversi, come descritto nel documento CG.10.00-P-RG-D-P-SV-T4-00-00-00-01 "Principi Generali di Progettazione" dovranno essere considerate anche le seguenti forze aggiuntive:

- Forze devianti derivanti dai piatti della flangia e irrigidimenti curvi;
- Forze dirette derivanti dai carichi del carroponete sull'estradosso della flangia;
- Forze assiali derivanti da reazioni degli irrigidimenti trasversali adiacenti; e
- Effetti destabilizzanti dell'instabilità di taglio delle anime.

Poiché il progetto degli irrigidimenti trasversali è essenzialmente quello di una trave a campata semplice, le forze risultanti sono fortemente influenzate dalla lunghezza della campata



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

dell'irrigidimento trasversale. Perciò un sistema di controventatura trasversale, come mostrato alla Figura 7-46, è utilizzato per ridurre le lunghezze di luce dell'irrigidimento trasversale e limitare le richieste di resistenza dell'irrigidimento. Il sistema di controventatura consiste dei seguenti profili vuoti circolari: CHS 219.1x12.5, CHS 323.9x12.5 e CHS 406x16. L'utilizzo del sistema di controventatura, in alternativa al sistema a telai proposto nel progetto di gara, ha come beneficio aggiuntivo quello di resistere più efficacemente al modo di instabilità totale a nodi mobili dell'intero sistema.

Diverse disposizione degli irrigidimenti trasversali e dei controventi sono stati utilizzati nei segmenti A e B del trasverso a causa della flangia curva del segmento B che comporta considerevoli forze devianti. Nel segmento B i controventi sono disposti in modo da sostenere gli irrigidimenti trasversali della flangia alla mezzeria del trasverso riducendo i tagli di progetto di circa il 50% e i momenti di progetto di circa il 75%. In assenza di punti di controventatura aggiuntivi, l'irrigidimento trasversale dovrebbe essere alto circa 1,8 m. A causa delle considerevoli forze devianti sono richiesti elementi di controventatura più grandi.

La resistenza alla flessione dell'irrigidimento trasversale spiega la stabilità della flangia laterale ricorrendo a metodi simili a quelli descritti per gli irrigidimenti trasversali della gamba della torre. Per aumentare la stabilità della flangia laterale, si utilizzano anche piccoli piatti a linguetta a ciascuna estremità poiché non ci sono altri vincoli per tutta la lunghezza dell'irrigidimento che permettano di sviluppare la rigidità alla curvatura della flangia. In aggiunta, a causa di maggiori forze devianti negli irrigidimenti longitudinali della flangia e il profilo curvo degli irrigidimenti longitudinali dell'anima, gli irrigidimenti longitudinali in questi punti sono saldati direttamente alle anime dell'irrigidimento trasversale.

Tutti gli irrigidimenti trasversali sono stati verificati sia per le prescrizioni di flessione che di rigidità minima. Una verifica aggiuntiva è stata eseguita per la resistenza al taglio delle sezioni lorde e nette nei punti di intaglio. I coefficienti di utilizzo di ciascuna delle verifiche di progetto per gli irrigidimenti trasversali della flangia e dell'anima dei segmenti A e B sono mostrati alla Tabella 7-. Per la maggior parte delle posizioni gli irrigidimenti trasversali sono governati da sollecitazioni dovute a flessione indicate in tabella come la "Inerzia minima necessaria alla resistenza". Tale verifica è pure pesantemente influenzata dalla stabilità laterale delle flange che limita la sollecitazione ammissibile della flangia. Gli irrigidimenti trasversali di tipo B sulle flange del trasverso sono governati dal taglio dovuto alla ridotta lunghezza della luce. Ciò si traduce in un maggiore spessore dell'anima per questi irrigidimenti.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Segmento	A		B	
	Flangia	Anima	Flangia	Anima
Massima lunghezza luce (mm)	8000	10200	4000	7200
Anima irrigidimento	875 x 16	875 x 16	875 x 25	875 x 16
Flangia irrigidimento	425 x 25	425 x 25	425 x 25	350 x 20
Coefficiente di utilizzo per l'inerzia minima necessaria alla resistenza	0.48	0.48	0.27	0.20
Coefficiente di utilizzo per l'inerzia minima necessaria alla resistenza	0.94	0.91	0.73	0.98
Coefficiente di utilizzo per taglio su sezione lorda	0.21	0.10	0.40	0.07
Coefficiente di utilizzo per taglio su sezione netta	0.52	0.24	0.83	0.16

Tabella 7-10: Coefficienti di utilizzo (UR) per irrigidimenti trasversali del trasverso.

Le forze di progetto negli elementi di controvento sono state determinate dalle forze di progetto dell'irrigidimento trasversale e le reazioni terminali. I controventi sono progettati per lavorare in tensione e compressione e pertanto sono governati dai carichi compressivi massimi. I controventi sono profili vuoti circolari laminati a caldo di dimensione standard e hanno una resistenza allo snervamento di 355 MPa. La Tabella 7-8 mostra i carichi compressivi massimi e la resistenza di progetto per ogni elemento di controventatura.

Tipo di irrigidimento trasversale	A		B	
	Diagonale	Orizzontale	Diagonale	Orizzontale
Elemento di controventatura				
Dimensione del profilo	323.9 x12.5	219.1 x 12.5	406.4 x 16	219.1 x12.5
Massima forza di compressione	1200 kN	700 kN	3450 kN	500 kN
Resistenza di progetto, $N_{b,rd}$	1300 kN	950 kN	4150 kN	950 kN
Coefficiente di utilizzo per la compressione assiale	0.92	0.73	0.83	0.52

Tabella 7-8: Coefficienti di utilizzo (UR) per elementi di controventatura del trasverso.

### 7.4.3 Fatica

I trasversi non sono soggetti a sollecitazioni dirette derivanti da carichi dinamici sull'impalcato del ponte e così i carichi del vento sono stati considerati l'unica fonte ragionevole di carichi di fatica. I trasversi sono stati valutati per la fatica causata da carichi del vento regolarmente presenti ricorrendo a una procedura semplificata e conservativa. Le distribuzioni della frequenza e della frequenza cumulativa di tutte le velocità del vento che si hanno a livello dell'impalcato della torre Calabria sono presentate alla Figura 7-58 con la frequenza rappresentata sull'asse verticale e la

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

velocità del vento sull'asse orizzontale. Le velocità del vento al di sotto di 1 m/s, che rappresentano il 19% della frequenza cumulativa, non sono rappresentate sul grafico di distribuzione della frequenza. La distribuzione direzionale dei venti è indicata con la rosa dei venti alla T Figura 7-59 dove l'asse verticale con le etichette corrisponde al Nord. I dati relativi alla velocità del vento si basano sulle misure effettuate all'aeroporto di Reggio Calabria e trasformate per il sito del ponte considerando il terreno tra le due località.

I venti presenti con regolarità sono notevolmente più leggeri delle velocità del vento di progetto indicate nei principi di base. Il progetto dei trasversi della torre è governato da carichi del vento allo SLIS che corrispondono a una velocità del vento di 60 m/s a 70 m sul livello del mare. La risposta strutturale alla radice quadrata media ai venti variabili nel tempo è approssimativamente proporzionale a  $V^{2.8}$ , dove  $V$  è la velocità del vento. La distribuzione della velocità del vento cumulativa mostra che il 95% di tutte le velocità del vento che si hanno sulla torre Calabria sono inferiori a 15 m/s. Se si presuppone, in modo molto conservativo, che:

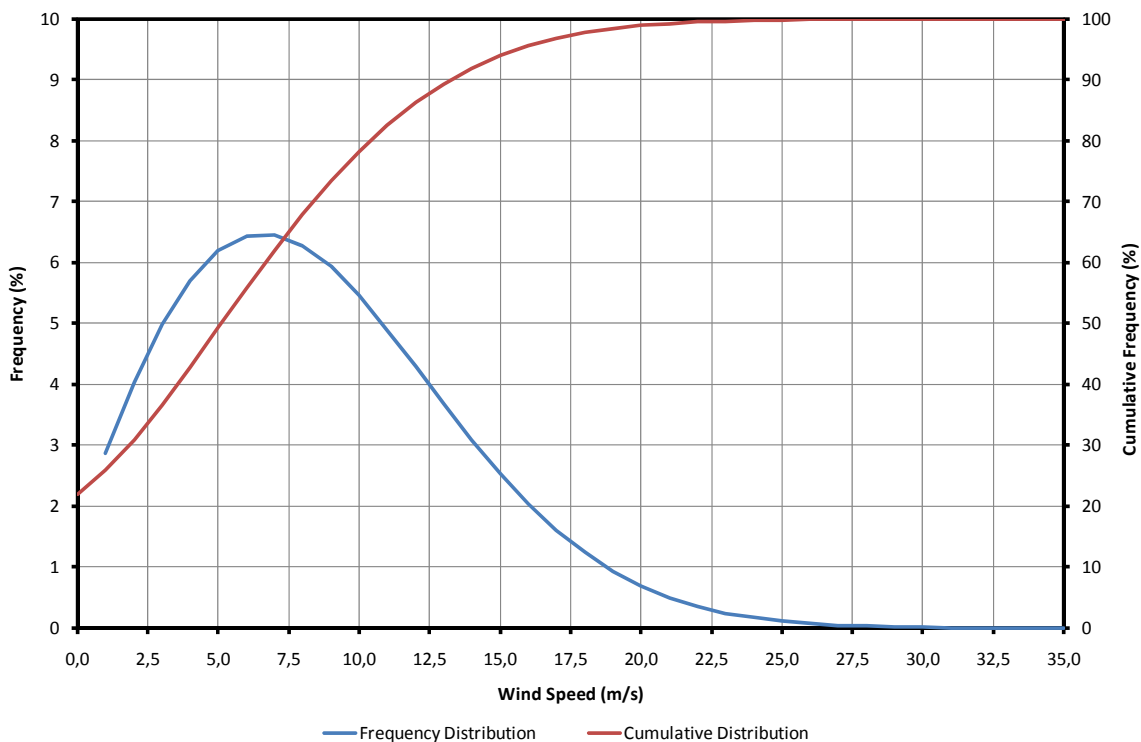
- velocità di 15 m/s si hanno nel sito del ponte abbastanza frequentemente da rappresentare un idoneo carico di fatica;
- tutti gli elementi del trasverso sono sollecitati alla tensione di snervamento di progetto,  $f_y/\gamma_{M0}$  con una combinazione di carico del vento allo SLIS di governo della progettazione;
- il vento soffia sempre nella direzione più critica; e
- l'intera sollecitazione su tutti gli elementi è attribuibile al carico del vento,

quindi la massima sollecitazione di fatica causata da venti di 15 m/s sarebbe:

$$\left(\frac{15}{60}\right)^{2.8} \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 9 \text{ MPa}$$

Una sollecitazione di 9 MPa è ben al di sotto della soglia di sollecitazione ad ampiezza costante anche per i peggiori dettagli di fatica confermando che la fatica indotta dal vento nei trasversi non è un problema.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



Frequenza (%)  
Frequenza cumulativa (%)  
Velocità del vento (m/s)  
Distribuzione della frequenza  
Distribuzione cumulativa

*Figura 7-58: Le distribuzioni della frequenza e della frequenza cumulativa delle velocità del vento a livello dell'impalcato della torre Calabria.*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

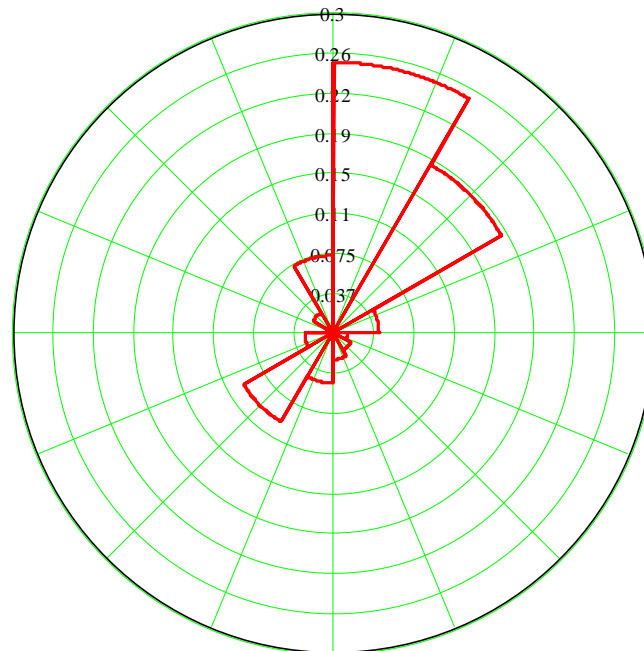


Figura 7-59: Rosa dei venti per tutte le velocità del vento a livello dell'impalcato della torre Calabria.

## 7.5 Ancoraggio di base

L'ancoraggio di base della torre consiste di tiranti di ancoraggio di post-tensione multi-trefolo, la piastra di base e l'irrigidimento locale della gamba della torre. L'attuale ancoraggio di base della torre è concettualmente simile a quello sviluppato nel progetto di gara fatta eccezione per i bulloni di ancoraggio sostituiti da tiranti di post-tensione per ridurre il volume di armatura delle fondazioni necessario per assicurare la resistenza alle forze di fenditura trasversali causate dalle reazioni della base della torre sull'estradosso della fondazione. Una vista in pianta della base della torre che mostra i punti in cui sono ubicati gli ancoraggi dei tiranti è mostrata alla Figura 7-60; l'irrigidimento locale della gamba della torre non è mostrato.

L'ancoraggio della base della torre è dimensionato per prevenire la decompressione sotto i carichi allo SLU/SLIS nel corso della costruzione e a ponte completato. Il dimensionamento dei componenti dell'ancoraggio di base è descritto nella presente sezione.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> <i>PS0013_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>	

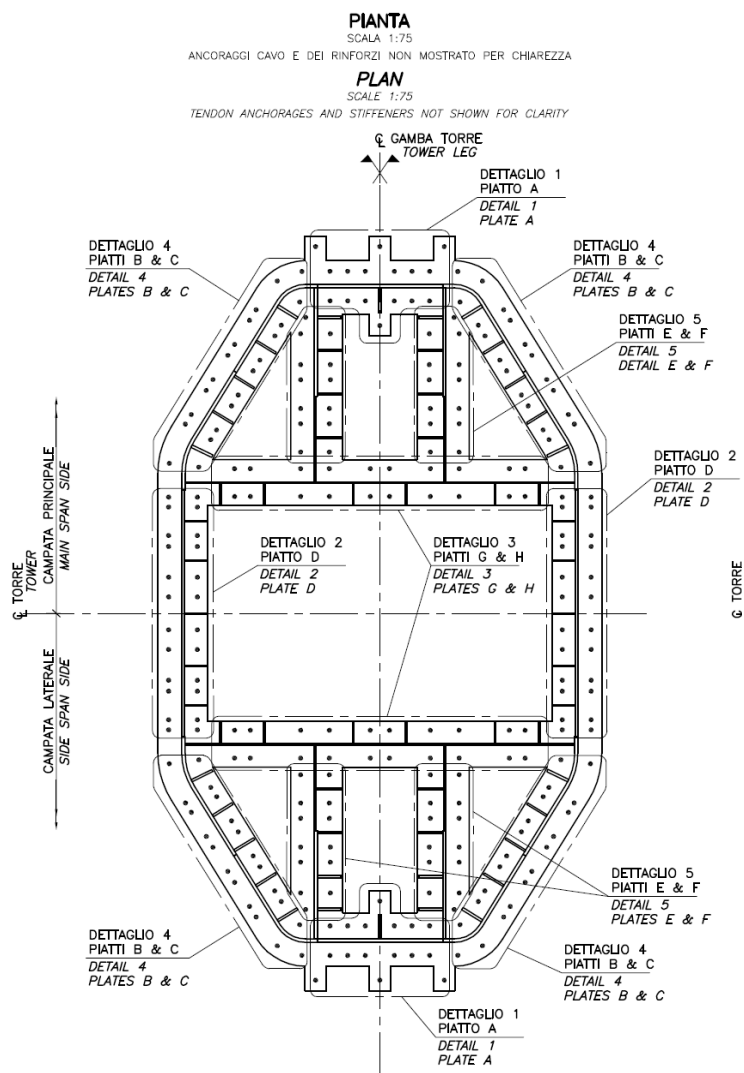
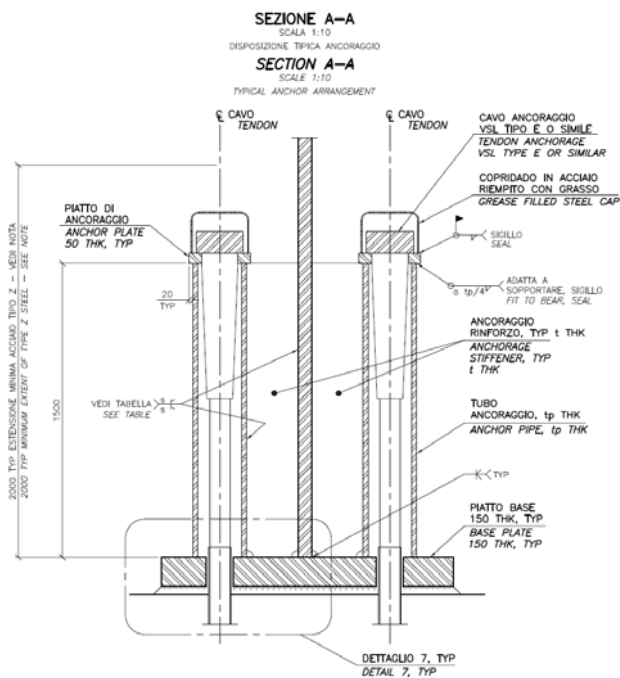
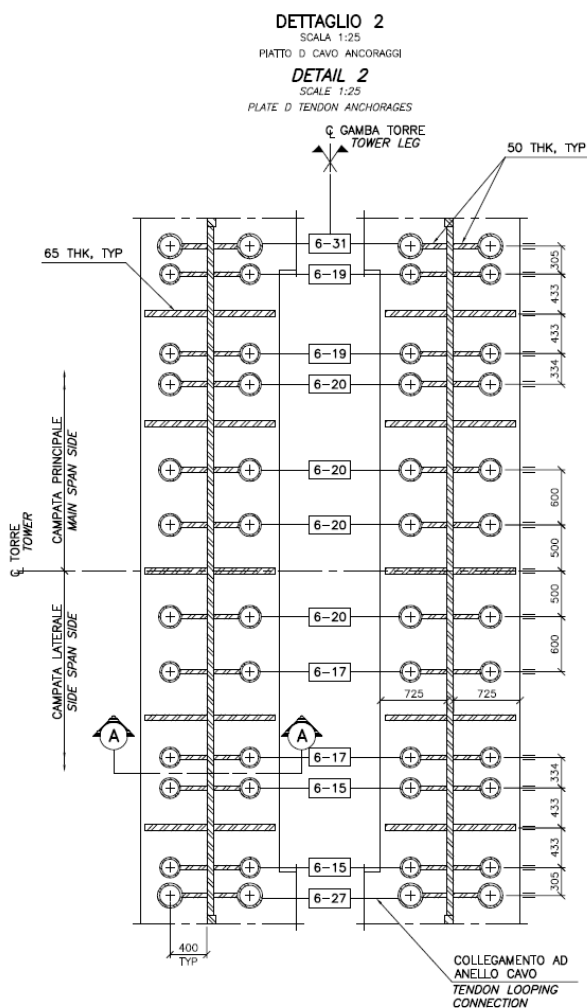


Figura 7-60: Disposizione del tirante dell'ancoraggio di base della torre.

### 7.5.1 Tiranti di ancoraggio

Le richieste di resistenza alla tensione alla base della torre sono soddisfatte da tiranti di ancoraggio di post-tensione multi-trefole. Tutti i tiranti solo fatti passare a coppia attraverso la fondazione della torre così che entrambi gli ancoraggi terminali resistano alle richieste di tensione in alcuni punti della base della torre. I piatti di ancoraggio dei tiranti A, E, F, G e H sul lato della campata principale della gamba della torre si collegano a coppia ai punti di ancoraggio corrispondenti sul lato campata laterale della gamba della torre. I piatti di ancoraggio dei tendoni B,

C e D sul lato orientale della gamba della torre si collegano a coppia ai punti di ancoraggio corrispondenti sul lato occidentale della gamba della torre. Le uniche eccezioni a questa disposizione sono i tiranti che ancorano le regioni angolari alle intersezioni dei piatti A, B e E che sono ancorati al piatto B, ma che si legano con un cappio tra i lati della campata principale e laterale della gamba della torre. Una vista in pianta tipica dell'ancoraggio del tirante e la sezione trasversale sono mostrate alla Figura 7-61. La vista in pianta mostra gli ancoraggi del piatto D sia sul lato orientale che occidentale della gamba della torre assieme in modo che si possano indicare i legami del tirante. La dimensione del tirante richiesta in ogni punto è indicata con 6-XX dove XX rappresenta il numero di trefoli richiesto. Le linee che collegano l'etichetta delle dimensioni del trefolo ai punti di ancoraggio indicano le coppie di ancoraggi che fanno parte dello stesso cappio del tirante.





		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

*Figura 7-61: Vista in pianta e sezione trasversale degli ancoraggi del tirante del piatto D.*

I tiranti consistono di trefoli che a livello individuale sono zincati, lubrificati e ricoperti di una guaina in polietilene similmente a quelli utilizzati spesso in cavi per stralli a trefoli paralleli. I trefoli hanno una superficie di 150 mm<sup>2</sup> e una resistenza alla rottura ultima di 1860 MPa. Nelle canaline dei tiranti non verranno inghisate così da permetterne la sostituzione. I trefoli fuoriescono dalla fondazione della torre attraverso aperture nel piatto della base della torre e raggiungono la testa dell'ancoraggio attraverso tubi di ancoraggio in acciaio. Anche le canaline del tirante attraversano le aperture del piatto della base in modo da evitare il contatto tra il tirante e la malta al di sotto del piatto di base. Gli ancoraggi dei trefoli sono posti in coppette in acciaio riempite di grasso saldate all'estradosso della piastra di ancoraggio. Tale disposizione porta ad avere un tirante completamente incapsulato con barriere multiple anticorrosione. Le canaline dei tiranti potranno essere anche deumidificate con uno sforzo e costo aggiuntivi relativamente piccoli collegando i tubi di ancoraggio dei tiranti adiacenti a tubi in acciaio di piccolo diametro in modo da formare una canalina continua che attraversa tutti i tiranti nei quali si potrebbe pompare aria secca.

I tiranti variano per dimensione da 9 a 55 trefoli e i tiranti più grandi sono generalmente concentrati lungo le piastre A, B e E ove sono maggiori le forze di trazione. I tiranti sono stati progettati sulla base delle dimensioni di ancoraggi di tipo E e dei particolari in metallo del sistema VSL, in ogni caso ancoraggi simili possono essere forniti da altri fornitori. Ogniqualvolta è possibile i tiranti vengono posizionati a non meno di 400 mm dalla faccia verticale dell'irrigidimento/gamba della torre più vicina al fine di garantire lo spazio necessario al pensionamento iniziale. Nello spazio di 400 mm assicurato può essere posto il martinetto ZPE-1250 di VSL che è in grado di tendere un tirante 6-55. Come mostrato alla Figura 7-62 lo spazio disponibile per ancorare i tiranti richiesti all'intersezione dei piatti A, B e E è limitato e una luce di 400 mm non può essere garantita per tutti i tiranti. VSL ha confermato che i tiranti qui specificati possono essere installati e tesi utilizzando un martinetto monotrefolo ZPE-23FJ del sistema VSL che richiede solo 90 mm di luce. Questo martinetto può anche essere utilizzato per tiranti posti in aree della sezione trasversale della torre l'accesso alle quali può risultare molto più difficoltoso con un martinetto multitrefolo di maggiori dimensioni.

I tiranti sono dimensionati in modo da impedire che la base della torre si decomprima sotto l'azione di una delle combinazioni di carico allo SLU e SLIS nel corso della costruzione o a ponte completato. La decompressione della base della torre è stata scelta come stato limite di progetto per evitare le perdite di rigidezza rotazionale che possono accompagnare la decompressione. C'è



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

un certo margine per attenuare questo criterio in una successive fase di progetto, se la relazione di rigidità momento-rotazione non lineare è inserita nel modello di analisi globale. Ci si aspetta che ciò possa consentire un numero di tiranti di ancoraggio ridotto e una minore quantità di trefoli.

Gli ancoraggi dei tiranti sono collegati ai piatti principali della gamba della torre attorno ai quali sono in genere disposti simmetricamente. Il percorso di carico più forte e più diretto per le sollecitazioni della base della torre alla tensione che vanno dalla gamba della torre all'interno degli ancoraggi del tirante passa attraverso i piatti principali e gli irrigidimenti dell'ancoraggio piuttosto che attraverso gli irrigidimenti della gamba della torre e la conseguente flessione e taglio del piatto di base. Perciò si presuppone che tutte le sollecitazioni della base della torre alla tensione vengano trasferite agli ancoraggi dei tiranti attraverso i piatti principali e gli irrigidimenti dell'ancoraggio. I piatti principali della gamba della torre assicurano un'area sufficiente a sostenere tutte le tensioni massime alla tensione senza alcun contributo da parte degli irrigidimenti e perciò il percorso di carico supposto è attuabile.

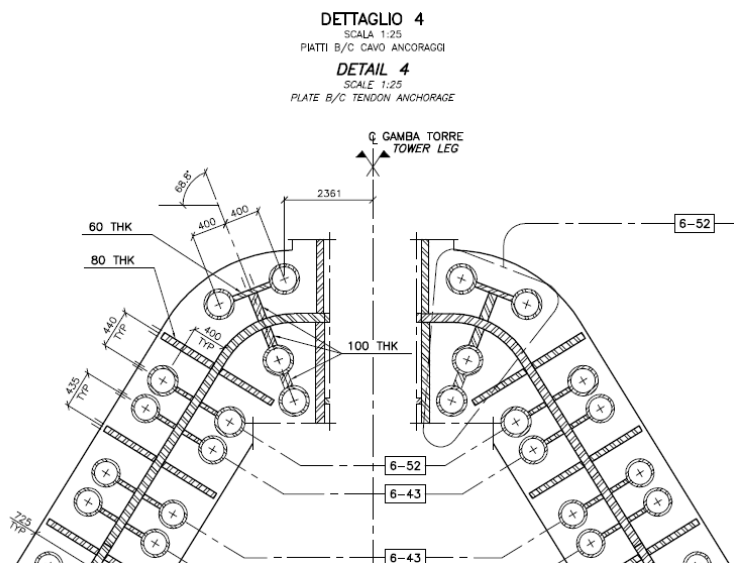


Figura 7-62: Ancoraggi del tirante all'intersezione dei piatti A, B e E.

I tiranti sono dimensionati sulla base di un'effettiva forza di tensione pari a:

$$F_{t,eff} = \frac{0.65 \cdot f_{pk}}{1.10} \cdot A_s$$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

ove  $f_{pk}$  è la resistenza alla rottura del tirante, 0,65 è la frazione della resistenza alla rottura effettiva dopo le perdite (frizione, set di ancoraggio, ecc.),  $A_s$  è l'area del tirante e 1,10 è un fattore di sicurezza assunto in modo da avere una maggiore sicurezza che la torre non si decomprima e perda rigidità sotto l'azione di carichi di rottura.

Le richieste di resistenza massima del tirante sono calcolate a partire dalle sollecitazioni alla tensione massime nel piatto che stando ancorando espresse come carico di rottura per larghezza unitaria del pannello a ogni irrigidimento longitudinale. Le richieste di resistenza massime a ponte completato sono calcolate per tutte le combinazioni di carico allo SLU e SLIS che governano la progettazione. Le richieste di resistenza massime nel corso della costruzione (torre indipendente o torre indipendente con tie-back) sono calcolate allo SLU tenendo conto di carichi del vento e sismici di livello SLS2. Le richieste di resistenza massime, le condizioni di governo della progettazione, il numero richiesto e fornito di tiranti e trefoli sono elencati per ogni irrigidimento longitudinale della torre Sicilia alla Tabella 7-9. I punti di disposizione degli irrigidimenti longitudinali sulla sezione trasversale della gamba della torre sono indicati alla Figura 7-10. Il numero di tiranti richiesto per ancorare le regioni angolari alle intersezioni dei piatti della gamba della torre sono stati calcolati separatamente. Le richieste di resistenza della torre Calabria sono simili. Le richieste di resistenza sui lati della campata principale e laterale della gamba della torre sono elencati separatamente.

Piatto	Irrigidimento	Massima forza di trazione (MN/m)	Condizione di governo della progettazione	No. di tiranti	Trefoli richiesti/ Tirante	Trefoli previsti / Tirante
<b>Lato campata principale</b>						
Piatto A	LS1	25.2	SLU- Ponte Completato	6	52	52
Piatto B	LS2	25.6	SLU- Ponte Completato	4	51	52
	LS3	22.4	Torre indipendente con Tie-Back	4	43	43
Piatto C	LS4	20.0	Torre indipendente con Tie-Back	4	38	38
	LS5	18.1	Torre indipendente con Tie-Back	4	35	35
	LS6	16.2	Torre indipendente con Tie-Back	4	30	30
Piatto D	LS7	10.3	SLIS-Ponte Completato	4	19	19
	LS8	9.0	SLIS-Ponte Completato	4	20	20
	LS9	7.6	SLIS-Ponte Completato	4	19	20
Piatto E	LS26	26.4	SLU- Ponte Completato	4	38	38
	LS27	21.4	Torre indipendente con Tie-Back	4	38	38
	LS28	16.8	Torre indipendente con Tie-Back	4	34	34
Piatto F	LS29	9.1	Torre indipendente con Tie-Back	4	19	19

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO			
Torre – Relazione tecnica specialistica		Codice documento PS0013_F0_ITA.doc		Rev F0	Data 20-06-2011

Piatto H	LS19	4.8	Torre indipendente con Tie-Back	4	11	11
	LS20	5.6	Torre indipendente con Tie-Back	4	11	11
Piatto G	LS18	3.8	Torre indipendente con Tie-Back	4	9	9
<b>Lato campata laterale</b>						
Piatto A	LS1	12.8	Torre indipendente	6	26	52
Piatto B	LS2	14.2	Torre indipendente	4	28	51
	LS3	12.7	Torre indipendente	4	25	29
Piatto C	LS4	11.2	Torre indipendente	4	22	22
	LS5	9.7	SLIS-Ponte completato	4	19	20
Piatto D	LS6	8.2	SLIS-Ponte completato	4	16	18
	LS7	7.0	SLIS-Ponte completato	4	13	15
Piatto E	LS8	7.2	Torre indipendente	4	16	17
	LS9	7.6	Torre indipendente	4	19	20
Piatto F	LS26	14.4	Torre indipendente	4	22	38
	LS27	11.8	Torre indipendente	4	21	38
Piatto H	LS28	9.0	Torre indipendente	4	19	34
	LS29	4.6	Torre indipendente	4	10	19
Piatto G	LS19	2.2	Torre indipendente	4	5	11
	LS20	2.6	Torre indipendente	4	5	11
Piatto G	LS18	1.6	Torre indipendente	4	4	9

*Tabella 7-9: Richiesta di resistenza e tiranti richiesti/forniti sulla base della torre Sicilia.*

Le richieste di resistenza sul lato della campata principale della gamba della torre sono generalmente governate dai carichi del vento o sismici sulla torre indipendente con tie-back; in ogni caso i carichi sismici allo SLU a ponte completato governano le richieste di resistenza sulle fibre longitudinali estreme della gamba della torre sui piatti A, B e E e i carichi del vento allo SLIS a ponte completato governano le richieste di resistenza sulle fibre trasversali estreme della gamba della torre sul piatto D. Le richieste di resistenza massime sul lato della campata principale della gamba della torre sono tipicamente maggiori di quelle sul lato della campata laterale a causa del tie-back della torre. Per i piatti della gamba della torre governati da carichi longitudinali, le richieste di resistenza della campata principale sono circa il doppio dei corrispondenti carichi della campata laterale. Per i piatti della gamba della torre governati da carichi trasversali la differenza è minore.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Le richieste di resistenza sul lato della campata laterale della gamba della torre sono generalmente governate dai carichi del vento sulla torre indipendente ad eccezione delle richieste di resistenza sul piatto D che sono governate dai carichi del vento allo SLIS a ponte completato.

In alcuni punti sulla sezione trasversale della gamba della torre, quali le regioni angolari e sul piatto E vicino al piatto A non c'è spazio sufficiente per ancorare il numero combinato di tiranti per la stessa regione angolare e gli irrigidimenti longitudinali adiacenti. In queste aree il numero di tiranti è stato consolidato e la dimensione dei tiranti previsti è stata aumentata per permettere la disposizione degli ancoraggi.

Il collegamento a coppia dei tiranti tra gli ancoraggi della campata principale e laterale del piatto A e E ha portato a un certo conservatorismo sul lato della campata laterale dove le richieste di resistenza sono di molto inferiori. Le maggiori quantità di trefoli risultanti da tale conservatorismo possono potenzialmente essere compensate tendendo questi tiranti da solo lato dell'ancoraggio della campata principale. Tale ottimizzazione può essere ulteriormente approfondita in un successiva fase di progettazione.

I tubi di ancoraggio del tirante sono progettati per la massima forza del tirante che si ha nel corso dell'iniziale tensione del tirante. La forza di tensione del tirante è definita in  $0.78 \cdot f_{pk}$ , in ogni caso i tubi sono progettati in modo conservativo, considerando una possibile sovratensione accidentale, per  $0.90 \cdot f_{pk}$ . I tubi sono corti e robusti e quindi sono dimensionati in base alla loro resistenza allo snervamento. Le dimensioni del tubo previste per ogni tirante sono elencate nella Tabella 7-10.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Numero di Trefoil	Diametro Esterno del Tubo (mm)	Spessore del Tubo (mm)
0 - 12	200	15
13 - 19	225	20
20 - 22	250	20
23 - 27	275	25
28 - 31	275	25
32 - 37	300	30
38 - 43	325	30
44 - 55	350	35

Tabella 7-10: Dimensioni del tubo di ancoraggio.

### 7.5.2 Irrigidimento piatto

L'irrigidimento della piastra di base della torre consiste di irrigidimenti verticali della piastra di base e di irrigidimenti dell'ancoraggio. Gli irrigidimenti della piastra di base sono gli irrigidimenti a forma di aletta saldati ai piatti della gamba della torre opposti agli irrigidimenti longitudinali della gamba della torre come mostrato alla Figura 7-63 o tra gli irrigidimenti longitudinali e gli irrigidimenti dell'ancoraggio per ridurre luce della piastra di base. Gli irrigidimenti della piastra di supporto riportano le pressioni di contatto afferenti della piastra di base ai piatti della gamba della torre. Alla base della torre gli irrigidimenti longitudinali della torre sono affondati in modo da sostenere entro 50 mm dall'estremità della piastra di base. Gli irrigidimenti dell'ancoraggio verticali lavorano in modo simile agli irrigidimenti della piastra di supporto e collegano i tubi di ancoraggio del tirante ai piatti della gamba della torre.

Gli elementi di irrigidimento del piatto sono progettati per sollecitazioni combinate di taglio e flessione in conformità alla norma EN 1993-1-5 Paragrafo 10 utilizzando l'equazione di stato limite:

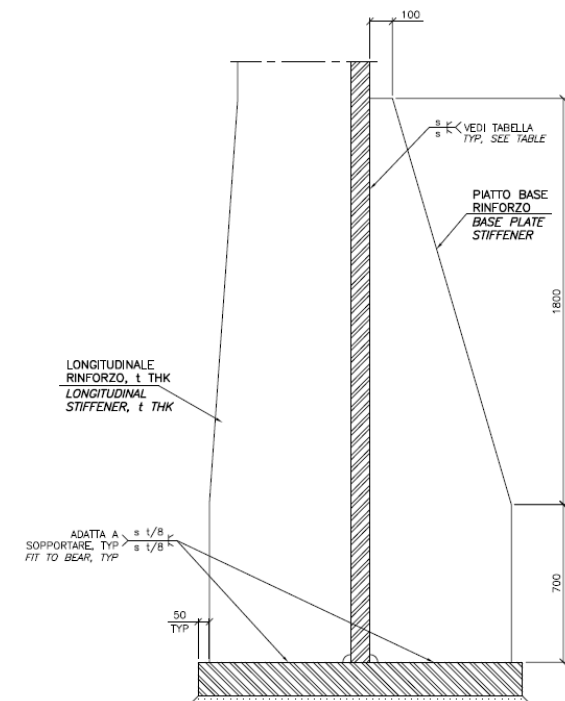
$$\left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_x \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\tau_{Ed}}{\chi \cdot f_y / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq 1.0$$

dove  $\sigma_{x,Ed}$  è la sollecitazione di pressoflessione,  $\rho_x$  è il fattore di riduzione della sollecitazione di compressione per la snellezza del piatto,  $f_y$  è la tensione di snervamento,  $\tau_{Ed}$  è lo sforzo di taglio,  $\chi$  è il fattore di riduzione dello sforzo di taglio per la snellezza del piatto e  $\gamma_{M1}$  è il fattore parziale per il materiale. Gli irrigidimenti sono alti 1500 mm e hanno uno spessore che varia da 40 mm a 100 mm a seconda dell'area della piastra di base da sostenere. I corrispondenti fattori di riduzione

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

della sollecitazione di compressione variano da 0,53 e 1,0. Per tutti gli spessori dell'irrigidimento il fattore di riduzione dello sforzo di taglio è pari a 1,0.

Gli irrigidimenti sono dimensionati per sostenere unicamente le pressioni di contatto dell'area tributaria causati da carichi applicati esternamente. Le pressioni di contatto causate da forze di tensioni nei tiranti dell'ancoraggio sono bilanciate dalla forza di compressione applicata all'estradosso del tubo di ancoraggio e quindi tali forze non vengono ritrasmesse attraverso gli irrigidimenti ai piatti della gamba della torre. Si presuppone che le pressioni di contatto entro 150 mm delle facce del piatto della gamba della torre siano portate attraverso lo spessore della piastra di base direttamente nei piatti della gamba della torre senza causare tagli o flessioni degli irrigidimenti. Le pressioni di contatto all'esterno di questa zona devono essere trasferite attraverso gli irrigidimenti. Per gli irrigidimenti di ancoraggio si verifica pure che vi sia la resistenza al taglio necessaria a ritrasmettere l'effettiva forza di trazione nel tirante ancorato al piatto della gamba della torre come richiesto dal percorso di carico descritto in precedenza.



*Figura 7-63: Sezione trasversale della base della torre che mostra l'irrigidimento longitudinale e l'irrigidimento della piastra di base.*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

### 7.5.3 Piastra di base

La piastra di base è una piastra in acciaio di 150 mm di spessore che distribuisce le forze di compressione in tutti i piatti della gamba della torre e negli irrigidimenti longitudinali, nonché le forze di pre-tensione dei tiranti di ancoraggio pressoché uniformemente al baggiolo di malta 40 mm di spessore che distribuisce ulteriormente il carico alla sottostante fondazioni in calcestruzzo della torre. La geometria piana della piastra di base viene scelta per sostenere tutti gli irrigidimenti longitudinali e limitare la sollecitazione da appoggio sull'estradosso della fondazione in calcestruzzo a circa 60 MPa. La larghezza della piastra di base è 725 mm all'esterno dei piatti esterni della gamba della torre e all'interno della gamba della torre varia da un minimo di 675 mm lungo i piatti G e H a un massimo di 800 mm lungo il piatto A. La larghezza della piastra di base è incrementata localmente attorno ai tiranti dell'ancoraggio isolati lungo il piatto A come mostrato alla Figura 7-64.

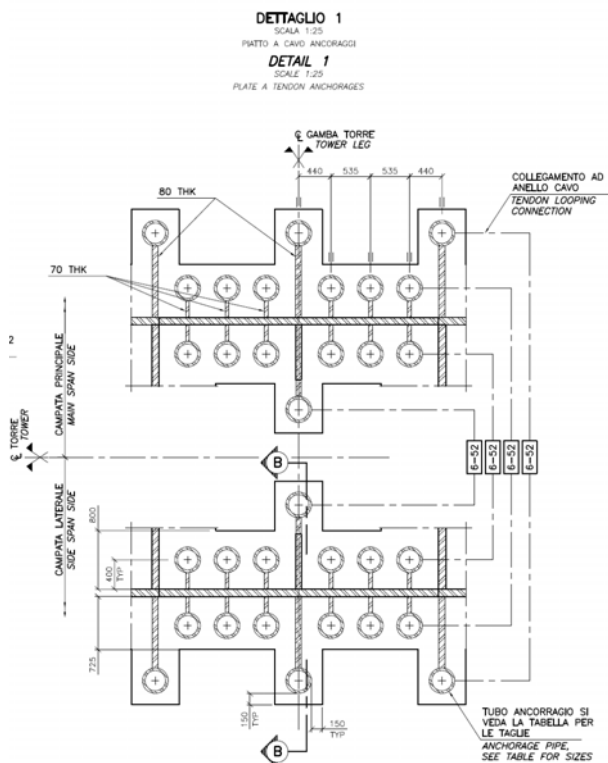


Figura 7-64: Allargamento locale della piastra di base lungo il piatto A.

La piastra di base fornita ha una resistenza al taglio di progetto di 29,3 MN/m e una resistenza al momento plastico di 1,90 MNm/m. Le richieste di resistenza della piastra di base si basano sulle

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

pressioni di contatto massime e le luci tra irrigidimenti adiacenti e le lunghezze della trave di sbalzo oltre le punte degli irrigidimenti e dei tubi di ancoraggio. Per le lunghezze dalla trave di sbalzo le richieste di resistenza al taglio e al momento sono calcolate nel seguente modo:

$$V = P \cdot L \text{ per larghezza unitaria}$$

$$M = V \cdot L/2 \text{ per larghezza unitaria}$$

dove  $P$  è la pressione di contatto e  $L$  è la lunghezza della trave di sbalzo. Per luci continue le richieste di resistenza al taglio e al momento sono calcolate nel seguente modo:

$$V = P \cdot L/2 \text{ per larghezza unitaria}$$

$$M = P \cdot L^2/10 \text{ per larghezza unitaria}$$

La piastra di base viene conservativamente assunta per estendersi solo in un'unica direzione tra gli irrigidimenti della gamba della torre e dato che la base è continua attraverso gli irrigidimenti, sia il momento flettente negativo che positivo saranno inferiori a quelli assunti per la progettazione.

Le pressioni di contatto massime si hanno lungo i piatti A, B, C e E, per i quali sono maggiori gli spessori del piatto della gamba della torre e le dimensioni dell'irrigidimento longitudinale. Per le pressioni di contatto massime che sono circa 60 MPa, la piastra di base è in grado di raggiungere circa 500 mm che è maggiore o uguale alla luce massima lungo i piatti con il carico maggiore. La lunghezza massima della trave a sbalzo della piastra di base è 225 mm la cui resistenza alla pressione di contatto è circa 65 MPa.

La resistenza al taglio dell'ancoraggio di base è fornita dalla frizione tra la piastra di base e il baggiolo di malta sottostante. La massima forza di taglio della base della torre è 158 MN ed è causata dalla combinazione di carichi sismici longitudinali allo SLIS. Presupponendo in via conservativa che la minore forza di compressione assiale della gamba della torre di circa 1,000 MN agisca contemporaneamente alla massima forza di taglio e ignorando la compressione aggiuntiva derivante dalle forze di precompressione del tirante, la resistenza al taglio dell'ancoraggio della base della torre è di 500 MN risultante da un coefficienti di utilizzo massimo di 0,32. Questo basso coefficiente di utilizzo indica che il coefficiente di attrito di progetto tra la piastra di base e l'inghisaggio potrebbe essere tanto basso fisso a 0,2 e assicurare ancora un'idonea resistenza al taglio alla base della torre.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

## 7.6 Varie Considerazioni di Progetto

### 7.6.1 Accesso

Le gambe e i trasversi della torre sono dotati di sistemi di accesso che facilitano l'ispezione e la manutenzione di tutti i componenti della torre. I sistemi di accesso consistono di scale a pioli nelle quattro celle triangolari, ascensori e scale a pioli di emergenza in entrambe le celle delimitate dai piatti A, E, F e G e di una scala a rampe nella cella centrale. Aperture di accesso nei piatti della gamba della torre per permettere gli spostamenti all'interno delle sette celle sono previste in una sezione trasversale per concio della gamba della torre e in punti aggiuntivi secondo quanto richiesto per assicurare l'accesso ai trasversi, ai carriponte di ispezione della gamba della torre, le corsie di manutenzione dell'impalcato sospeso, la base della torre e le selle del cavo principale. Intagli circolari di 1,000 mm di diametro sono previsti in ogni diaframma a piatto triangolare per permettere liberi spostamenti in verticale all'interno di tali celle. L'unica apertura di accesso al trasverso è il portello presente nella flangia superiore del trasverso 3 che permette l'accesso al cavo principale. La disposizione tipica delle aperture di accesso previste in ogni concio della gamba della torre è mostrata alla Figure 7-65. Tutte le aperture di accesso tipiche sono larghe 800 mm e alte 2,000 mm.

Il progetto della torre ha preso in considerazione la presenza delle aperture di accesso richieste nei principali piatti della gamba della torre e del trasverso. Poiché le aperture di accesso sono poste solo ad altezze discrete, risulterebbe troppo economicamente gravoso aumentare lo spessore di tutti i piatti interessati delle gambe della torre per compensare le aree rimosse per la realizzazione delle aperture, perciò i piatti interessati sono rinforzati attorno alle aperture di accesso come mostrato alla Figure 7-66. Il rinforzo tipicamente consiste di una coppia di piatti di 200 mm di larghezza e dello spessore corrispondente a quello del piatto interessato, saldato da entrambi i lati dell'apertura per rimpiazzare l'area rimossa. I piatti di rinforzo si estendono per un tratto sufficiente sopra e sotto l'apertura per assicurare che il carico sul piatto interessato possa essere trasferito ai piatti di rinforzo prima dell'apertura. Irrigidimenti trasversali del piatto, posti tra gli irrigidimenti longitudinali adiacenti all'apertura, sono previsti sopra e sotto all'apertura. Il rinforzo mostrato alla Figure 7-66 è completamente limitato all'interno dello spazio adiacente agli irrigidimenti trasversali della gamba della torre, cosa che risulta conveniente per la costruzione; in ogni caso il rinforzo di alcune delle aperture nei piatti esterni di maggiore spessore deve estendersi

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011	

oltre gli irrigidimenti trasversali adiacenti in modo che una lunghezza di saldatura sufficiente possa essere prevista per trasferire la forza necessaria al rinforzo.

Le quote proposte delle aperture di accesso e la disposizione dei rinforzi sono state verificate per soddisfare le tipiche prescrizioni strutturali; nondimeno il posizionamento verticale delle aperture riguardanti le necessarie piattaforme di accesso e gli irrigidimenti trasversali richiedono ulteriore attenzione nella fase di progettazione di dettaglio.

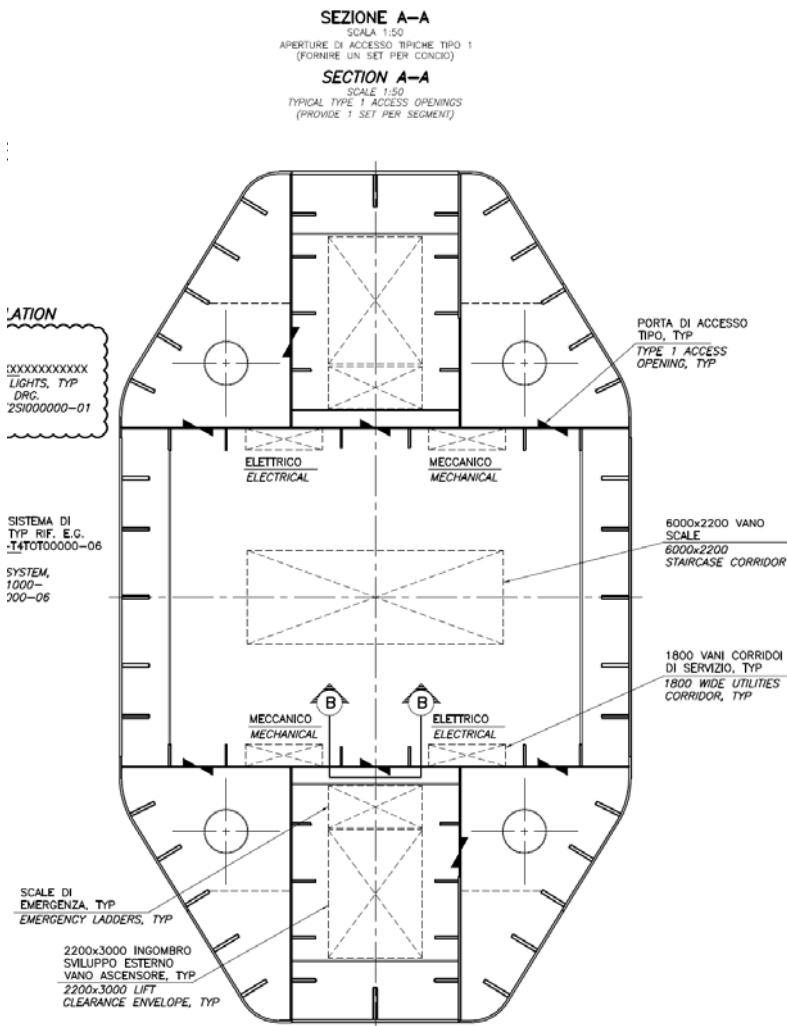


Figure 7-65: Tipiche aperture di accesso nella sezione trasversale della gamba della torre.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

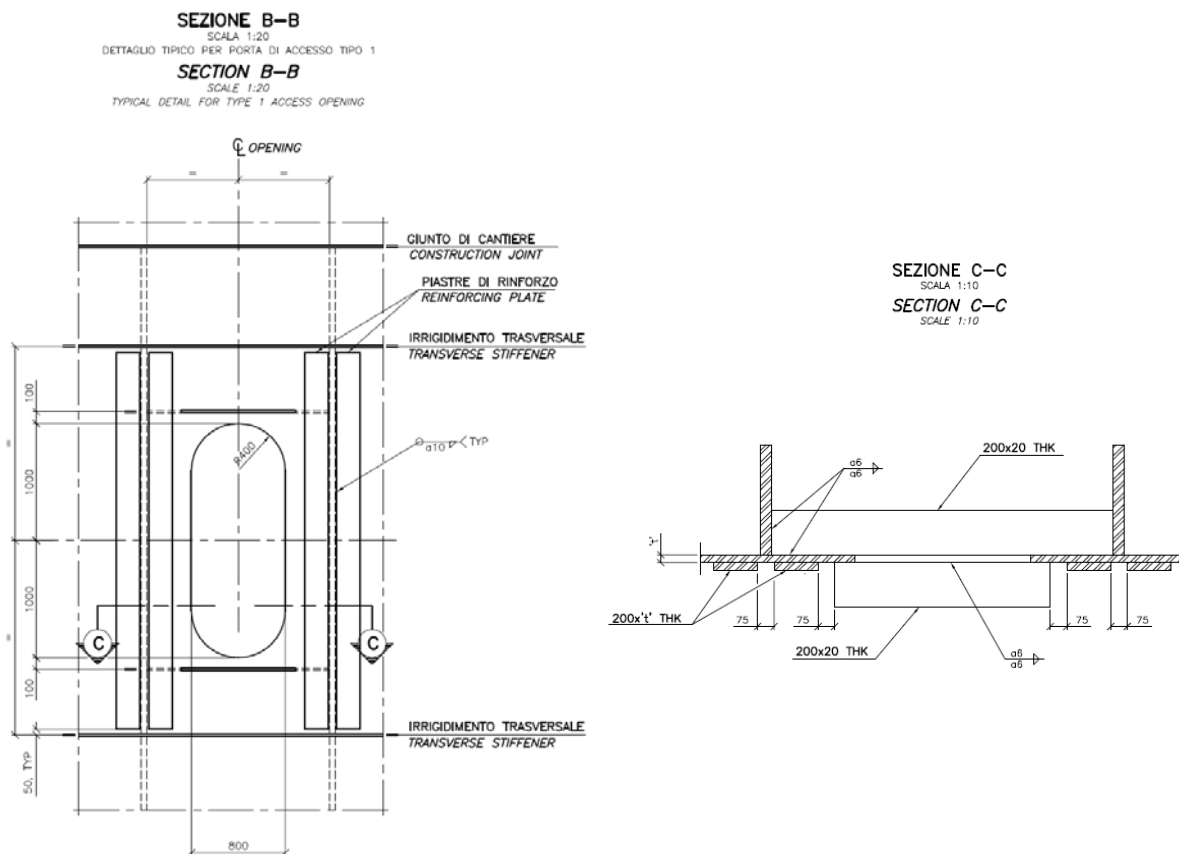


Figure 7-66: Tipico rinforzo attorno alle aperture di accesso.

## 7.6.2 Collegamento di componenti non strutturali

I collegamenti di componenti non strutturali, quali i sistemi di accesso, le infrastrutture elettriche e meccaniche verso la struttura della torre non sono stati dimensionati in questa fase del progetto. Tuttavia viene anticipato che i collegamenti passeranno attraverso le piastre di base con saldatura alla struttura della torre. Le piastre di base avranno fori chiusi o piatti a linguetta per l'attacco dei componenti non strutturali.

## 7.6.3 Interfacce elettriche e meccaniche

I cavi elettrici e le tubazioni meccaniche si inseriscono nelle gambe della torre attraverso un albero posto nella fondazione in calcestruzzo. Una volta all'interno delle gambe della torre i componenti vengono deviate nei corridoi dedicati lungo i piatti G e H nella cella centrale 12 m x 8 m, come mostrato alla Figure 7-65. I corridoi sono generalmente liberi da ostruzioni ad eccezione dei

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

diagrammi di tipo 2 nel punto di connessione delle flange superiore e inferiore del trasverso con le gambe della torre.

Tutti i piatti della struttura della torre attraverso i quali devono passare tubi e cavi elettrici saranno rinforzati localmente per rimpiazzare ogni zona in acciaio rimossa dall'intaglio.

Ingressi dei tubi di drenaggio sono previsti alle quote intermedie della torre come indicato sui disegni meccanici e un pozzetto di raccolta e un tubo di drenaggio verranno annegati nella fondazione in calcestruzzo alla base della gamba della torre per scaricare l'acqua in eccesso derivante da perdite dei tubi, lavaggio o attività antincendio.

#### **7.6.4 Deumidificazione**

Le gambe della torre e i trasversi sono deumidificati da due sistemi di deumidificazione indipendenti per ogni torre. Il primo sistema deumidifica una gamba e il trasverso 1, mentre il secondo sistema deumidifica l'altra gamba e i trasversi 2 e 3. I gruppi di deumidificazione sono posti sui trasversi 1 e 2. Il sistema di deumidificazione richiede specifiche aperture di accesso che devono rimanere aperte o sigillate a seconda di quanto definito sui disegni del sistema di deumidificazione.

## **8 Sintesi**

Le gambe della torre e i trasversi consistono di elementi in piatto di acciaio irrigiditi longitudinalmente e trasversalmente. I pannelli in acciaio e gli elementi di irrigidimento sono verificati utilizzando il metodo della larghezza equivalente in accordo alle disposizioni della norma EN 1993-1-5. Gli elementi della gamba della torre e il trasverso sono verificati allo SLU e SLIS. Lo stato limite di servizio non governa la progettazione di questi elementi pertanto non sono stati eseguiti controlli allo SLS. Il progetto della gamba della torre è governato da combinazioni di carichi sismici allo SLU e carichi del vento allo SLIS. I coefficienti di utilizzo della gamba della torre variano in genere tra 0,95 e 1,0 per la combinazione di carico di governo della progettazione. I progetti del trasverso sono governati da carichi del vento allo SLIS con sollecitazioni critiche risultanti da una combinazione di taglio e pressoflessione. I coefficienti di utilizzo massimi del trasverso ammontano a circa 0,9 per ciascun trasverso e variano in maniera più ampia rispetto alla

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

gamba della torre a causa dell'altezza variabile della sezione e della differenza nelle distribuzioni dei momenti e degli sforzi di taglio di governo della progettazione.

L'ancoraggio di base della torre consiste di tiranti multi-trefolo precompressi, irrigidimento locale del piatto della gamba e di una piastra di base in acciaio di spessore. La pretensione dell'ancoraggio di base viene verificata per assicurare che sia sufficiente a evitarne la depressione sotto l'azione dei carichi allo SLS, SLU e SLIS (sollecitazione di trazione al di sotto della piastra di base). Le dimensioni di tiranti e altri componenti dell'ancoraggio di base sono in genere governati da carichi SLS2 nel corso della costruzione e allo SLU/SLIS a ponte completato.

I componenti della torre sono valutati per stato limite alla fatica (SLF) considerando gli effetti del carico ferroviario e il carico del vento a livello di fatica (solo trasversi). Le sollecitazioni di fatica sono verificate perché siano inferiori al limite di sollecitazione per la categoria del dettaglio e il numero anticipato dei cicli di sollecitazione.

L'analisi della torre e le procedure di verifica sono in genere in accordo con i principi di progetto e NTC08 integrati a seconda delle necessità dai diversi Eurocodici.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

## 9 Allegato A: Confronto delle storie temporali ed effetti della forza sismica dello spettro di risposta

Nella presente appendice, i risultati sismici dettagliati delle storie temporali SLU della gamba della torre derivati da ogni storia temporale di input, sono presentati con i risultati medi utilizzati per il progetto e i risultati dell'analisi sismica dello spettro di risposta (RSA).

I risultati dell'analisi per la torre della Sicilia, sono mostrati nelle Figure da A-1 a A-5. In ogni figura, i valori massimi positivi e negativi per ogni input di storia temporale, sono rilevati con lo stesso colore. Gli effetti della forza media della storia temporale sono rappresentati dalla linea nera e i risultati RSA sono rappresentati dalla linea nera tratteggiata. I risultati delle storie temporali tracciati, sono gli effetti dominanti della combinazione longitudinale o trasversale dominante (basata su  $(1.0 \text{ or } 0.8) \times \text{Longitudinale} + (0.8 \text{ or } 1.0) \times \text{Trasversale} + 0.75 \times \text{Verticale}$ ). I risultati RSA tracciati sono gli effetti dominanti delle combinazioni dominanti longitudinali, trasversali o verticali (basato su  $(1.0 \text{ or } 0.3 \text{ or } 0.3) \times \text{Longitudinale} + (0.3 \text{ or } 1.0 \text{ or } 0.3) \times \text{Trasversale} + (0.3 \text{ or } 0.3 \text{ or } 1.0) \times \text{Verticale}$ ).

L'accordo fra gli effetti della forza delle storie temporali e gli effetti della forza RSA è generalmente buono con i risultati RSA in generale entro il range dei risultati delle storie temporali. Il chiaro disaccordo fra storia temporale e le forze assiali RSA rivela alcuni dei limiti del metodo RSA. I massimi carichi assiali RSA della torre di circa 600 MN (negativi e più compressivi) sono causati dalla combinazione verticale dominante; la domanda assiale massima dalla combinazione trasversale dominante è di circa 450 MN e quella della combinazione longitudinale dominante è 385 MN; entrambe sono maggiormente in accordo con i risultati della storia temporale. I maggiori carichi assiali sismici nelle gambe delle torri sono causati da modi verticali che in realtà sono fortemente smorzati dall'interazione suolo-struttura. Sebbene la RSA con uno smorzamento costante del 5% affronti sufficientemente il comportamento della superstruttura e fornisca uno smorzamento ragionevolmente rappresentativo per prevedere i carichi a taglio e flessurali nelle gambe delle torri, essa sottovaluta lo smorzamento presente per i modi verticali della torre. Il progetto di gara RSA considerava lo smorzamento modale composito per cui lo smorzamento di un particolare modo era calcolato come media ponderata dei valori di smorzamento associati ai movimenti di particolari componenti della struttura nel modo. Questo approccio risultava in un rapporto di smorzamento modale fino al 18% ed un migliore accordo con le forze assiali previste dalla storia temporale e RSA. Dunque non ci si può aspettare che i risultati della storia temporale e

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

della forza assiale RSA concordino come accade per altri effetti di forza, ed i risultati delle analisi delle storie temporali sono più adeguati.

I coefficienti di variazione (COV) per gli effetti di forza della storia temporale della gamba della Sicilia, sono mostrati in Figura A-6. L'output grezzo dall'analisi delle storie temporali, suggerisce COV generalmente compresi fra il 10% ed il 20% per ogni effetto di forza sull'altezza della torre. Sebbene questi valori siano ragionevoli e concordino con quanto atteso per una analisi delle storie temporali non lineare completata utilizzando moti di input parzialmente artificiali, essi devono essere considerati alla luce della dispersione dei moti di input, come descritto nei Principi di Progetto Generale Sezione 5.2.4. La dispersione degli input delle storie temporali contribuisce alla variabilità delle risposte delle storie temporali. Questo contributo deve essere considerato al momento della valutazione delle caratteristiche statistiche delle risposte della torre agli otto input. Considerando il COV 6% nei moti di input, basato su uno spettro smorzato del 5%, o il COV 12% basato sullo spettro smorzato equivalente del 2%, i COV mostrati in Figura A-6 sono limitati e soddisfano i requisiti di GCG.F.05.03 Sezione 5.1 per l'utilizzo dei risultati medi per il progetto.

Le Figura A-7 a Figura A-11 mostrano i risultati delle analisi per la torre della Calabria. I commenti sugli output per la torre della Sicilia si applicano egualmente all'output per la torre della Calabria.

I coefficienti di variazione per gli effetti della forza delle storie temporali della gamba della torre della Calabria, sono mostrati in Figura A-12. I COV sono tipicamente leggermente maggiori di quelli mostrati per la torre della Sicilia. Tuttavia, similmente alla torre della Sicilia, quando considerata alla luce della variabilità dei moti di input, la dispersione dell'output è limitata e ragionevole per il tipo di analisi condotta.

Al termine di questo appendice, nelle Figura A-13 ad Figura A-36, sono riportate le tracce alla base della torre e le forze assiali del segmento 17 della gamba della torre, i momenti longitudinali e i momenti trasversali per entrambe le torri come funzione del tempo per ciascuno degli input delle storie temporali della Sicilia e della Calabria.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

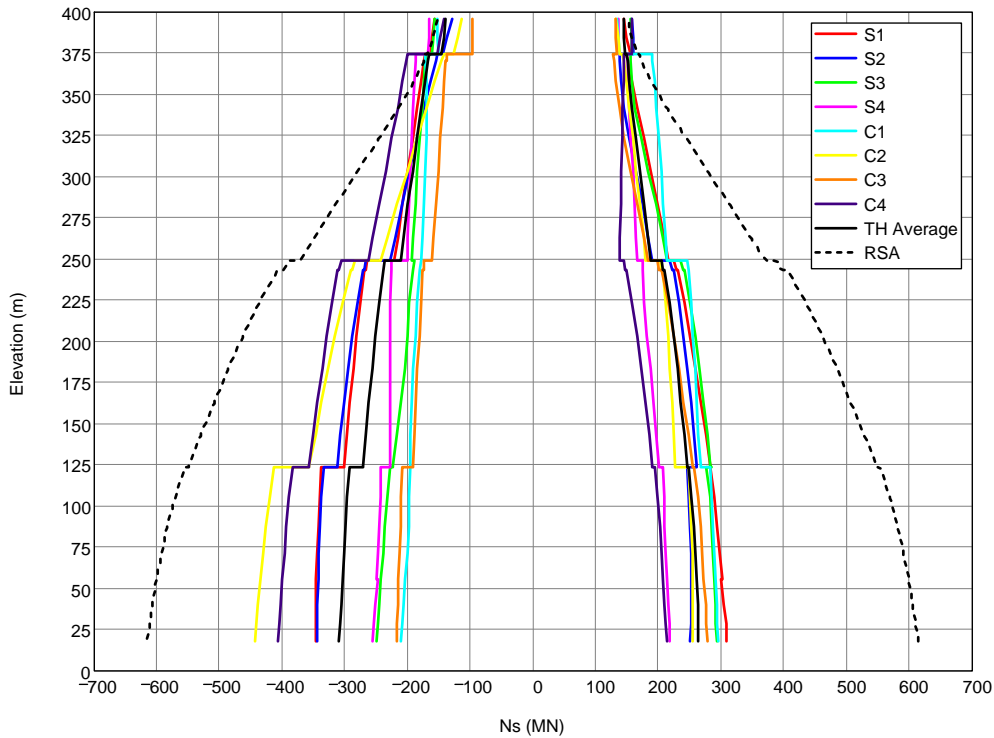


Figura A-1: Carichi assiali sismici, torre Sicilia.

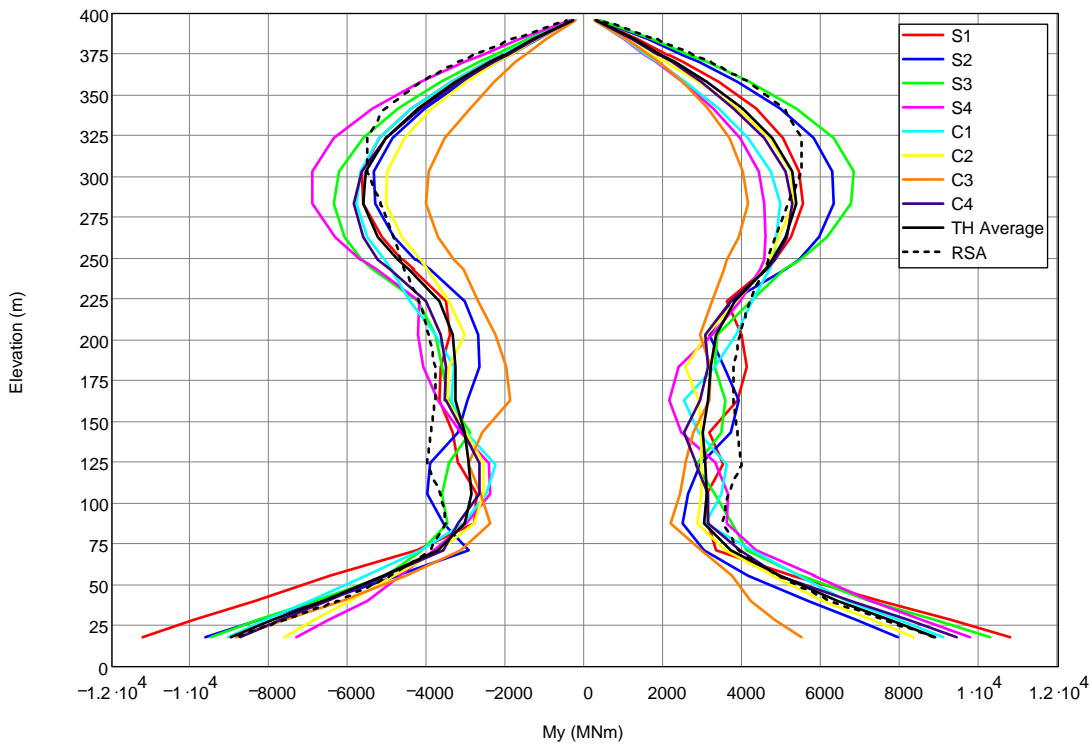


Figura A-2: Momenti longitudinali sismici, torre Sicilia.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

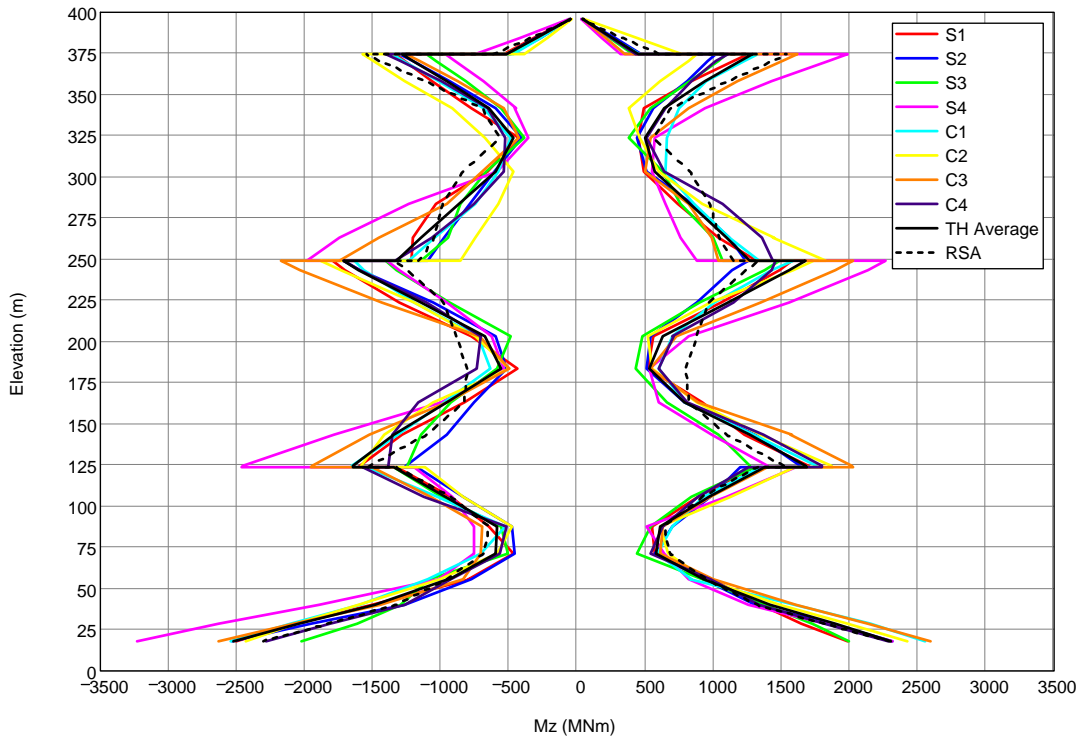


Figura A-3: Momenti trasversali sismici, torre Sicilia.

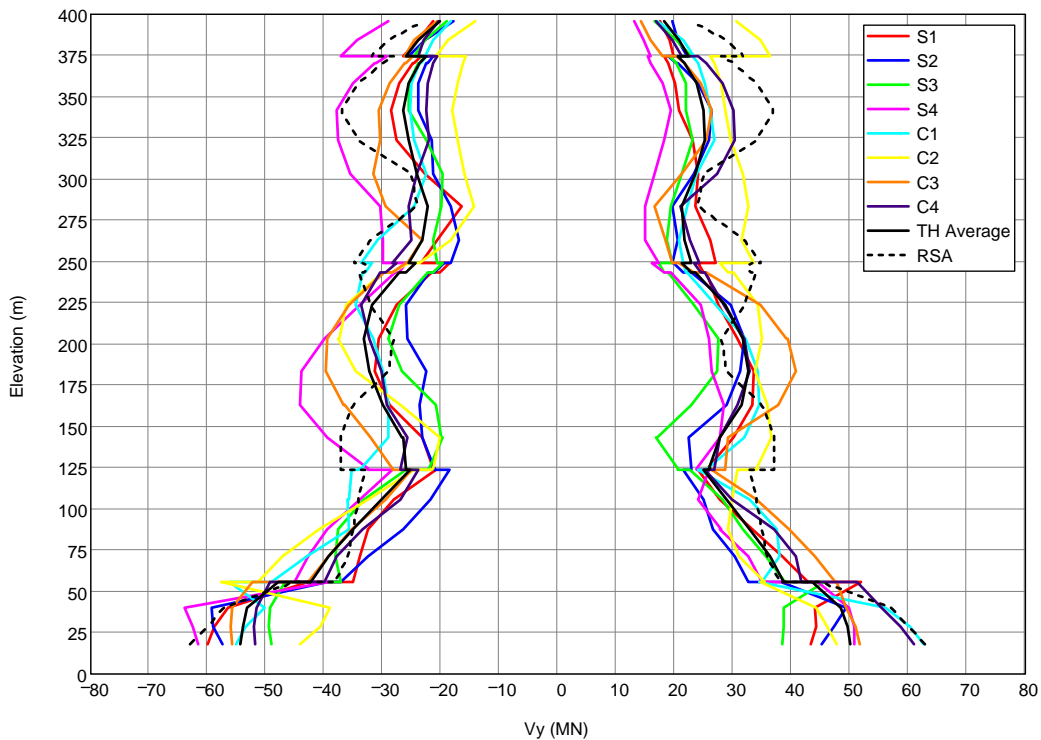


Figura A-4: Forze di taglio trasversali sismiche torre Sicilia.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

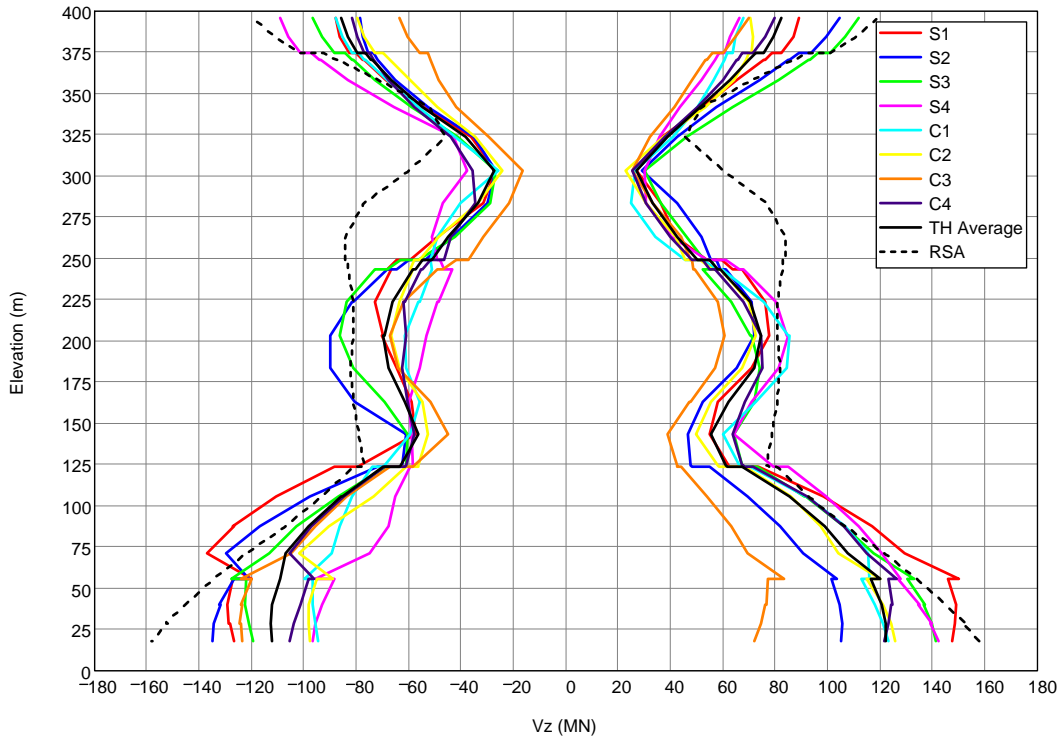


Figura A-5: Forze di taglio longitudinali sismiche torre Sicilia.

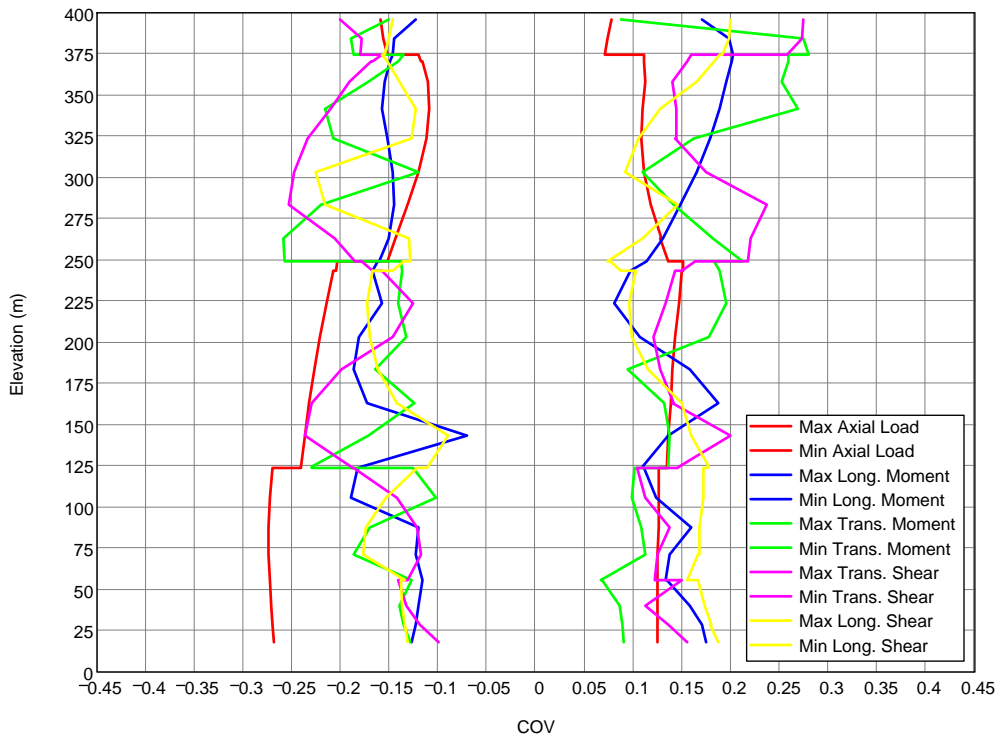


Figura A-6: Coefficienti di variazione per l'output delle storie temporali della torre della Sicilia.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

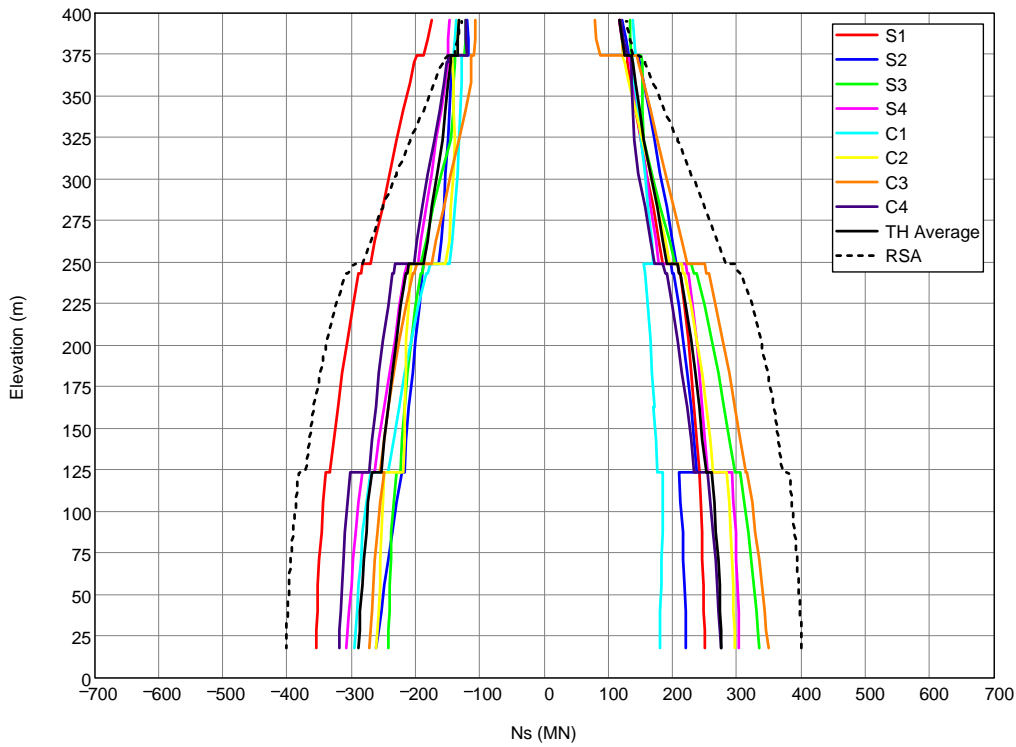


Figura A-7: Carichi assiali sismici, torre Calabria.

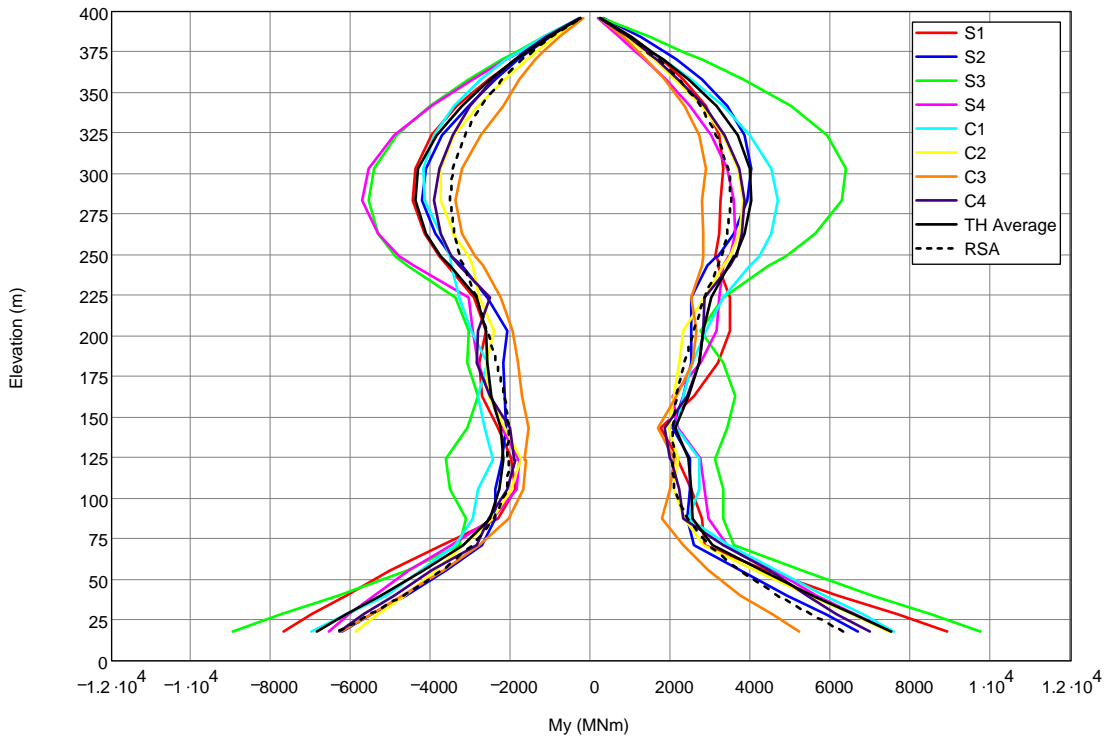


Figura A-8: Momenti longitudinali sismici, torre Calabria.

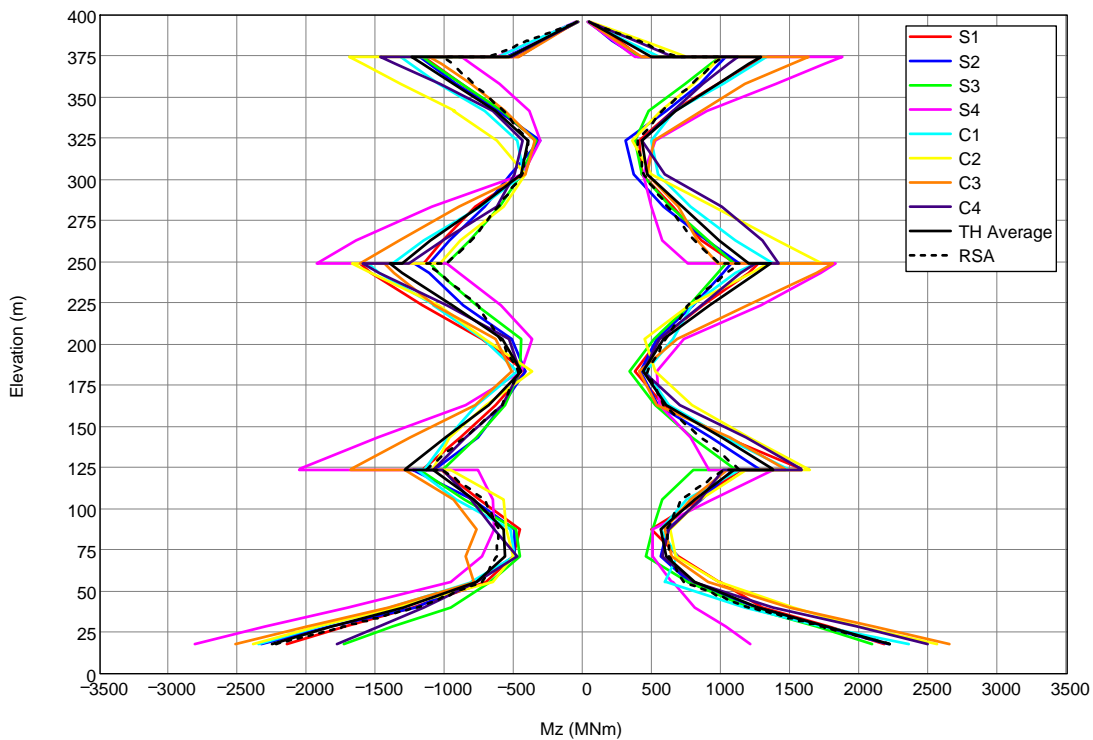


Figura A-9: Momenti trasversali sismici, torre Calabria.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

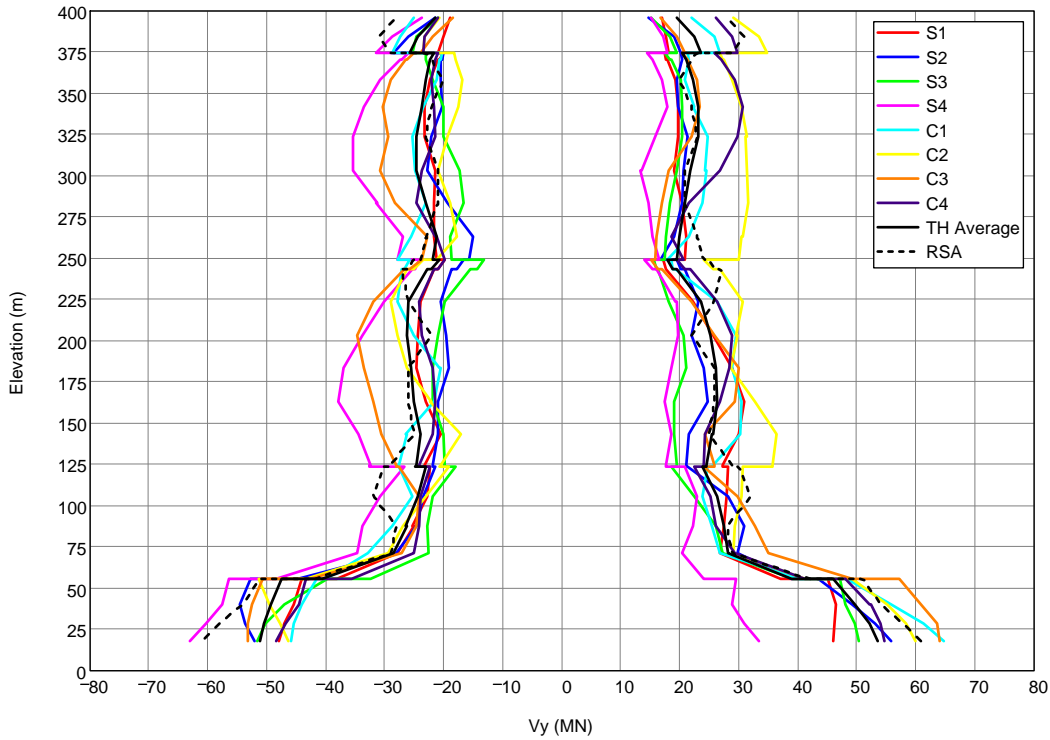


Figura A-10: Forze di taglio trasversali sismiche torre Calabria.

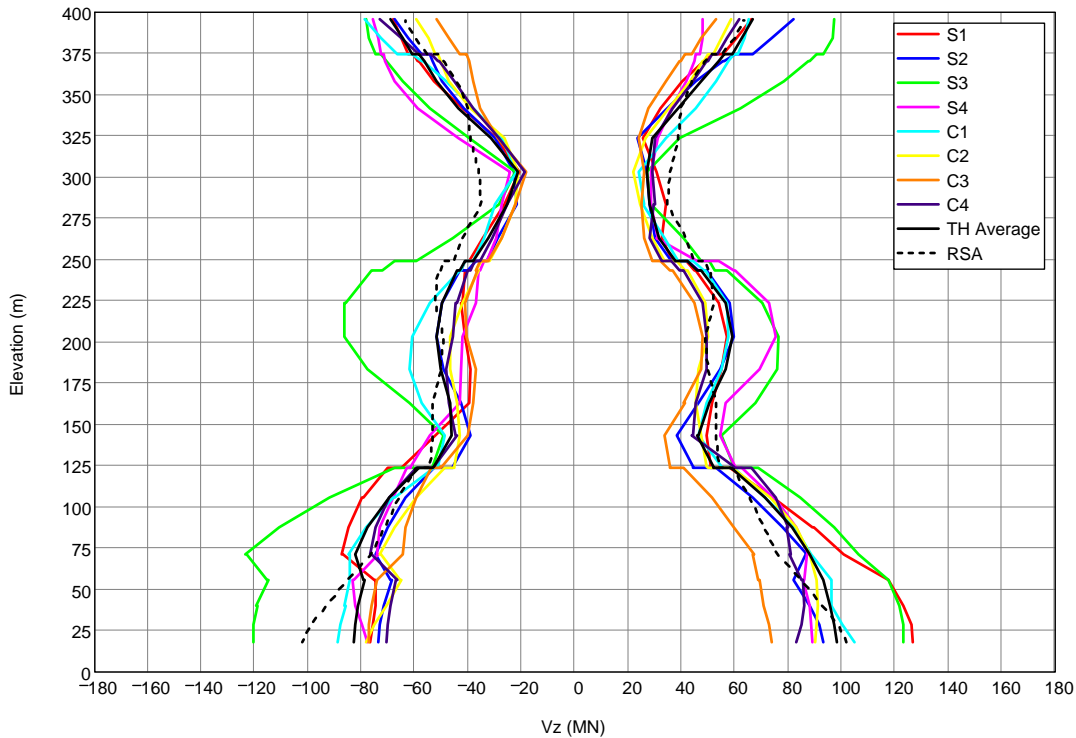


Figura A-11: Forze di taglio longitudinali sismiche torre Calabria.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011	

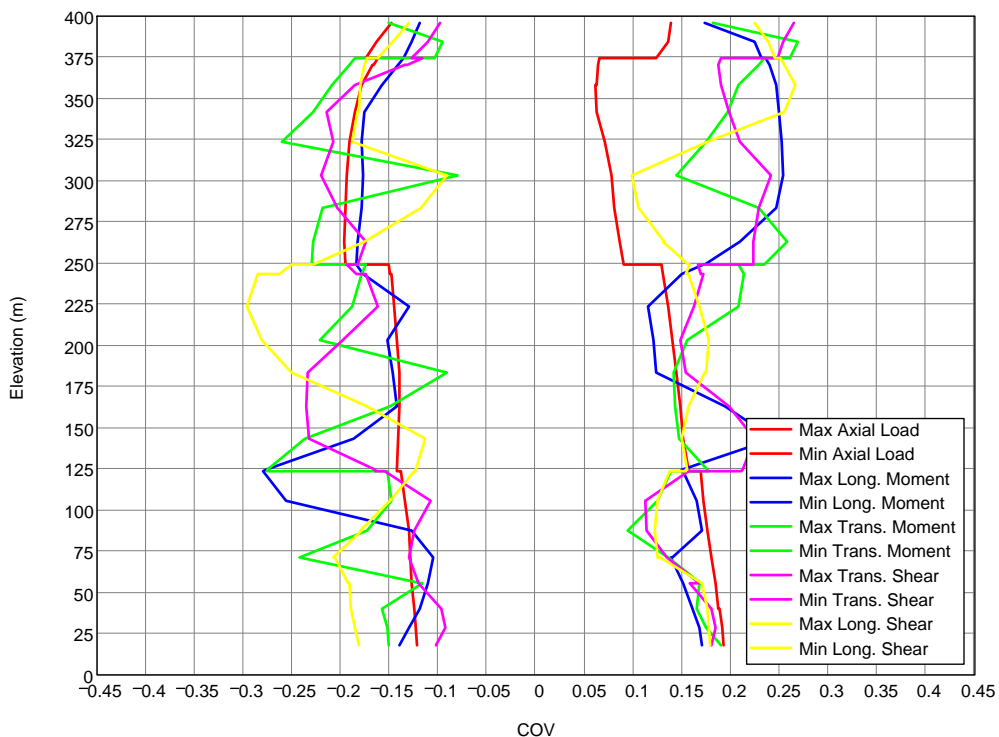
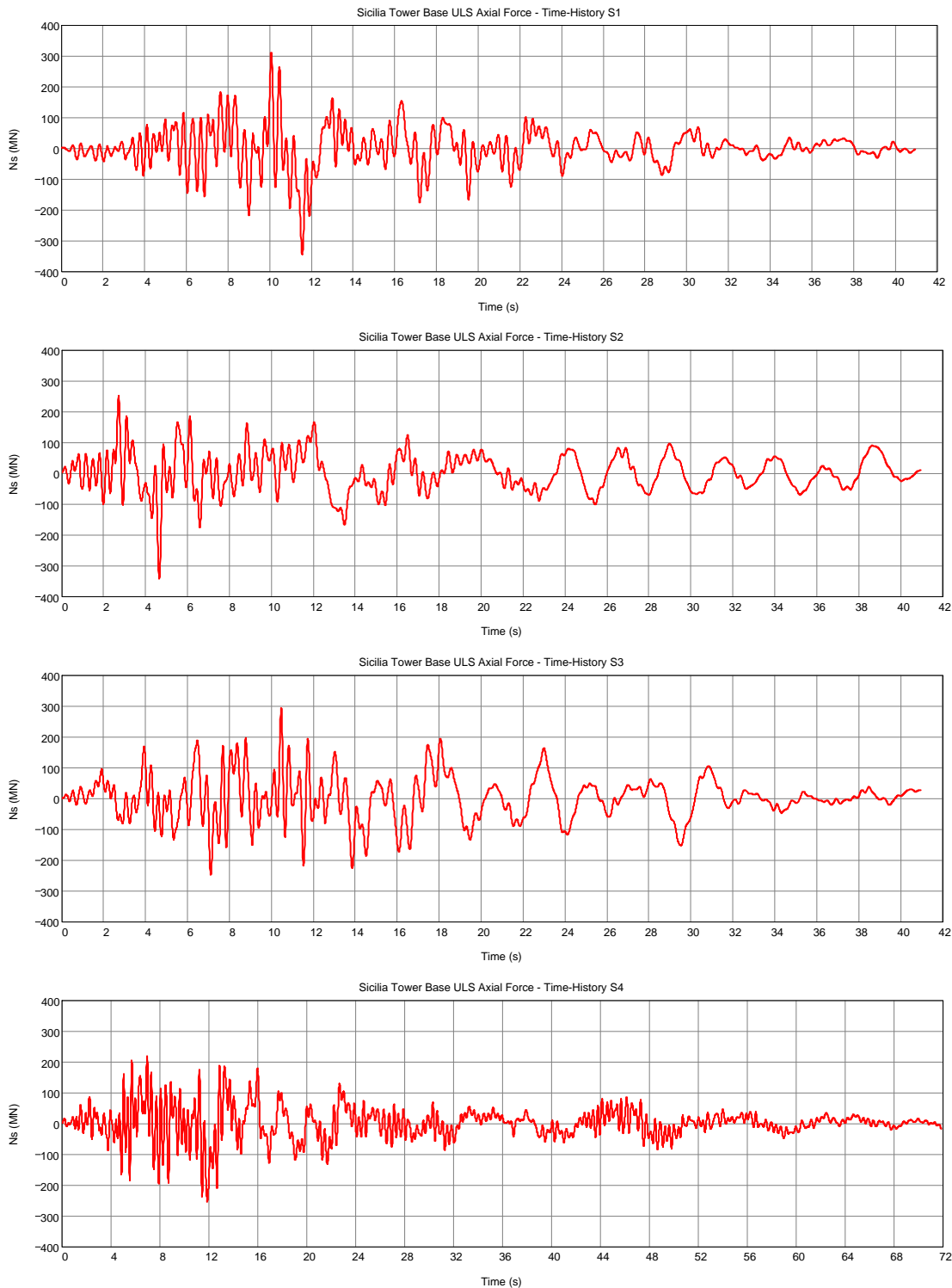


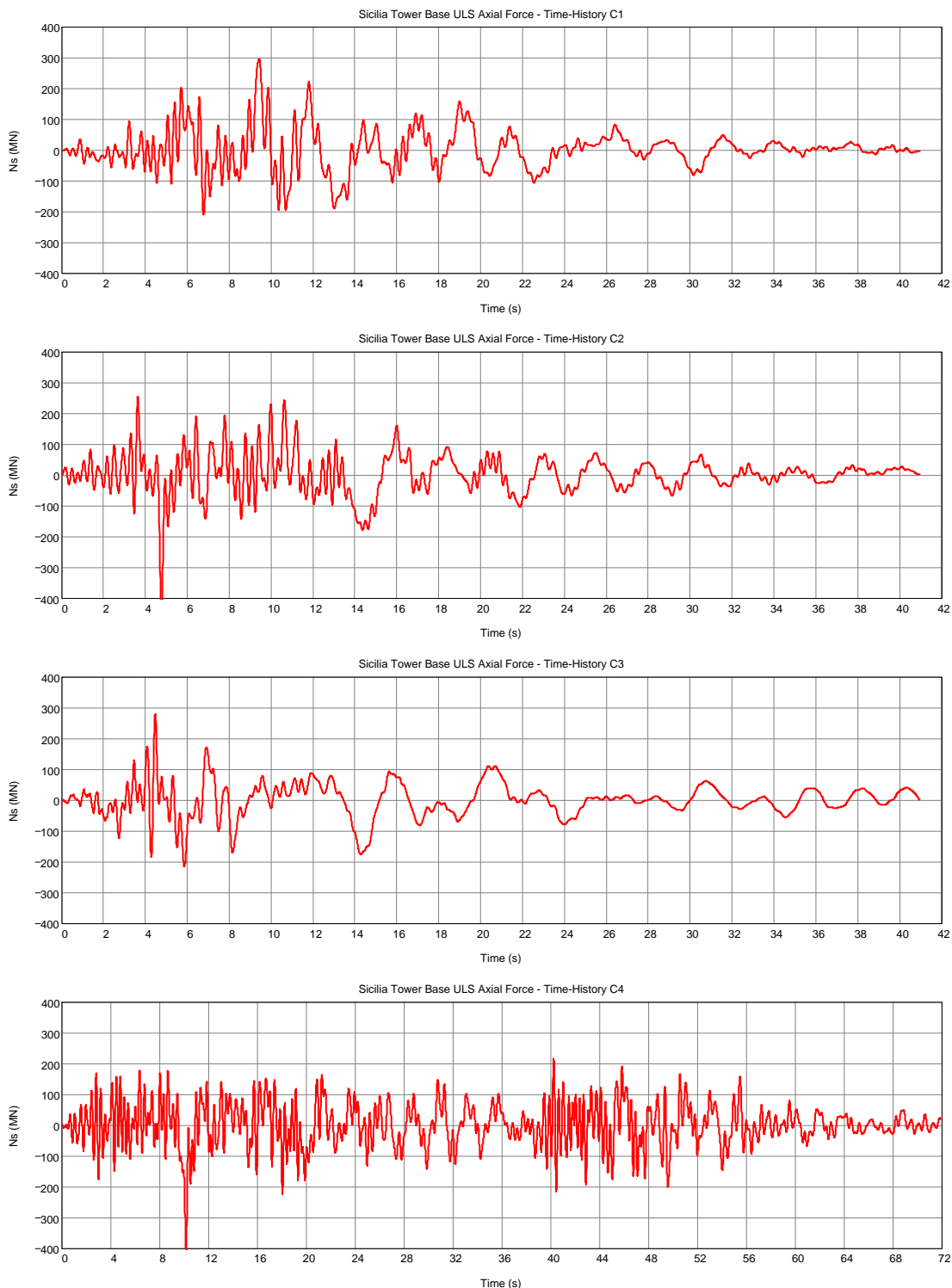
Figura A-12: Coefficienti di variazione per l'output delle storie temporali della torre della Calabria.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



*Figura A-13: Carichi assiali sismici SLU della base della torre Sicilia, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Sicilia da 1 a 4.*

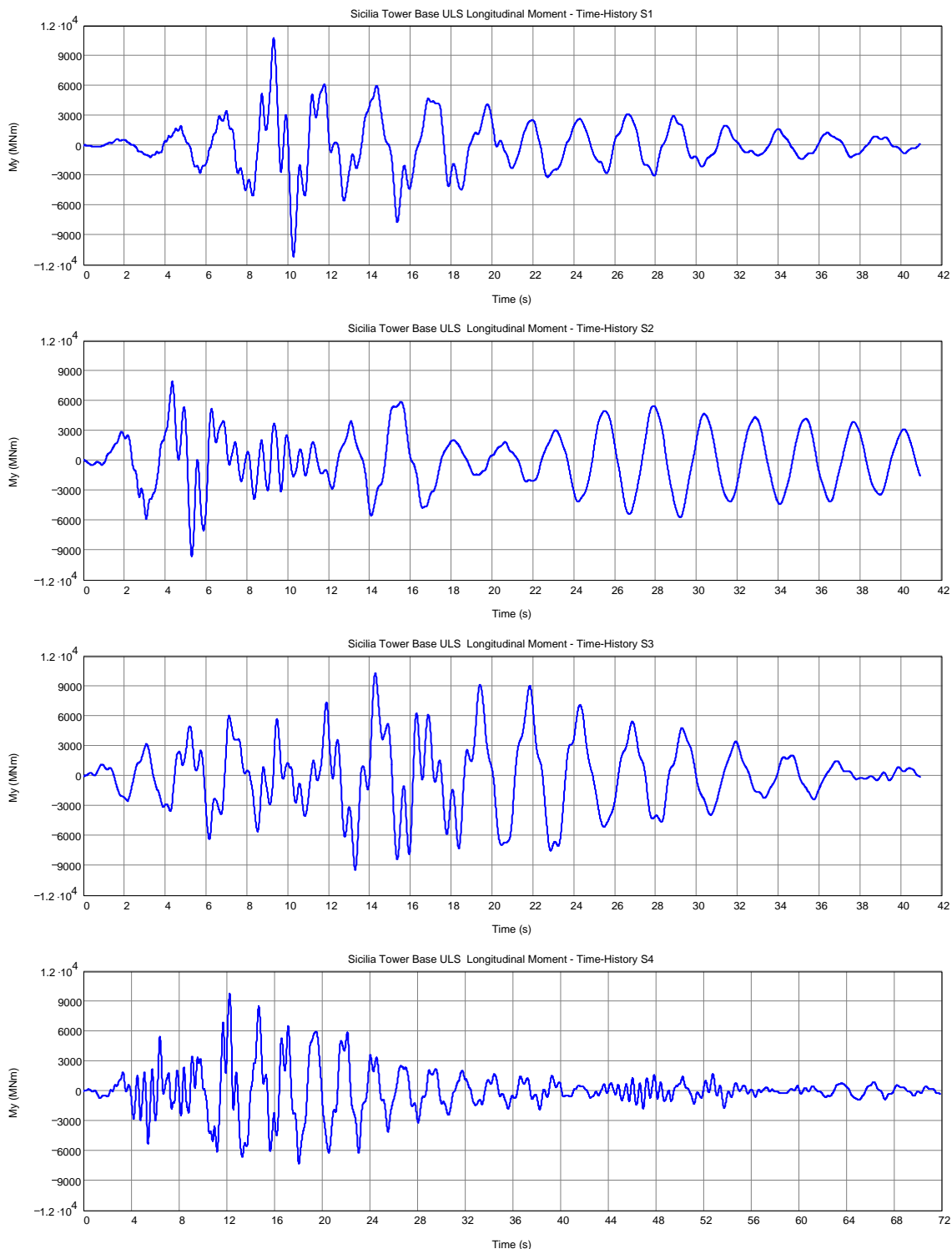
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



*Figura A-14: Carichi assiali sismici SLU della base della torre Sicilia, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Calabria da 1 a 4.*

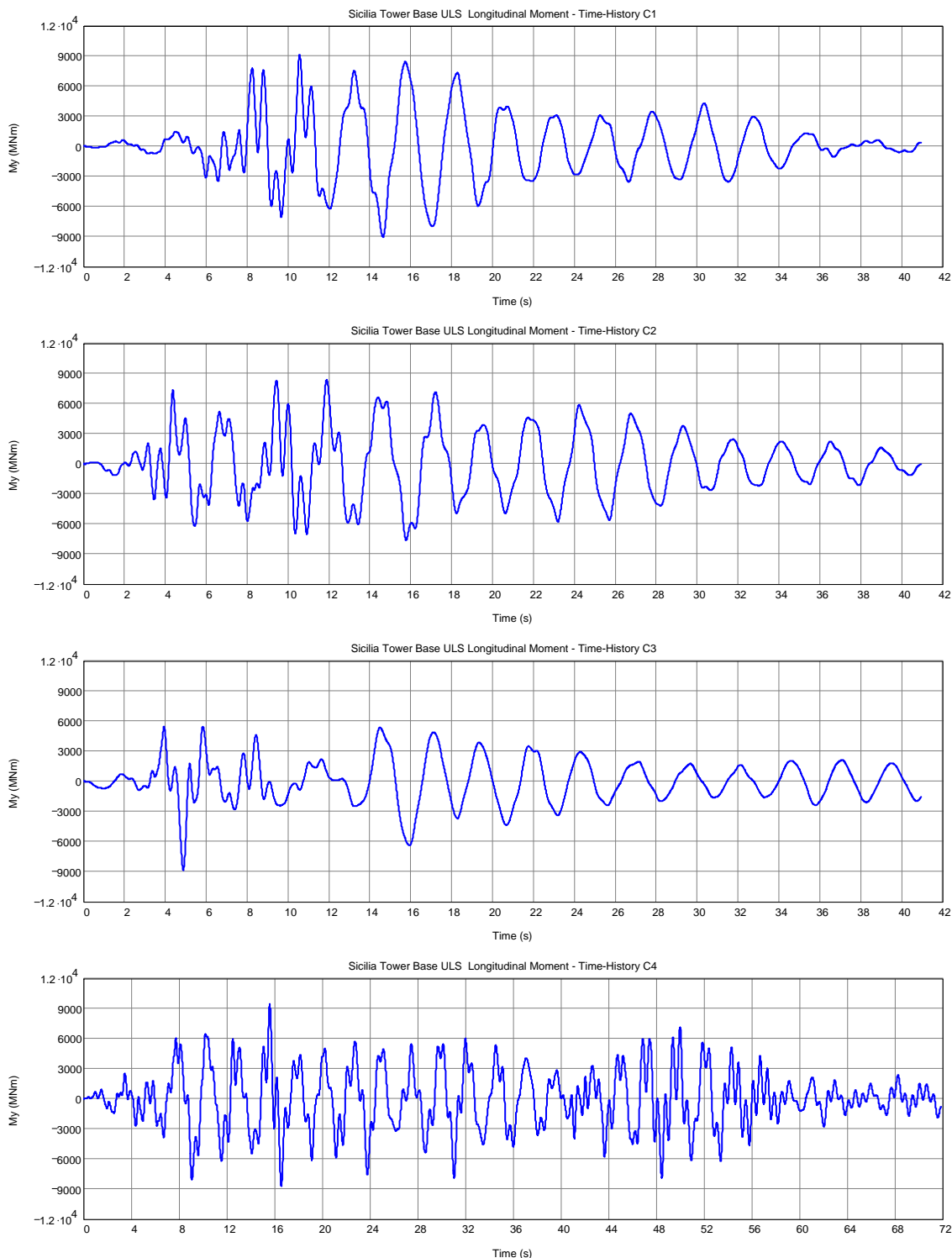


		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> <i>PS0013_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>



*Figura A-15: Momenti longitudinali sismici SLU della base della torre Sicilia, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Sicilia da 1 a 4.*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> <i>PS0013_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>



*Figura A-16: Momenti longitudinali sismici SLU della base della torre Sicilia, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Calabria da 1 a 4.*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

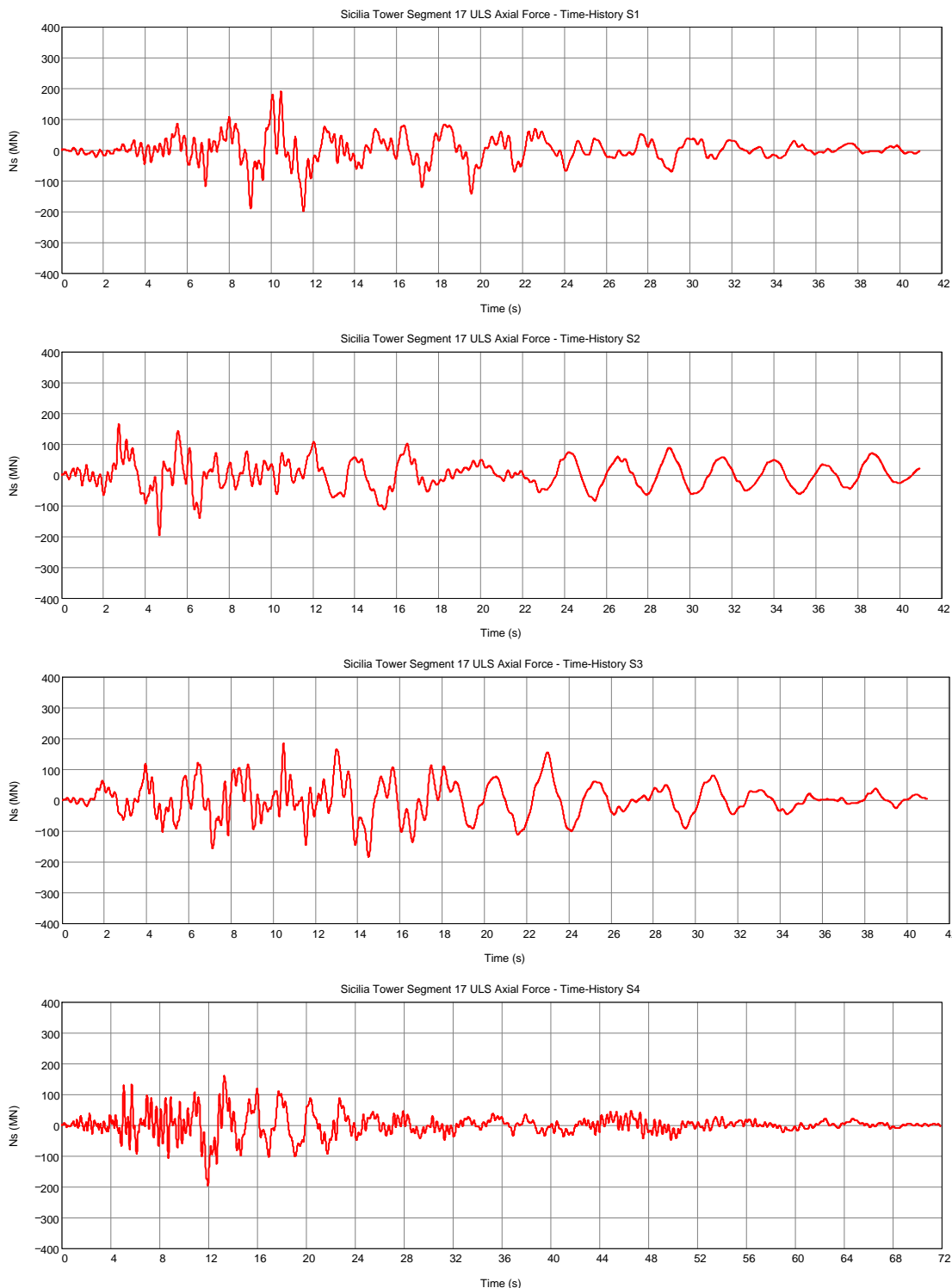


*Figura A-17: Momenti trasversali sismici SLU della base della torre Sicilia, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Sicilia da 1 a 4.*



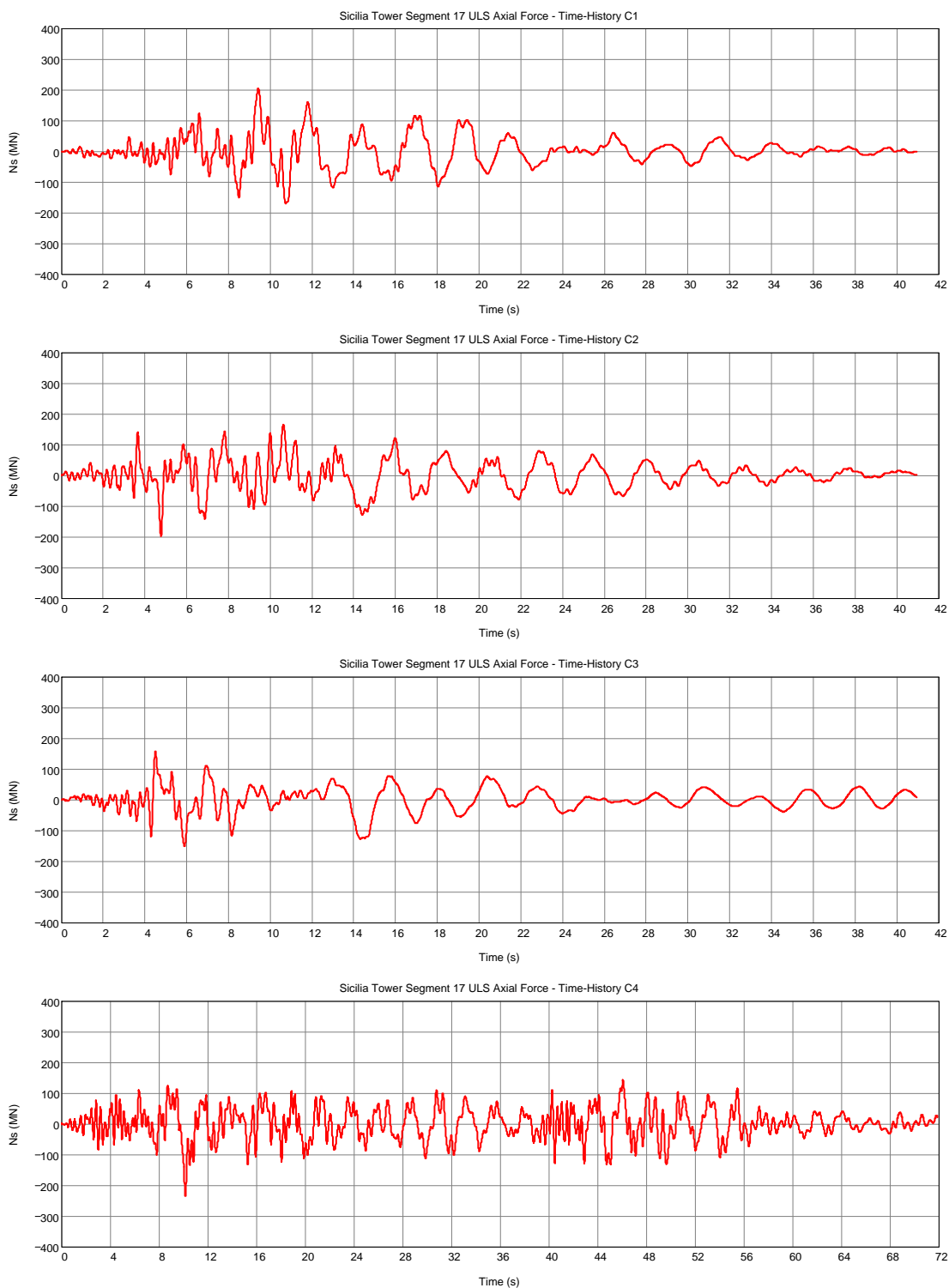
Figura A-18: Momenti trasversali sismici SLU della base della torre Sicilia, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Calabria da 1 a 4.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



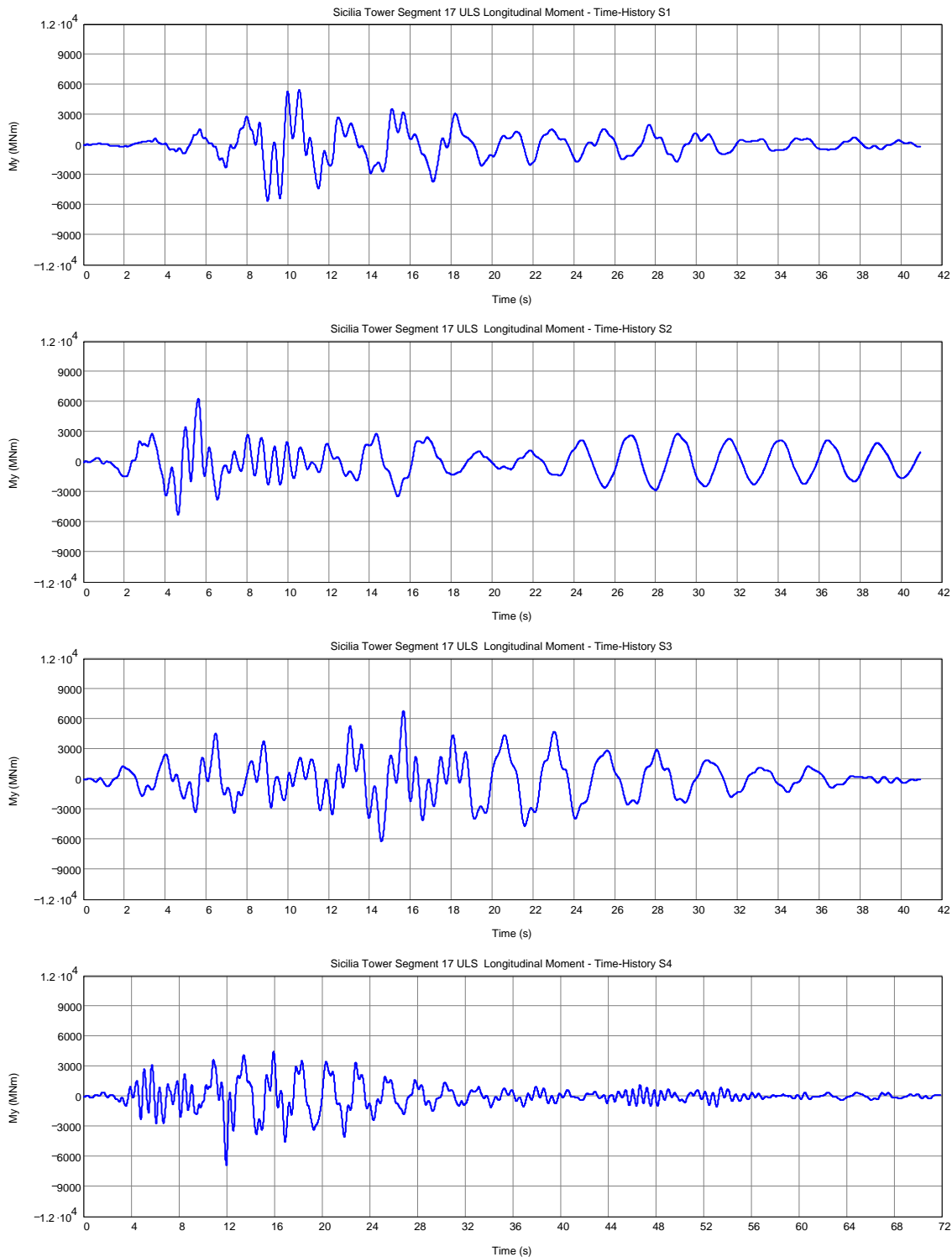
*Figura A-19: Carichi assiali sismici SLU del segmento 17 della gamba della torre della Sicilia, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Sicilia da 1 a 4.*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



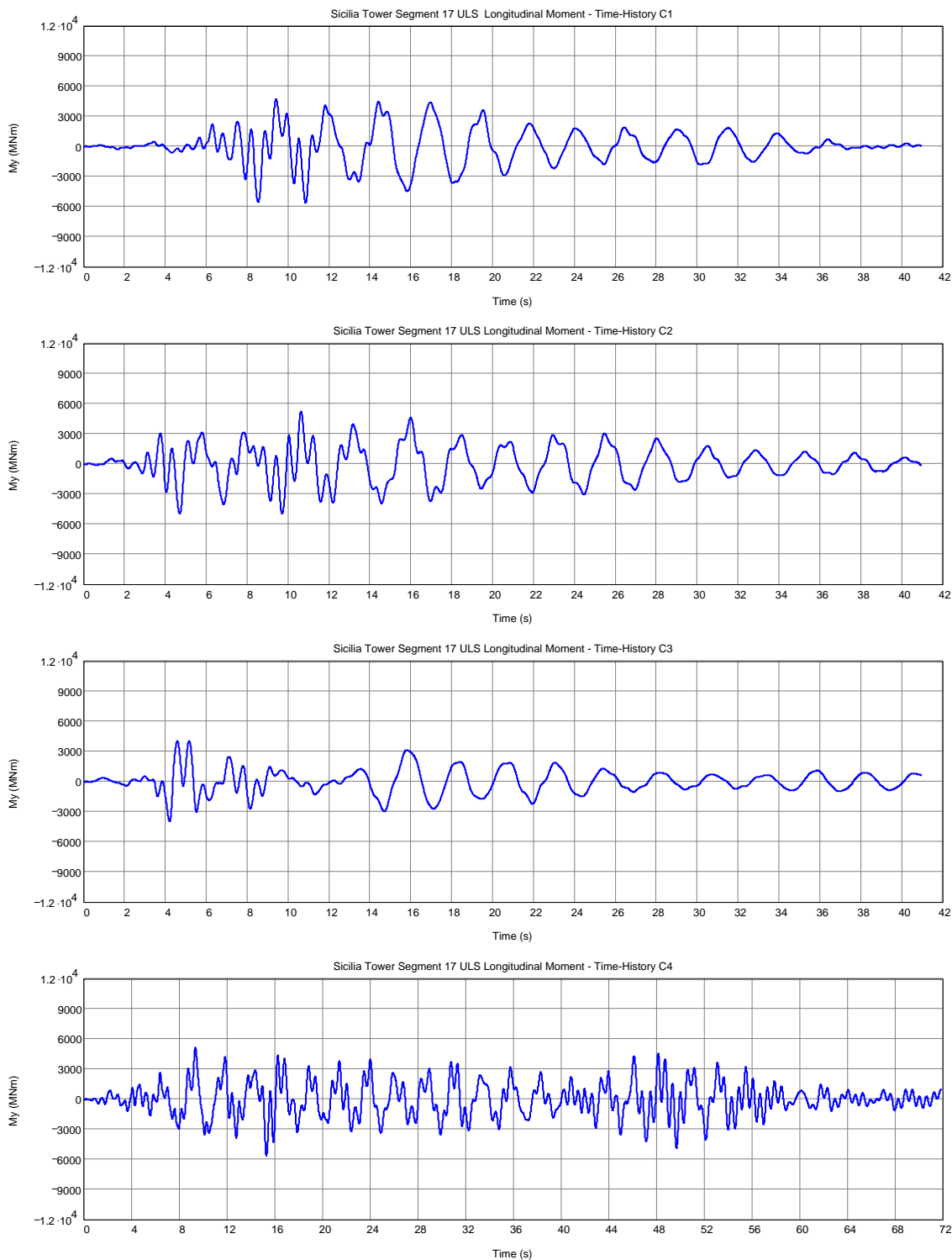
*Figura A-20: Carichi assiali sismici SLU del segmento 17 della gamba della torre della Sicilia, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Calabria da 1 a 4.*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



*Figura A-21: Momenti longitudinali sismici SLU del segmento 17 della gamba della torre della Sicilia, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Sicilia da 1 a 4.*

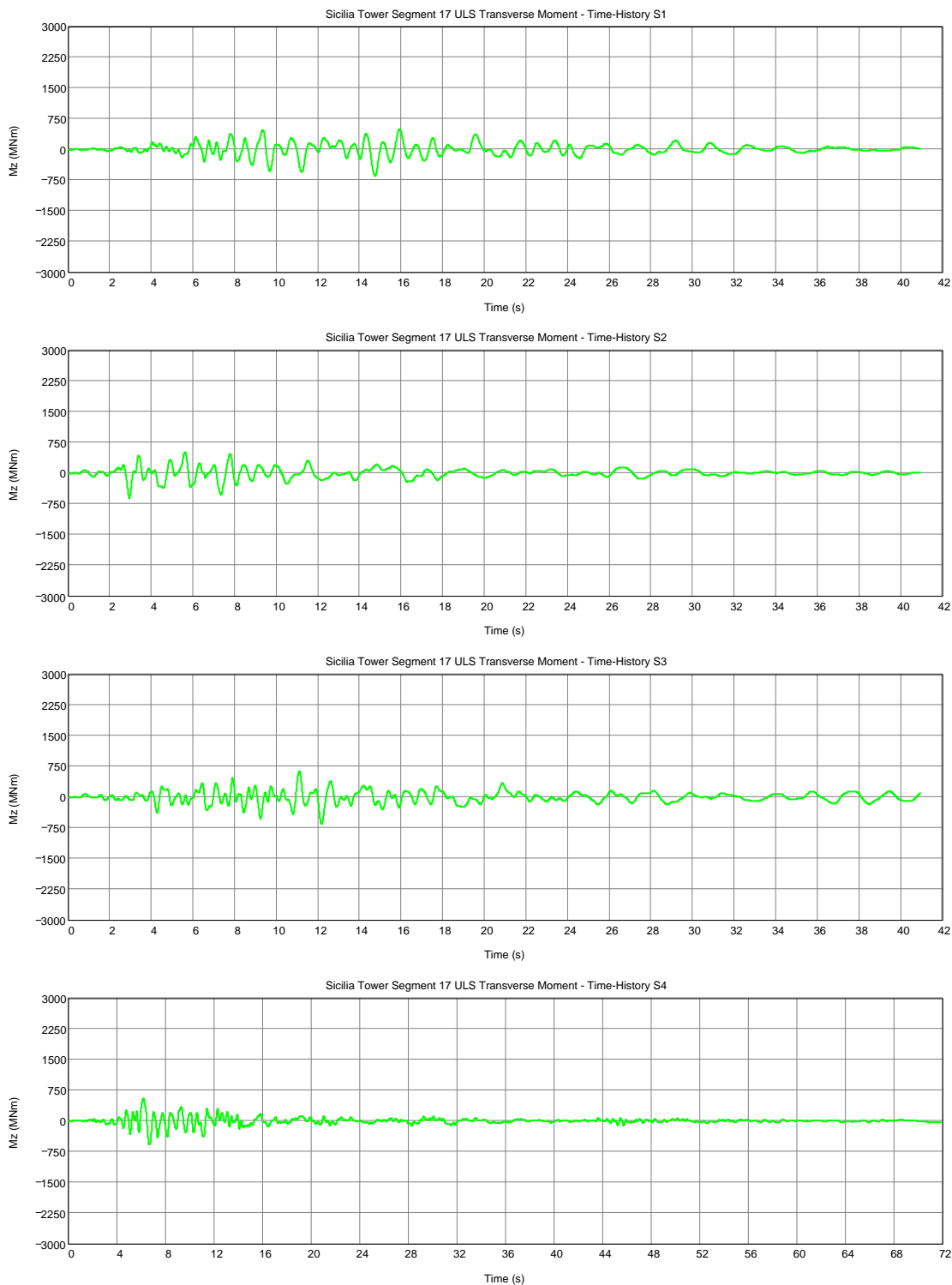
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> <i>PS0013_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>



*Figura A-22: Momenti longitudinali sismici SLU del segmento 17 della gamba della torre della Sicilia, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Calabria da 1 a 4.*

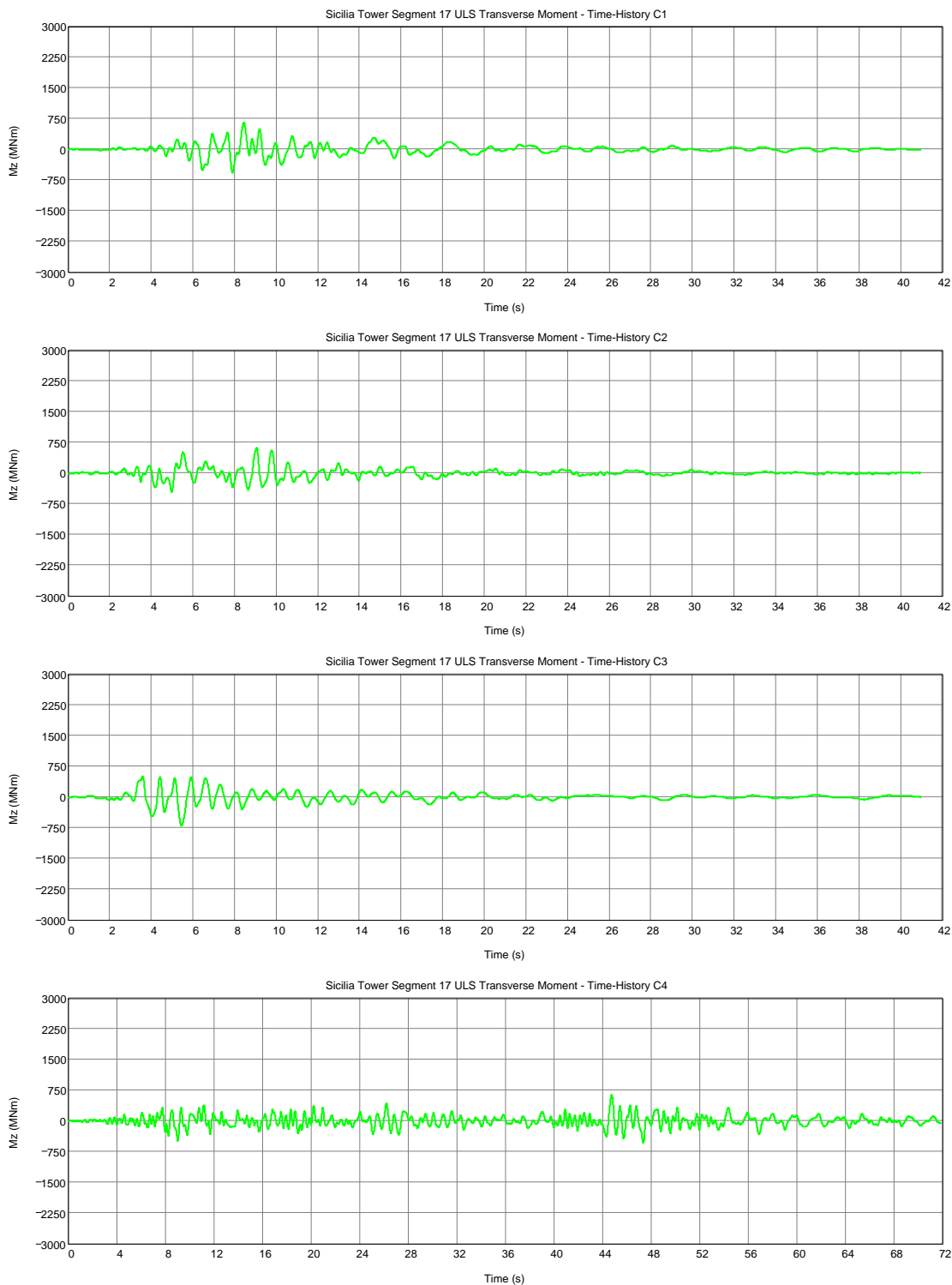


		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> <i>PS0013_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>



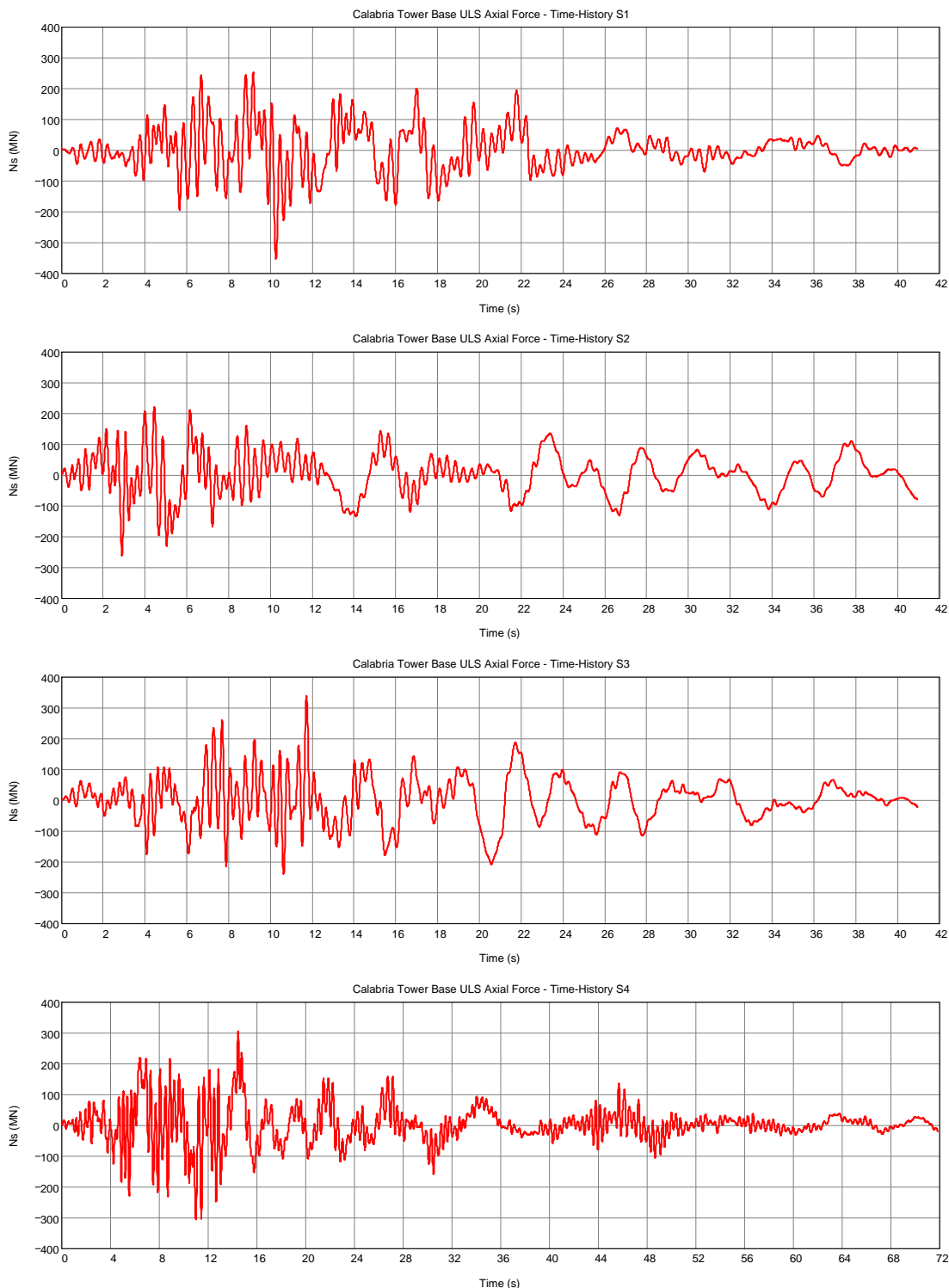
*Figura A-23: Momenti trasversali sismici SLU del segmento 17 della gamba della torre della Sicilia, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Sicilia da 1 a 4.*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



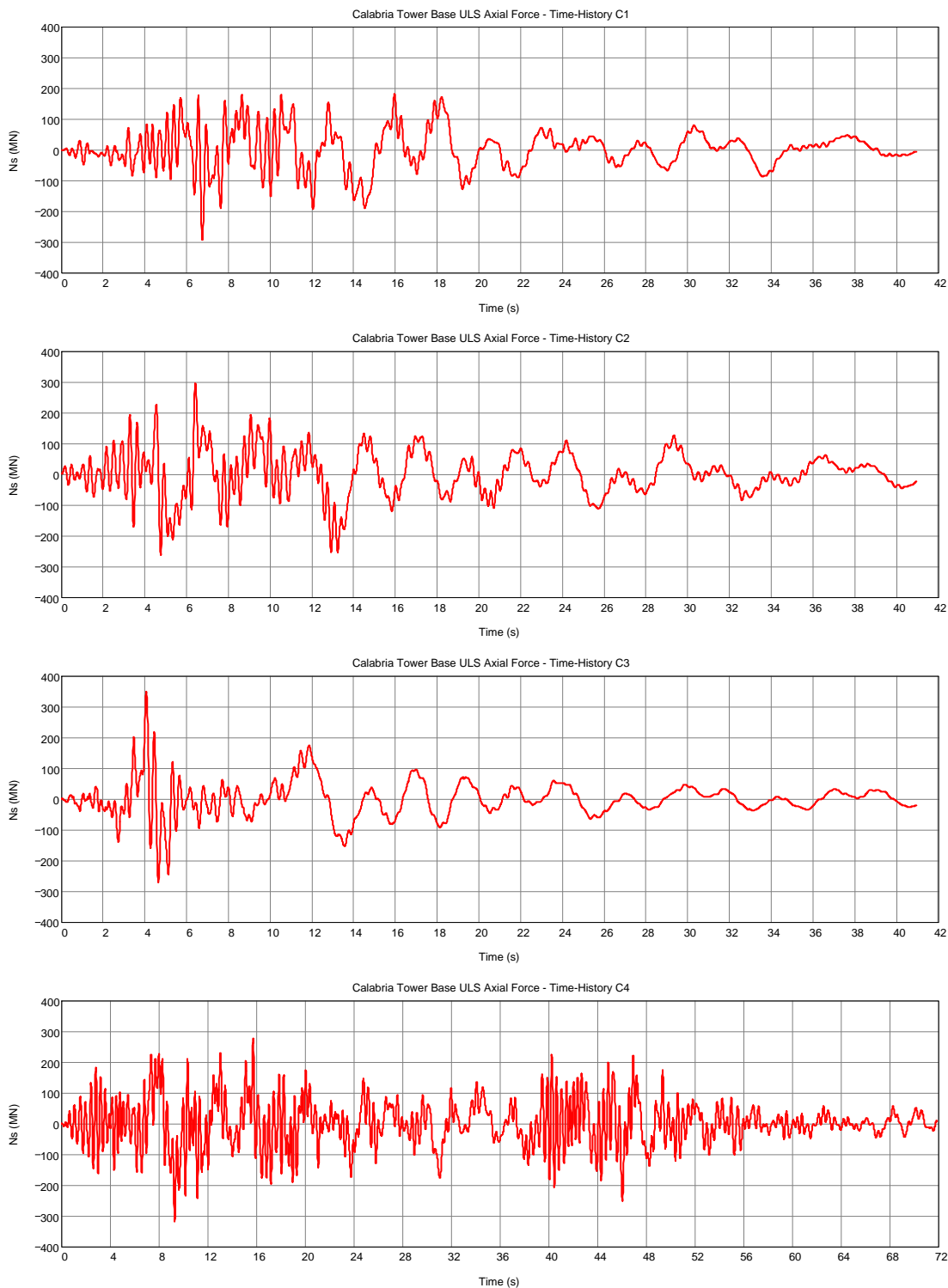
*Figura A-24: Momenti trasversali sismici SLU del segmento 17 della gamba della torre della Sicilia, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Calabria da 1 a 4.*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



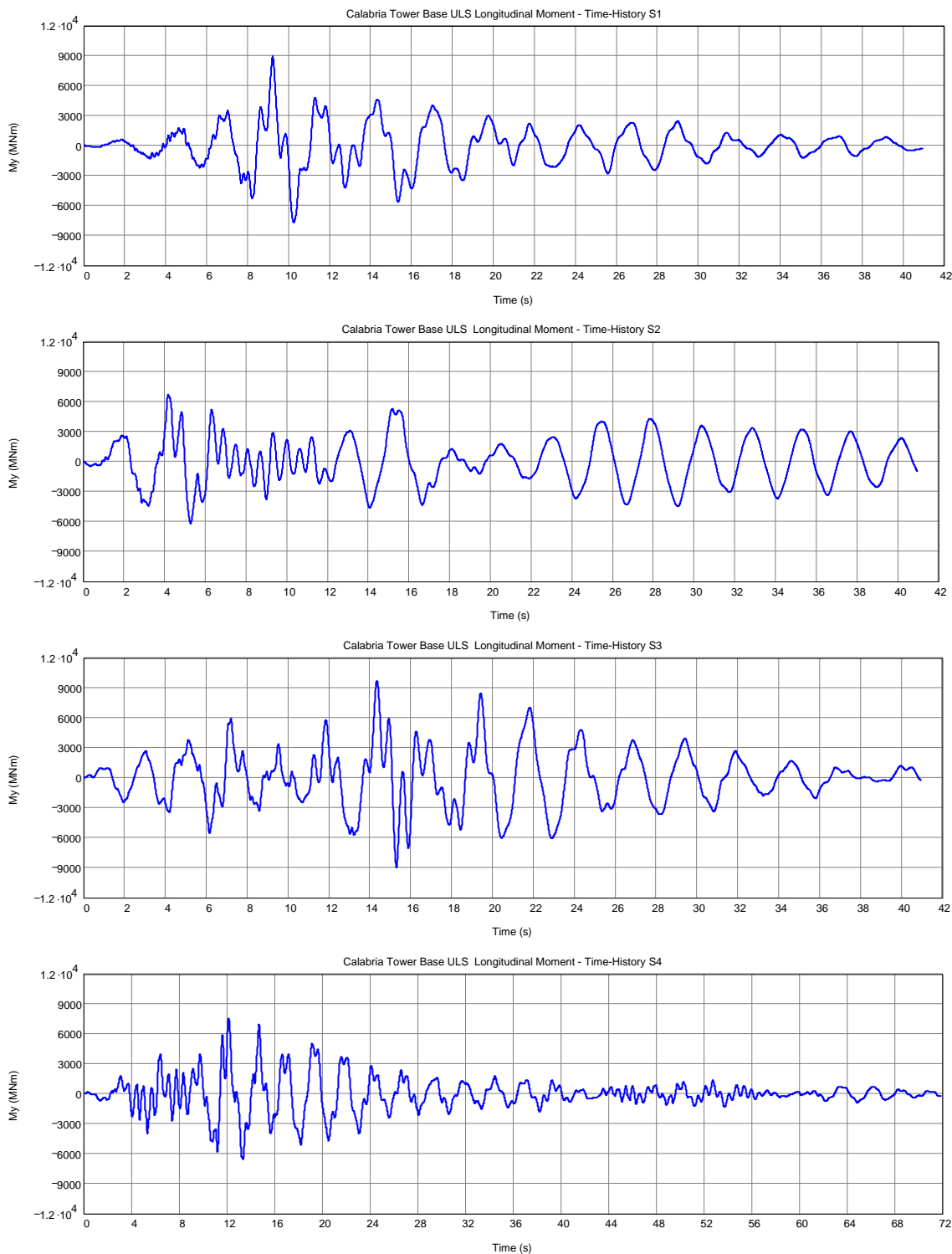
*Figura A-25: Carichi assiali sismici SLU della base della torre della Calabria, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Sicilia da 1 a 4..*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> <i>PS0013_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>



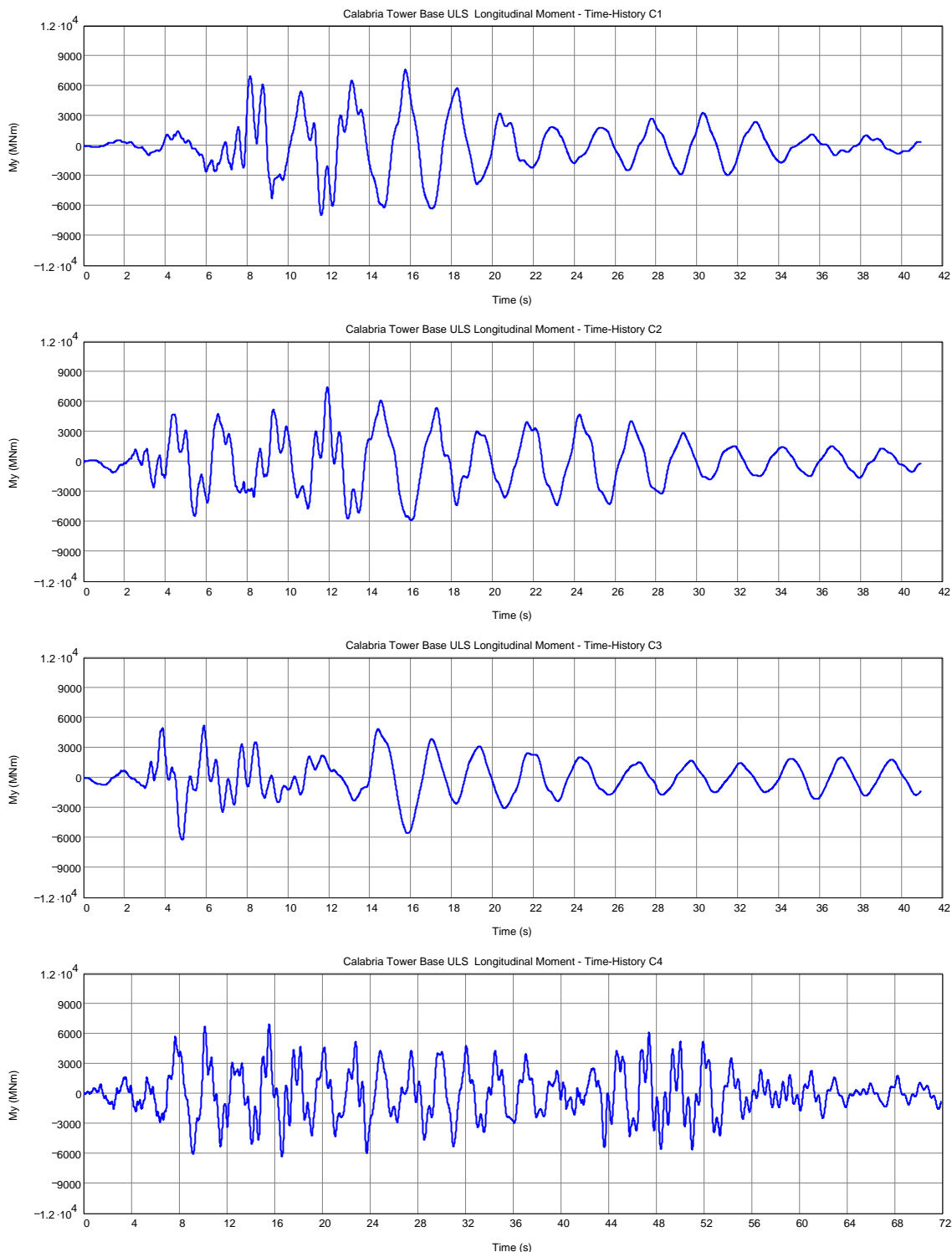
*Figura A-26: Carichi assiali sismici SLU della base della torre della Calabria, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Calabria da 1 a 4.*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> <i>PS0013_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>



*Figura A-27: Momenti longitudinali sismici SLU della base della torre della Calabria, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Sicilia da 1 a 4.*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> <i>PS0013_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>



*Figura A-28: Momenti longitudinali sismici SLU della base della torre della Calabria, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Calabria da 1 a 4.*



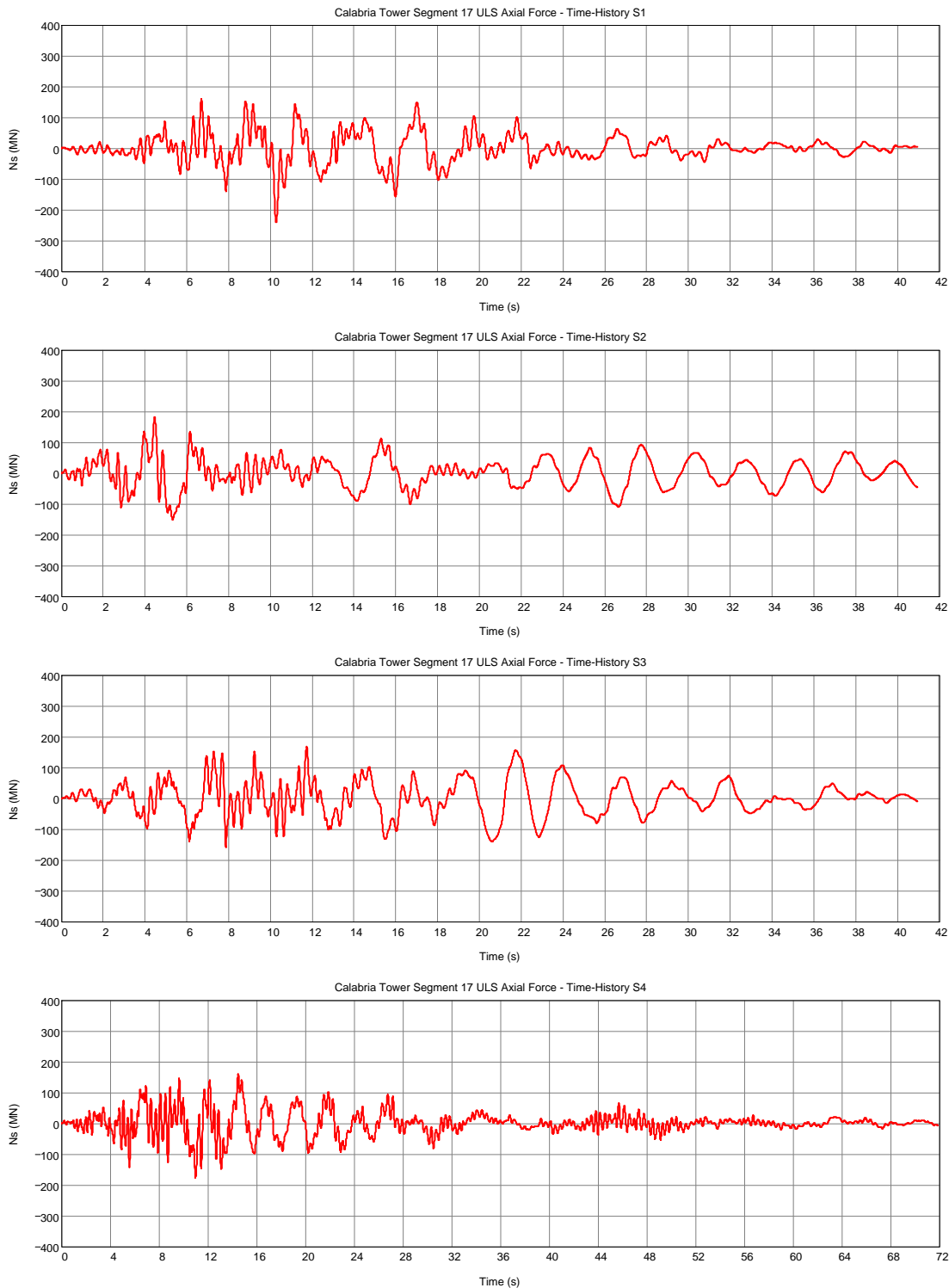
Figura A-29: Momenti trasversali sismici SLU della base della torre della Calabria, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Sicilia da 1 a 4.



Figura A-30: Momenti trasversali sismici SLU della base della torre della Calabria, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Calabria da 1 a 4.

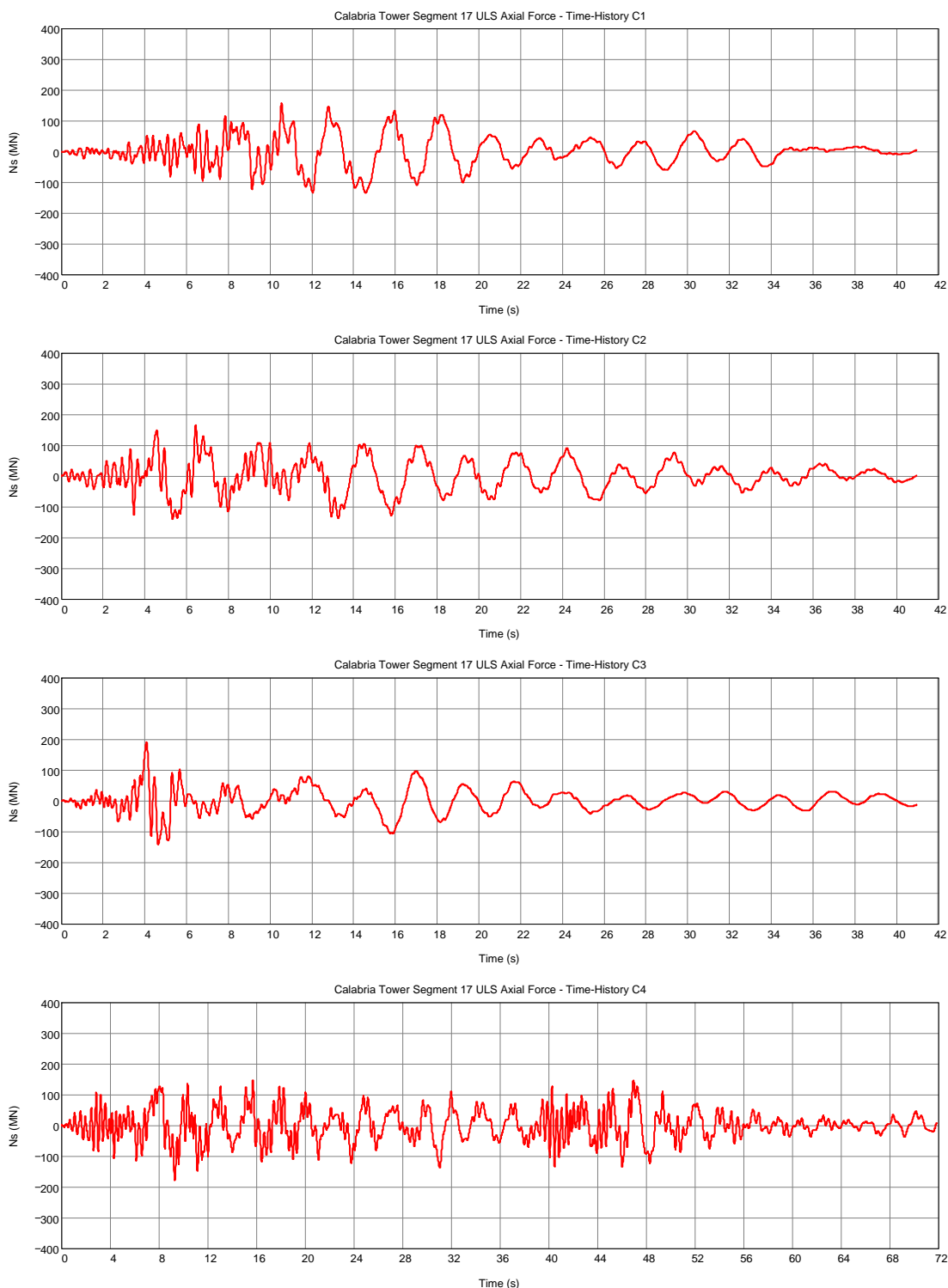


		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



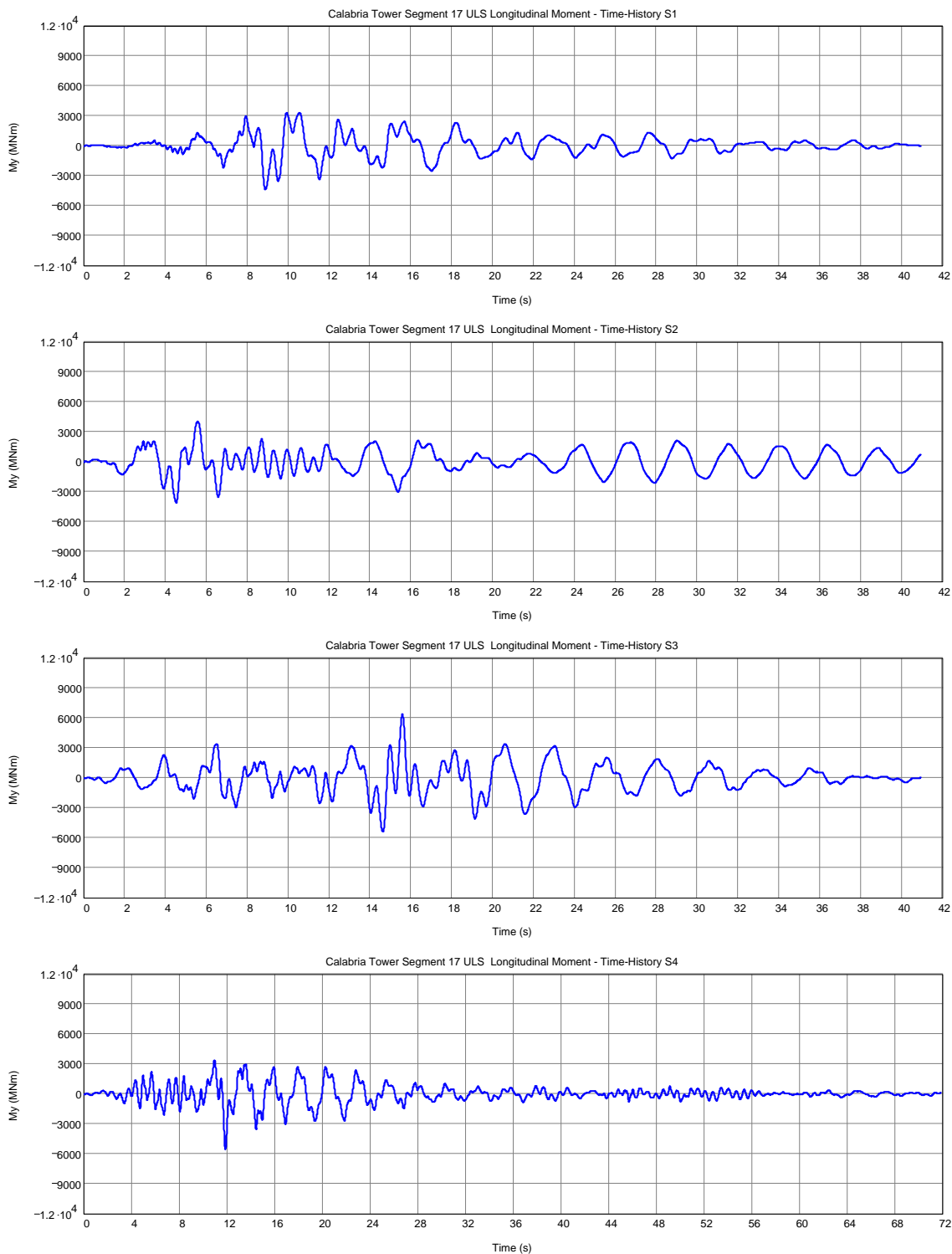
*Figura A-31: Carichi assiali sismici SLU del segmento 17 della gamba della torre della Calabria, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Sicilia da 1 a 4*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



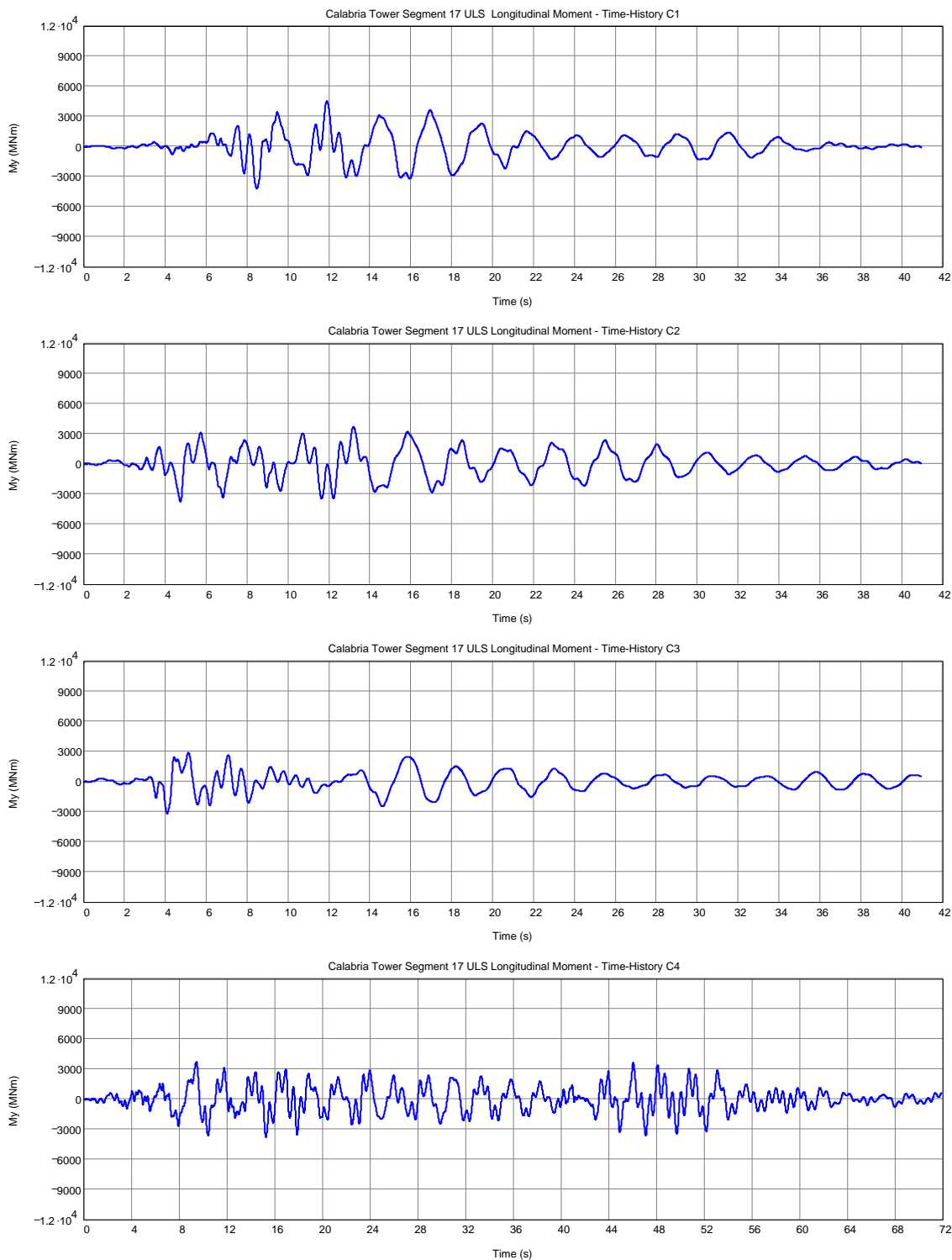
*Figura A-32: Carichi assiali sismici SLU del segmento 17 della gamba della torre della Calabria, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Calabria da 1 a 4.*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



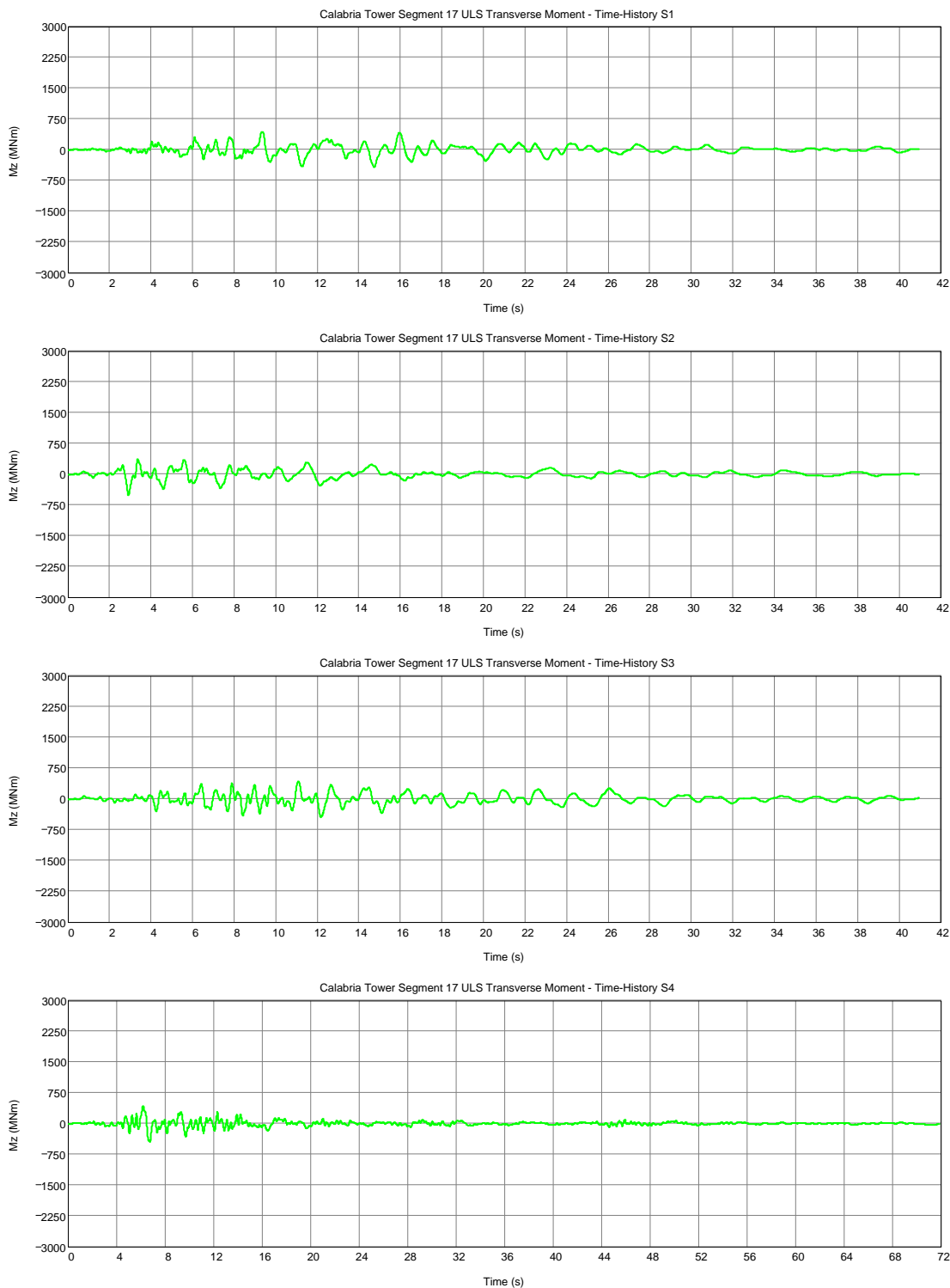
*Figura A-33: Momenti longitudinali sismici SLU del segmento 17 della gamba della torre della Calabria, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Sicilia da 1 a 4.*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



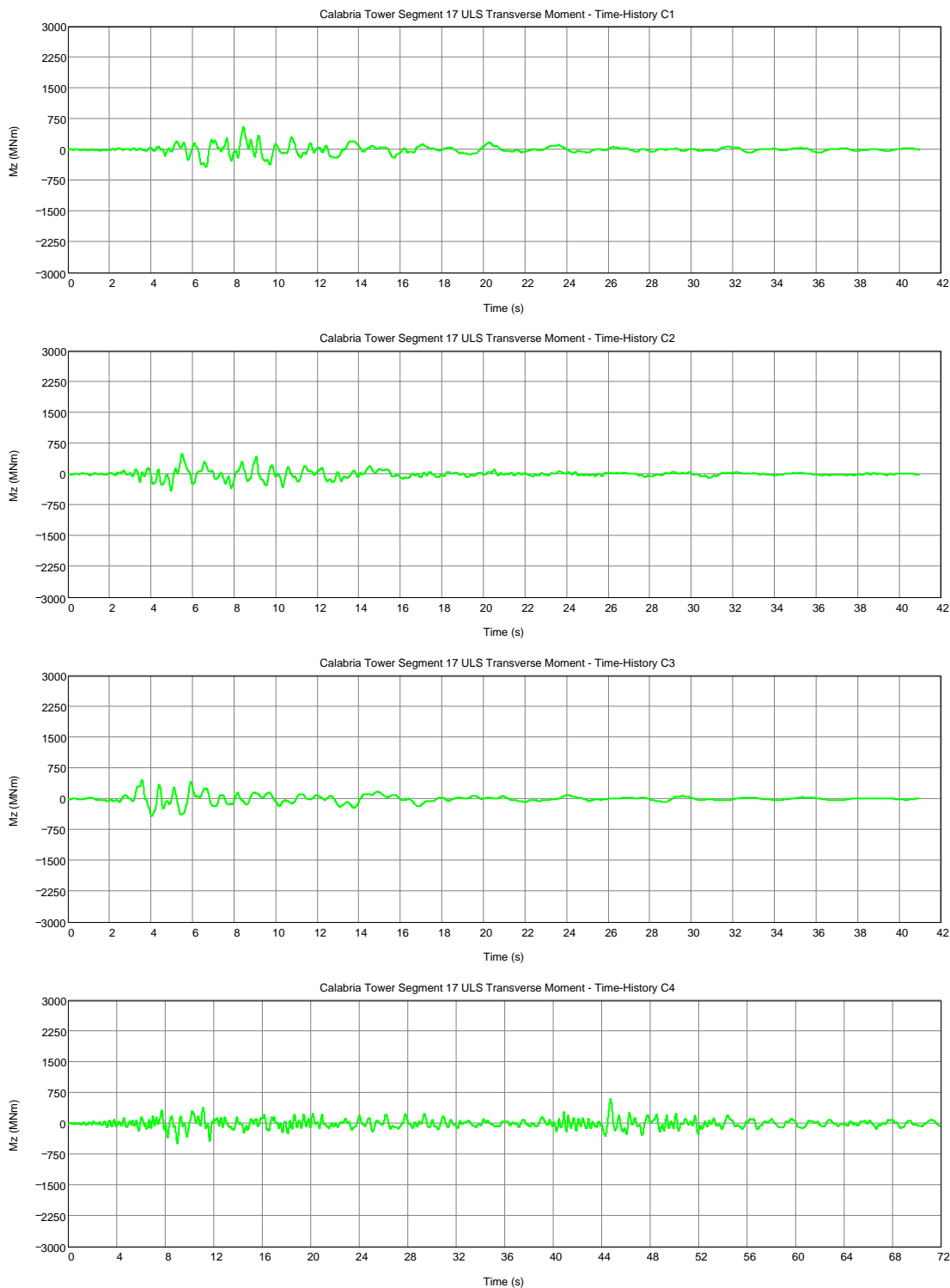
*Figura A-34: Momenti longitudinali sismici SLU del segmento 17 della gamba della torre della Calabria, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Calabria da 1 a 4.*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> <i>PS0013_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>



*Figura A-35: Momenti trasversali sismici SLU del segmento 17 della gamba della torre della Calabria, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Sicilia da 1 a 4.*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



*Figura A-36: Momenti trasversali sismici SLU del segmento 17 della gamba della torre della Calabria, come funzione del tempo per gli input delle storie temporali della Calabria da 1 a 4.*

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

## 10 Appendice B: Effetti di forza della gamba della torre della Calabria

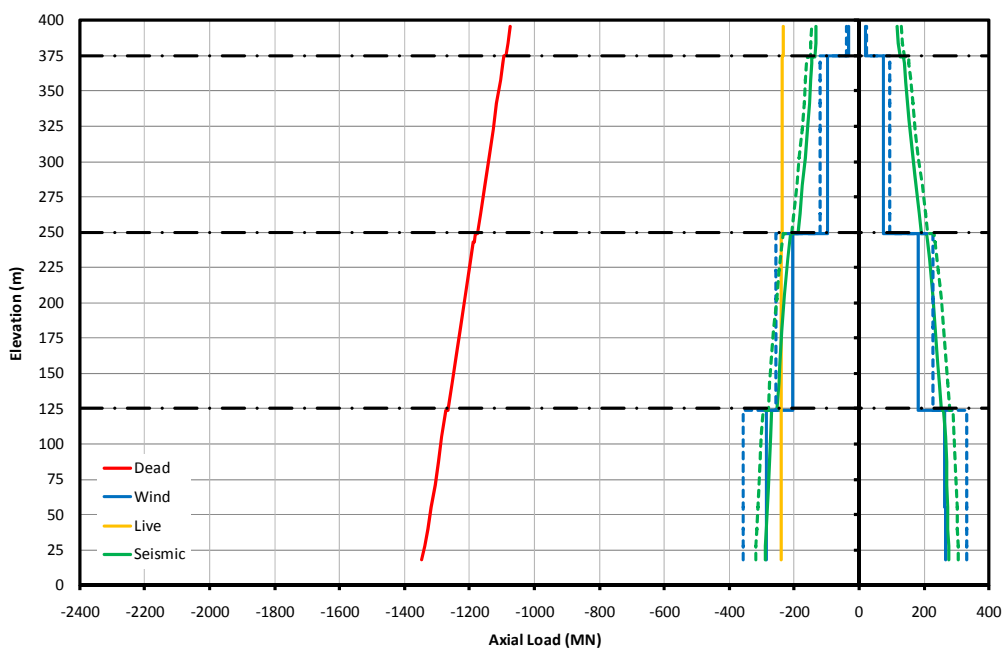


Figura B-1: Carichi assiali non fattorizzati della gamba della torre della Calabria (SLU – linee continue, SILS – linee tratteggiate).

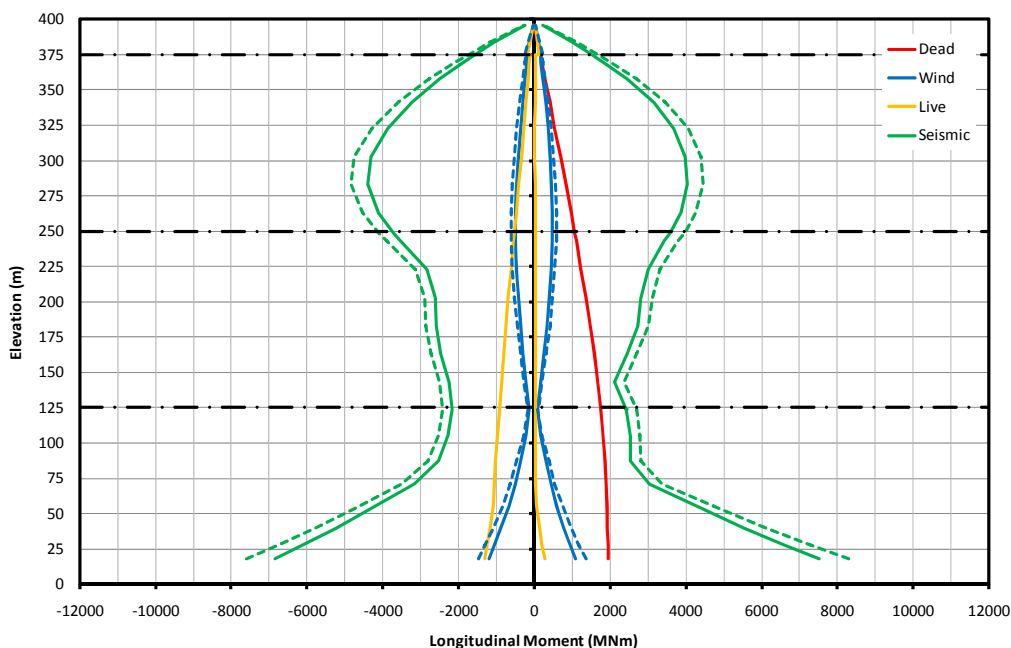


Figura B-2: Momenti longitudinali non fattorizzati della gamba della torre della Calabria (SLU – linee continue, SILS – linee tratteggiate).

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

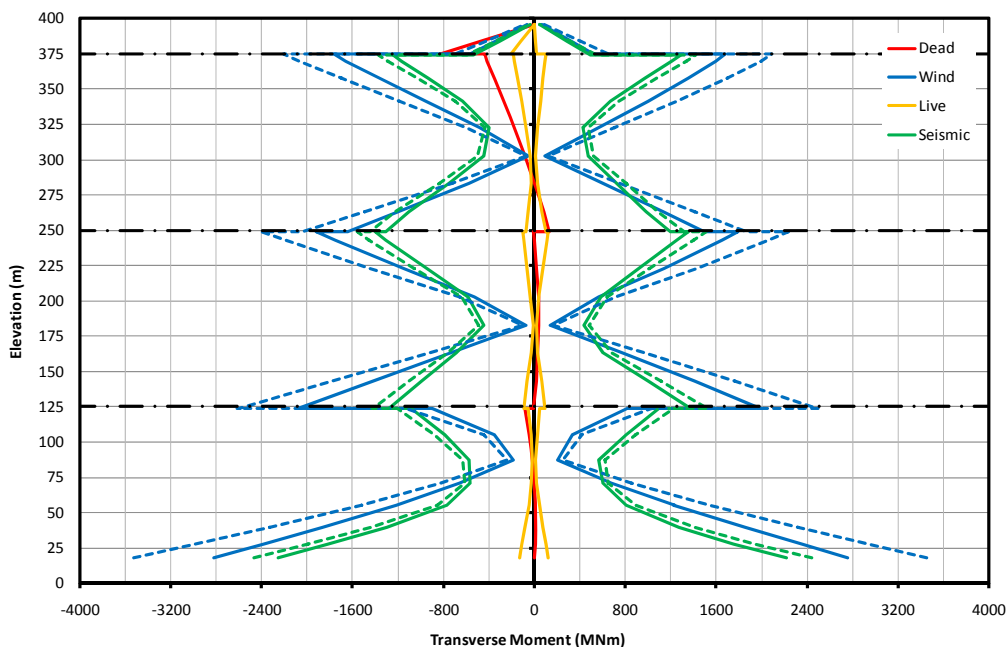


Figura B-3: Momenti trasversali non fattorizzati della gamba della torre della Calabria (SLU – linee continue, SILS – linee tratteggiate).

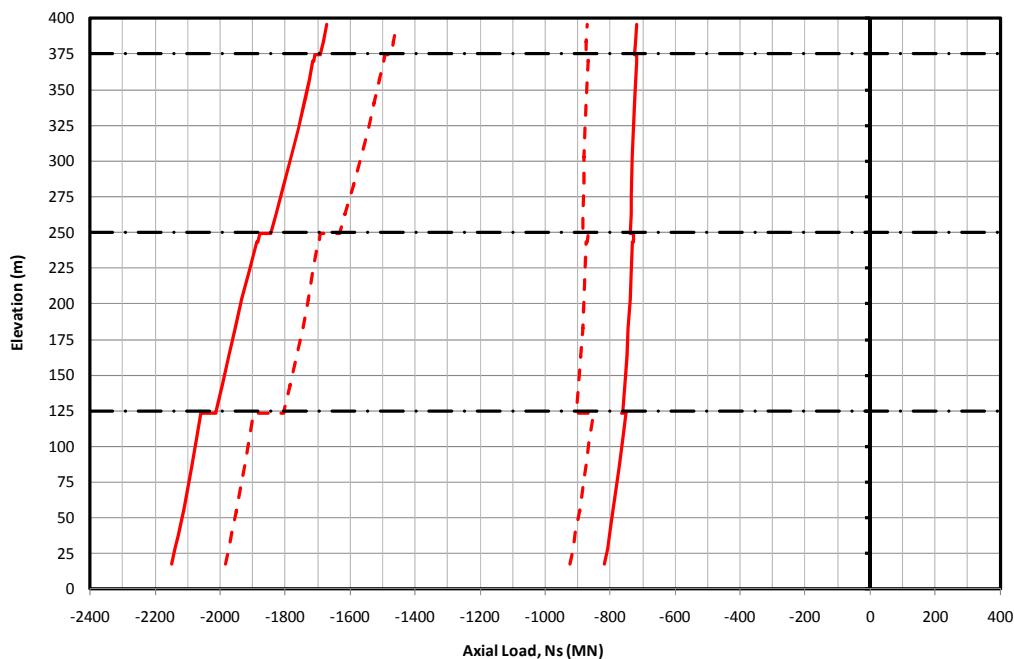


Figura B-4: Fascio forza assiale fattorizzata della gamba della torre della Calabria (SLU – linee continue, SILS – linee tratteggiate).



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

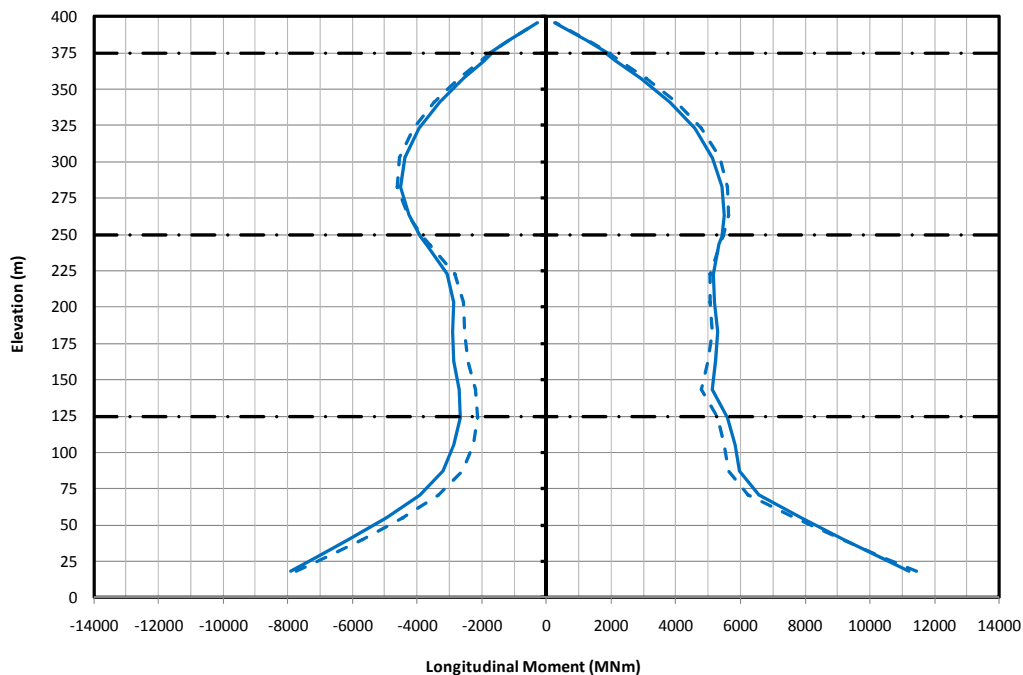


Figura B-5: Fascio momento longitudinale fattorizzato della gamba della torre della Calabria (SLU – linee continue, SILS – linee tratteggiate).

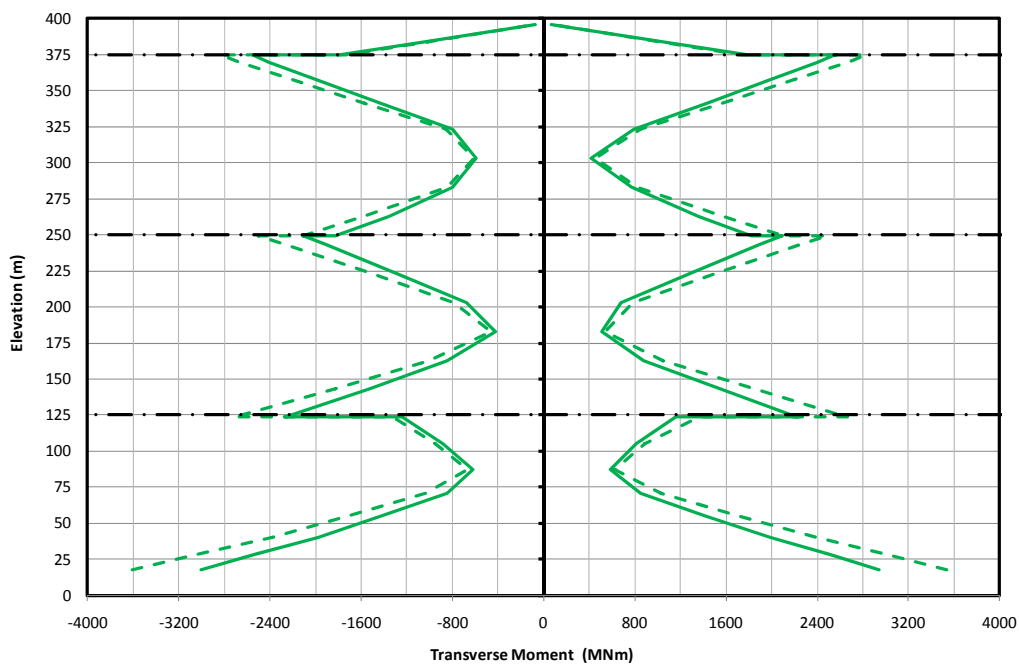


Figura B-6: Fascio momento trasversale fattorizzato della gamba della torre della Calabria (SLU – linee continue, SILS – linee tratteggiate).

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

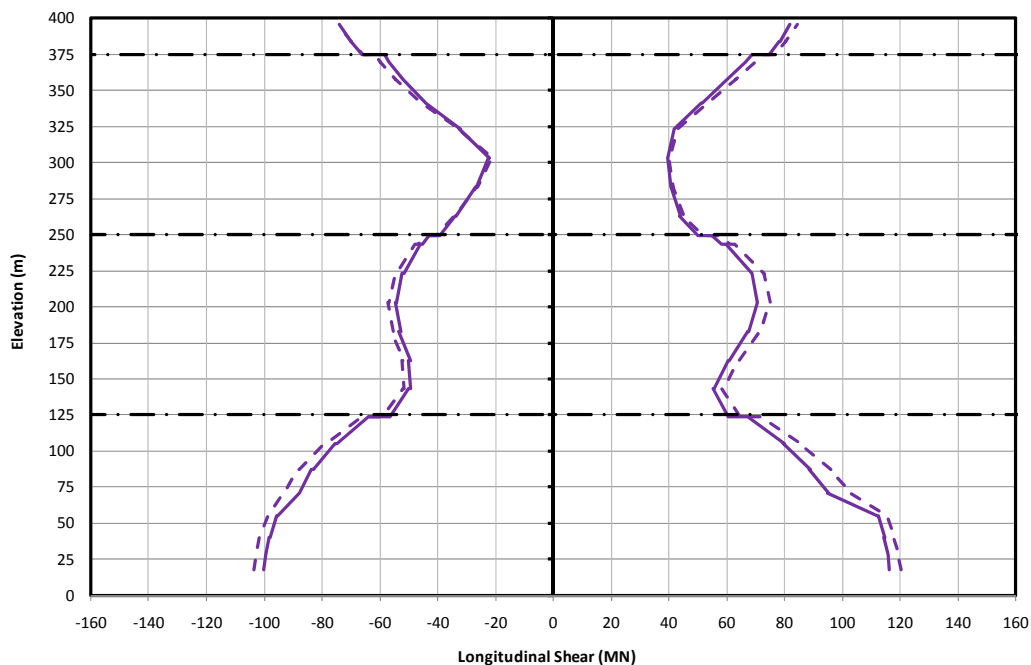


Figura B-7: Fascio forza di taglio longitudinale fattorizzata della gamba della torre della Calabria (SLU – linee continue, SILS – linee tratteggiate).

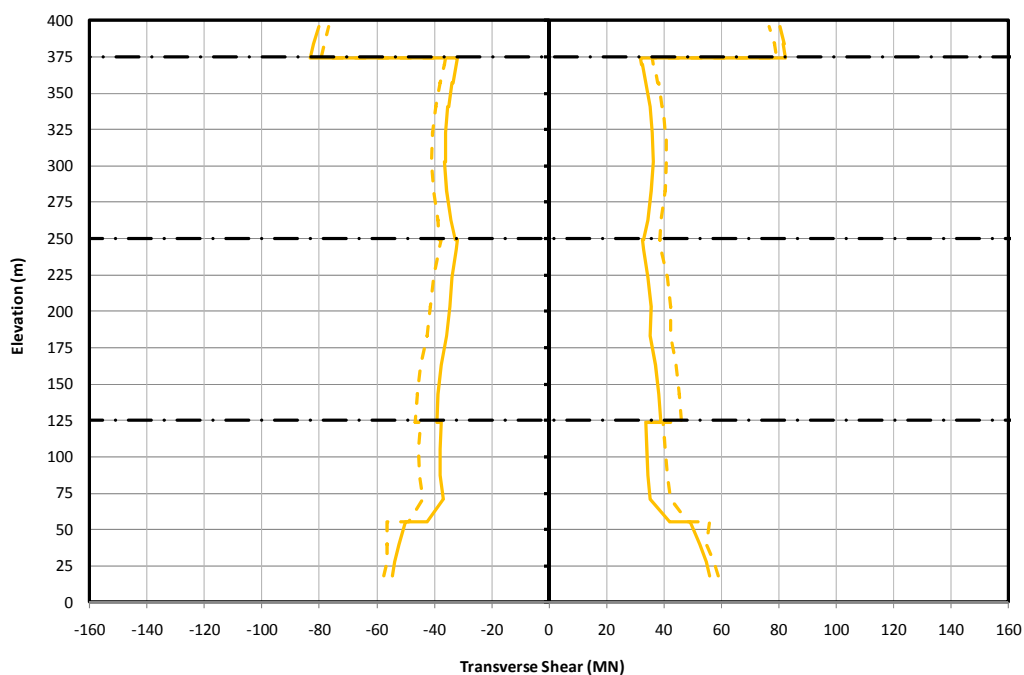


Figura B-8: Fascio forza di taglio trasversale fattorizzata della gamba della torre della Calabria (SLU – linee continue, SILS – linee tratteggiate).

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

## 11 Appendice C: Valutazione degli effetti di forza dell'analisi del fascio delle storie temporali sismiche

Data l'eccezionale importanza del ponte, le gambe delle torri sono state valutate anche per gli effetti di forza dell'analisi del fascio delle storie temporali sismiche allo stato limite ultimo. L'obiettivo di tale valutazione era quello di valutare la potenziale portata del danno che potrebbe derivare da un evento sismico maggiore rispetto a quanto atteso. Le verifiche progettuali sono state dunque effettuate considerando tutti i fattori di sicurezza parziale pari a 0.1, in modo tale che i livelli di sollecitazione reali nella gamba della torre, potessero essere determinati. I massimi rapporti di utilizzo SLU determinati per le torri di Sicilia e Calabria, sono mostrati nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e Figura C-2, rispettivamente, per ogni input di storia temporale per le combinazioni dominanti longitudinali e trasversali. In ogni figura, gli input delle storie temporali sono denotati dall'abbreviazione S1L, dove S rappresenta l'input Sicilia (oppure C la Calabria), 1 rappresenta il numero di input (1,2, 3 o 4) ed L rappresenta la direzione dominante (L per longitudinale oppure T per trasversale). I rapporti di utilizzo sono rappresentati da quadrati pieni per le combinazioni longitudinali e da quadrati vuoti per le combinazioni trasversali.

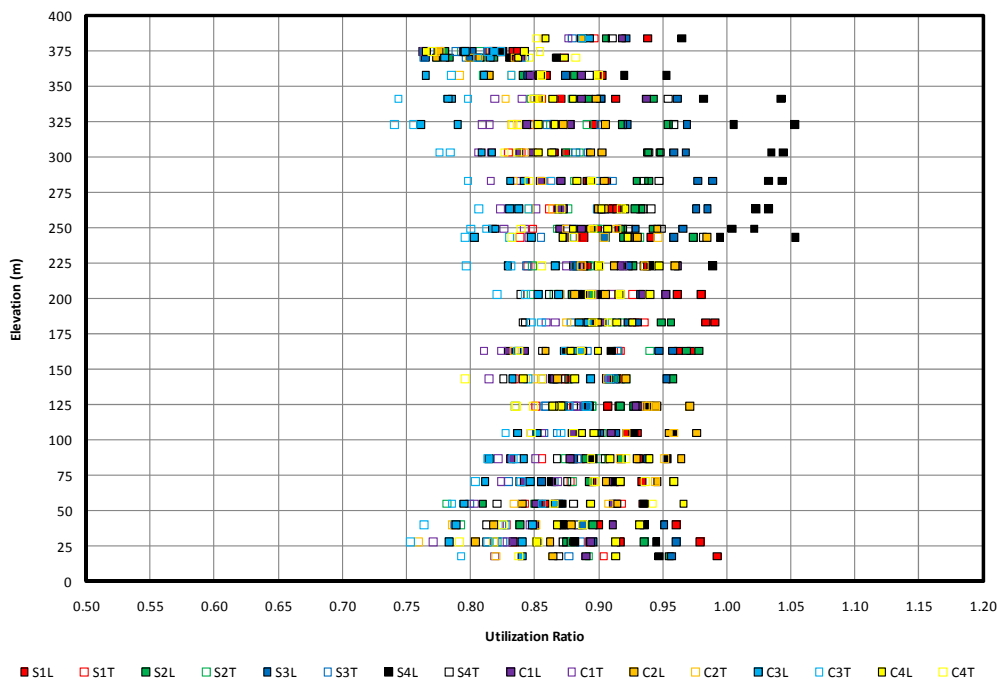
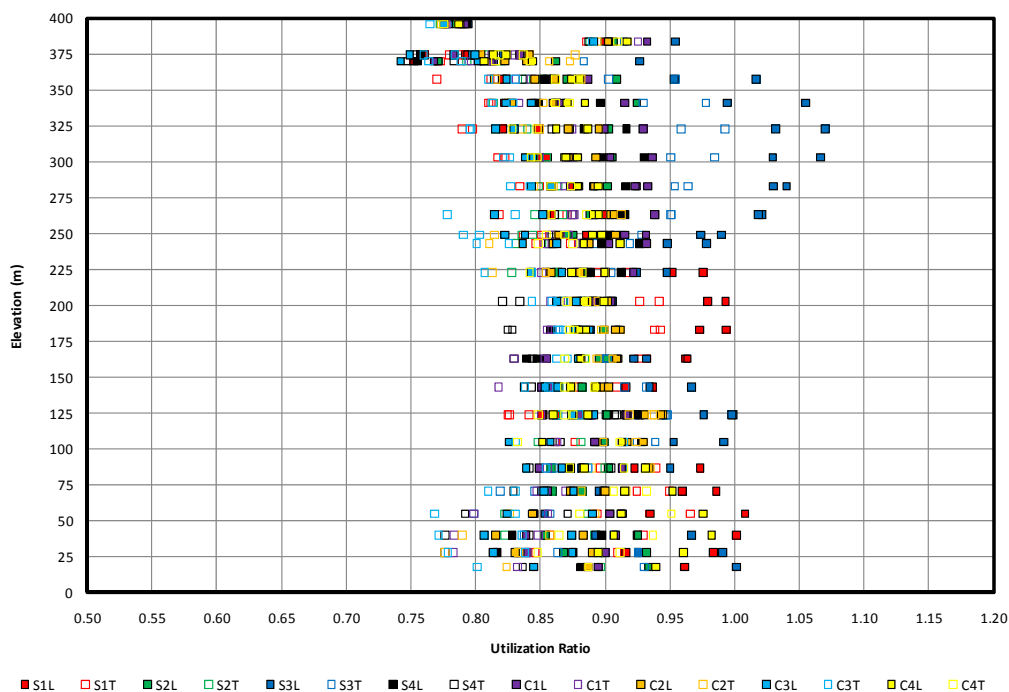


Figura C-1: Rapporti di utilizzo della gamba della torre di Sicilia per ogni input di storia temporale per le combinazioni dominanti longitudinali e trasversali (tutti i fattori di sicurezza parziale = 1.0).

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Torre – Relazione tecnica specialistica</b>	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



*Figura C-2: Rapporti di utilizzo della gamba della torre di Calabria per ogni input di storia temporale per le combinazioni dominanti longitudinali e trasversali (tutti i fattori di sicurezza parziale = 1.0).*

Per entrambe le torri, i rapporti di utilizzo dominanti derivano dalle combinazioni longitudinali dominanti. I massimi rapporti di utilizzo sono generati dall'input S3 per la torre della Sicilia e dall'input S4 per la torre della Calabria. Sulla base dei metodi di verifica progettuale con fattori di sicurezza parziale pari a 1.0, i massimi rapporti di utilizzo sono maggiori a 1.0 solo fra elevazioni di 250 m e 350 m, con un valore massimo di 1.07 per il segmento 17 della gamba della torre della Calabria e 1.05 per il segmento 18 della gamba della torre della Sicilia. Come mostrato nell'Appendice A, i diversi input in termini di storie temporali, generano la maggiore variazione di momento longitudinale in questa porzione dell'altezza della torre.

Un modello di elemento finito dettagliato per il segmento 17 della gamba della torre della Calabria è stato utilizzato per valutare con maggiore accuratezza i livelli di sollecitazione nelle varie parti del segmento sotto la combinazione di carico dominante. Il modello è stato creato utilizzando lo stesso criterio ed i modelli di materiali descritti alla Sezione 7.3.3.3 per il modello similare utilizzato per confermare l'adeguatezza dei metodi di verifica progettuale. La combinazione di carico critica comprendeva i seguenti componenti di carico fattorizzati nella parte inferiore del segmento (sezione trasversale maggiormente sollecitata): carico assiale,  $N_s = 1730$  MN, momento longitudinale,  $M_y = 7865$  MNm, momento trasversale,  $M_z = 160$  MNm, taglio trasversale,  $V_y = 16$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Torre – Relazione tecnica specialistica	Codice documento PS0013_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

MN, taglio longitudinale,  $V_z = 14$  MN. La risposta carico-deformazione del modello (per l'accorciamento assiale e le rotazioni longitudinali e trasversali) è mostrata in Figura C-3, in cui il fattore di carico tracciato sull'asse verticale è la frazione dei carichi specificati che sono applicati in un particolare incremento di carico e l'accorciamento e la rotazione finale relativa alla risposta elastica teorica ai carichi specificati è tracciata sull'asse orizzontale. La linea nera continua al fattore di carico 1.0 rappresenta l'incremento di carico in cui i carichi specificati sono applicati al modello. Le linee diagonali tratteggiate in nero rappresentano i livelli di incremento della flessibilità dalla totale elasticità (Secante 1X) all'elevata inelasticità (Secante 3X).

Le deviazioni delle curve carico-deformazione dalla linea che rappresenta la risposta totalmente elastica, è dovuta agli effetti delle sollecitazioni residue ed alle imperfezioni geometriche. Ai carichi specificati, l'accorciamento assiale è approssimativamente del 20% maggiore e le rotazioni sono circa del 30% maggiori rispetto alla risposta elastica teorica. L'analisi indica che la capacità ultima del segmento è approssimativamente del 14% maggiore rispetto ai carichi specificati; tuttavia, quando si ammettono gli effetti di secondo ordine della ridotta rigidità secante del segmento, il limite inferiore della capacità ultima prevista è dell'11% maggiore rispetto ai carichi specificati. L'analisi indica che la sezione può sostenere le esigenze sismiche massime che le verifiche di progetto avevano suggerito essere in eccesso rispetto alla capacità della sezione.

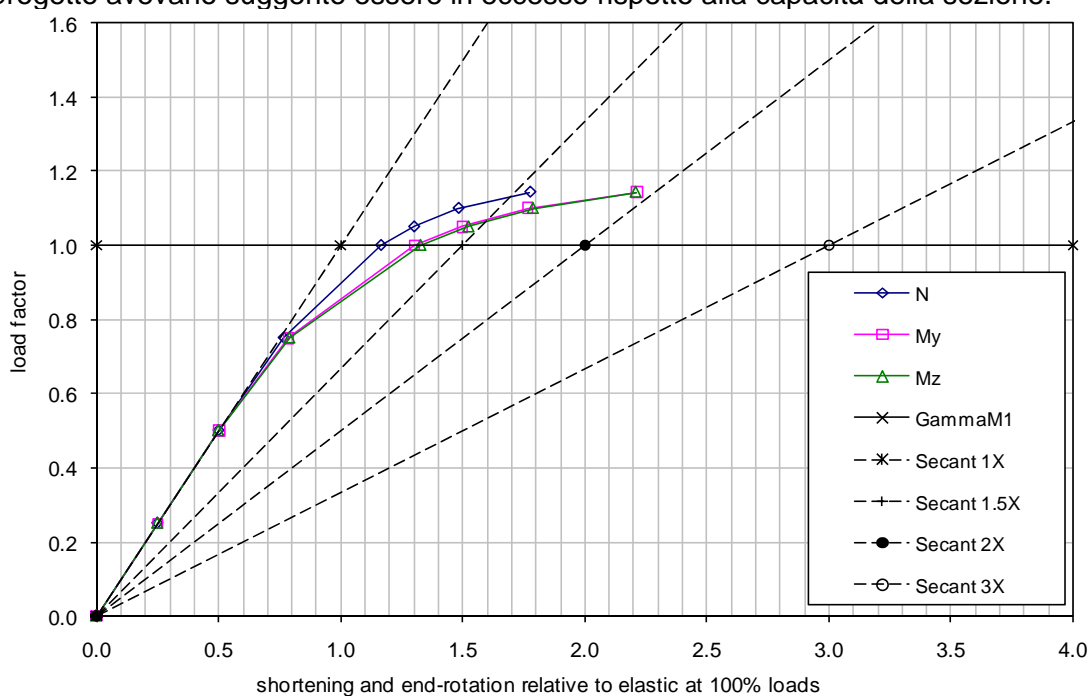


Figura C-3: Risposta deformazione-carico del segmento 17 della gamba della torre della Calabria sotto la massima combinazione di carico di storia temporale sismica.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

La portata del danno che ci si potrebbe aspettare nel segmento ai carichi specificati, è stata valutata considerando le sollecitazioni indotte e le deformazioni. Le sollecitazioni longitudinali (assiali) sul lato maggiormente compresso del segmento, sono mostrate in Figura C-4. Tutte le sollecitazioni compressive inferiori a 350 MPa, sono tracciate nello stesso colore, in modo tale da ridurre la dimensione ed incrementare il numero degli intervalli di sollecitazione tracciati vicino alla resistenza allo snervamento dell'acciaio. La sollecitazione compressiva massima riportata è di 520 MPa e si verifica molto localmente all'intersezione delle piastre A e B alla base del segmento sul lato destro della figura. Questa sollecitazione è irragionevolmente elevata e non si ritiene sia rappresentativa della sollecitazione reale esistente in questo punto, poiché la curva sollecitazione-deformazione è essenzialmente perfettamente plastica oltre la sollecitazione di snervamento di 460 MPa, come mostrato in Figura C-5. (cfr. Sezione 7.3.3.3 per ulteriori commenti sulla curva sollecitazione-deformazione utilizzata) e in ragione del fatto che il momento trasversale causa sollecitazioni compressive maggiori all'intersezione opposta delle piastre A e B. Questa sollecitazione maggiore di quanto ragionevolmente attendibile, è probabilmente il risultato delle condizioni limite al collegamento dell'elemento spider rigido, attraverso il quale il carico è applicato al modello. Lontano da questo punto e in un punto simile sull'altro lato della piastra A, le massime sollecitazioni compressive sono fra 450 MPa e 475 MPa. Le sollecitazioni di questa portata si verificano ai pannelli inferiori sulle piastre B e C, e ad intermittenza lungo la porzione curva della piastra B, vicino al punto di collegamento con la piastra A. Lontano da queste zone, le sollecitazioni massime sono chiaramente sotto lo snervamento.

Poiché l'acciaio è stato modellato come essenzialmente perfettamente plastico oltre la tensione di snervamento, le sollecitazioni non possono fornire una valutazione effettiva del potenziale danno, come possono invece fare le deformazioni. Le deformazioni longitudinali (assiali) sulla faccia maggiormente compressa del segmento sotto i carichi specificati, sono mostrate in Figura C-6. Le deformazioni inferiori a 0.002, sono tracciate nello stesso colore, in modo da ridurre la dimensione ed incrementare il numero degli intervalli di deformazione tracciati vicino alla deformazione di snervamento. La massima deformazione compressiva riportata di 0.003827 si verifica vicino alla parte inferiore della sezione sulla porzione curva della piastra B ed è molto localizzata. Lontano da questo punto, le massime deformazioni sono generalmente fra 0.003 e 0.00325. Come indicato in

smoothed multi-linear = multi-lineare liscio - bilinear = bilineare - proofstresses =sollecitazioni di prova - strain = deformazione

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica	<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Figura C-5, queste deformazioni sono inferiori a quella corrispondente allo snervamento totale (basato sulla sollecitazione di prova del 0.2%, che genererebbe uno snervamento totale di 0.00419) e dunque, questo segmento della gamba della torre raggiunge il requisito di danno riparabile, come specificato per le torri a SLU in GCG.F.04.01 Tabella 6 e definito nella Tabella 5 come “Occorrenza del comportamento inelastico localizzato...”

Dato che questo è il segmento della gamba della torre maggiormente soggetto a sollecitazione sotto il fascio dei risultati dell’analisi delle storie temporali, il comportamento dei segmenti della gamba della torre adiacenti, per i quali le verifiche progettuali indicano anche rapporti di utilizzo maggiori a 1.0, ci si aspetta siano simili ma meno severi.

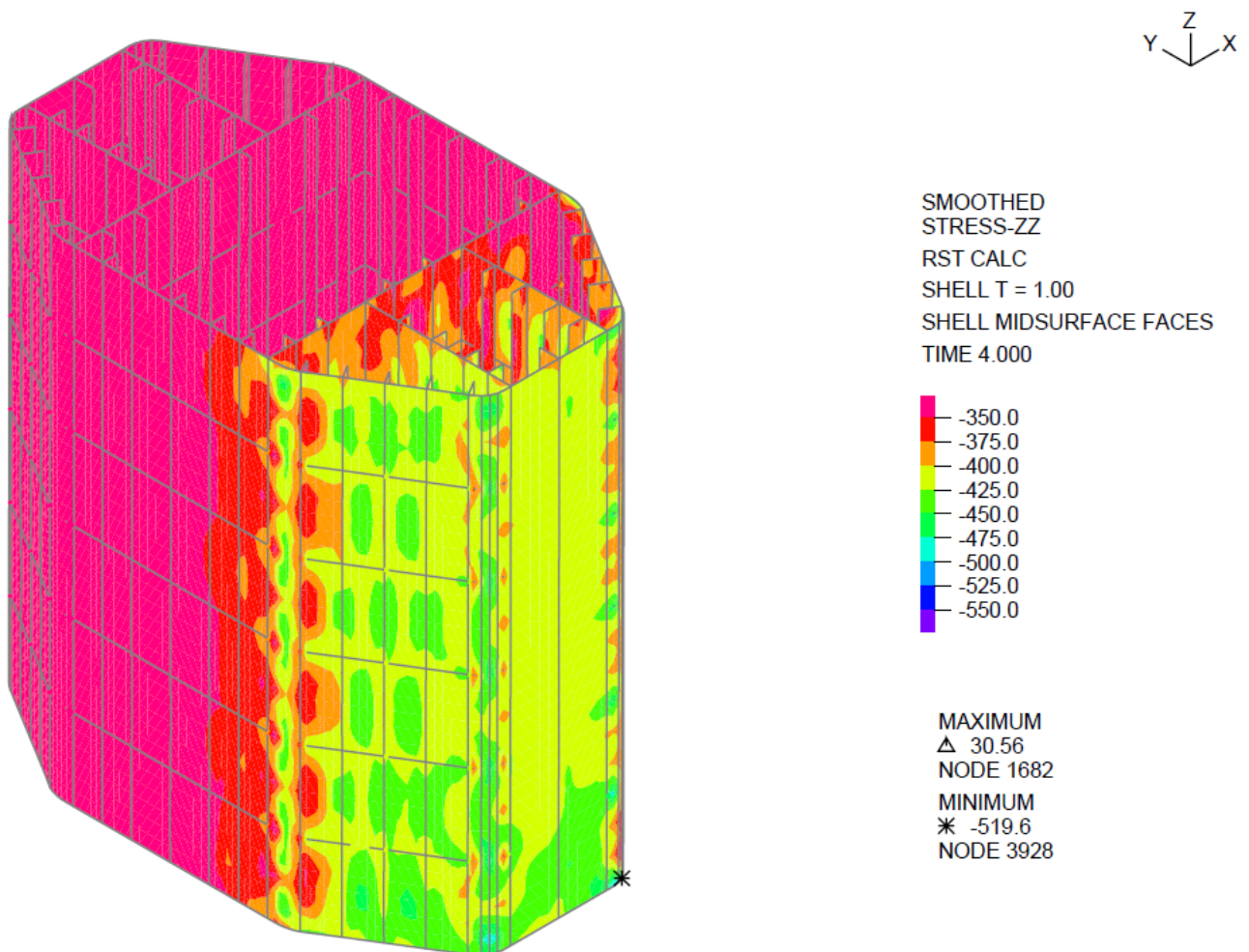
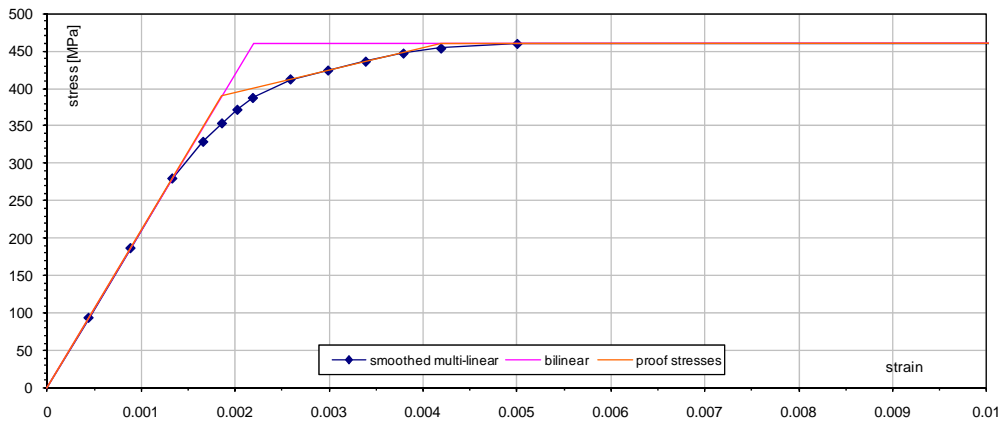


Figura C-4: Sollecitazioni longitudinali del segmento 17 della gamba della torre della Calabria, dovute agli effetti di forza sismica massima.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Torre – Relazione tecnica specialistica		<i>Codice documento</i> PS0013_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



smoothed multi-linear = multi-lineare liscio - bilinear = bilineare - proofstresses =sollecitazioni di prova - strain = deformazione

Figura C-5: curva sollecitazione – deformazione modellata.

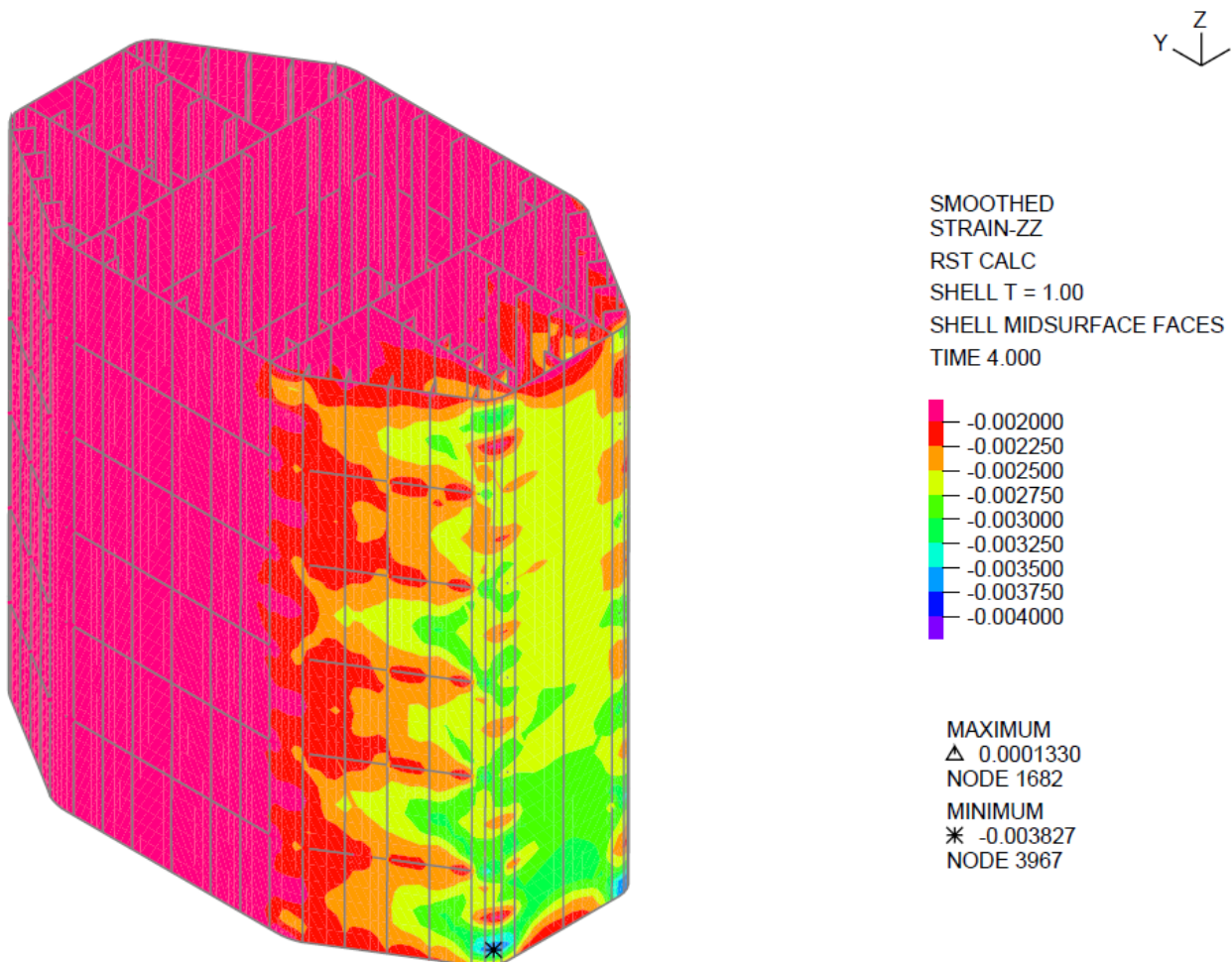


Figura C-6: Deformazioni longitudinali del segmento 17 della gamba della torre della Calabria dovute al fascio degli effetti di forza sismica.