

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  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> <i>Tipo di sistema</i> <i>Raggruppamento di opere/attività</i> Opera - tratto d'opera - parte d'opera <i>Titolo del documento</i></p>	<p>OPERA DI ATTRAVERSAMENTO PS0263_F0 METODI E SISTEMI TEMPORANEI PER LA COSTRUZIONE E IL MONTAGGIO SOVRASTRUTTURE Torri Verifica strutturale delle fasi di montaggio</p>
--	--

CODICE	C	G	1	0	0	0	P	C	L	D	P	M	T	S	5	T	O	0	0	0	0	0	0	0	1	F0
--------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

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

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio	<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

INDICE

INDICE	3
1 Introduzione	5
1.1 Ambito della verifica	5
2 Commenti generali sul metodo di costruzione	8
2.1 Movimentazione e trasporto generali di elementi	8
2.2 Montaggio dei conci delle gambe di torre	9
2.3 Montaggio dei trasversi	10
3 Modello di analisi	11
4 Verifica globale delle fasi di costruzione	13
5 Piattaforma di assemblaggio	20
5.1 Reazioni della piattaforma di assemblaggio	21
5.2 Irrigidimenti longitudinali – sollecitazioni locali	23
5.3 Diaframmi trasversali in lamiera – sollecitazioni locali	26
5.4 Connessione dello strand jack per piattaforma di assemblaggio alle gambe di torre	33
6 Procedura di giunzione	35
7 Riassunto delle modifiche di progetto necessarie per adeguare il metodo di costruzione proposto	37
Allegato 1	42

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

1 Introduzione

È stato chiesto a COWI di verificare i metodi di costruzione delle torri proposti da Eurolink/Cimolai allo scopo di controllare le strutture permanenti.

I metodi costruttivi proposti sono verificati per esaminare la fattibilità, per stimare gli impatti globali e locali sulla struttura permanente e per valutare la necessità di rinforzare ulteriormente la struttura.

Il metodo di montaggio delle torri proposto da CIMOLAI comprende i seguenti step principali:

- Montaggio dei primi tre conci delle gambe di torre partendo dalle torri di montaggio temporanee, costruite alla base di ciascuna gamba di torre.
- Montaggio di una piattaforma ad elevazione per l'assemblaggio su ciascuna gamba di torre. La piattaforma viene guidata, lungo i conci di gamba di torre precedentemente montati, mediante quattro rulli collocati alla sommità e al fondo della piattaforma. La piattaforma sale lungo la gamba di torre mediante *strand jacks* collegati al lato inferiore della piattaforma stessa e alla sommità del concio di gamba di torre montato in precedenza.
- Installazione dei conci di gamba di torre da 4 a 21 e della la sella dei cavi principali con la piattaforma ad elevazione per l'assemblaggio; e
- Installazione dei tre trasversi mediante *strand jack*, supportati a livello del concio della gamba di torre proprio sopra l'elevazione del trasverso.

1.1 Ambito della verifica

- La verifica del metodo di costruzione delle torri si basa sulle informazioni fornite da Cimolai/Eurolink. I rapporti e i disegni di Cimolai, verificati in quanto rientrano nel presente ambito, sono elencati rispettivamente alla Montaggio di una piattaforma ad elevazione per l'assemblaggio su ciascuna gamba di torre. La piattaforma viene guidata, lungo i conci di gamba di torre precedentemente montati, mediante quattro rulli collocati alla sommità e al fondo della piattaforma. La piattaforma sale lungo la gamba di torre mediante *strand jacks* collegati al lato inferiore della piattaforma stessa e alla sommità del concio di gamba di torre montato in precedenza.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

e Tabella 1-2 Disegni Cimolai verificati.

Tabella 1-1 Rapporti Cimolai verificati.

Titolo del rapporto	Documento N°
Piattaforma ad elevazione per l'assemblaggio dei piloni	Documento N. 2002159RCDO033 0
Procedura di giunzione bullonata e saldata per le torri	2002159RCDO036 0
Risposte ai "Commenti di Cimolai sul metodo di costruzione delle torri (20 aprile 2010)	2002159RCDO032 A
Metodo di montaggio Torri	2002159-CIM-EMS-0100 0

Tabella 1-2 Disegni Cimolai verificati

Titolo del disegno	Documento N°
Torri - Montaggio - Fasi di attracco della chiatta e scarico dei conci di pilone	2002159DO00616C
Montaggio - Torri - Sistemazione aree di cantiere - Messina	2002159DO00618A
Montaggio - Torri - Sistemazione aree di cantiere - Reggio Calabria	2002159DO00619A
Torri - Fasi di montaggio - Montaggio del concio di base	2002159DO00104B
Torri - Fasi di montaggio - Montaggio del concio 2	2002159DO00105B
Torri - Fasi di montaggio - Montaggio del concio 3	2002159DO00106B
Torri - Fasi di montaggio - Manovra di rotazione dei conci da posizione orizzontale a posizione verticale	2002159DO00121A
Torri - Fasi di montaggio - Montaggio del concio 4	2002159DO00109B
Torri - Attrezzatura di montaggio dei conci prefabbricati insieme di carpenteria	2002159DO00103B
Torri - Fasi di montaggio - Montaggio dell'attrezzatura di sollevamento	2002159DO00107B
Torri - Fasi di montaggio - Montaggio dei concio 4 (a/b)	2002159DO00108B
Torri - Fasi di montaggio - Montaggio traverse inferiori	2002159DO001300
Torri - Fasi di montaggio - Montaggio traverse intermedie	2002159DO001310
Torri - Fasi di montaggio - Montaggio traverse superiori	2002159DO001320

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Torri - Montaggio - Fasi del sistema di appensione dell'attrezzatura posa conci per lo spostamento del concio al successivo	2002159DO001420
Torri - Montaggio - Dettaglio ancoraggio strand jack su parete esterna	2002159DO00140A
Montaggio impalcato - Montaggio concio 28C - Sottofase a, b, c	2002159DO002370
Montaggio impalcato - Montaggio concio 27C - Sottofase d, e	2002159DO002380

Nei casi in cui non erano disponibili informazioni, sono state formulate ipotesi ragionevoli, come descritto nei relativi capitoli del presente rapporto. La verifica del metodo di costruzione è principalmente incentrata sull'esame della struttura permanente delle torri per i carichi di costruzione e include quanto segue:

- Commenti e osservazioni generali concernenti il metodo di costruzione proposto.
- Verifica globale della torre per controllare la fase costruttiva prima dell'installazione del trasverso 1. Tale fase considera il carico di sollevamento/piattaforma durante il montaggio del concio 8 della gamba di torre e il montaggio del trasverso 1.
- Verifica globale della fase costruttiva delle torri prima dell'installazione del trasverso 2. Tale fase considera il carico di sollevamento/piattaforma durante il montaggio del concio 14 della gamba di torre e il montaggio del trasverso 2.
- Verifica globale della fase costruttiva delle torri prima dell'installazione del trasverso 3. Tale fase considera il carico di sollevamento/piattaforma durante il montaggio della sella del cavo e il montaggio del trasverso 3.
- Verifica globale delle torri relativamente ai conci dell'impalcato adiacenti alle torri, utilizzando gli *strand jack* fissati al trasverso 3.
- Verifica globale delle torri relativamente alla fase di costruzione prima del montaggio del concio d'impalcato a livello di torre. In questa fase si considerano il carico del vento su impalcato, cavi, pendini e torre prima che l'impalcato stesso sia vincolato trasversalmente dalle torri.
- Verifica locale della connessione, alla gamba di torre, degli ancoraggi di *strand jack* per la piattaforma di assemblaggio.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> <i>PS0263_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>

- Verifica combinata, globale e locale, degli irrigidimenti longitudinali e dei diaframmi trasversali, relativamente alle reazioni applicate durante il montaggio dei conci; e
- Esame di fattibilità della procedura proposta per realizzare le giunzioni assiali tra i conci delle gambe di torre.

Nel progetto della torre è stata presa in considerazione la torre libera, con e senza sistema di controfreccia, poiché le domande della torre in queste condizioni non dipendono dai dettagli del metodo globale di montaggio della torre. I carichi sulla torre libera, con e senza sistema di controfreccia, sono stati calcolati soltanto per determinare il progetto dell'ancoraggio di base della torre stessa.

L'attrezzatura di montaggio e le relative connessioni alla struttura permanente, salvo quelle sopra indicate, non sono state riesaminate o verificate.

L'entità dei calcoli di analisi e di progetto è intesa e fornire un'indicazione generale della fattibilità dei metodi di costruzione e delle modifiche previste per la struttura permanente delle torri. I risultati presentati si basano sui carichi previsti alle sezioni trasversali critiche. Un'analisi particolareggiata più esauriente di tutte le fasi e di tutti i carichi di costruzione potrebbe tradursi in alcune ottimizzazioni, in particolare per le porzioni delle gambe di torre che si trovano distanti dalle sezioni trasversali critiche.

2 Commenti generali sul metodo di costruzione proposto

Come parte del riesame e della verifica, è stato svolto un riesame generale dei vari metodi proposti da Cimolai in base all'esperienza con processi simili. I commenti non si riferiscono specificatamente alla resistenza globale della struttura permanente ma dovrebbero essere considerati come parte del processo globale di revisione.

2.1 Movimentazione e trasporto generali di elementi

La costruzione e il montaggio di grandi ponti comporta una fabbricazione in serie e la movimentazione ripetitiva di elementi simili. La movimentazione inizia con le piastre e i profilati, poi seguono i pannelli e i sottogruppi e, infine, il montaggio degli elementi.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Qui di seguito i commenti relativi a movimentazione e trasporto generali dei conci:

- 1 La movimentazione, compreso il rizzaggio, dovrà avvenire preferibilmente senza attacchi saldati. L'esperienza ci insegna che l'uso ripetitivo di apparecchiature di movimentazione non saldate è economicamente conveniente e richiede minori riparazioni della struttura permanente. Allo stesso tempo, è anche più veloce fissare e liberare gli elementi durante le operazioni che sono frequenti sul percorso critico.
- 2 Durante il trasporto marittimo, si dovrà evitare che gli elementi del ponte subiscano l'impatto delle onde. L'eventuale impatto aumenterebbe notevolmente i carichi sugli elementi. Inoltre, si dovrà evitare che l'acqua del mare entri nelle parti interne degli elementi di torre, perché i depositi salini non sono ammessi e, in pratica, è difficile rimuoverli.
- 3 I punti di supporto dei conci delle gambe di torre non sembrano limitati ai punti in cui si trovano i diaframmi e gli irrigidimenti. Si dovrà verificare la capacità dei conci delle gambe di torre a livello dei punti di supporto.
- 4 In un'ulteriore fase del progetto, si potrà verificare il trasporto in posizione verticale dei conci di torre più alti. Così facendo, si eliminerebbe la necessità di girarli sul lato, riportandoli poi in posizione verticale prima del montaggio.

2.2 Montaggio dei conci delle gambe di torre

Il montaggio dei conci delle gambe di torre si basa sul sollevamento della piattaforma di assemblaggio con l'elemento della gamba di torre in alto. La piattaforma di assemblaggio è supportata mediante gli *strand jack* dalla sommità della torre, e i sollevatori degli *strand jack* vengono collocati sotto la piattaforma. Il concetto è illustrato nel disegno Cimolai N. 2002159D000103B.

Durante il sollevamento, la piattaforma di assemblaggio è guidata dalla gamba di torre, e il carico eccentrico derivante dal concio della gamba e dalla piattaforma è trasferito alla torre attraverso i rulli di guida. Le gru a torre e le piattaforme d'accesso sono tutte fissate alla piattaforma di assemblaggio, muovendosi così lungo la gamba di torre durante il sollevamento.

L'accesso alla piattaforma di assemblaggio durante il sollevamento non è permesso per ragioni di sicurezza e, pertanto, la piattaforma è comandata a distanza.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Qui di seguito i commenti al concetto di montaggio proposto:

- 1 Durante il sollevamento, gli appositi macchinari e le gru a torre sono situati sulla piattaforma di sollevamento e i macchinari sono comandati a distanza. Durante il sollevamento, si deve provvedere l'accesso di sicurezza alla piattaforma di assemblaggio per i casi di malfunzionamento e per portare a termine la manutenzione o le riparazioni durante l'operazione di sollevamento.
- 2 Il peso massimo di un concio di gamba di torre è pari a ~ 1525 t (il concio 14 della gamba di torre in Sicilia include le TMD) e il peso della piattaforma di assemblaggio è pari a ~ 600 t.
- 3 La piattaforma di assemblaggio è anche piattaforma di lavoro per tutti i lavori da eseguire dall'esterno delle gambe di torre. Il che significa che tutti i lavori eseguiti dalla piattaforma si trovano sul percorso critico. Ad esempio, saldatura, test di saldatura NdT e riparazioni di saldature.
- 4 Durante il sollevamento di una gamba di torre, i carichi pesanti dei conci sono trasferiti alle gambe di torre attraverso i rulli di guida. Ci si attende, pertanto, che tutte le aree di contatto dei rulli debbano essere pitturate dopo che sia stato terminato il montaggio della torre.

2.3 Montaggio dei trasversi

I trasversi sono montati con *strand jack* dalla sommità dei conci di gamba di torre montati in precedenza e con un sistema di funi di rinvio, che consente di passare i trasversi ai bassi livelli durante il sollevamento.

Qui di seguito i commenti al concetto di montaggio proposto:

1. Le gambe di torre sono disposte in pendenza tra di loro e, quindi, defletteranno una verso l'altra, così come sono state costruite. Sarebbe possibile neutralizzare la deflessione prima di installare i trasversi, in modo da ottenere la geometria desiderata e da non generare situazioni impreviste nelle gambe di torre.
2. Dovrebbe anche essere possibile neutralizzare eventuali deviazioni di appiombamento fuori tolleranza in direzione longitudinale.
3. Sembra che i trasversi siano sollevati con due *strand jack* a ciascun'estremità, per cui vi è ridondanza.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

4. Durante il montaggio dei trasversi si utilizza un cavo di rinvio per tenere i trasversi stessi lontani dall'asse della torre. Ciò è necessario poiché i trasversi non possono essere sollevati direttamente in linea con le gambe delle torri, a causa delle fondazioni e/o dei trasversi montati in precedenza. L'orientamento degli *strand jack* durante il sollevamento dei trasversi varierà da verticale ad un angolo di approssimativamente 6°-8° dalla posizione verticale.

3 Modello di analisi

Come parte della verifica e valutazione delle torri durante la costruzione, è stato creato un modello di analisi. Il modello di analisi delle torri è stato creato utilizzando il software intermo CAMIL di analisi strutturale COWI/Buckland e Taylor Ltd. Il modello è stato costruito passo dopo passo seguendo la procedura di montaggio proposta. Questo modello comprende gli elementi "beam" con le adeguate proprietà della sezione e masse, a rappresentare le gambe di torre e i trasversi. Le fondazioni vengono modellate a partire dalle molle del terreno di cui al modello globale IBDAS. La torre situata in Calabria è stata modellata tenendo conto del fatto che essa comprende, in generale, piastre di gamba di torre più sottili di quelle della torre situata in Sicilia e, pertanto, è leggermente meno tollerante ai carichi di erosione. Per confermare l'appropriatezza del modello, le forme modali e le forze per la torre libera completata sono state verificate utilizzando quelle determinate dal modello di analisi globale IBDAS.

I seguenti carichi sono stati presi in considerazione nell'analisi della fase di costruzione:

- Fisso.
- Vento.
- Sismico (in base all'analisi dello spettro di risposta).
- Montaggio di concio di torre, utilizzando la piattaforma di assemblaggio (comprendente l'impatto e un gioco per le tolleranze geometriche di fabbricazione).
- Montaggio del trasverso (compreso l'impatto).

I carichi del vento e sismici sono stati determinati per un adeguato periodo di ritorno in considerazione della durata approssimativa della costruzione delle torri. I componenti delle torri sono analizzati e verificati considerando due serie di combinazioni di carichi: i) carichi che

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

agiscono sulla torre durante la costruzione generale; e ii) carichi ridotti che agiscono sulla torre durante le operazioni di sollevamento.

- Per i carichi di vento durante le operazioni di sollevamento sono considerati periodi di ritorno più brevi rispetto a quelli considerati durante la costruzione generale della torre, poiché le operazioni di sollevamento possono essere sospese durante i periodi di vento forte. Le velocità del vento caratteristiche prese in considerazione durante la costruzione sono elencate alla Montaggio di concio di torre, utilizzando la piattaforma di assemblaggio (comprendente l'impatto e un gioco per le tolleranze geometriche di fabbricazione).

Tabella 3-1 Velocità del vento caratteristiche durante la costruzione

Elevazione (m)	Velocità del vento caratteristica durante la costruzione generale (m/s)	Velocità del vento caratteristica durante le operazioni di sollevamento (m/s)
10	36,5	10,5
70	47	14
400	60	20

Le pressioni di progetto del vento sono proporzionali alla velocità del vento al quadrato, per cui le pressioni del vento durante le operazioni di sollevamento saranno ridotte soltanto al 10% ($100 \times 10,5^2/36,5^2$) dei valori durante la costruzione generale.

- Le pressioni totali di progetto del vento sono determinate in base alle velocità del vento di cui alla Montaggio di concio di torre, utilizzando la piattaforma di assemblaggio (comprendente l'impatto e un gioco per le tolleranze geometriche di fabbricazione).

, moltiplicate per un fattore di raffica di 2,0 e per un adeguato coefficiente di resistenza per l'angolo del vento preso in considerazione. I fattori di resistenza sono come specificato nei Principi Generali di Progettazione (CG.10.00-P-RG-D-P-SV-T4-00-00-00-01). Per il vento che agisce lungo l'asse del ponte, il coefficiente di resistenza è pari a 0,5 per ciascuna gamba. Per il vento che agisce trasversalmente all'asse del ponte, è specificato un fattore di resistenza totale pari a 1,8 per le gambe sopravento e sottovento. Al fine della presente valutazione, si applica un fattore di resistenza pari a 1,8 sia per le gambe sopravento sia per quelle sottovento.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Le forze sismiche durante la costruzione generale si basano sullo spettro di progetto riportato nei Principi Base (GCG.F.04.01) e su un'accelerazione massima del suolo di $1,4 \text{ m/s}^2$, come specificato nel "Criterio di Progettazione: Verifica delle fasi di costruzione per le strutture permanenti" (A9055-NOT-3-028). Durante brevi operazioni di sollevamento, la probabilità di un evento sismico significativo è al di sotto di quanto tipicamente associato ad altri carichi ULS. Pertanto, il carico sismico durante le operazioni di sollevamento non viene preso in considerazione.

I componenti delle torri sono verificati utilizzando le combinazioni ULS 1 e 3.

ULS1: $(0,95 / 1,15) \text{ PP} + (0 / 1,5) \text{ PN} + 1,0 \text{ VV}$

ULS3: $(0,95 / 1,15) \text{ PP} + (0 / 1,5) \text{ PN} + 1,0 \text{ VS}$

dove PP è il peso intrinseco del componente strutturale, PN è il peso intrinseco del componente non strutturale, W è il carico del vento e VS è il carico sismico.

4 Verifica globale delle fasi di costruzione

Utilizzando il modello di analisi descritto nel capitolo precedente, gli effetti globali delle forze sono determinati per la torre durante le fasi critiche di costruzione. Le tre fasi di costruzione seguenti corrispondono al massimo degli effetti delle forze sulle gambe di torre:

- Immediatamente prima dell'installazione del trasverso 1. Tale fase considera il carico di sollevamento/piattaforma durante il montaggio del concio 8 della gamba di torre e il montaggio del trasverso 1.
- Immediatamente prima dell'installazione del trasverso 2. Tale fase considera il carico di sollevamento/piattaforma durante il montaggio del concio 14 della gamba di torre e il montaggio del trasverso 2; e
- Immediatamente prima dell'installazione del trasverso 3. Tale fase considera il carico di sollevamento/piattaforma durante il montaggio del trasverso 3.

La Figura 4-1 Modelli di analisi per le fasi critiche di costruzione e per la torre completata

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

mostra il modello nelle fasi critiche sopra descritte e dopo il completamento della costruzione della torre.



Figura 4-1 Modelli di analisi per le fasi critiche di costruzione e per la torre completata

La Figura 4-2 Inviluppi di effetti di forze nelle fasi critiche di costruzione durante la costruzione generale

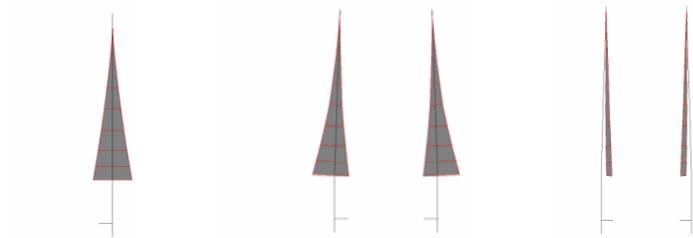
mostra gli inviluppi di momento longitudinale (M_y), momento trasversale (M_z) e forza assiale (P) nelle fasi critiche di costruzione, Immediatamente prima dell'installazione di ciascun trasverso. Gli inviluppi di effetto delle forze sono per la costruzione generale (ossia, non per le operazioni di sollevamento) e includono carico fisso, effetti del vento e sismici come descritto al capitolo precedente. I momenti determinanti per le gambe di torre nelle fasi critiche di costruzione sono tipicamente causati dalla combinazione di carichi di vento.

Verifica strutturale delle fasi di montaggio

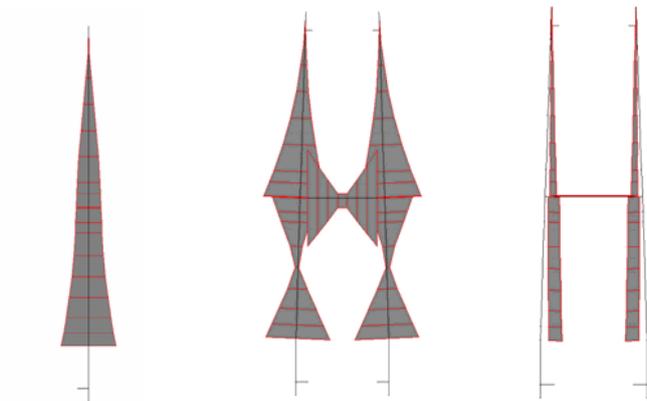
Codice documento
PS0263_F0_ITA.doc

Rev
F0

Data
20-06-2011

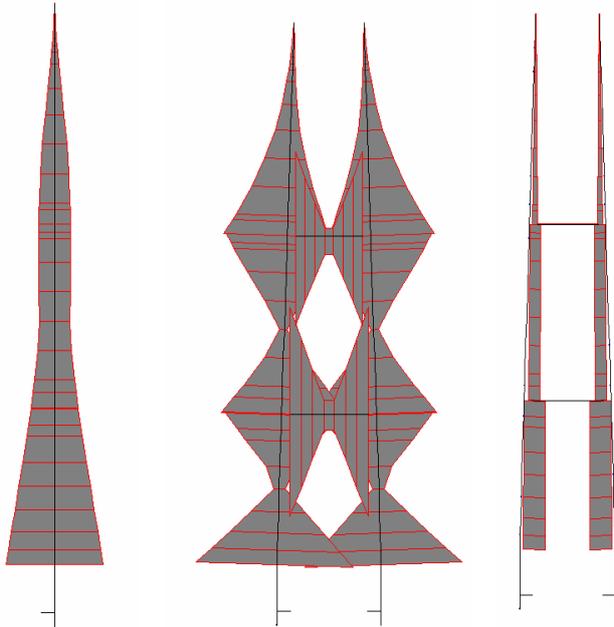


$M_{y,max} = 1142\text{MN-m}$ $M_{z,max} = 1070\text{MN-m}$ $P_{max} = 125\text{MN}$



$M_{y,max} = 1247\text{MN-m}$ $M_{z,max} = 1450\text{MN-m}$ $P_{max} = 265\text{MN}$

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011



$$M_{y,max} = 1390\text{MN-m} \quad M_{z,max} = 2275\text{MN-m} \quad P_{max} = 506\text{MN}$$

Figura 4-2 Involuppi di effetti di forze nelle fasi critiche di costruzione durante la costruzione generale

Gli effetti delle forze mostrati alla Figura 4-2 Involuppi di effetti di forze nelle fasi critiche di costruzione durante la costruzione generale

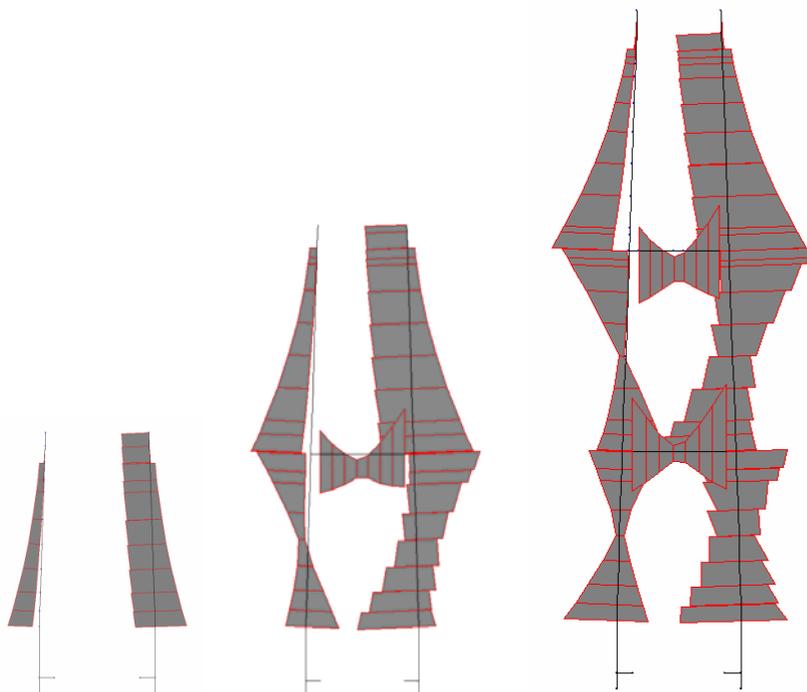
sono ben al di sotto di quelli presenti nel ponte finito, per il quale sono stati progettati i componenti delle torri. Pertanto, l'attuale progetto delle torri è adeguato alle forze globali durante le fasi temporanee di costruzione.

Durante le operazioni di sollevamento è stato ipotizzato che la torre sia soggetta a basse velocità del vento, e i carichi sismici non vengono presi in considerazione. Tuttavia, la piattaforma di assemblaggio dei conci delle gambe di torre esercita sulle gambe stesse momenti trasversali significativi.

La parte dominante delle sollecitazioni durante le operazioni di sollevamento è rappresentata dal carico assiale e dalla flessione trasversale della gamba di torre. La Figura 4-3 mostra gli involuppi di momento trasversale delle gambe di torre per le tre fasi critiche di costruzione. Gli involuppi tengono in considerazione gli effetti dei carichi fissi del vento. Gli involuppi includono anche gli effetti del montaggio dei trasversi e dei conci delle gambe di torre. I carichi derivanti dal montaggio

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Verifica strutturale delle fasi di montaggio	<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

di un concio di gamba sono stati spostati lungo tutta l'altezza della gamba allo scopo di individuare la posizione critica. La piattaforma di assemblaggio che porta un concio di gamba di torre è stata posta soltanto sulla gamba destra della torre, in modo da mostrare più chiaramente l'effetto degli involuppi del momento.



$M_{z,max} = 380\text{MN-m}$

$M_{z,max} = 530\text{MN-m}$

$M_{z,max} = 610\text{MN}$

Figura 4-3 Involuppi di momento trasversale durante le operazioni di sollevamento

Gli effetti globali delle forze durante il sollevamento dei trasversi e dei conci di gambe di torre non sono determinanti per il progetto delle gambe di torre. Tuttavia, le sollecitazioni causate dagli effetti globali devono essere combinate con le sollecitazioni locali causate dalle reazioni della piattaforma di assemblaggio sulle gambe di torre. Tuttavia, occorre una stima delle sollecitazioni globali massime nelle gambe di torre.

La massima sollecitazione di compressione nell'irrigidimento longitudinale caricato della piastra B è approssimativamente di 50 MPa e si presenta nel concio 6 della gamba di torre, quando la piattaforma di sollevamento si trova approssimativamente nello stesso punto. Carico assiale, momento longitudinale e momento trasversale coesistenti, che causano la sollecitazione massima sono:

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

$$P_{\max} = 291 \text{ MN}$$

$$M_{y,\max} = 80 \text{ MN-m}$$

$$M_{z,\max} = 97 \text{ MN-m}$$

La massima sollecitazione di compressione nell'irrigidimento longitudinale caricato della piastra C è approssimativamente di 70 MPa e si presenta nel concio 7 della gamba di torre, esattamente sotto il trasverso 1, quando la piattaforma di sollevamento si trova approssimativamente nello stesso punto. Carico assiale, momento longitudinale e momento trasversale coesistenti, che causano la sollecitazione massima sono:

$$P_{\max} = 259 \text{ MN}$$

$$M_{y,\max} = 67 \text{ MN-m}$$

$$M_{z,\max} = 563 \text{ MN-m}$$

Le sollecitazioni massime di trazione attese nella torre sono determinate utilizzando lo stesso approccio descritto sopra. Le sollecitazioni massime di trazione nelle gambe di torre sono inferiori alle sollecitazioni massime di compressione in quanto controbilanciate dalla sollecitazione di compressione del carico fisso. Una sollecitazione massima di trazione di approssimativamente 30 MPa è stata calcolata nei punti in cui si trovano gli irrigidimenti longitudinali.

Per semplicità, una sollecitazione assiale globale massima di irrigidimento longitudinale, pari a 70 MPa in compressione e a 30 MPa in trazione è ipotizzata per gli irrigidimenti longitudinali caricati delle piastre B e C in combinazione con le sollecitazioni locali causate dalle reazioni della piattaforma di assemblaggio sulla gamba di torre.

Come indicato al capitolo 1.1, sono stati anche verificati gli effetti prodotti sulla torre dal montaggio del concio 28C dell'impalcato vicino alla torre stessa utilizzando stand jacks fissati al trasverso 3, come mostrato alla Figura 4-4 Montaggio del concio 28C dell'impalcato utilizzando il trasverso 3

Il peso approssimativo del concio di impalcato lungo 58 m è pari a 1.064 tonnellate. La forza massima dello *strand jack* è stimata in base all'angolo del cavo per la posizione critica del concio d'impalcato durante il sollevamento. Utilizzando ipotesi prudenziali relative all'ubicazione della

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

connessione del trasverso e ai dettagli a livello del trasverso stesso, è stato trovato che le forze massime dello *strand jack* causeranno basse sollecitazioni del trasverso. Pertanto, questa fase di costruzione non è determinante per il progetto delle gambe di torre o del trasverso 3.

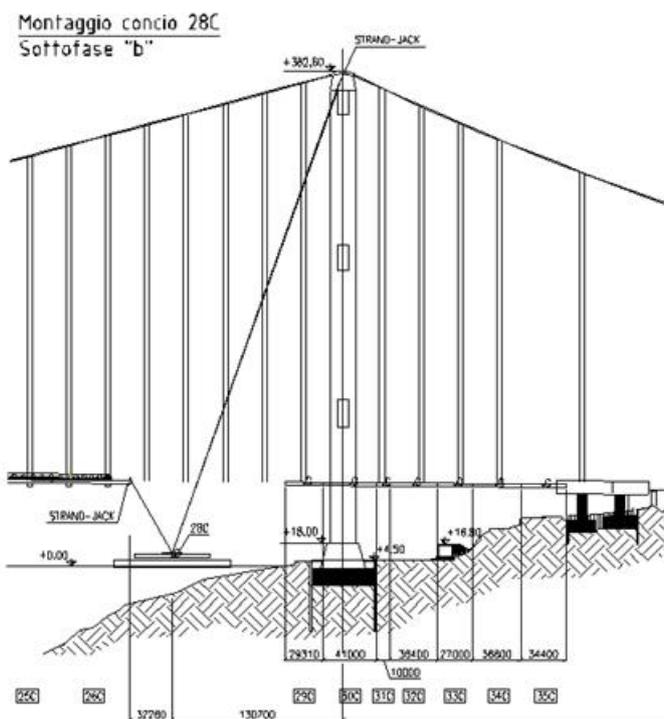


Figura 4-4 Montaggio del concio 28C dell'impalcato utilizzando il trasverso 3

Come indicato al capitolo 1.1, la torre è stata anche verificata per quanto concerne i carichi del vento presenti quando l'impalcato sospeso sia quasi completamente montato ma non ancora vincolato trasversalmente a livello delle torri. In questa condizione, tutti i carichi di vento applicati all'impalcato, ai pendini e ai cavi devono essere trasferiti alla torre attraverso i cavi principali a livello della relativa sella. I requisiti della torre in questa condizione si basano sulla velocità del vento SLS2, specificata nei Principi Base. Gli effetti delle forze per questa fase di costruzione sono stati comparati con quelli derivanti da vento ULS/SILS sulla struttura completata. È stato trovato che il vento ULS/SILS sul ponte completato non sarà determinante per il progetto della struttura permanente della torre.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Verifica strutturale delle fasi di montaggio	Codice documento PS0263_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

5 Piattaforma di assemblaggio

I conci delle gambe di torre uno a tre sono montati direttamente mediante le torri provvisorie di montaggio situate a ogni base di gamba. Le torri provvisorie di montaggio non hanno alcun effetto sulla struttura permanente e non sono prese in considerazione nella presente verifica. I conci delle gambe di torre da 4 a 21 e le selle dei cavi principali sono montati utilizzando la piattaforma ad elevazione per l'assemblaggio. La piattaforma di assemblaggio viene sollevata dagli strand jack fissati alla sommità del concio di gamba di torre montato in precedenza. Il concio della gamba di torre che viene montato è supportato, alla sommità della piattaforma di assemblaggio, sull'esterno della gamba stessa. La grande eccentricità della piattaforma di assemblaggio e dei pesi dei conci delle gambe di torre viene bilanciata da supporti che rotolano lungo le superfici delle gambe stesse. Il metodo proposto per montare i conci delle gambe di torre mediante piattaforma di assemblaggio è mostrato alla Figura 5-1 Piattaforma di assemblaggio su gamba di torre e vista isometrica della piattaforma

con una vista isometrica della piattaforma. La piattaforma di assemblaggio applica reazioni molto grandi alla gamba di torre e gli effetti sono valutati nel presente capitolo.

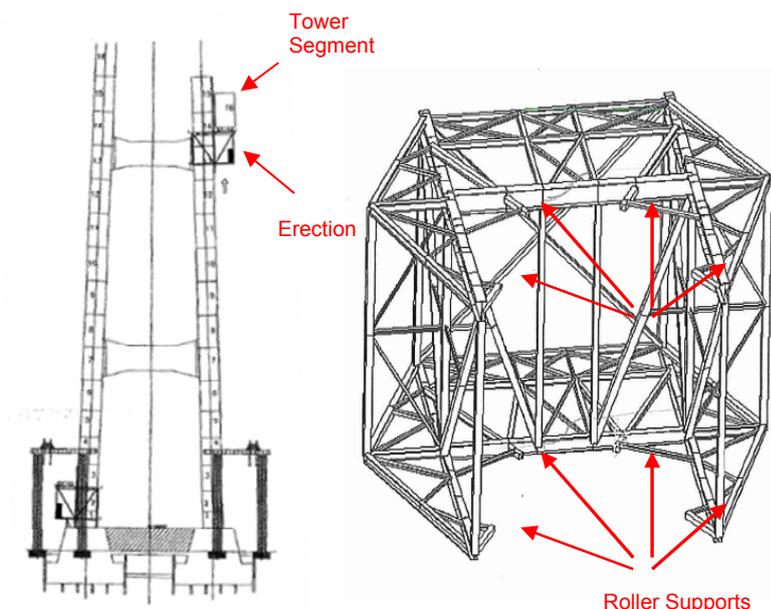


Figura 5-1 Piattaforma di assemblaggio su gamba di torre e vista isometrica della piattaforma

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Verifica strutturale delle fasi di montaggio	Codice documento PS0263_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

5.1 Reazioni della piattaforma di assemblaggio

Utilizzando la configurazione della piattaforma di assemblaggio e i pesi di piattaforma e concio, si stimano le reazioni del supporto a rotolamento. Per determinare le reazioni si considerano i seguenti pesi:

Peso massimo del concio (comprensivo di 6-25,5 t degli assorbitori armonici): 1525 t

Peso della piattaforma fornita da Cimolai (Doc. n. 2002159RCD0032 A): 600 t

La Figura 5-2 *Diagramma di corpo libero della piattaforma di assemblaggio*

illustra il diagramma di corpo libero della piattaforma di assemblaggio che porta il concio di torre durante il sollevamento e il posizionamento alla sommità della torre.

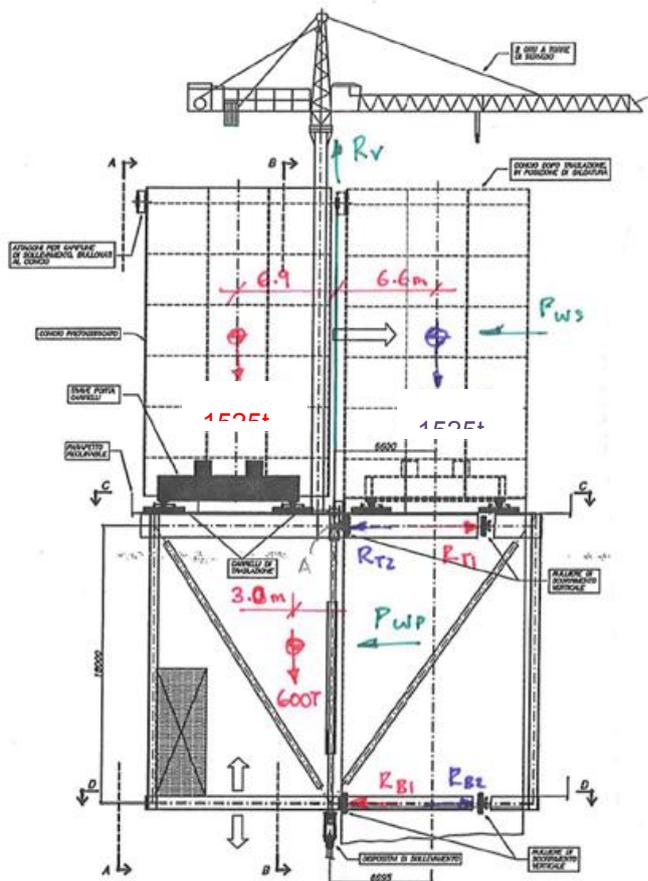


Figura 5-2 *Diagramma di corpo libero della piattaforma di assemblaggio*

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Utilizzando il diagramma di corpo libero riportato alla Figura 5-2 Diagramma di corpo libero della piattaforma di assemblaggio

Ipotizzando, molto prudenzialmente e soltanto per le verifiche di fattibilità, di aumentare tali reazioni per un fattore di carico fisso pari a 1,15 e per un fattore d'impatto dinamico pari a 1,15, la reazione risultante è $684 \times 1,15 \times 1,15 = 905$ tonnellate. Aggiungendosi ai carichi gravitazionali, il carico del vento causerà reazioni aggiuntive. Per la velocità massima del vento di 20 m/s considerata durante le operazioni di sollevamento, si stima che la reazione risultante sarebbe di 75 tonnellate. La reazione calcolata è divisa tra i due supporti a rotolamento utilizzati alla sommità e al fondo della piattaforma. Poiché i supporti sono orientati approssimativamente su un angolo di 30° con la forza applicata, la reazione totale esercitata sull'irrigidimento longitudinale è $(905+75)/2/\cos(30^\circ) = 565$ tonnellate.

La grandezza dello squilibrio di reazione è una funzione della rigidità della piattaforma di assemblaggio, dell'attrito trasversale sui rulli e delle tolleranze geometriche ammesse. Un'analisi di questi parametri non rientra nell'ambito della presente verifica; tuttavia, per questa valutazione le reazioni calcolate sono state aumentate del 50%, ciò che ha portato ad una reazione massima di:

$$R_{1\max} = 565 \times 1,5 = 848 \text{ tonnellate.}$$

Come mostrato alla Figura 5-2 Diagramma di corpo libero della piattaforma di assemblaggio

, l'eccentricità creata dalla piattaforma e dal concio di torre è invertita quando il nuovo concio di torre viene posizionato in linea con l'esistente gamba di torre. In questa configurazione, i pesi della piattaforma di assemblaggio e del concio di gamba di torre presentano eccentricità opposte, riducendo la reazione massima. Utilizzando lo stesso approccio di cui sopra, ma ignorando il fattore d'impatto poiché la piattaforma non è in sollevamento quando si trova in questa posizione, la reazione massima è:

$$R_{2\max} = 522 \text{ tonnellate.}$$

La reazione massima è causata mentre la piattaforma di assemblaggio viene sollevata con un concio di gamba di torre.

Per i rulli di grande diametro proposti da Cimolai, il carico verticale aggiuntivo dovuto all'attrito dei rulli stessi è probabilmente minimo. Data l'incertezza sulla grandezza dello squilibrio di reazione, i piccoli effetti dell'attrito dei rulli vengono trascurati.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Rev</th> <th>Data</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20-06-2011</td> </tr> </tbody> </table>	Rev	Data	F0	20-06-2011
Rev	Data						
F0	20-06-2011						

5.2 Irrigidimenti longitudinali – sollecitazioni locali

Le reazioni della piattaforma descritte nel precedente capitolo sono applicate agli irrigidimenti longitudinali angolari della gamba di torre sulle piastre B e C, come mostrato alla Figura 5-3

Irrigidimenti longitudinali a supporto dei rulli della piattaforma di assemblaggio

Gli irrigidimenti longitudinali portano le reazioni della piattaforma in flessione, estendendosi tra i diaframmi trasversali. È stato ipotizzato che le reazioni della piattaforma siano applicate agli irrigidimenti longitudinali attraverso la configurazione di rulli provvista da Cimolai.

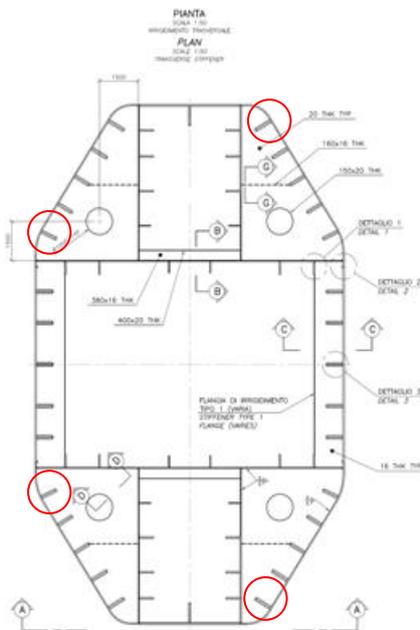


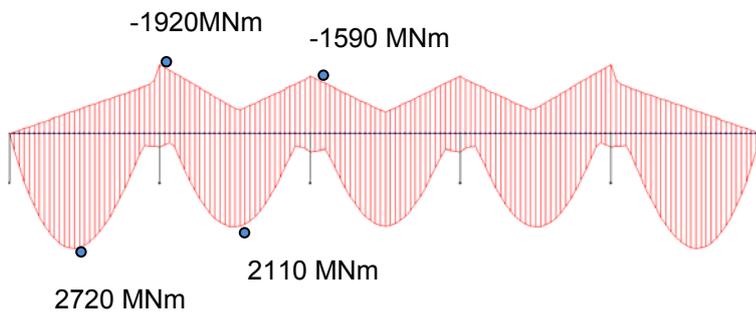
Figura 5-3 Irrigidimenti longitudinali a supporto dei rulli della piattaforma di assemblaggio

La (a) spaziatura dei diaframmi trasversali a 3,5 m.

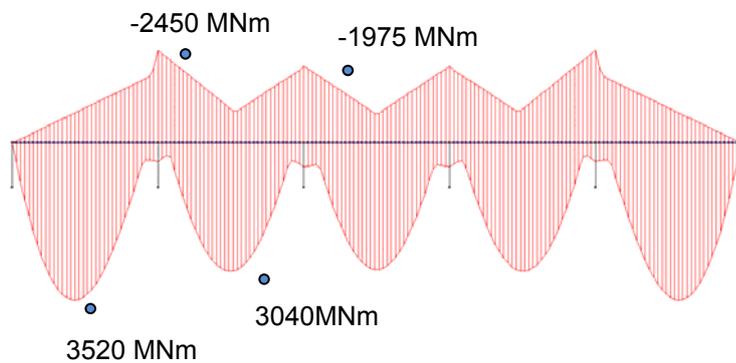
mostra gli involuipi del momento degli irrigidimenti longitudinali per le posizioni dei diaframmi trasversali a 3,0 e 3,5 m, che coprono la gamma tipica delle spaziature degli irrigidimenti presenti nelle gambe di torre. Alla sommità della torre montata parzialmente, la reazione della piattaforma di assemblaggio è applicata all'ultimo tratto degli irrigidimenti longitudinali sotto la giunzione orizzontale del concio. A livello di diaframma trasversale, immediatamente sotto la giunzione del concio, non vi è continuità di momento; pertanto, i maggiori momenti flettenti dell'irrigidimento longitudinale si presentano quando le reazioni della piattaforma sono applicate in questo tratto dell'irrigidimento longitudinale. I momenti massimi per le spaziature dei diaframmi trasversali a

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_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						

3,0 m e 3,5 m sono rispettivamente pari a 2.720 kNm e 3.520 kNm. Lontano dalla giunzione del concio, alla sommità della torre, i momenti del tratto interno tra i diaframmi trasversali sono minori, presentando valori di 2.110 kNm e 3.040 kNm per le posizioni dei diaframmi a 3,0 m e 3,5 m.



(a) spaziatura dei diaframmi trasversali a 3,0 m.



(a) spaziatura dei diaframmi trasversali a 3,5 m.

Figura 5-4 Involuppi di momento dell'irrigidimento trasversale per il carico della piattaforma di assemblaggio

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Le sollecitazioni massime degli irrigidimenti longitudinali sono calcolate utilizzando i momenti massimi mostrati alla (a) spaziatura dei diaframmi trasversali a 3,5 m.

. La **Errore. L'autoriferimento non è valido per un segnalibro.** identifica l'irrigidimento longitudinale critico e le conseguenti sollecitazioni locali di flessione per le due spaziature dei diaframmi trasversali prese in considerazione. Nel tratto dell'irrigidimento verticale sotto la giunzione trasversale, le massime sollecitazioni locali di flessione negli irrigidimenti longitudinali caricati della piastra B e C variano tra 353 MPa e 673 MPa per le due spaziature dei diaframmi trasversali prese in considerazione. Nei tratti interni dell'irrigidimento longitudinale, le massime sollecitazioni locali di flessione negli irrigidimenti longitudinali caricati della piastra B e C variano tra 275 MPa e 522 MPa.

I maggiori momenti dell'irrigidimento sono causati dalle reazioni della piattaforma di assemblaggio tra i diaframmi e, pertanto, le maggiori sollecitazioni locali di flessione degli irrigidimenti sono le sollecitazioni di trazione indotte sulla sporgenza dell'irrigidimento. Pertanto, la sollecitazione totale massima deriva dalla combinazione con la massima sollecitazione globale di trazione pari a 30 MPa. Le conseguenti sollecitazioni totali sono, in molti casi, maggiori della resistenza alle sollecitazioni prevista in progetto, $f_y/\gamma_{m0} = 438$ MPa, per entrambe le spaziature dei diaframmi; il che indica che gli irrigidimenti longitudinali caricati dalla piattaforma di assemblaggio dovranno essere modificati.

Le massime sollecitazioni locali di compressione sono causate dai momenti inarcanti (negativi) a livello dei diaframmi. Quando combinate con la massima sollecitazione globale di compressione di 75 MPa, le sollecitazioni locali sono sempre inferiori alle sollecitazioni massime di trazione.

La combinazione della sollecitazione globale di trazione di 30 MPa con le più elevate sollecitazioni di flessione del tratto finale è prudentiale e alquanto irrealistica, poiché vicino alla sommità della torre parzialmente montata si ha una sollecitazione assiale globale molto limitata. Comunque, la sollecitazione assiale globale è, in generale, una piccola parte della sollecitazione totale e, per semplicità, nella presente valutazione si ipotizza applicata in tutti i casi.

Tabella 5-1 Sollecitazioni degli irrigidimenti longitudinali dovute al carico della piattaforma di assemblaggio

Ubicazio ne irrigidime	Concio critico	Dimensi oni irrigidim	Piastra t (mm)	Modulo sezione min. (mm ³)	Tratto irrigid.	Lunghezza tratto (m)	M _{max} (KNm)	σ (MPa)
------------------------------	-------------------	-----------------------------	-------------------	--	--------------------	----------------------------	---------------------------	------------

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

nto		ento (mm)						
Piastra B	Concio Calabria 10	625 x 63	45	$7,67 \times 10^6$	Int.	3,0	2110	275
						3,5	2730	358
					Fin.	3,0	2720	353
						3,5	3520	458
Piastra C	Concio Sicilia 16	550 x 55	40	$5,22 \times 10^6$	Int.	3,0	2110	404
						3,5	2730	522
					Fin.	3,0	2720	520
						3,5	3520	673

Allo scopo di limitare le sollecitazioni locali alla sollecitazione massima ammessa stimata, pari a 408 MPa (438 MPa – 30 MPa), si stima che le dimensioni dei quattro irrigidimenti caricati debbano essere aumentate approssimativamente a 700 mm x 70 mm nel tratto finale sotto la giunzione orizzontale e approssimativamente a 625 mm x 63 mm nei tratti interni. Per uno spessore di piastra principale pari a 40 mm, tali irrigidimenti avrebbero moduli di resistenza elastici rispettivamente di $10 \times 10^6 \text{ mm}^4$ e $7,45 \times 10^6 \text{ mm}^4$. Per i momenti massimi di 3.520 kNm e 2.720 kNm, si hanno massime sollecitazioni locali di flessione pari a 352 MPa e 366 MPa.

Essendo le forze di taglio approssimativamente uguali a livello di tutti i supporti, le sollecitazioni massime di taglio si presenteranno negli irrigidimenti 625 x 63. La massima sollecitazione media di taglio su un irrigidimento 625 x 63 è approssimativamente 141 MPa, corrispondente a un rapporto di utilizzo taglio pari a 0,55. Per considerare l'interazione di taglio e momento, le sollecitazioni di von Mises sono state calcolate in base alle forze e momenti massimi di taglio a livello del supporto. In tale punto il rapporto di utilizzo per le sollecitazioni di von Mises è approssimativamente 0,9.

Può essere possibile ridurre la quantità di acciaio aggiuntivo necessario per provvedere la capacità richiesta, considerando modificazioni alternative alla sezione trasversale delle gambe di torre e eventualmente alla sequenza fabbricazione/assemblaggio. Tali alternative sono descritte al capitolo 7.

5.3 Diaframmi trasversali in lamiera – sollecitazioni locali

Le lamiere dei diaframmi trasversali che supportano gli irrigidimenti longitudinali devono anche essere progettate per le reazioni della piattaforma di assemblaggio. L'attuale progetto non prevede

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Verifica strutturale delle fasi di montaggio	<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

alcuna connessione diretta tra l'irrigidimento longitudinale e il diaframma trasversale, come mostrato alla Figura 5-5 Attuale dettaglio di diaframma trasversale a livello dell'irrigidimento longitudinale



Figura 5-5 Attuale dettaglio di diaframma trasversale a livello dell'irrigidimento longitudinale

Questo dettaglio è inadeguato per le grosse reazioni della piattaforma di assemblaggio sugli irrigidimenti longitudinali, e si deve provvedere ad una connessione diretta saldando l'irrigidimento longitudinale direttamente al diaframma trasversale, come mostrato alla Figura 5-6 Dettaglio modificato di connessione dell'irrigidimento longitudinale al diaframma trasversale

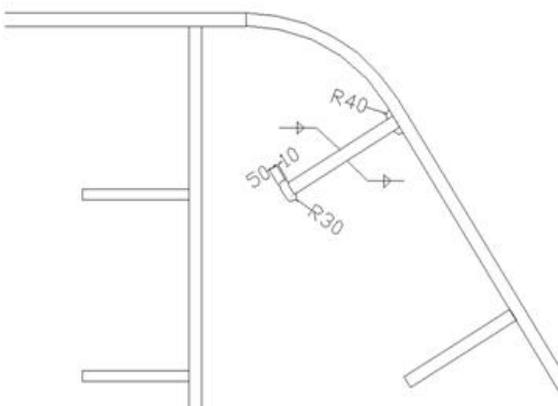


Figura 5-6 Dettaglio modificato di connessione dell'irrigidimento longitudinale al diaframma trasversale

In base al modello continuo ad elementi "beam" utilizzato per analizzare l'irrigidimento longitudinale sotto i carichi della piattaforma di assemblaggio, la reazione massima a livello di un diaframma trasversale è approssimativamente pari a 7.780 kN e varia poco con l'ubicazione del

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

diaframma stesso. Per la configurazione data dei rulli, questa reazione si presenta quando il rullo è centrato sopra il diaframma. In questa posizione, i rulli centrali sarebbero situati a 187,5 mm dall'asse della lamiera del diaframma. I rulli sono stretti e, pertanto, è appropriato ipotizzare che l'intera reazione poggi sull'irrigidimento longitudinale (distribuzione trasversale trascurabile) e che sia trasferita nel taglio tra l'irrigidimento longitudinale e il diaframma trasversale.

Per il dettaglio di connessione mostrato alla Figura 5-6 Dettaglio modificato di connessione dell'irrigidimento longitudinale al diaframma trasversale

, la lunghezza di saldatura disponibile che deve contenere le lunette angolari è tipicamente $(625-50) \times 4 \text{ lati} = 2,300 \text{ mm}$. Per la reazione di 7.780 kN, la capacità richiesta della saldatura è pari a 3,38 kN/mm, ciò che richiede uno spessore di 14 mm. Tuttavia, lo spessore di 20 mm della lamiera del diaframma trasversale non ha sufficiente capacità di taglio per trasferire le forze da una saldatura d'angolo da 14 mm doppia faccia. Pertanto, per il carico calcolato, sarà probabilmente necessario adottare una delle seguenti soluzioni alternative:

- 1 Aumentare localmente a 28 mm lo spessore della lamiera del diaframma trasversale e provvedere saldature d'angolo doppia faccia con spessore di 14 mm, come mostrato nella Figura 5-6 Dettaglio modificato di connessione dell'irrigidimento longitudinale al diaframma trasversale

(sarebbe fattibile ispessire leggermente meno la lamiera del diaframma e adottare dimensioni di saldatura leggermente minori a livello dei diaframmi che si trovano sotto la giunzione del concio, dove è richiesta una profondità di 700 mm dell'irrigidimento longitudinale); oppure

- 2 Aumentare le profondità degli irrigidimenti longitudinali per provvedere una lunghezza aggiuntiva di saldatura per il trasferimento delle forze di taglio. La profondità richiesta per gli irrigidimenti sarebbe approssimativamente pari a 800 mm e le saldature d'angolo avrebbero uno spessore di 10 mm.

Il diaframma complessivo in lamiera deve, inoltre, essere controllato per verificare eventuali sollecitazioni dirette derivanti dal carico trasmesso attraverso la connessione all'irrigidimento longitudinale. Data la forma irregolare e la larga finestatura nella lamiera del diaframma, per valutare le sollecitazioni e la resistenza all'imbozzamento della lamiera del diaframma è stato utilizzato un modello "shell" ad elementi finiti. I dettagli del modello utilizzato sono riportati nella Relazione di Progetto – Gambe di torri, inclusi giunti e giunzioni (CG1000-P-CL-D-P-SV-T4-00-00-

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

00-00-01). Le reazioni della piattaforma di carico sono state applicate agli irrigidimenti longitudinali interessati, in concomitanza con le azioni di deviazione (kick) derivanti dalle piastre supportate B, C, E, F e H delle gambe di torre. Il modello ad elementi finiti è utilizzato per valutare l'amplificatore di carico minimo, α_{cr} , affinché i carichi di progetto raggiungano il carico critico elastico e per determinare la sollecitazione massima di von Mises sulla piastra, in base all'analisi lineare dei carichi applicati. Il modello ad elementi finiti utilizzato nell'analisi è mostrato alla Figura 5-7

Modello ad elementi finiti di diaframma trasversale

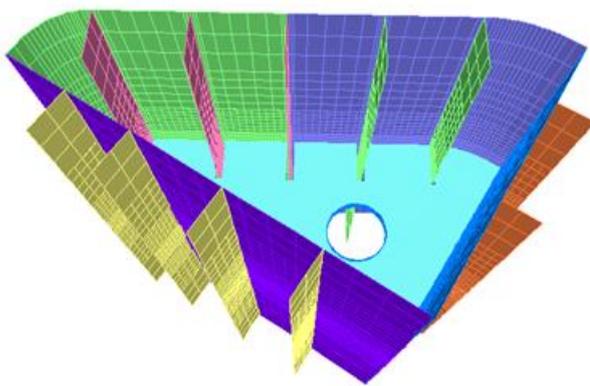


Figura 5-7 Modello ad elementi finiti di diaframma trasversale

Il modello ad elementi finiti è stato utilizzato con tutte le combinazioni di carico pertinenti, e un'analisi di buckling (imbozzamento) è stata svolta utilizzando il campo di sollecitazione completo. La modalità critica di buckling è stata causata caricando l'irrigidimento longitudinale sulla piastra C, in prossimità dell'intersezione delle piastre C, D e H, e si è trovato che esso presentava un amplificatore di carico minimo, α_{cr} pari a 1,02. La relativa forma deformata del diaframma trasversale è mostrata alla Figura 5-8

Forma deformata del diaframma trasversale per la modalità critica di buckling

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_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>F0</td> <td>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						

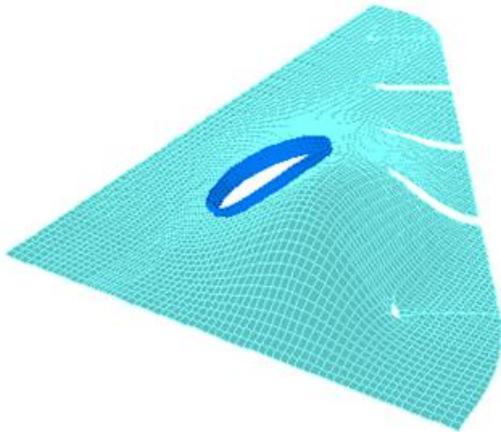


Figura 5-8 Forma deformata del diaframma trasversale per la modalità critica di buckling

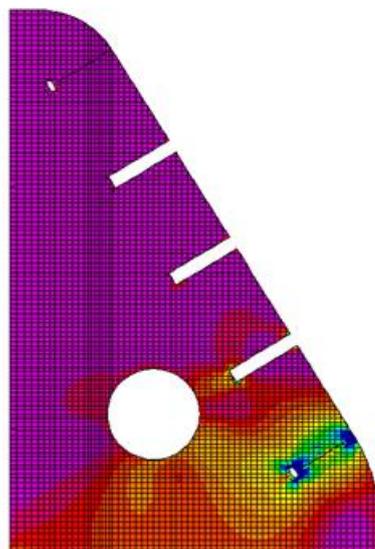


Figura 5-9 Sollecitazioni massime di von Mises in diaframmi trasversali

Le maggiori sollecitazioni di von Mises si presentano attorno al perimetro della lunetta angolare dell'irrigidimento longitudinale caricato. Sollecitazioni maggiori di quelle di snervamento sono previste approssimativamente entro 100 mm dalla lunetta angolare. Le sollecitazioni elevate sono molto localizzate e si dissipano ad una distanza dall'apertura molto minore che non la

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Verifica strutturale delle fasi di montaggio	Codice documento <i>PS0263_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20-06-2011

sollecitazione di snervamento. Le concentrazioni di sollecitazioni elevate sono indicative dell'analisi elastica lineare svolta. Dato che, in un'analisi elastica perfettamente plastica più rappresentativa, la lamiera del diaframma iniziava a snervarsi attorno alla lunetta angolare e le deformazioni aumentavano, il carico si diffonderebbe in un'area molto più vasta, diminuendo in generale le sollecitazioni rispetto a quelle mostrate. Il dettaglio della lunetta angolare è compatibile con quello specificato dall'Eurocodice per l'utilizzo negli impalcati ortotropi in acciaio, e si prevede che, per i cicli di carico relativamente rari sperimentati durante il montaggio della torre, la prestazione del diaframma nel ponte completato non sia compromessa.

Per le zone della lamiera del diaframma che non sono situate direttamente adiacenti all'irrigidimento longitudinale caricato, la sollecitazione massima di von Mises è approssimativamente pari a 250 MPa, presentandosi proprio oltre la punta dell'irrigidimento. Utilizzando i criteri della norma EN 1993-1-5 capitolo 10 e allegato B, il risultante fattore di riduzione, ρ , è 0,56 e il rapporto di utilizzo è 1,06, ciò che indica che il diaframma è sovrasollecitato. Come indicato dal basso fattore di riduzione, la lamiera del diaframma è molto sottile. La resistenza all'imbozzamento può essere notevolmente migliorata spostando l'irrigidimento 160 mm x 16 mm, attualmente in specifica, della lamiera del diaframma come mostrato alla Figura 5-8.

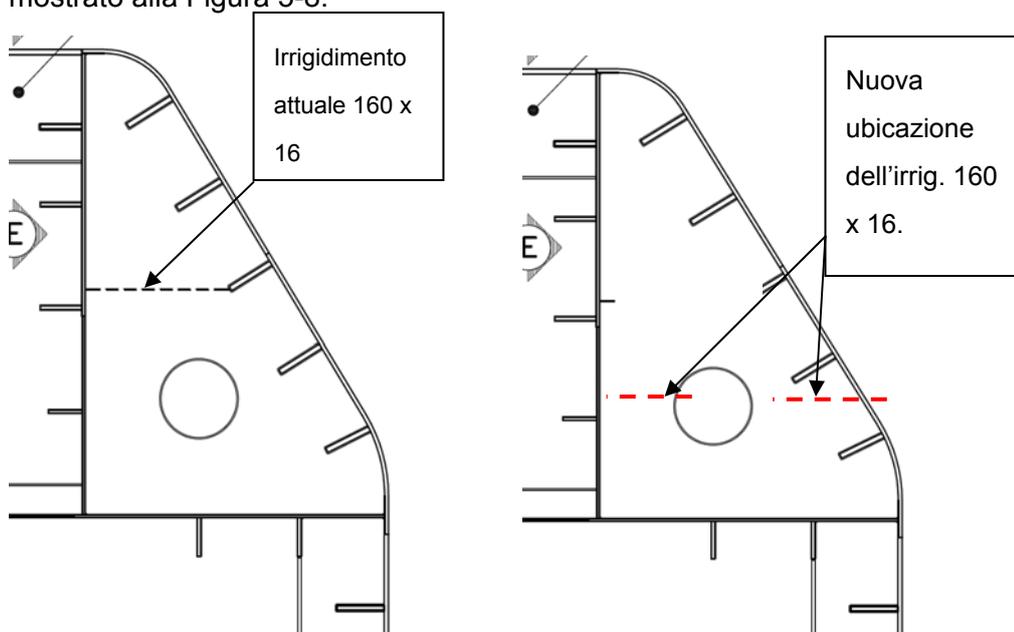


Figura 5-10 Modifica proposta per l'ubicazione dell'irrigidimento del diaframma.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio	<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Il modello FE è stato aggiornato con l'ubicazione revisionata dell'irrigidimento della lamiera del diaframma, e l'analisi elastica di buckling è stata rieseguita. Con l'irrigidimento riposizionato l'amplificatore di carico minimo, per la modalità critica di buckling, è aumentato a 1,53. La relativa forma deformata del diaframma, per la modalità critica di buckling, è mostrata alla Figura 5-11

Forma deformata di diaframma trasversale per la modalità critica di buckling dopo la modifica proposta per l'irrigidimento del diaframma

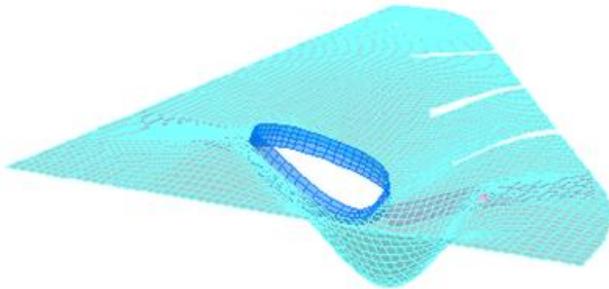


Figura 5-11 Forma deformata di diaframma trasversale per la modalità critica di buckling dopo la modifica proposta per l'irrigidimento del diaframma

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Verifica strutturale delle fasi di montaggio	<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

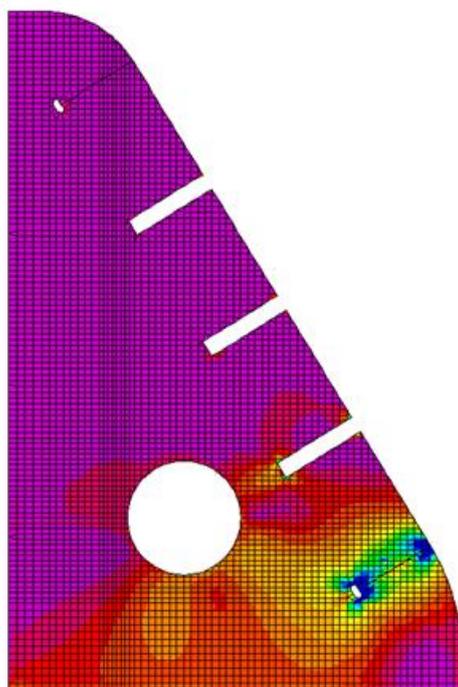


Figura 5-12 Sollecitazioni massime di von Mises in diaframmi trasversali dopo la modifica proposta per l'irrigidimento del diaframma

5.4 Connessione dello strand jack per piattaforma di assemblaggio alle gambe di torre

La piattaforma di assemblaggio viene sollevata lungo la gamba di torre mediante quattro *strand jack* connessi al lato inferiore della piattaforma stessa. I cavi di sollevamento vengono ancorati alla sommità del concio di gamba di torre montato precedentemente a livello dell'intersezione delle piastre C, D e H. L'ancoraggio sulla sommità è eccentrico alla parte frontale della gamba di torre e, pertanto, la sua connessione alla gamba di torre deve resistere alla forza del cavo verticale e al momento indotto dall'eccentricità. La forza verticale del cavo è trasferita alla piastra della gamba di torre mediante un fazzoletto saldato alla parte frontale della gamba di torre e sulla quale fanno pressione le piastre di ancoraggio del cavo. Il momento è trasferito alla gamba di torre attraverso una coppia di forza comprendente una componente di trazione fornita da quattro barre Macalloy da 50 mm, che passano attraverso la piastra di rivestimento della gamba di torre, e da una

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> <i>PS0263_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>

componente di compressione fornita dalla pressione delle piastre di ancoraggio cavo sulla parte frontale della gamba di torre.

L'ancoraggio del cavo è stato verificato relativamente alla forza di sollevamento massima ponderata di approssimativamente 28 MN, calcolata utilizzando il diagramma di corpo libero riportato alla Figura 5-2 **Diagramma di corpo libero della piattaforma di assemblaggio**

- Non è chiaro se il fazzoletto spesso 90 mm, saldato alla parte frontale della gamba di torre, sia inteso per essere rimosso dopo il montaggio del concio. È in pratica impossibile rimuovere il fazzoletto senza danneggiare la struttura d'acciaio permanente, e, lasciandolo montato, si avranno continui problemi di manutenzione.
- Sarà probabilmente difficile curvare il fazzoletto, che è relativamente stretto, con lo stesso profilo di quello della piastra della gamba di torre. Qualsiasi disallineamento del fazzoletto e della piastra della gamba di torre renderà difficile eseguire le necessarie saldature di connessione.
- Le barre Macalloy con diametro di 50 mm richiedono fori nella piastra di rivestimento della gamba di torre. Completato il montaggio, i fori della piastra di rivestimento devono essere riempiti in modo da non compromettere la durata a lungo termine della torre.
- Le barre Macalloy con diametro di 50 mm richiedono due fori in uno degli irrigidimenti longitudinali della piastra H. I fori sottraggono approssimativamente il 25% dell'area dell'irrigidimento e, data la posizione di uno dei fori sulla punta dell'irrigidimento stesso, essi sottraggono una parte anche maggiore di inerzia. L'irrigidimento longitudinale interessato deve essere reso più profondo per un tratto sufficiente, sopra e sotto i fori necessari, in modo da non ridurre localmente la superficie o l'inerzia dell'irrigidimento stesso; e
- La piastra spessa 8 mm alla quale sono ancorate due delle barre Macalloy è inadeguata al trasferimento della forza della barra all'irrigidimento trasversale della piastra rinforzata D, senza il contributo dell'irrigidimento longitudinale della piastra H. Le deformazioni di questa connessione possono danneggiare l'irrigidimento longitudinale permanente. Si raccomanda di aumentare a 120 mm lo spessore della piastra, analogamente allo spessore della piastra prevista per le altre due barre Macalloy.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Verifica strutturale delle fasi di montaggio	Codice documento PS0263_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

6 Procedura di giunzione

Le giunzioni orizzontali tra i conci delle gambe di torre sono connessioni ibride, in cui tutte le piastre interne e tutti gli irrigidimenti verticali sono connessi mediante bulloni antiscorrimento e le piastre esterne mediante saldature di testa in profondità. In conformità alla norma EN 1993-1-8, l'uso di tali connessioni è ammesso a condizione che le saldature siano state eseguite prima del serraggio finale dei bulloni.

La procedura proposta per eseguire la giunzione orizzontale comporta la connessione di più conci di gamba di torre utilizzando, all'inizio, soltanto i bulloni di costruzione provvisori. Dopo che un certo numero di conci di gamba di torre sono stati montati e connessi mediante i bulloni provvisori, vengono eseguite le connessioni saldate; poi vengono rimossi i bulloni di costruzione provvisori, trasferendo tutto il carico alle saldature. Infine, vengono installati e completamente tensionati i bulloni finali critici per lo scorrimento, completando la giunzione. La procedura proposta è illustrata alla Figura 6-1 Procedura proposta per eseguire le giunzioni orizzontali delle gambe di torre

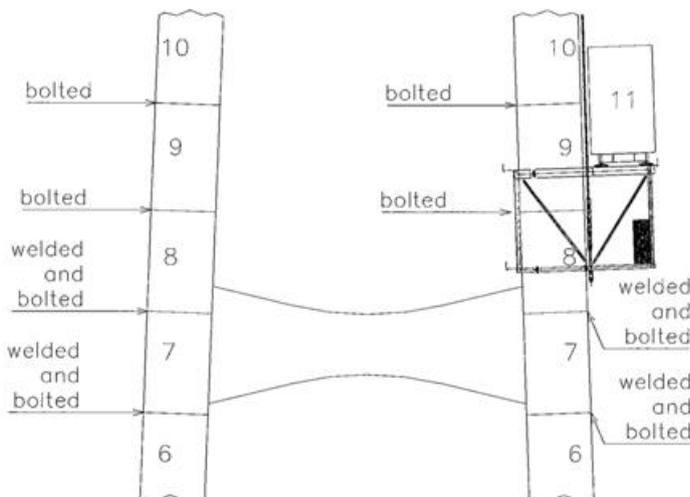


Figura 6-1 Procedura proposta per eseguire le giunzioni orizzontali delle gambe di torre

La procedura per eseguire le giunzioni orizzontali soddisfa i criteri dell'Eurocodice per le connessioni ibride, in quanto le saldature saranno completate prima del serraggio finale dei bulloni. Tuttavia, nella procedura proposta si specifica che, dopo l'esecuzione delle saldature, il passo successivo consiste nel "disinstallare i [bulloni] HR-10.0 provvisori e lasciare il carico solo sulle

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> <i>PS0263_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>

saldature (o le saldature che non influiscono reciprocamente sulla rispettiva parte bullonata).” Il significato della frase tra parentesi non si comprende chiaramente; comunque, in base ai requisiti della norma EN 1993-1-8, tutti i bulloni provvisori utilizzati nella sezione trasversale dovranno essere rimossi prima del serraggio finale di tutti i bulloni permanenti.

Un altro aspetto riguardante la procedura proposta è che non è chiaro se siano state prese in debita considerazione le potenziali conseguenze del ritiro della saldatura. Data la dimensione delle saldature e il numero di passate di richiesto, si dovrebbe tenere conto di un ritiro di saldatura di almeno 2 mm – 4 mm. Per i diametri standard dei fori utilizzati nelle piastre di giunzione, è probabile che tale ritiro faccia sì che i bulloni esercitino una pressione sui fori dei bulloni delle piastre connesse, causando forze di taglio sia sui bulloni provvisori sia sui bulloni finali che sono stati installati ma non tensionati. Le forze di taglio possono creare difficoltà per la rimozione dei bulloni provvisori, e ciò che è cruciale, possono causare domande aggiuntive di taglio sui bulloni permanenti che non erano stati presi in considerazione per il progetto permanente. I vincoli derivanti dai bulloni possono anche causare sollecitazioni aggiuntive nelle piastre e saldature della torre. Uno studio approfondito di questi aspetti non rientra nell’ambito della nostra valutazione e non è possibile se non si hanno a disposizione informazioni più particolareggiate sulle procedure di saldatura e bullonatura. Ad ogni modo, prima di completare la fase finale di progetto, si dovrà dimostrare che tali aspetti sono stati studiati e affrontati nella procedura di giunzione.

La procedura proposta comporta il montaggio di diversi conci di gamba di torre utilizzando connessioni soltanto bullonate prima di eseguire le saldature. Come tale, la giunzione parziale deve essere verificata per controllare che essa abbia la forza adeguata ai carichi di costruzione in due condizioni:

1. Capacità di piastre e irrigidimenti interni soltanto quando sono usati i bulloni provvisori; e
2. Capacità delle piastre di rivestimento soltanto dopo che le saldature sono state completate e i bulloni provvisori rimossi.

Dato che in questo momento non si conoscono le esatte procedure di assemblaggio e l’esatto numero di bulloni provvisori, è stata utilizzata una procedura approssimativa per valutare la forza della giunzione della torre per queste due condizioni. Le capacità si basano sulla piena capacità delle piastre e degli irrigidimenti interni soltanto o delle piastre di rivestimento soltanto. Tale approccio è valido per verificare se la procedura proposta è fattibile, la condizione estrema

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

essendo quella in cui il numero dei bulloni provvisori richiesti fornisca la piena capacità di piastre e irrigidimenti interni.

I risultati della presente valutazione indicano che è fattibile montare un certo numero di conci utilizzando connessioni soltanto bullonate prima di tornare ad eseguire le saldature finali. I momenti massimi della fase di costruzione si presentano in prossimità dei punti in cui si trovano i trasversi. Pertanto, in questi punti le giunzioni finali saldate/bullonate dovranno essere completate prima di montare altri conci sopra il trasverso. La parte a sbalzo della gamba di torre che si estende sopra i trasversi può essere costruita con vari conci di torre solo bullonati, poiché la resistenza delle piastre e irrigidimenti interni o delle piastre di rivestimento è adeguata per resistere alle forze applicate.

La procedura generale proposta per le giunzioni orizzontali è considerata fattibile. Il numero esatto di bulloni provvisori richiesti e il numero di conci che possono essere montati utilizzando connessioni soltanto bullonate dovranno essere verificati dopo che saranno state sviluppate procedure di assemblaggio particolareggiate.

Nella valutazione, descritta in precedenza, delle sollecitazioni locali negli irrigidimenti longitudinali sulle piastre B e C dovute al carico della piattaforma di assemblaggio, è stato ipotizzato che l'effettiva sezione dell'irrigidimento comprenda la sporgenza dell'irrigidimento stesso e una larghezza tributaria della piastra di rivestimento della torre (si veda il capitolo 5). Quest'ipotesi, tuttavia, non è valida per le giunzioni di torre che non sono state saldate, e la resistenza della sezione dovrà basarsi su quella del solo irrigidimento longitudinale (ossia non della piastra di rivestimento). Una verifica dei diagrammi dei momenti flettenti, di cui al capitolo 0, indica che il momento massimo negli irrigidimenti nell'area della connessione di torre è approssimativamente pari a 2.084 kNm. Per l'irrigidimento 625 mm x 63 mm proposto al capitolo 5 per i tratti tipici, la sollecitazione risultante sarebbe approssimativamente pari a 508 MPa. Pertanto, gli irrigidimenti longitudinali in queste aree devono essere aumentati a 700 mm x 70 mm, come già proposto per il tratto di diaframma immediatamente sotto la giunzione orizzontale della torre.

7 Riassunto delle modifiche di progetto necessarie per adeguare il metodo di costruzione proposto

Lo studio eseguito evidenzia che:

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> <i>PS0263_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20-06-2011</i>

- I metodi descritti sono considerati fattibili con un limitato rinforzo delle strutture permanenti
- La verifica di descrizioni più particolareggiate dei metodi può dar luogo all'esigenza di un ulteriore rinforzo delle strutture permanenti

Le conclusioni qui di seguito riportate si basano sulla verifica della base di fattibilità relativamente ai metodi di costruzione descritti. Ulteriori particolari su tali metodi possono dar luogo a eventuali cambiamenti delle conclusioni sotto riportate.

Come descritto al capitolo 5.2, gli attuali irrigidimenti longitudinali sulle piastre B e C sono inadeguati a sopportare le reazioni della piattaforma di carico. È stato stimato che, per resistere ai momenti locali applicati in concomitanza con il carico assiale globale nell'irrigidimento, i quattro irrigidimenti caricati devono essere almeno di 700 mm x 70 mm nei tratti finali, sotto la giunzione dei conci e nel tratto della giunzione dei conci. Gli irrigidimenti nei tratti interni tipici devono essere almeno 625 mm x 63 mm.

Come descritto al capitolo 5.3, gli irrigidimenti longitudinali caricati devono essere connessi direttamente alle lamiere dei diaframmi. Può anche essere necessario apportare modifiche allo spessore delle lamiere dei diaframmi, a seconda della profondità degli irrigidimenti prevista e della lunghezza disponibile di trasferimento del carico.

Le eventuali modifiche agli irrigidimenti longitudinali e alle lamiere dei diaframmi devono essere considerate congiuntamente, dato che si influenzano reciprocamente. Le tre seguenti combinazioni di irrigidimento (quelle caricate soltanto dalla piattaforma di assemblaggio) e le modifiche delle lamiere dei diaframmi possono essere utilizzate per provvedere le capacità richieste:

- 1 Utilizzare un irrigidimento longitudinale 700 mm x 70 mm per tutta l'altezza della torre e portare lo spessore di tutte le lamiere di diaframma a 25 mm attorno alle connessioni dell'irrigidimento longitudinale (è stato ipotizzato che la superficie ispessita sia approssimativamente pari a 4 m² per diaframma). Gli irrigidimenti longitudinali devono essere connessi direttamente alle lamiere dei diaframmi con saldature d'angolo doppie, spessore 12 mm. Quantitativamente gli aumenti stimati sono:

Torre in Sicilia: 175 tonnellate per gli irrigidimenti
35 tonnellate per i diaframmi

Torre in Calabria: 200 tonnellate per gli irrigidimenti

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

35 tonnellate per i diaframmi

445 tonnellate in totale

- 2 Utilizzare un irrigidimento 700 mm x 70 mm soltanto nei tratti finali e per tutta la lunghezza della giunzione del concio (lunghezza ipotizzata: oltre 5,5 m) e un irrigidimento minimo 625 mm x 63 mm in tutti gli altri tratti interni. Tale soluzione richiede che lo spessore della lamiera di diaframma venga portato localmente ad una grandezza tra 25 mm e 28 mm, a seconda della profondità dell'irrigidimento a livello di ciascun diaframma. Gli irrigidimenti longitudinali devono essere connessi direttamente alle lamiere di diaframma mediante doppia saldatura d'angolo con uno spessore da 12 mm a 14 mm, a seconda della profondità dell'irrigidimento a livello di ciascun diaframma. Quantitativamente gli aumenti stimati sono:

Torre in Sicilia: 75 tonnellate per gli irrigidimenti
 50 tonnellate per i diaframmi

Torre in Calabria: 85 tonnellate per gli irrigidimenti
 50 tonnellate per i diaframmi

260 tonnellate in totale

- 3 Per l'irrigidimento longitudinale utilizzare una profondità costante di 800 mm ed uno spessore uguale all'attuale spessore massimo di irrigidimento o 65 mm (ossia, un irrigidimento 700 mm x 70 mm diventa 800 mm x 70 mm e un irrigidimento 575 mm x 58 mm diventa 800 mm x 65 mm). Gli irrigidimenti longitudinali devono essere connessi direttamente alle lamiere dei diaframmi con saldature d'angolo doppie, spessore 10 mm. Questa soluzione non richiede l'ispessimento locale delle lamiere di diaframma. Quantitativamente gli aumenti stimati sono:

Torre in Sicilia: 270 tonnellate per gli irrigidimenti
 0 tonnellate per i diaframmi

Torre in Calabria: 290 tonnellate per gli irrigidimenti
 0 tonnellate per i diaframmi

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

560 tonnellate in totale

- Può essere possibile ridurre la quantità aggiuntiva di acciaio richiesto prendendo in considerazione le seguenti modifiche:
- Gli irrigidimenti longitudinali piatti caricati devono essere cambiati con pezzi a T, come mostrato alla Figura 7-1 Irrigidimento longitudinale modificato utilizzando un pezzo a T
-



Figura 7-1 Irrigidimento longitudinale modificato utilizzando un pezzo a T

- Rendere gli irrigidimenti longitudinali talmente profondi che vadano a toccare le opposte piastre di gamba di torre (E o H) (e siano saldati alle stesse), e praticare un adeguato foro d'accesso attraverso le nuove piastre. La nuova piastra potrebbe anche funzionare come irrigidimento longitudinale per le opposte piastre di gamba di torre, consentendo di rimuovere l'irrigidimento attuale. La Figura 7-2 mostra due varianti della soluzione descritta.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Verifica strutturale delle fasi di montaggio	Codice documento PS0263_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

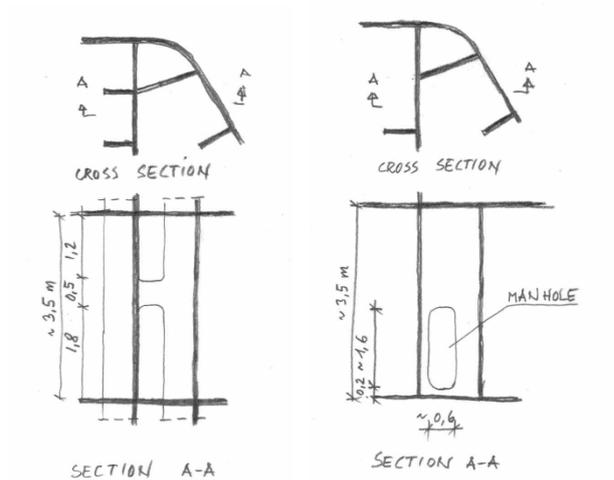


Figura 7-2 Irrigidimento longitudinale modificato utilizzando una nuova piastra

Le soluzioni alternative sopra elencate possono ridurre l'acciaio aggiuntivo richiesto per adeguare il metodo di costruzione proposto; tuttavia, la sezione trasversale delle gambe di torre e eventualmente la sequenza fabbricazione/assemblaggio potrebbero dover essere modificate.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio	<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Allegato 1

Aerodinamica della Torre durante la Costruzione

Indice

1. Sommario.....	43
2. Modi e Frequenze di Vibrazione	44
3. Valutazione della Vibrazione della Torre	46
3.1 Velocità di Risonanza del Vento.....	46
3.2 Ampiezza di Risposta	47
4. Massa Smorzante Regolata (TMD)	49
Appendice A : Fase di Costruzione.....	52
Appendice B – Frequenze, Massa Equivalente e Progetto della TMD	61

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio	<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

1. Sommario

Questo promemoria riassume la vibrazione della torre indotta dal vento durante la fase di costruzione e la necessità di una massa smorzante regolata TMD (Tuned Mass Damper) per attenuare la vibrazione dove necessario, derivante dall'indagine che è stata eseguita in base agli 80 giorni di progetto, al metodo di costruzione proposto nel progetto definitivo e ai test eseguiti in galleria del vento sul modello aeroelastico completo di torre in BMT (Doc. No. 431163rep1v4), come segue.

- Si deve investigare e controllare il primo modo di vibrare flessionale lungo l'asse del ponte.
- La vibrazione della torre deve essere attenuata nelle fasi di costruzione No. 11 e 12 (erezione della gamba della torre, segmenti No. 13 e 14) per la sicurezza strutturale e nelle fasi costruttive da No. 15 a No. 22 (dall'erezione del semento No. 17 della gamba della torre alla fase iniziale di installazione PPWS) per il comfort dei lavoratori.
- La vibrazione della torre può essere attenuata per le fasi costruttive No. 11 e 12 attraverso l'installazione della TMD per le condizioni in servizio nei segmenti della gamba della torre No. 13 e 14 e per le fasi di costruzione dalla No. 15 alla No. 22 attraverso l'installazione di un'altra TMD temporanea.

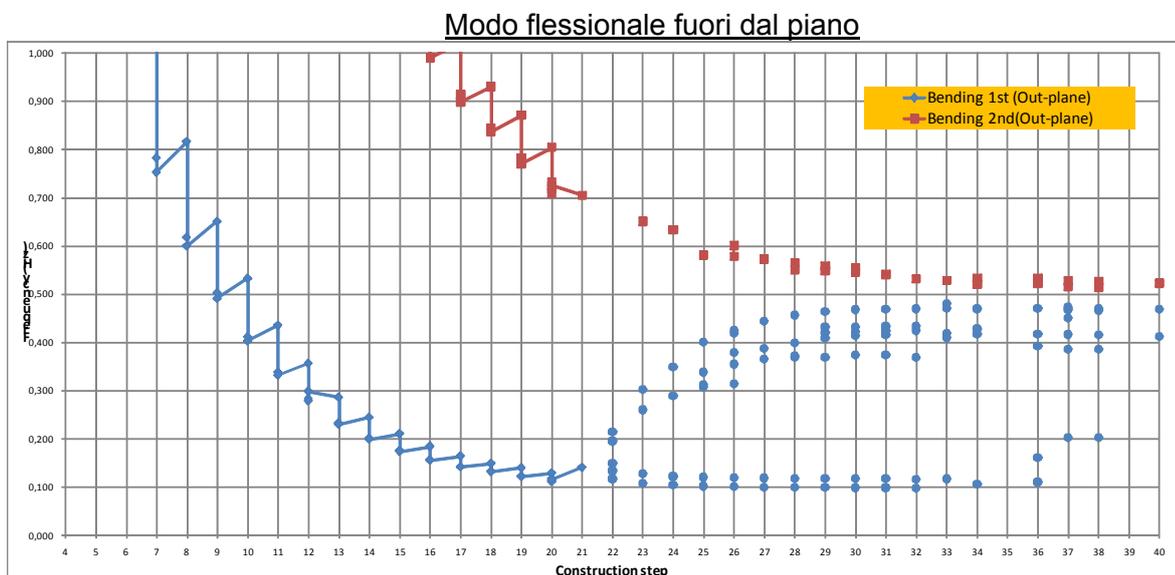
		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>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						

Le fasi di costruzione della superstruttura prese in considerazione per l'indagine sono descritte nell'Appendice A.

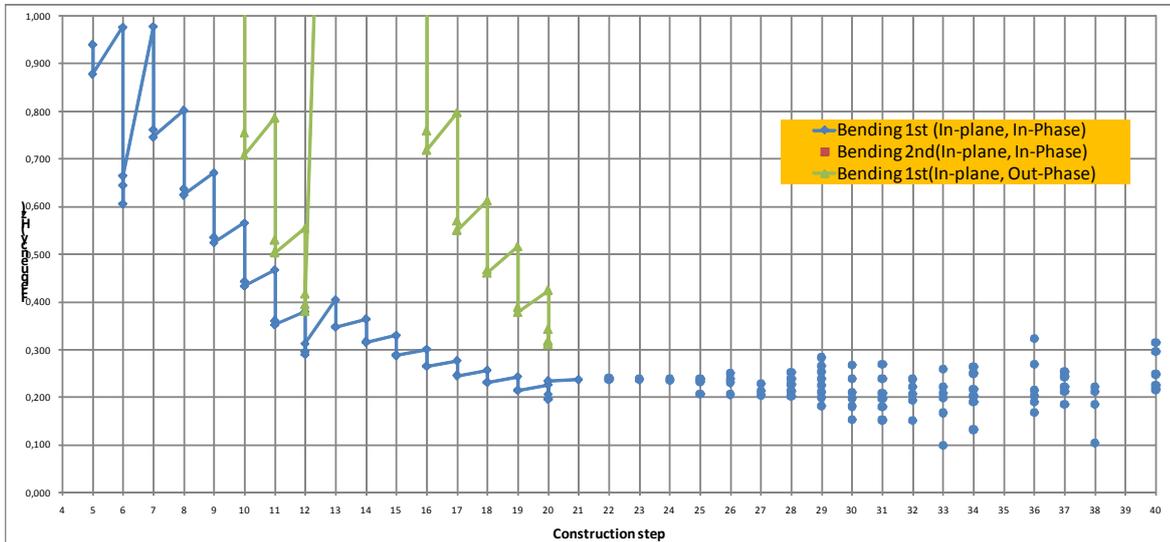
2. Modi e Frequenze di Vibrazione

La costruzione della superstruttura era rappresentata da 40 step costruttivi, dal No. 1 al No. 20 per la costruzione della torre, il No. 21 e il No. 22 per l'installazione della passerella, dal No. 23 al No. 32 per l'installazione dei cavi, dal No. 33 al No. 39 per la costruzione dell'impalcato e il No. 40 per la condizione di riferimento, come descritto in Appendice A.

Il modello globale 3D è stato stabilito in base alla sottomissione degli 80 giorni del progetto che include l'erezione della piattaforma della torre, ma solo per un peso di 8,000 kN, il sistema passerella e il sistema tie-back provvisorio. E' stata eseguita un'analisi agli autovalori del ponte in costruzione per tutte le fasi costruttive e sono state ottenute frequenze proprie e massa equivalente come riferimento ai modi di vibrare della torre, come mostrato in Appendice B e illustrato in Figura 2-1.



Modo flessionale nel piano



Modo torsionale

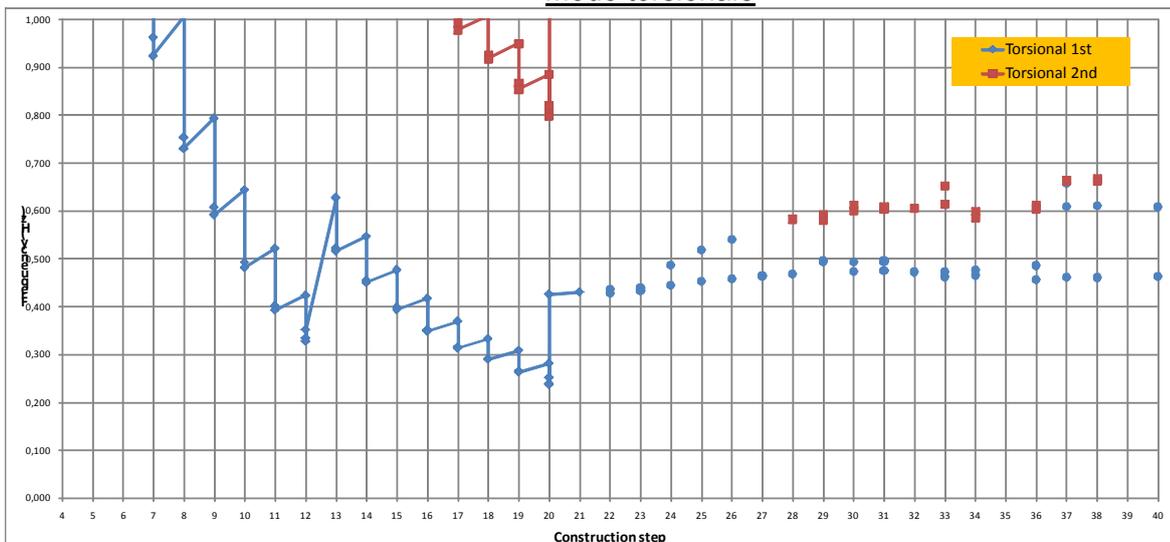


Figura 2-1 Frequenze proprie durante la costruzione come riferimento ai modi di vibrare della torre

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

3. Valutazione della Vibrazione della Torre

La valutazione della vibrazione della torre è stata fatta in base ai criteri di sicurezza e comfort per i lavoratori ed è stata eseguita tramite la valutazione della velocità di risonanza del vento per la torre in tutte le fasi costruttive e poi tramite la valutazione dell'ampiezza di risposta della torre nelle fasi costruttive che si ritiene avvengano al di sotto della velocità del vento di progetto.

3.1 Velocità di Risonanza del Vento

Le velocità di risonanza del vento sono state calcolate usando la formula sottostante, dove il numero di Strouhal è 14 dai test in galleria del vento per una torre libera.

$$\text{Velocità di risonanza del vento } V = \frac{fD}{St}$$

f : frequenze proprie (Hz)

D: lunghezza rappresentativa (20m)

Le velocità di progetto del vento sono state calcolate usando la formula seguente secondo i criteri di sicurezza e comfort per i lavoratori riguardo all'erezione della torre, dove 11.875 m/s è la velocità del vento conveniente per ottenere la velocità del vento di progetto, per l'erezione della parte alta della torre, usando la formula seguente, per la velocità del vento di lavoro di 15 m/s all'altezza di 10mm.

$$\text{Velocità di progetto del vento } u(z) = 1.07 \cdot (u_{ref} \cdot 0.17 \cdot \ln\left(\frac{z}{0.01}\right) + 0.01 \cdot z)$$

z : elevazione della parte alta dell'erezione della torre

u_{ref} : 29 m/s per la sicurezza strutturale (corrisponde a SLS2 del progetto di base)

11.875 m/s per il comfort dei lavoratori

Le velocità di risonanza del vento e le velocità di progetto del vento per il primo modo flessionale della torre lungo l'asse del ponte per tutte le fasi costruttive sono rappresentate nella Figura 3-1, poichè nei test in galleria del vento solo il primo modo flessionale è stato valutato rilevante per i criteri di sicurezza strutturale e comfort dei lavoratori.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Verifica strutturale delle fasi di montaggio	Codice documento PS0263_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20-06-2011

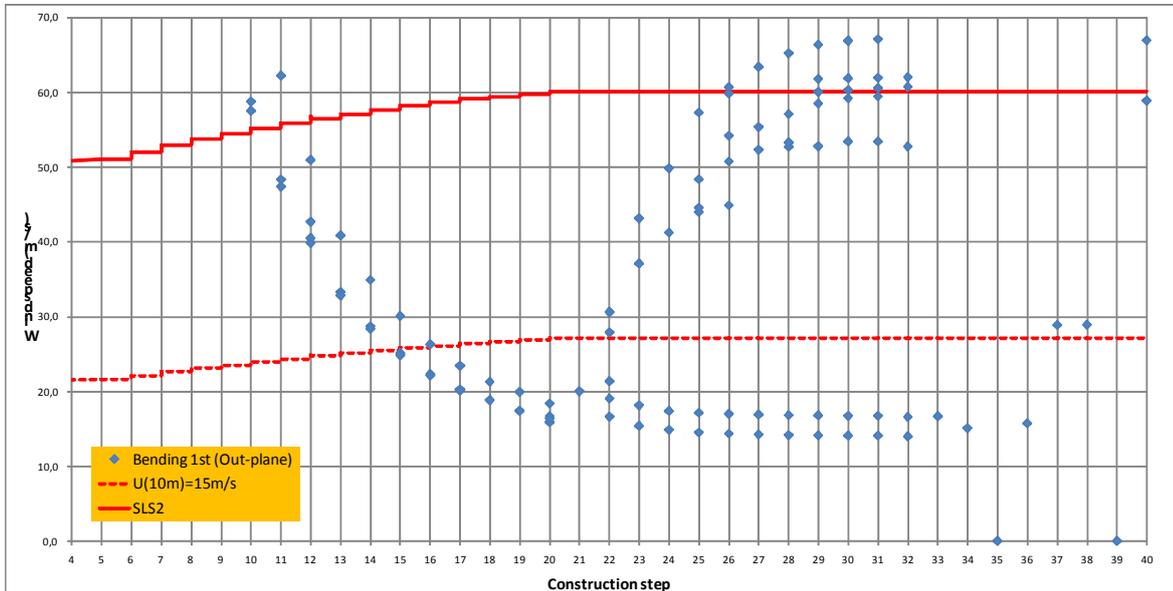


Figure 3-1 Velocità di risonanza e velocità di progetto del vento per la torre durante la costruzione

Nella Figura 3-1, i punti blu mostrano la velocità di risonanza del vento del primo modo flessionale e le linee rosse mostrano la velocità di progetto del vento per i criteri di sicurezza e comfort. Sono state valutate le fasi costruttive la cui velocità di risonanza del vento è al di sotto della velocità di progetto del vento per quanto riguarda le ampiezze di risposta.

3.2 Ampiezza di risposta

Le ampiezze di risposta sono ottenute usando la relazione del numero di Scruton per l'ampiezza usando i risultati ottenuti in galleria del vento come mostrato di seguito, dove le masse equivalenti sono quelle calcolate nell'analisi agli autovalori, lo smorzamento è stato assunto pari a 0,16% che si ritiene realistico dalle misure effettuate.

$$\text{Numero di Scruton } S_c = \frac{2 \cdot M_{eq} \cdot \delta}{\rho \cdot D^2}$$

Densità aria $\rho = 1.23 \text{ kg} \cdot \text{s} / \text{m}^3$,

Lunghezza rappresentativa $D = 20 \text{ m}$

Smorzamento strutturale $\delta = 0.01$ in logdec

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO					
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		Codice documento PS0263_F0_ITA.doc	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Rev</th> <th>Data</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20-06-2011</td> </tr> </tbody> </table>	Rev	Data	F0	20-06-2011
Rev	Data						
F0	20-06-2011						

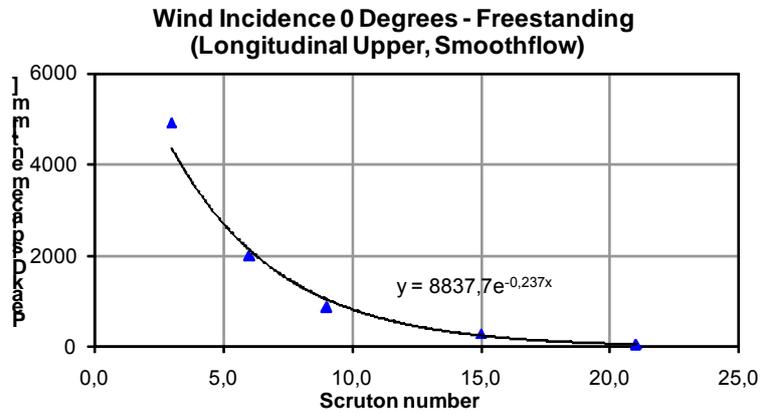


Figure 3-1 Diagramma $A_{peak}-Sc$ (Torre libera investito da un flusso leggero)

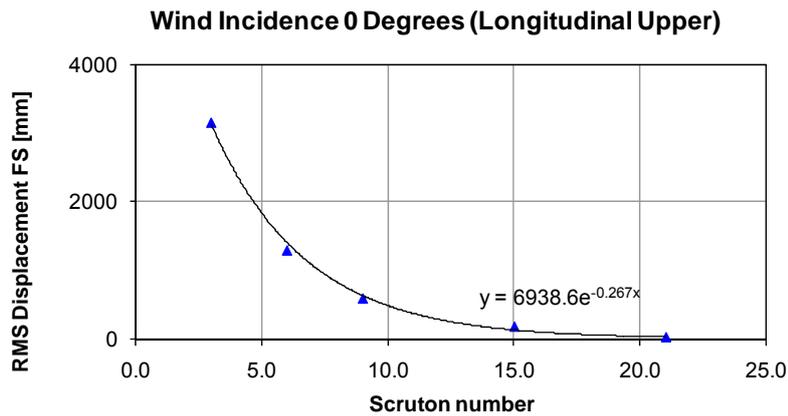


Figura 3-3 Diagramma $A_{R.M.S.}-Sc$ (Torre libera investito da un flusso leggero)

I picchi di ampiezza attesi e le ampiezze ammissibili della torre durante la costruzione della parte alta dell'erezione della torre sono mostrate di seguito per le fasi di costruzione dove sono richieste misure di attenuazione.

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO	
Verifica strutturale delle fasi di montaggio	<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

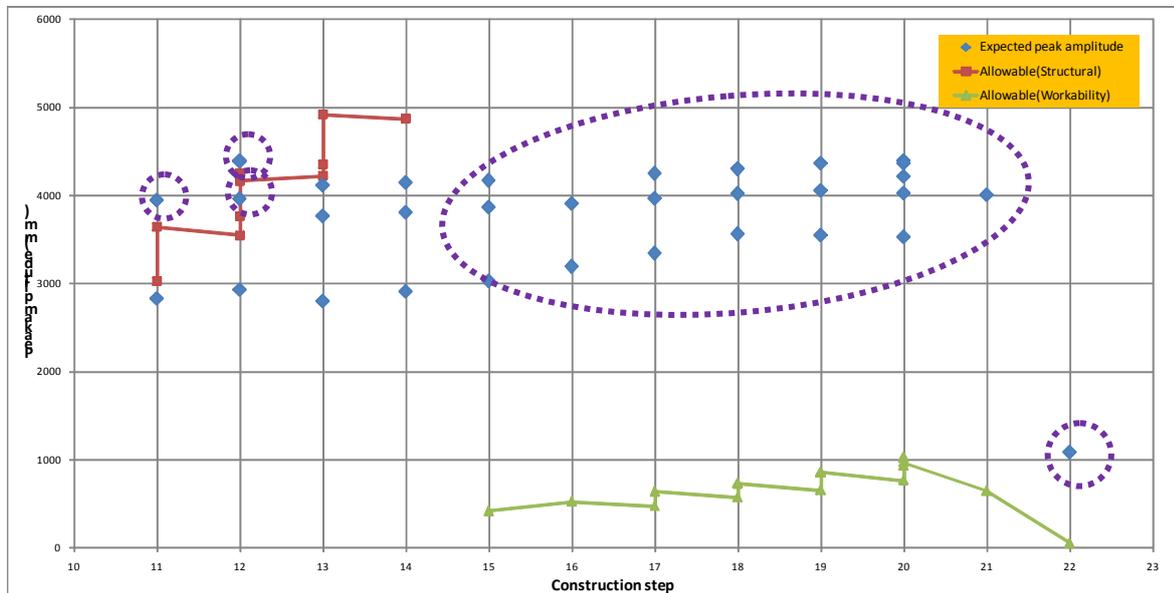


Figura 3-4 Picco dell'ampiezza attesa e ampiezza ammissibile

Le ampiezze ammissibili sono calcolate in modo tale che la forza del vento nella torre non supera la capacità per la combinazione di carico 1.0DD+1.0VV per valutazioni di sicurezza, dove VV è causato dall'oscillazione vortex shedding e il fattore gamma per il materiale è preso in considerazione pari a 1.05, e il picco dell'accelerazione che i lavoratori sentono sulla struttura non supera i 0.5 m/s^2 (50gal) secondo valutazioni di comfort per i lavoratori.

Nella Figura 3-4 si è trovato che la vibrazione della torre deve essere attenuata nelle fasi costruttive No. 11 e 12 (erezione del segmento della gamba della torre No.13 e 14) per la sicurezza strutturale e nelle fasi costruttive dalla No. 15 alla No. 22 (dall'erezione del segmento di gamba della torre No. 17 verso la fase iniziale dell'installazione PPWS) per il comfort dei lavoratori.

4. Massa Smorzante Regolata (TMD)

La vibrazione della torre nelle fasi costruttive No. 11 e 12 può essere attenuata dalla TMD per le condizioni di servizio in modo che sia installata nei segmenti della gamba della torre No. 13 e 14, poichè per le condizioni di servizio la frequenza è lontana dalla frequenza della torre ma la massa è più grande e lo smorzamento aggiuntivo richiesto è relativamente piccolo.

La vibrazione della torre nelle fasi costruttive dalla No. 15 alla No. 22 deve essere attenuata da un'altra TMD provvisoria che viene utilizzata per la torre durante la costruzione. Permettendo un

		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio	<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

marginale di errore del 5% per la regolazione della frequenza e del 10% per la regolazione dello smorzamento, la massa TMD provvisoria è stata calcolata pari a $M_{TMD} = 45$ tonnellate per ogni gamba della torre e uno smorzamento interno del 9% per la fase costruttiva No. 22 con lo scopo di attenuare la vibrazione secondo le condizioni seguenti. I risultati dettagliati ottenuti dalla TMD provvisoria in tutte le fasi costruttive sono descritte in Appendice B.

- La massa TMD è posizionata sulla torre a 290m di altezza dopo che viene eretto il segmento No. 16 della gamba della torre, spostata a 350m di altezza dopo che viene eretto il segmento No. 19 della gamba della torre (fase costruttiva No. 9) e poi spostata vicino a / sopra il traverso No. 3 dopo che la torre viene completata (fase costruttiva No. 19).
- La massa TMD è posizionata sul segmento della gamba della torre No. 16 in modo che la frequenza sia regolata per adattarsi alla fase costruttiva 15 (erezione del segmento No. 17 della gamba della torre) e riaggiustata 5 volte per meglio adattarsi alle fasi costruttive seguenti, poiché la frequenza della torre varia da 0.176 a 0.115 Hz. Il riaggiustamento finale viene eseguito dopo che è installato il sistema tie-back provvisorio.

La massa TMD provvisoria è stata progettata, come una delle possibili soluzioni, come un sistema di pendolo inverso ognuno di massa pari a 22.5 tonnellate con una molla e uno smorzatore idraulico, come mostrato in Figura 4-1, assumendo due masse TMD attaccate a ogni gamba della torre.

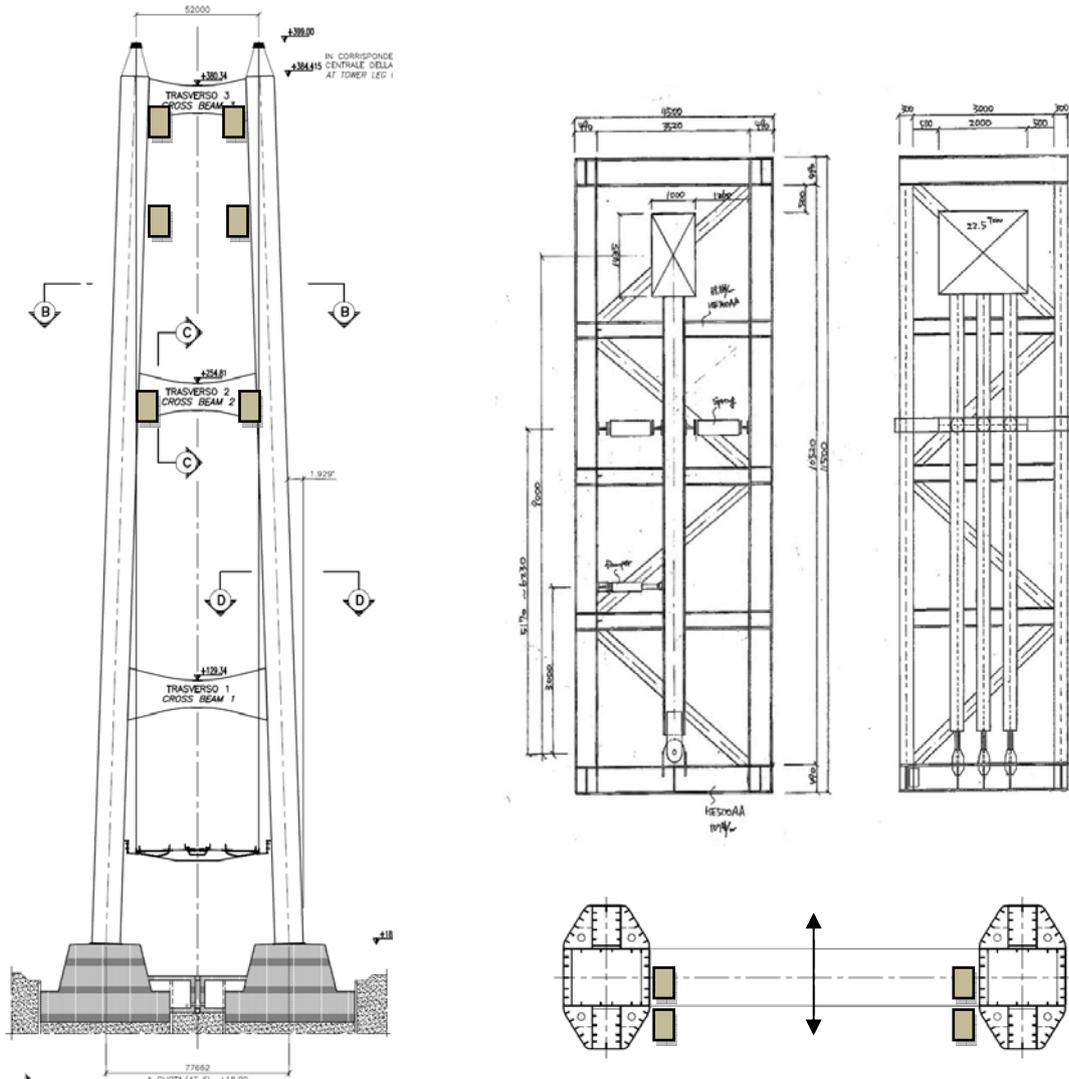
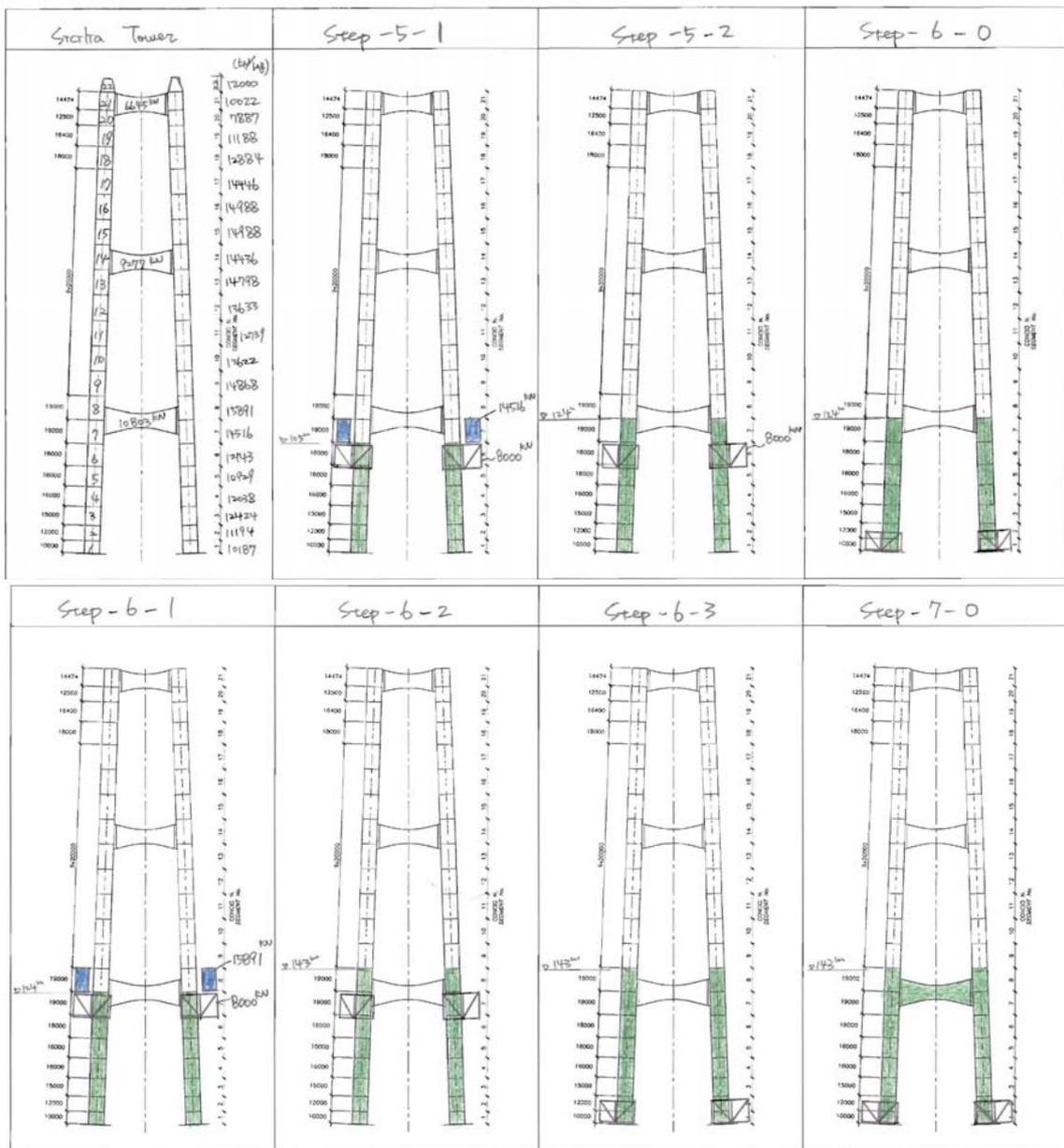


Figura 4-1 TMD provvisoria e la sua posizione attesa

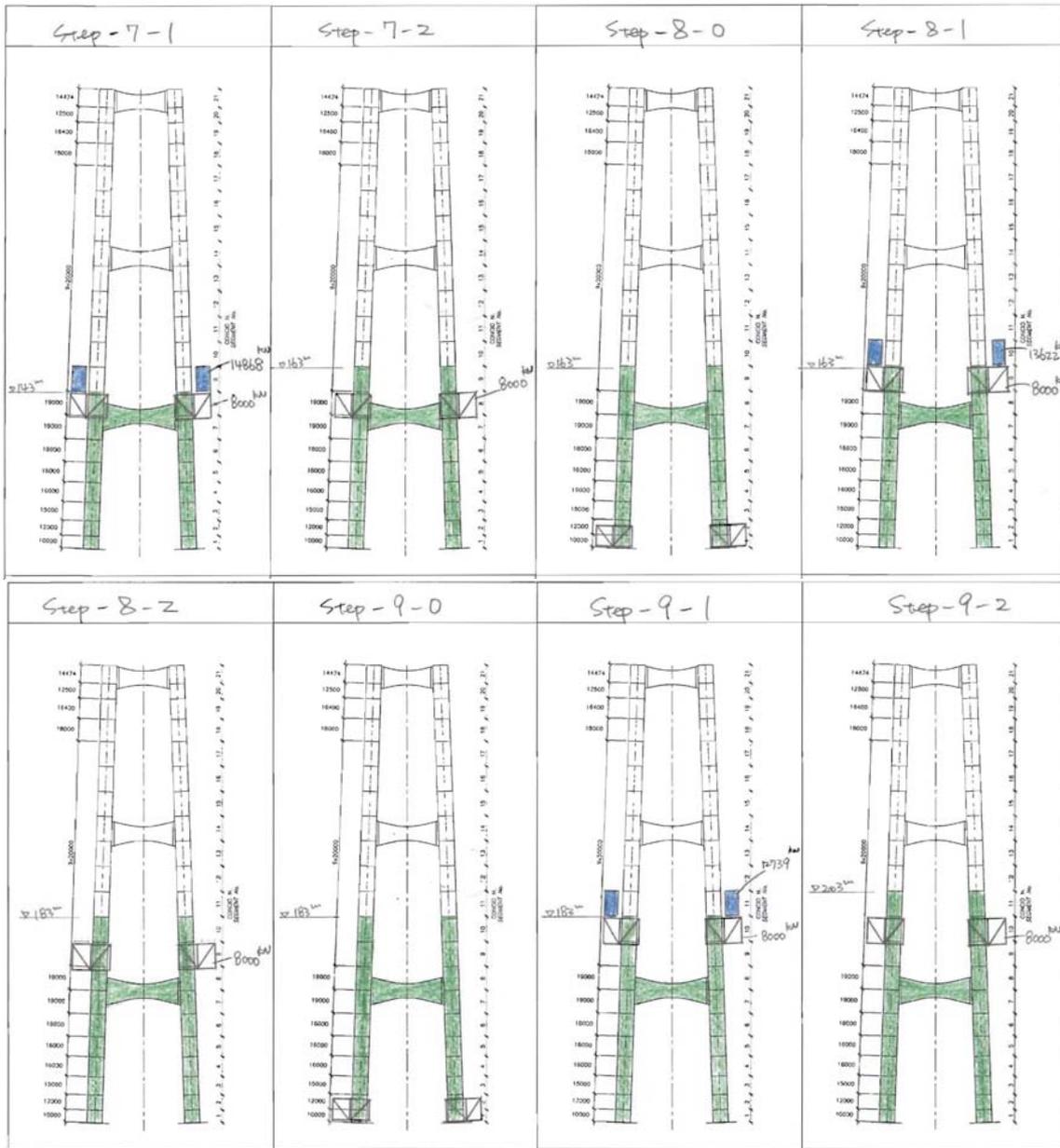
Appendice A : Fasi Costruttive

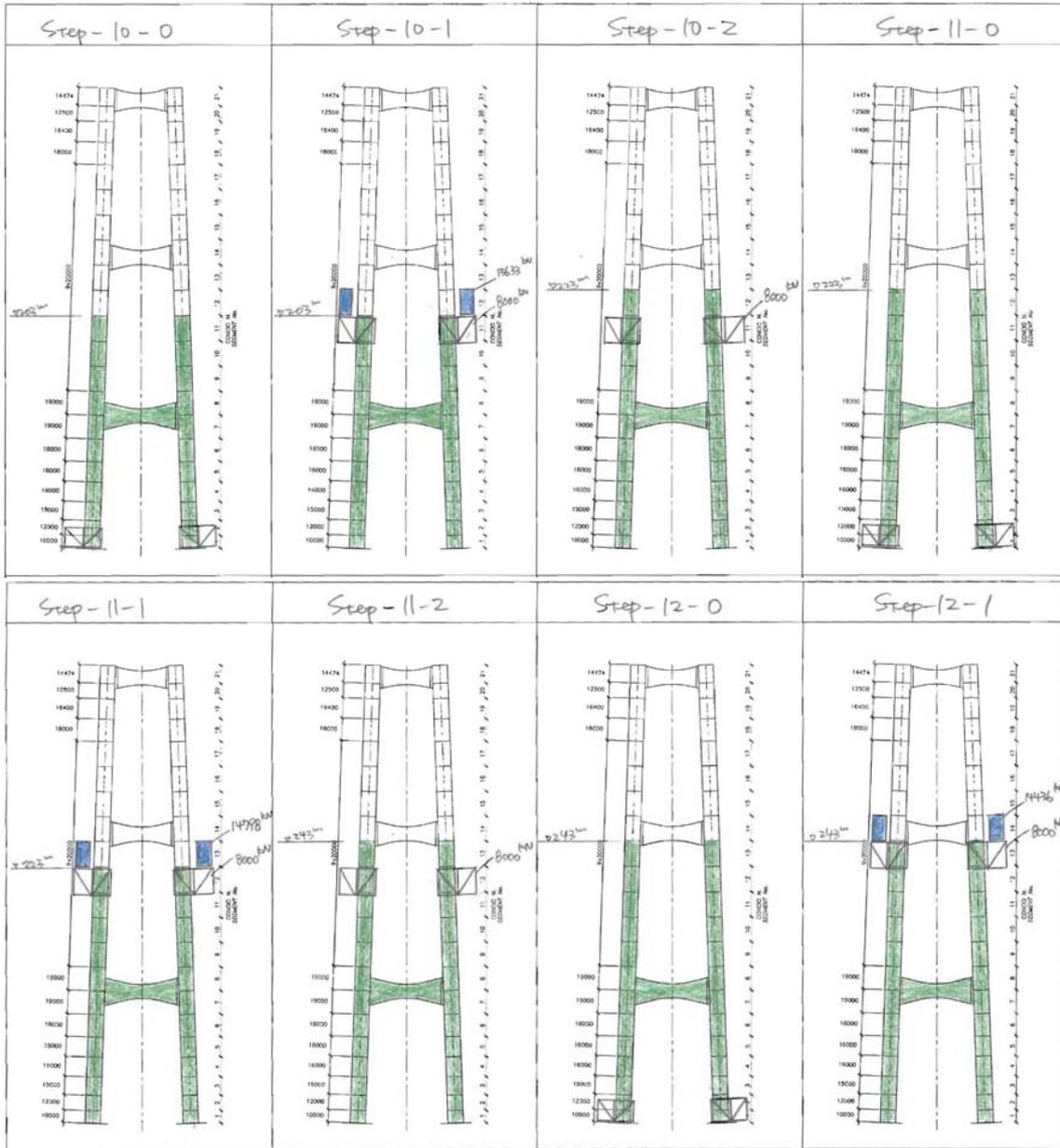


Verifica strutturale delle fasi di montaggio

Codice documento
PS0263_F0_ITA.doc

Rev Data
F0 20-06-2011

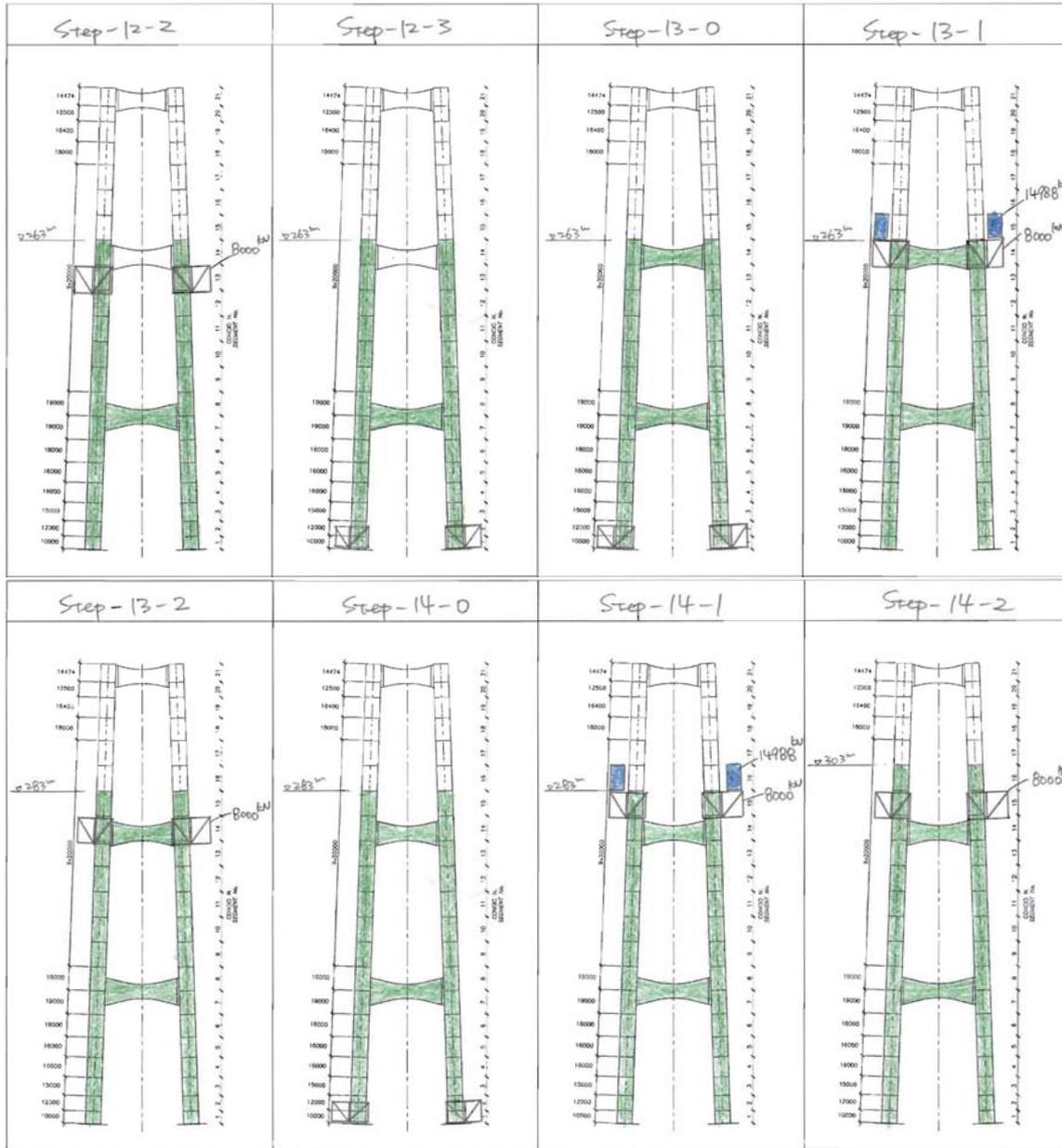


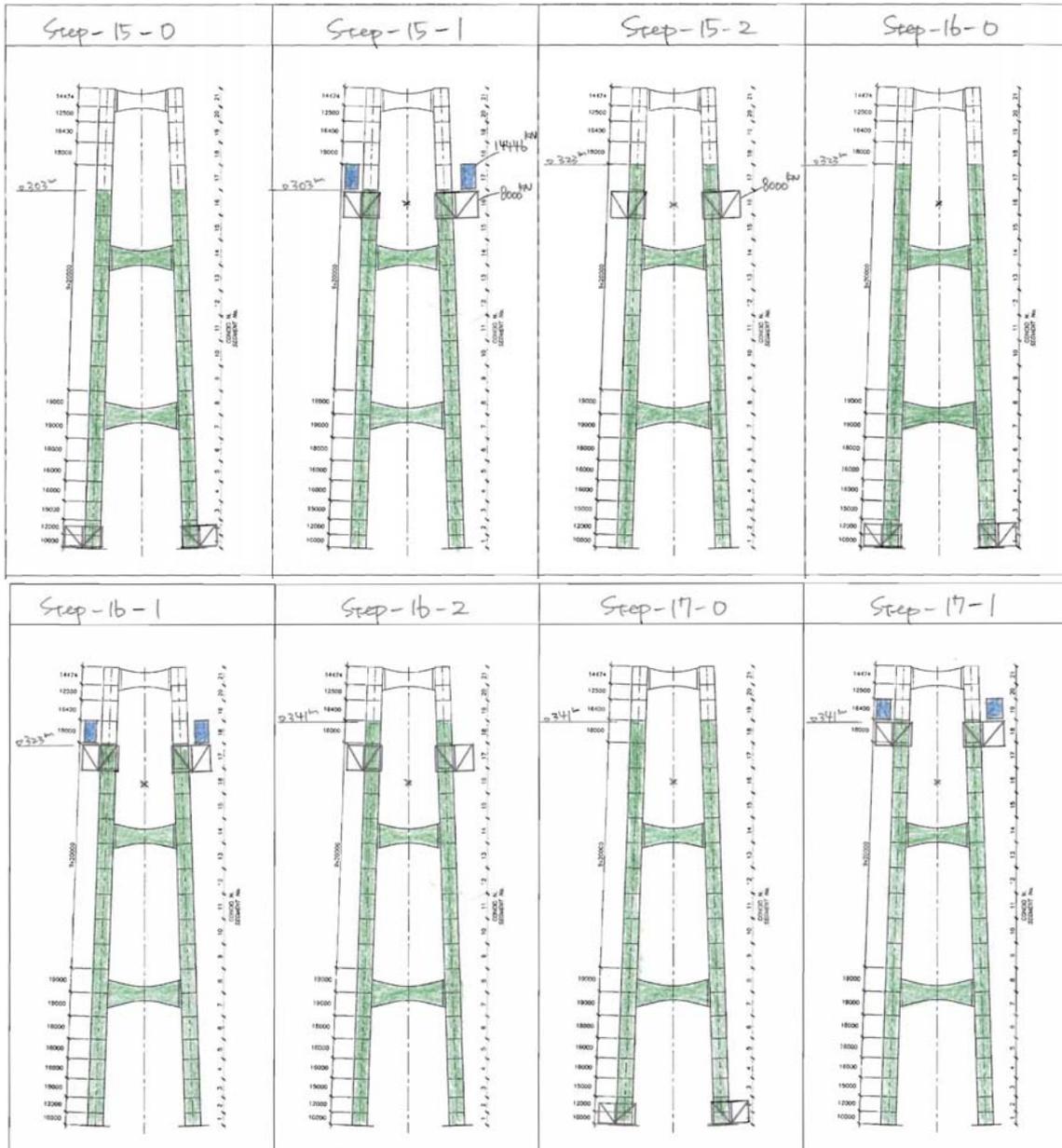


Verifica strutturale delle fasi di montaggio

Codice documento
PS0263_F0_ITA.doc

Rev Data
F0 20-06-2011

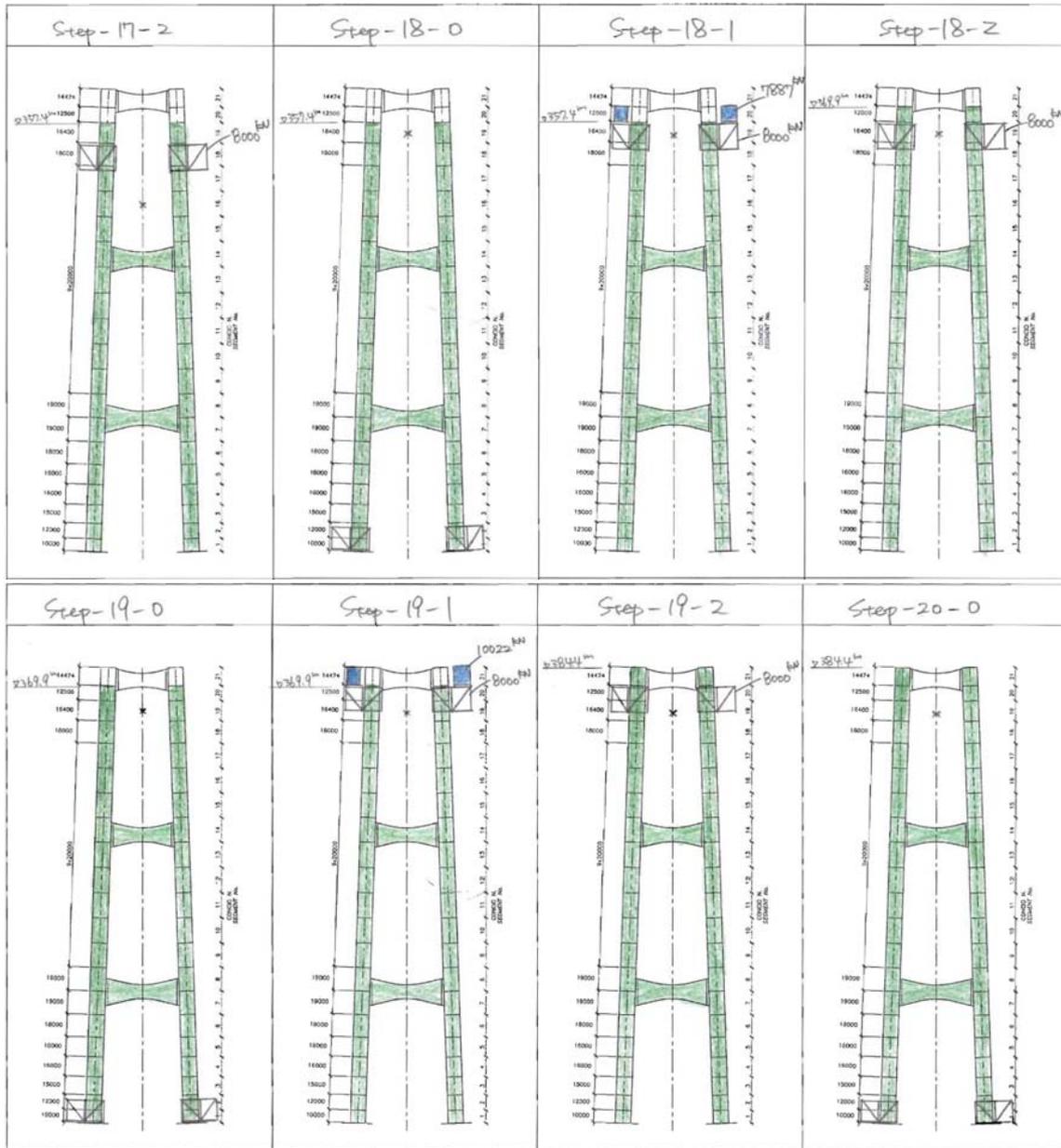




Verifica strutturale delle fasi di montaggio

Codice documento
PS0263_F0_ITA.doc

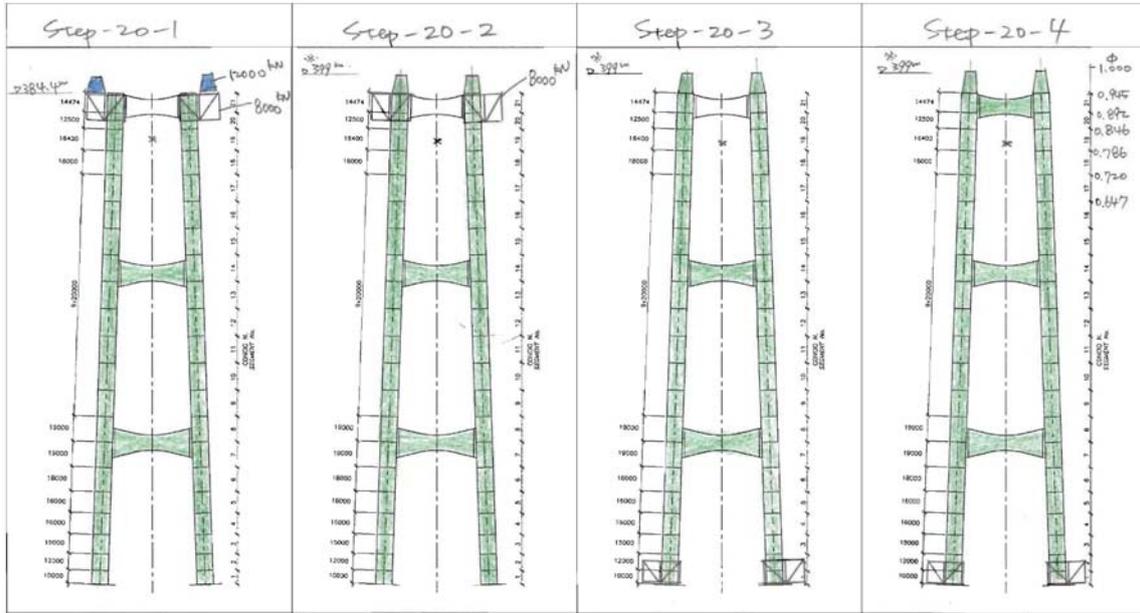
Rev Data
F0 20-06-2011



Verifica strutturale delle fasi di montaggio

Codice documento
PS0263_F0_ITA.doc

Rev	Data
F0	20-06-2011



		Ponte sullo Stretto di Messina PROGETTO DEFINITIVO		
Verifica strutturale delle fasi di montaggio		<i>Codice documento</i> PS0263_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

Fase-21	Installazione della passerella	Installazione della passerella
Fase-22		Set-back Provvisorio
Fase-23	Installazione del cavo	10 / 324 Trefoli installati
Fase-24		20 / 324 Trefoli installati
Fase-25		40 / 324 Trefoli installati
Fase-26		60 / 324 Trefoli installati
Fase-27		90 / 324 Trefoli installati
Fase-28		130 / 324 Trefoli installati
Fase-29		180 / 324 Trefoli installati
Fase-30		230 / 324 Trefoli installati
Fase-31		270 / 324 Trefoli installati
Fase-32		Completamento cavo
Fase-33		Installazione dell'impalcato
Fase-34	26% dell'impalcato installato	
Fase-35	39% dell'impalcato installato I pendini Tie-down vengono installati	
Fase-36	52% dell'impalcato installato	
Fase-37	69% dell'impalcato installato	
Fase-38	79% dell'impalcato installato	
Fase-39	Chiusura impalcato	
Fase-40	Condizione di riferimento	

Appendice B – Frequenze, Massa Equivalente e Progetto della massa TMD

Sc	Tower					TMD					M/TMD y M/Towe	f(TMD) (Tower)	Sc-req /leg	δeq-req (logdec)	Robustness							
	f Hz	Meq ton/m/leg	Mmode ton/leg	δ (logdec)	φ	f Hz	m ton/leg	c kN s/m	h	δ (logdec)					φ	α	h	δeq	A(tower)	ζ	A(TMD)	
Step-15-1	0,176	111,6	7654	0,01	1,00	4,5	0,178	45	6,0	0,060	0,375	0,96	0,54%	1,011	14,1	0,031	100%	100%	0,128	0,000	7,3	0,000
Step-15-2	0,174	86,1	6417	0,01	1,00	3,5	0,178	45	6,0	0,060	0,375	0,92	0,59%	1,023	14,1	0,040	95%	90%	0,094	0,000	6,7	0,002
Step-16-0	0,184	77,1	5772	0,01	1,00	3,1	0,178	45	6,0	0,060	0,375	0,92	0,66%	0,967	14,1	0,045	95%	110%	0,095	0,000	6,2	0,002
Step-16-1	0,156	106,1	7804	0,01	1,00	4,3	0,160	45	6,0	0,066	0,418	0,92	0,49%	1,026	14,1	0,033	105%	90%	0,066	0,008	5,4	0,040
Step-16-2	0,155	85	6710	0,01	1,00	3,5	0,160	45	6,0	0,066	0,418	0,82	0,45%	1,032	14,1	0,041	105%	110%	0,069	0,029	4,7	0,126
Step-17-0	0,164	76,3	6049	0,01	1,00	3,1	0,160	45	6,0	0,066	0,418	0,82	0,50%	0,976	14,1	0,046	100%	100%	0,121	0,001	6,7	0,007
Step-17-1	0,142	101,3	7910	0,01	1,00	4,1	0,142	45	6,0	0,075	0,471	0,82	0,38%	1,000	14,1	0,034	95%	90%	0,058	0,117	4,7	0,510
Step-17-2	0,141	83,5	6935	0,01	1,00	3,4	0,142	45	6,0	0,075	0,471	0,82	0,44%	1,007	14,1	0,042	95%	110%	0,066	0,066	4,5	0,274
Step-18-0	0,149	75	6260	0,01	1,00	3,0	0,142	45	6,0	0,075	0,471	0,94	0,64%	0,953	14,1	0,046	105%	90%	0,054	0,110	4,7	0,421
Step-18-1	0,132	94,7	7795	0,01	1,00	3,8	0,131	45	6,0	0,081	0,511	0,94	0,51%	0,992	14,1	0,037	100%	100%	0,090	0,001	6,7	0,007
Step-18-2	0,132	82,1	7067	0,01	1,00	3,3	0,131	45	6,0	0,081	0,511	0,91	0,53%	0,992	14,1	0,042	95%	90%	0,072	0,008	5,8	0,037
Step-19-0	0,139	73,5	6369	0,01	1,00	3,0	0,131	45	6,0	0,081	0,511	0,91	0,59%	0,942	14,1	0,047	95%	110%	0,081	0,003	5,2	0,015
Step-19-1	0,122	95	8111	0,01	1,00	3,9	0,131	45	6,0	0,081	0,511	0,91	0,46%	1,074	14,1	0,037	105%	90%	0,069	0,008	6,4	0,016
Step-19-2	0,121	81,2	7280	0,01	1,00	3,3	0,131	45	6,0	0,081	0,511	0,87	0,47%	1,083	14,1	0,043	105%	110%	0,054	0,110	4,7	0,421
Step-20-0	0,129	72,8	6565	0,01	1,00	3,0	0,131	45	6,0	0,081	0,511	0,87	0,52%	1,016	14,1	0,048	100%	100%	0,090	0,001	6,7	0,007
Step-20-1	0,111	95,7	8499	0,01	1,00	3,9	0,115	45	6,0	0,092	0,582	0,87	0,40%	1,036	14,1	0,036	95%	90%	0,072	0,008	5,8	0,037
Step-20-2	0,111	81,9	7035	0,01	1,00	3,3	0,115	45	6,0	0,092	0,582	0,82	0,43%	1,036	14,1	0,042	105%	90%	0,052	0,079	3,5	0,250
Step-20-3	0,117	73,5	6343	0,01	1,00	3,0	0,115	45	6,0	0,092	0,582	0,82	0,48%	0,983	14,1	0,047	105%	110%	0,068	0,019	3,3	0,057
Step-21-4 (Freestanding)	0,115	77,2	7223	0,01	1,00	3,1	0,115	45	6,0	0,092	0,582	0,82	0,42%	1,000	14,1	0,045	100%	100%	0,077	0,022	4,3	0,084
Step-21 (Temporary Set-back)	0,140	82,4	9301	0,010	1,00	3,3	0,140	45	6,0	0,076	0,478	0,97	0,46%	1,000	14,1	0,042	95%	90%	0,096	0,005	5,9	0,026
Step-22 (Cutwalk completion)	0,133	218,5	19508	0,010	1,00	8,9	0,140	45	6,0	0,076	0,478	0,97	0,22%	1,053	14,1	0,025	95%	110%	0,088	0,019	4,6	0,075