

I ponti di grande luce

Tommaso RUSMI

I ponti di grande luce hanno un carattere suggestivo poiché tendono a dominare ed interagire con armonia con il paesaggio circostante.

Un ponte progettato senza considerazioni estetiche assolve il ruolo di collegamento ma spesso rappresenta una barriera nel paesaggio con connotati negativi. L'approccio ingegneristico è spesso di progettare una struttura indipendente dal contesto in cui andrà collocata, mentre quello architettonico tende ad integrarla nel paesaggio con studi sulla forma, geometria e del territorio. Spetta ai progettisti considerare entrambi gli aspetti di estetica e funzionalità, e strutture recenti sono state pensate e costruite integrando le diverse discipline progettuali. L'architetto Mario Botta sostiene che il ponte crea il paesaggio e rappresenta una sfida inventiva di ingegneri e costruttori ad evocare meraviglia e bellezza sull'ambiente. Strutture recenti come il viadotto di Millau in Francia, che con le sue torri alte 343m rappresenta il ponte più alto nel mondo costruito con tecniche costruttive all'avanguardia, mostrano una unica integrazione con il paesaggio circostante, valorizzandolo e attribuendo all'attraversamento una marcata funzione simbolica (Fig.1).



Fig. 1 - Millau in Francia aperto al traffico 2004

I ponti di grande luce hanno un costo elevato che è giustificato solo in determinate circostanze e progetti ambiziosi possono subire pesanti variazioni una volta che l'analisi dei costi-benefici è completata. Da un punto di vista economico, l'ottimizzazione strutturale con analisi non lineari e di stabilità e l'attento studio sui metodi costruttivi è fondamentale. Giustificare un investimento su grande scala implica progettare una struttura che, durante il servizio, non richieda costante manutenzione per una durata dell'opera nel tempo di almeno 200 anni come nel caso del Ponte sullo Stretto di Messina. Questi requisiti necessitano una costante attenzione ai parametri progettuali con coefficienti di sicurezza adeguati a garantire

una lunga durata temporale, e spesso i parametri variabili come traffico, vento, o sisma sono valutati considerando proiezioni della struttura nel futuro con simulazioni di incrementi di traffico e eventi eccezionali stimati con tempi di ritorno superiori a 500 anni. La progettazione dei ponti di grande luce deve tenere in conto i fenomeni aerodinamici, infatti l'incremento della lunghezza della campata produce una diminuzione delle frequenze naturali e del rapporto fra i modi di vibrare torsionali e verticali. Di conseguenza queste strutture hanno una elevata suscettibilità alle azioni del vento che spesso domina i criteri progettuali.

TSING MA BRIDGE, HONG KONG

Nell'ultimi quindici anni sono state progettate strutture significative come il ponte Tsing Ma ad Hong Kong che è il ponte sospeso più lungo del mondo che porta sia carichi stradali che ferroviari. Ha una campata centrale di 1377m e due laterali di 360m, con linea ferroviaria al centro dell'impalcato inserita all'interno nel cassone metallico.



Fig. 2 - collegamento fra Hong Kong e l'aeroporto su Lantau Island

Il ponte collega Hong Kong con il nuovo aeroporto sull'isola di Lantau (*Lantau fixed Link*) ed ha una posizione strategica per le spedizioni merci verso la Cina (Fig.2). È stato progettato per garantire l'esercizio durante qualsiasi condizione atmosferica, inclusi gli eventi eccezionali quali tifoni e bufere con venti sopra 290Km/h. Essendo posizionato nel corridoio dell'aeroporto le torri sono state progettate con altezza limitata e l'impalcato è posizionato 60m sopra il livello del mare per garantire il passaggio delle navi.

La progettazione ha tenuto in conto variazioni termiche di ± 23 oC, una accelerazione sismica al suolo di 0.05g, e forze di impatto da navi petrolifere da 220 000 dwt.

Per considerare il passaggio dei treni all'interno del ponte, la struttura longitudinale che sopporta il piano viario stradale e ferroviario è di tipo reticolare con una carenatura laterale in acciaio inox per ottimizzare il comportamento della struttura nei confronti dell'azione del vento (Fig.3).



Fig. 3 - Vista assonometrica dell'impalcato

È stato sviluppato un impalcato in acciaio a due livelli, largo 41m e alto 7.7m, con appendici aerodinamiche laterali. La parte centrale del ponte fra le due carreggiate stradali aventi ciascuna 3 corsie per senso di marcia, è aperta su 3.5m per garantire la ventilazione del cassone. La linea ferroviaria a due binari è collocata sotto il canale di ventilazione ed ai suoi lati ospita due corsie di emergenza per senso di marcia atte ad ospitare il traffico in caso di chiusura delle carreggiate sovrastanti.

Tale struttura comprende travi irrigidenti longitudinali e travi Vierendeel trasversali che collaborano con la piastre ortotrope dell'impalcato. Sono state eseguite numerose prove in galleria del vento per confermare l'efficienza della sezione trasversale in tutte le condizioni atmosferiche.

L'impalcato, composto da 50 000 t di acciaio, è stato fabbricato nel Regno Unito con sezioni lunghe 36m, ed è stato assemblato in Cina all'estuario del fiume Pearl. I singoli elementi sono stati poi trasportati in cantiere con chiatte e posizionati con sollevamenti da 1000 t tramite tecniche innovative di tesatura (*strand jacking techniques*, Fig.4).



Fig. 4 - Sollevamento dei conci tramite pendini collegati alla trave mobile di sollevamento che scorre sui cavi principali

Ciascun cavo di 1.1m di diametro comprende 34 000 fili e porta l'impalcato tramite pendini posizionali ad intervallo di 18m. I cavi principali – fra i più grandi del mondo – sono stati costruiti con la tecnica *aerial spinning* con avanzamento di 1 000 t per settimana (Fig. 5).

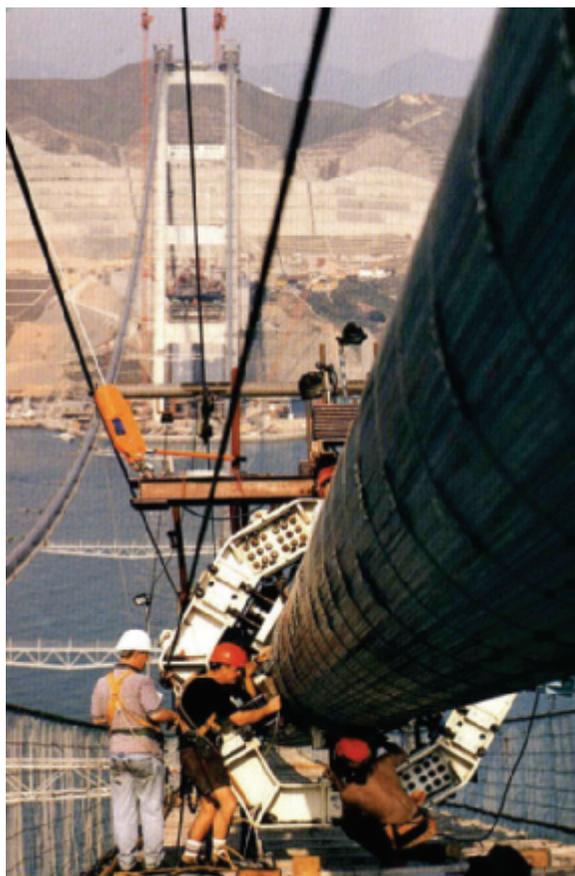


Fig. 5 - assemblaggio dei cavi portanti

I cavi sono tenuti in posizione sopra le torri da selle di acciaio di 500t ciascuna (Fig. 6) e sono ancorati in due enormi blocchi di calcestruzzo di dimensione 270 000 m³.

Per velocizzare la costruzione ed ottimizzare i costi, le torri in calcestruzzo di 206m sono state costruite per conchi successivi (*slipforming*).

Le gambe delle torri sono larghe 6m, variano da 18m a 9m longitudinalmente, e sono collegate da travi precomprese. Durante la costruzione sono state usate travature irrigidenti per stabilizzare le torri sotto l'azione del vento.



Fig. 6 - Sella per i cavi principali in sommità di ciascuna torre

Per criteri di percorribilità e confort dei passeggeri è stata progettata una sezione del piano ferroviario innovativa (*trackform*) comprendente un grigliato su appoggi elastici così da ottimizzare il comportamento dinamico e ridurre il peso della struttura e vibrazioni (Fig 7).

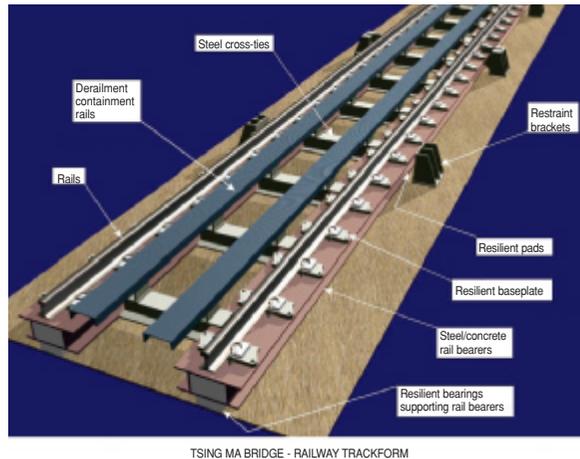


Fig. 7 - Assonometria del piano viario ferroviario

La linea ferroviaria ha un giunto che permette espansioni di 1m sullo sviluppo del ponte di 2km.

Particolare attenzione è stata considerata nell'aspetto estetico della struttura con l'intento di combinare funzionalità ed armonia della forma; i carter in acciaio inox dell'impalcato (essenziale per il comportamento aerodinamico) e le proporzioni e rivestimenti delle torri sono stati scelti in collaborazione con architetti ed autorità locali per accentuare l'eleganza strutturale ed attenuare i contrasti con l'ambiente circostante.



Fig. 8 - Mott MacDonald team durante la costruzione del ponte



Fig. 9 - Vista notturna del ponte Tsing Ma

STONECUTTERS BRIDGE, HONG KONG

Aperto al traffico nel Dicembre 2009, il ponte attraversa la baia di Hong Kong e rappresenta l'accesso al porto Kwai Chung (Fig.10).

L'aspetto estetico del ponte ha una estrema importanza dato che la struttura è visibile da molte parti di Hong Kong e Kowloon.

L'attraversamento è parte della *Route 8 Highway* e porta 2 carreggiate con 3 corsie per senso di marcia con corsie di emergenza e banchine di sosta.

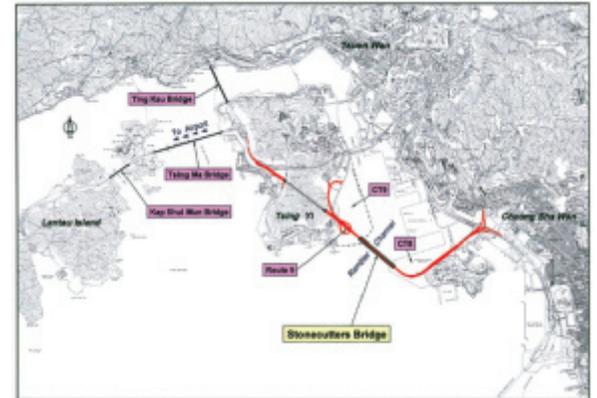


Fig. 10 - Ponte Stonecutters fra Hong Kong e il passante su Tsing Yi

L'impalcato, con profilo aerodinamico ottimizzato nelle gallerie del vento canadesi (Fig.11) si separa dalle precedenti filosofie progettuali che consideravano le campate principali e laterali equilibrate da una alta travatura reticolare longitudinale.

Infatti dal crollo del Tacoma Narrow Bridge (1940) dovuto alle oscillazioni torsionali indotte dal distacco periodico di vortici di von Karman (*vortex shedding*) che produce il fenomeno di instabilità aeroelastica detto anche *flutter*, molti ponti vennero progettati ad impalcato reticolare fino agli anni 70 quando vennero progettati i ponti Severn e Humber in Inghilterra con impalcato chiuso aerodinamico senza travi irrigidenti longitudinali.

Stonecutters Bridge è un ponte strallato con distanza fra i piloni di 1018m e due campate laterali di 289m per uno sviluppo complessivo di 1596m.

L'impalcato è costituito da due cassoni ortopropi paralleli aventi lunghezza di 18m, uniti da traversi lunghi 53m (Fig.11,12).

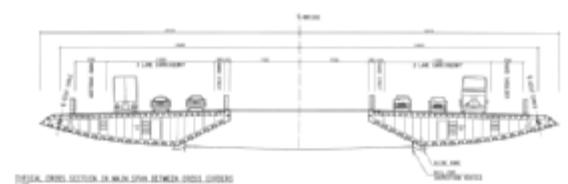


Fig. 11 - Sezione trasversale dell'impalcato

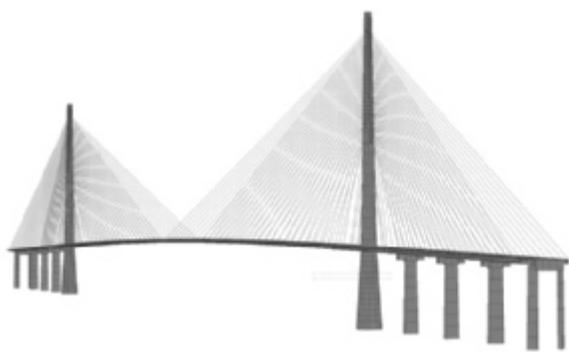


Fig. 12 - Modello strutturale del ponte Stonecutters (TDV-RM Bridge)

Sono state condotte numerose analisi strutturali, incluse fasi di montaggio (Fig. 13), analisi statiche, dinamiche e analisi stocastiche *wind buffeting*. L'analisi non lineare ha confermato l'importanza di considerare la non linearità dei cavi con variazioni del 20% rispetto alla analisi lineare.

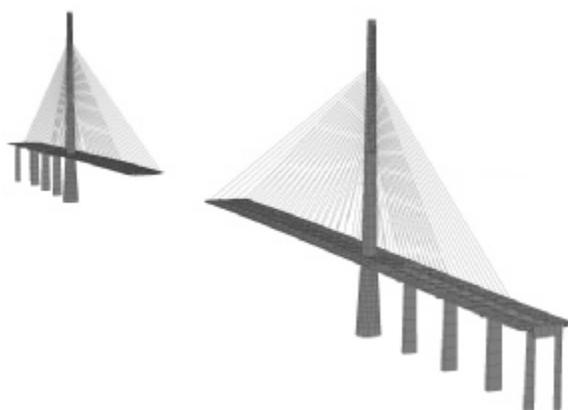


Fig. 13 - Analisi delle fasi di montaggio



Fig. 14 - Struttura in fase di costruzione (2007)

Una delle caratteristiche innovative della struttura è la geometria delle torri che hanno sezione conica a diametro variabile (Fig 16). La loro altezza è 295m sopra il livello del mare; la parte inferiore è costituita da cemento armato, mentre la restante parte di 115m è una sezione composta acciaio-calcestruzzo dove l'acciaio rappresenta il guscio esterno e il calcestruzzo costituisce il nucleo interno (Fig.15).

Per garantire la durabilità della struttura metallica è stato scelto un acciaio inox duplex (50% ferrite e 50% austenite) con grado 1.4462 e resistenza a snervamento di 460 Mpa come da EN10088.



Fig. 15 - Piolatura all'interno delle torri

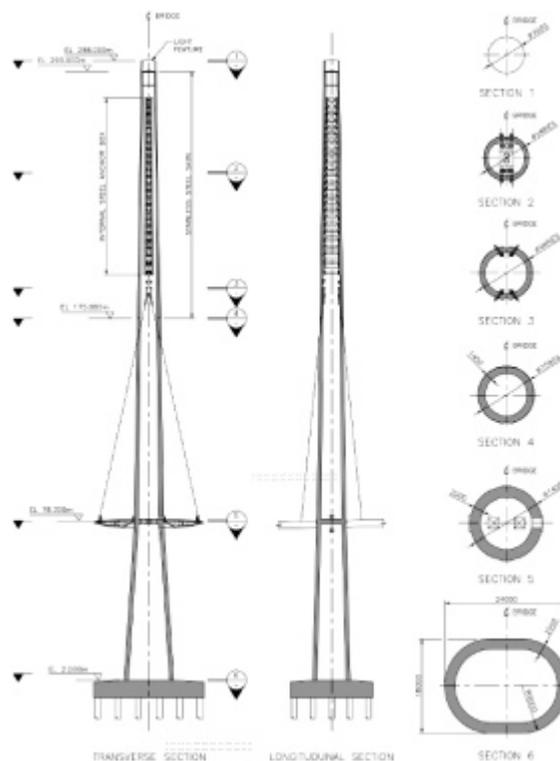


Fig. 16 - Geometria delle torri

Tutta l'area di Hong Kong è soggetta a tifoni di elevata intensità, e nel 2002 una antenna alta 50m è stata eretta in prossimità del cantiere per misurare la velocità, turbolenza e direzione dei venti. La stabilità dell'impalcato durante la costruzione ha richiesto particolare attenzione durante la progettazione e costruzione. Sono stati eseguiti numerosi studi aerodinamici in galleria del vento fra cui: modelli con sezioni in scala 1:80 per determinare la risposta *vortex shedding* ed i coefficienti dinamici della sezione; modelli con sezioni in scala 1:20 per verificare la correttezza dei parametri determinati con il modello 1:80; modello Aeroelastico della torre in scala 1:100 per determinare gli effetti del vortex shedding sulla torre e valutare le misure necessarie a ridurre gli effetti dei vortici a livelli accettabili di vibrazione; test sugli stralli per valutare il coefficiente di trascinamento (*drag loading coefficient*) e gli effetti di vi-

brazione della pioggia sui cavi (*rain-wind induced vibration*); modelli completi del ponte per misurare la risposta wind buffeting e la suscettibilità ai fenomeni di instabilità di *flutter* e *galloping* (Fig. 17,18).



Fig. 17 - Analisi dell'impalcato in galleria del vento

Sono state condotte analisi dinamiche wind buffeting con e senza traffico con coefficienti aerodinamici basati sulle prove in galleria del vento, ed analisi sugli smorzatori non lineari per stabilizzare gli stralli.

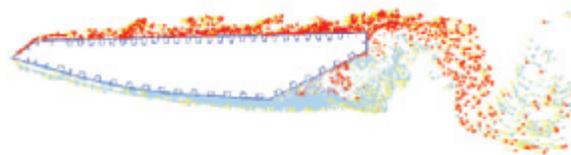


Fig. 18 - studio dei fenomeni aerodinamici sulla sezione

PONTE DI MESSINA

Il progetto dell'attraversamento dello Stretto di Messina ha sempre attirato un notevole interesse e allo stesso tempo numerose critiche da varie parti. Costituisce una delle maggiori sfide progettuali mai affrontate in ambito ingegneristico e scientifico poiché collega la Calabria con la Sicilia con una struttura sospesa di luce libera fra le torri di 3300m (Fig 19). Rappresenta l'attraversamento a campata più lunga del mondo, superando di gran lunga la luce libera di 1991m del ponte Akashi kaikyo costruito in Giappone negli anni 90 ed aperto al traffico nel 1998.

Il progetto preliminare dell'opera prevede il collegamento tra Calabria e Sicilia mediante la realizzazione di un ponte sospeso con due corsie stradali più una di emergenza per ogni senso di marcia e due binari di traffico ferroviario. La lunghezza totale dell'impalcato sospeso è pari a 3.666 m (Fig. 20). La campata centrale del ponte prevista di 3.300 m e i due piloni alti 382,6 m (s.l.m.) posti sulle sponde superano il record mondiale attuale di altezza detenuto dal Viadotto di Millau in Francia con 343 metri.

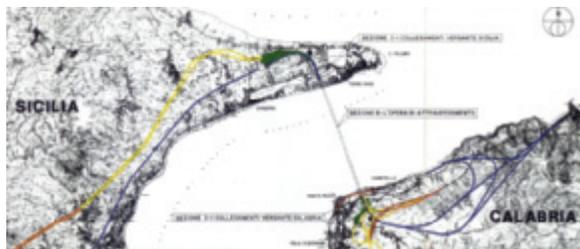


Fig. 19 - Planimetria dell'attraversamento

L'impalcato del ponte è sospeso da quattro cavi d'acciaio del diametro di 1,24 metri e della lunghezza di 5.300 metri.



Fig. 20 - Sezione longitudinale del ponte

Da un punto di vista strutturale, sono stati sviluppati modelli analitici non lineari sia bidimensionali sia tridimensionali per analizzare gli eventi legati a condizioni di servizio frequenti e rare ed è stato eseguito un calcolo indipendente delle deformazioni e delle pendenze longitudinali indotte dalle condizioni di carico più gravose, utilizzando una combinazione dei carichi ferroviari e autostradali.

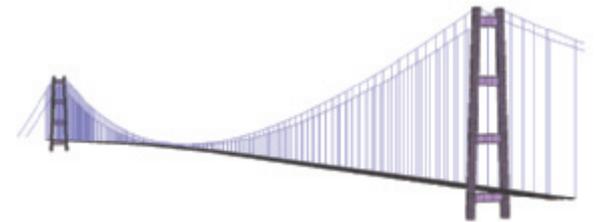


Fig. 21 - Modello strutturale del ponte

L'impalcato è progettato interamente in acciaio con tre cassoni longitudinali indipendenti e sorretti da travi-cassoni trasversali, è largo 60 m e lungo 3.666 m, ossia 183 m oltre le torri e fino ai giunti di dilatazione (Fig 22). La sua carpenteria, tutta realizzata – salvo limitate zone speciali – in acciaio Fe 510 D, ha un peso complessivo di 66.500 t.

È dotato di schermi frangivento con profili aerodinamici stabilizzatori che assicurano la stabilità aeroelastica con velocità del vento fino a 320 Km/h e riducono di circa due terzi la spinta del vento sugli automezzi in transito.

Queste prestazioni nei confronti del vento assicurano la continuità di servizio del ponte anche in caso di avverse condizioni meteorologiche.



Fig. 22 - Vista assometrica dell'impalcato e del sistema di sospensione

La configurazione del ponte è stata sviluppata sulla base di considerazioni strutturali e aerodinamiche. La larghezza della piattaforma di impalcato ha consentito di sistemare gli impianti fissi stradali e ferroviari e di assegnare appropriate destinazioni d'uso allo spazio disponibile.

La scelta di un impalcato stradale a tre corsie più una corsia di emergenza in ogni direzione, sebbene non sia giustificata dalle previsioni correnti del traffico, è ragionevole per assicurare il più alto livello di servizio nella maggior parte delle circostanze, compresi incidenti che possono bloccare una o più corsie, riparazioni o sostituzione del manto d'usura, applicazione delle strisce sulla pavimentazione, ecc.

Questa decisione è ben fondata anche in vista della lunghissima vita utile prevista per la struttura, della sua eccezionale lunghezza, e dell'impraticabilità di allargare gli impalcati qualora, in un futuro lontano, fosse necessario aumentarne la capacità a causa di un maggior afflusso di traffico attraverso lo Stretto.

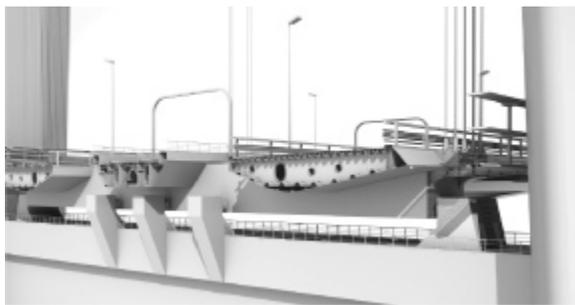


Fig. 23 - collegamento fra impalcato e torri

Il sistema di sospensione è costituito da due coppie di cavi del diametro di 1,24 m disposte ad interasse di 52 m a formare un grande e slanciato arco rovescio che scavalca lo Stretto. I cavi hanno uno sviluppo di 5.300 m tra i due ancoraggi ed un peso complessivo di 166.600 t. Ognuno di essi è formato da 44.352 fili paralleli di acciaio armonico del diametro di 5,38 mm (Fig. 24).

Ogni 30 m, lungo tutto lo sviluppo dell'impalcato sospeso, i cavi sorreggono le travi trasversali dell'impalcato attraverso quattro fasci di funi verticali (pendini) agganciati a collari che abbracciano ciascuna coppia di cavi. La grandissima rigidità dei cavi (ciascuno ha una massa di 8 t/m ed è sottoposto ad un tiro permanente di circa 64.500 t) assicura la stabilità globale del ponte e consente di controllare gli stati deformativi.



Fig. 24 - Cavi principali

Le torri sono strutture snelle e flessibili, ottimizzate ai fini del comportamento sismico ed aerodinamico. Ogni torre è formata da due gambe in acciaio con sezione a losanga di 16 x 12 m collegate tra loro da quattro traversi, raggiunge un'altezza di 382 m sul livello del mare ed è costituita da 56.000 t di acciaio S 420. La massima altezza raggiunta dalle torri compreso l'ingombro dei cavi e dei relativi carter di protezione, è pari a 382,6 m sul livello del mare, quota che coincide con l'intersezione teorica dei cavi sulla verticale delle torri (Fig. 25).

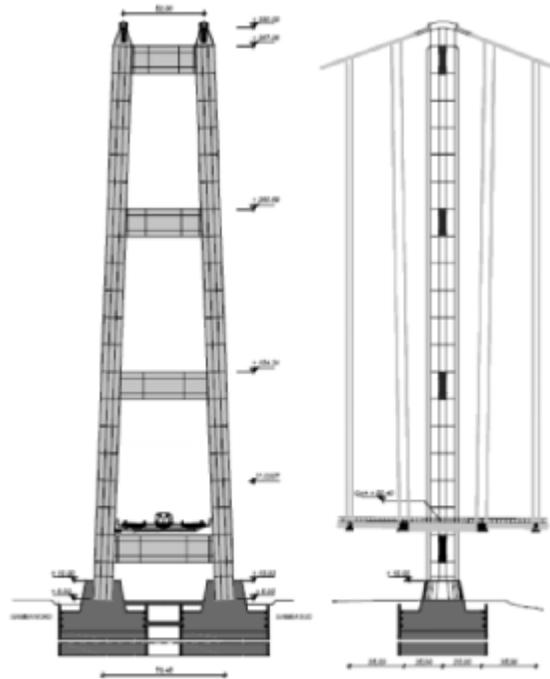


Fig. 25 - Geometria della torre

Per valutare la risposta globale del ponte sullo Stretto di Messina alle varie azioni è stato condotto uno studio comparativo delle specifiche progettuali ad esso relative, delle specifiche AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), delle specifiche britanniche BS 5400 e degli attuali Eurocodici.

Sulla base dei dati meteorologici locali, la struttura è stata progettata con venti aventi periodi di ritorno di 500 anni. Utilizzando i coefficienti di portanza, di resistenza e torsionali determinati dalle prove preliminari in galleria del vento, sono state determinate le inflessioni laterali della struttura d'impalcato ed ha calcolato le tensioni massime nelle gambe delle torri e nelle travate longitudinali. I risultati ottenuti sono congruenti con gli stati limite definiti e ricadono entro intervalli normalmente attesi ed accettati.

Mediante l'utilizzo di un modello analitico indipendente del ponte, sono stati individuati i modi di vibrare longitudinali, verticali, torsionali e trasversali e ne sono state calcolate le relative frequenze proprie.

Le velocità critiche del vento, relative a fenomeni di instabilità del ponte dovuti a flutter, sono circa tre volte maggiori rispetto ai venti trasversali con periodo di ritorno di 50 anni che si verificano sul sito. La velocità critica di flutter è simile a quelle ritenute accettabili per altri ponti sospesi di grande luce, costruiti in località anche più esposte al vento dello Stretto di Messina.



Fig. 26 - Prove in galleria del vento sull'impalcato

Le deformazioni di buffeting sono molto piccole grazie alla ottimizzazione della sezione trasversale messa a punto nel progetto di massima. Tali vibrazioni non produrranno alcun disagio significativo per gli utenti del ponte.

Gli studi sulla percorribilità del ponte indicano la previsione di ben poche limitazioni del traffico per motivi di vento, e tali limitazioni sono meno pesanti e meno frequenti di quanto è stato ritenuto accettabile su altri ponti di grande luce esistenti come lo Storebaelt e il Humber dell'Europa del nord.



Fig. 27 - Forme modali

La sollecitazione sismica non è determinante per il progetto di alcun elemento principale, eccetto per porzioni di gambe delle torri.

Inoltre i ponti sospesi, grazie alla loro intrinseca flessibilità e ai loro lunghi periodi di vibrazione, non sono sensibili ai terremoti, come del resto osservato nel comportamento del ponte San Francisco-Oakland Bay durante l'evento di Loma Prieta e in quello del ponte Akashi durante l'evento di Kobe.

Il ponte è in grado di resistere senza danni ad un sisma corrispondente al grado 7,1 della scala Richter – più severo del devastante terremoto che colpì Messina nel 1908.



Fig. 28 - Foto restituzione della struttura completata

MOTT MACDONALD

È una società di ingegneria internazionale che si occupa di progettazione, controllo e supervisione di progetti pubblici e privati in tutto il mondo. Con un organico di più di 15000 persone sparse fra gli uffici di Europa, America, Asia, Africa, Medio Oriente, e Australia, è una delle maggiori società di ingegneria in scala internazionale ed è stata premiata per il terzo anno di fila come *International Consultant of the Year* nonché considerata nelle prime 5 migliori società con cui lavorare nel census del *Sunday Times Best Big Companies 2010*.

Tommaso RUSMI Laureato in ingegneria nel 1998 all'Università degli studi di Firenze, ha collaborato con Transfield in Australia, Italferr a Roma e Milano e dal 2002 lavora con Mott MacDonald negli uffici di Londra dove è responsabile della progettazione e direzione lavori per la divisione ponti. Attualmente è incaricato Team leader e Project manager, fra le opere significative su cui ha lavorato si riportano lo Tsing Ma Bridge, Stonecutters Bridge ad Hong Kong, Incheon Bridge in Corea, Delhi metro in India, Ponte sullo stretto di Messina, Viadotto Metsovitikos in Grecia, Kuala Lumpur metro in Malesia, Al Raha Beach bridges ad Abu Dhabi.