

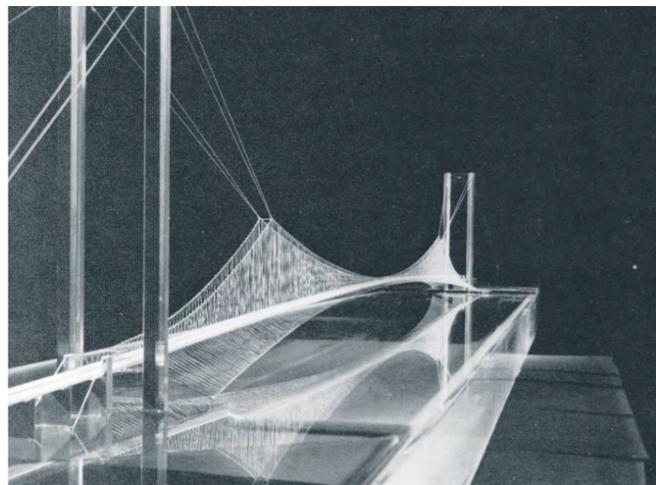
Pensare oltre il limite: progetti per ponti di grande luce

La nostra ricerca sui ponti sospesi ha avuto origine da uno studio dedicato al progetto di un ponte sullo Stretto di Messina di Sergio Musmeci, una delle 5 idee vincitrici del concorso del 1969 indetto da Anas.

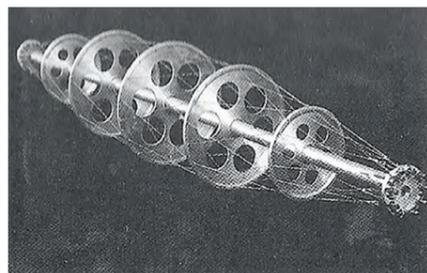
Il progetto di Musmeci prevedeva una soluzione all'avanguardia per il periodo (anche se, visto il decorso dello stato dell'arte in questo ambito dell'ingegneria, risulterebbe tuttora innovativa): un ponte in tensostruttura (luce libera $L=3300\text{m}$) che accoppiava alle funi portanti superiori due funi traenti (stabilizzanti) inferiori in modo da bilanciare la sezione dell'impalcato nei confronti degli effetti delle azioni del vento, mitigando soprattutto le deformazioni torsionali sull'impalcato.

Il calcolo e la verifica di questa soluzione, eseguiti per la prima volta in assoluto, furono infatti l'oggetto della tesi di Laurea in Ingegneria Civile dell'Ing. Marco Peroni, con la supervisione del prof. Massimo Majowiecki.

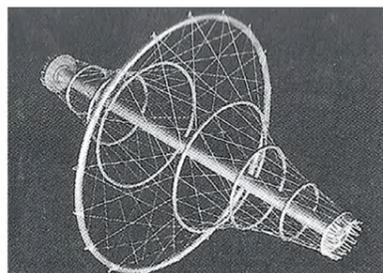
Il calcolo all'elaboratore di Peroni venne completato da un "modello sezione" caricato con una storia di vento, elemento che giustificava l'adozione del sistema tensostrutturale elaborato da Musmeci e ne sanciva la superiorità rispetto alla soluzione "classica" andata poi in appalto.



↑ Modello della proposta per il ponte sullo Stretto di Messina di Sergio Musmeci.



↑ Alcuni modelli iperbolici costruiti da Robert Le Ricolais (1894 - 1977).



01

Da Messina a Gibilterra

Nel 2005 Marco Peroni cominciò a studiare un sistema in tensostruttura per l'attraversamento dello Stretto di Gibilterra, ipotizzando un ponte a campata unica di 10 Km. Sviluppando i concetti elaborati da Musmeci per lo stretto di Messina, la nostra proposta consiste in una tensostruttura costruita sulla base del paraboloide iperbolico: si tratta in pratica di un sistema composto da una rete tridimensionale di funi interlacciate tra di loro in modo da formare una sorta di "cesto da basket" all'interno del quale scorre l'impalcato del ponte. È una versione tridimensionale del progetto di Musmeci, che invece si basava su un sistema a doppia trave di funi piane. L'utilizzo della soluzione a paraboloide (Hypar) non è di per se stesso nuovo. Tra i tanti tipi di costruzioni ad iperboloidi citiamo:

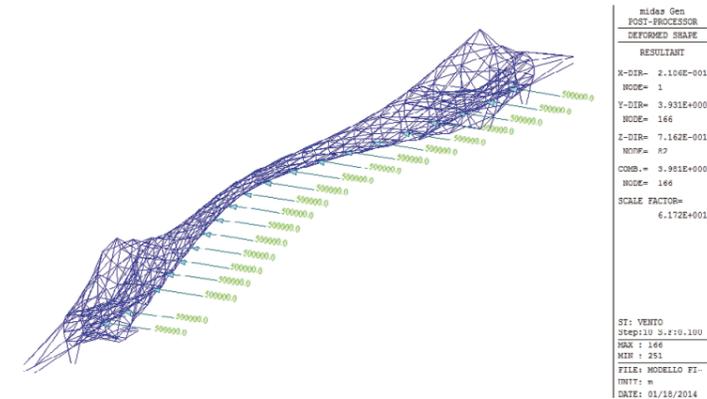
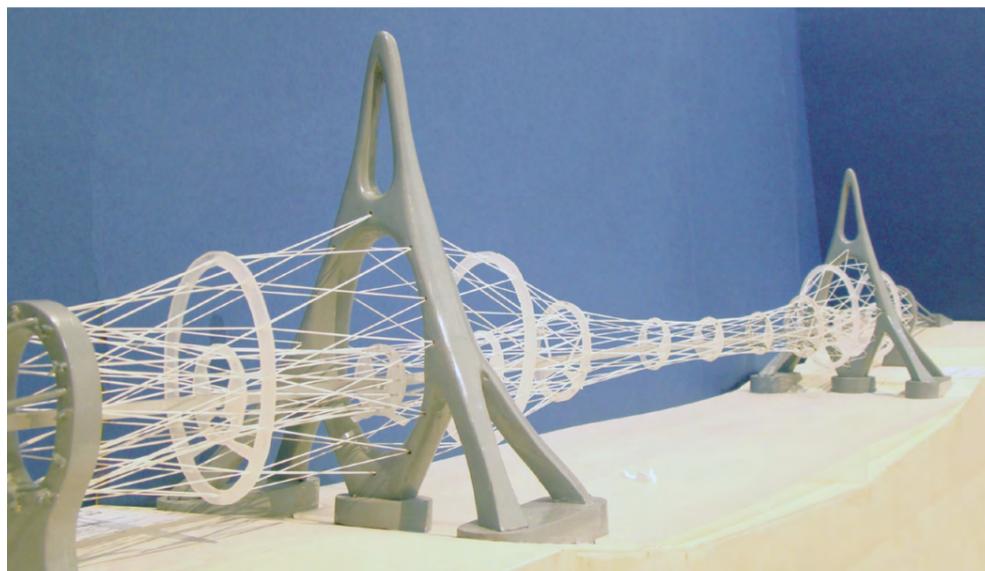
- i tralicci realizzati dall'ingegnere russo Vladimir Šuchov (1853-1939) per le torri di comunicazione da lui sviluppate all'inizio del XX secolo in Russia;
- il lavoro dell'architetto e ingegnere francese Robert Le Ricolais (1894 -1977), grande studioso di applicazioni sulle strutture a iperboloidi con utilizzi anche diversi da quelli canonici e in parte proprio con proposte di utilizzo a ponte di tubi con cavi intrecciati in questo modo.

Il modello da noi sviluppato si basa sui seguenti concetti fondamentali:

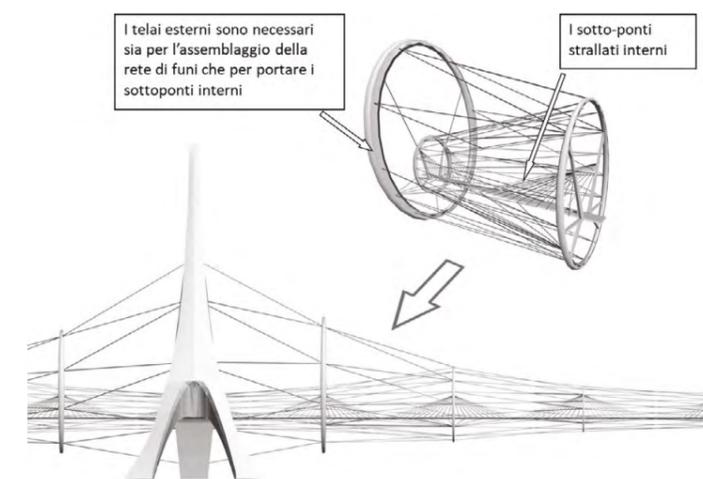
- l'incremento considerevole sia della rigidità torsionale che della rigidità nei confronti dell'effetto di lift (sollevamento) e drag (azione di spinta orizzontale) prodotto dal doppio effetto della configurazione tridimensionale dei cavi a iperboloidi, che si attecchiscono con un'opposta curvatura anticlasticca;
- la riduzione del peso proprio del ponte (soprattutto delle funi) ottenuta grazie all'uso di CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) per i cavi che, combinato a un impalcato leggero (in questo caso non c'è infatti bisogno di assegnare rigidità torsionale all'impalcato) riduce in maniera considerevole il peso proprio del ponte.

La costruzione della rete tridimensionale delle 32 funi che compongono l'ordito portante del ponte risulta possibile utilizzando dei telai in acciaio che, disposti in passi regolari lungo lo sviluppo della campata centrale, permettono di guidare la costruzione delle singole funi costituenti la rete portante e dargli la necessaria conformazione a iperboloidi. I telai verticali sono parte della struttura del ponte: vengono infatti sostenuti dalla rete di funi esterne e fungono da supporto per i sottoponti sui quali scorrerà l'impalcato del ponte. Questi ultimi saranno costituiti da ponti strallati di luce pari all'interasse dei telai e costruiti con tecnologie "tradizionali".

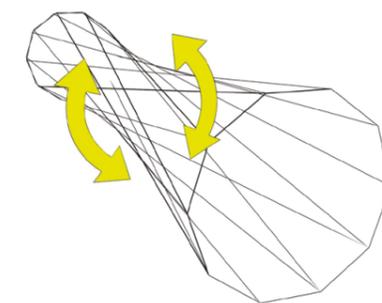
↓ ▾ Dettagli del modello in scala del ponte di Gibilterra realizzato dal nostro studio (lunghezza circa 3 m).



↑ Analisi al computer: deformazione dovuta al carico laterale del vento. Programma di calcolo utilizzato: Midas Gen (distribuito da CSPFea, Este, PD)



↑ Schema dei sottoponti.



↑ Schema del comportamento a torsione del ponte.

La costruzione del ponte sospeso per l'attraversamento dello Stretto di Messina è stata purtroppo sospesa una volta assegnato il progetto esecutivo vincitore al gruppo EUROLINK (che comprende tra gli altri Impregilo e CMC di Ravenna). A causa della rapida successione di governi e della crisi che ha colpito l'Italia dal 2008, l'intervento non è infatti stato più considerato prioritario per lo sviluppo del Mezzogiorno.

Nonostante le ragioni politiche ed economiche di questo momentaneo arresto del programma, il progetto ha da sempre presentato delle criticità ed ha suscitato diverse perplessità anche da parte degli stessi progettisti, non ultime quelle relative alla sua "serviceability" (cioè alla sua possibilità di utilizzo anche in condizioni di vento estreme).

Approfittando del periodo di stasi in cui versa il progetto, pensiamo che questo sia il momento adatto (fine del 2019) per poter presentare un'alternativa basata sui concetti già elaborati per il nostro progetto su Gibilterra: una soluzione che possa essere economicamente comparabile con quella appaltata ma più efficiente in termini di resistenza al vento e che consenta al ponte di rimanere aperto al traffico anche durante eventi meteorologici "estremi". Ricordiamo come la snellezza H/L (altezza impalcato/luce libera del ponte) del ponte di Messina sarebbe di 1/1320. Alcune comparazioni:

- la snellezza del ponte attualmente più lungo al mondo (l'Akashi Kaykio in Giappone, L=2000m) è di 1/300;

- il ponte con maggiore snellezza risulta essere quello sullo Storebealt (L=1620m), con un rapporto pari a 1/450.

Nessuno dei ponti più lunghi è stato abilitato per la percorrenza ferroviaria (quest'ultima necessita di limiti di deformabilità più stretti rispetto a quelli per la percorrenza stradale). Il ponte ferroviario più lungo del mondo è ad oggi il Tsing Ma Bridge a Hong Kong con 1370 m di luce libera.

Per rendere il ponte efficiente dal punto di vista dinamico ed evitare fenomeni di instabilità aero elastica (per intenderci come quella verificatasi in occasione del crollo del ponte di Tacoma nel 1940) i progettisti della SM hanno proposto una soluzione a impalcato trasparente, cioè un impalcato costituito da tre cassoni separati tra loro attraverso i quali l'aria può passare e quindi perdere forza. La rigidità a torsione del ponte viene comunque affidata tutta all'impalcato che risulta completamente esposto al vento e deve contrastare i movimenti con la sua forma. Essendo molto snello in rapporto alla sua lunghezza, potrebbe appunto risentire di questo fatto.

Il nostro progetto per un ponte sullo Stretto di Messina si basa sul comportamento a doppio effetto prodotto dalla conformazione tridimensionale dei cavi nella loro geometria ad iperboloidi con curvatura anticlastica (tipica di tutti i sistemi tensostrutturali) che, come abbiamo visto, ha caratterizzato anche la progettazione del ponte di Gibilterra.

La rete di funi principali parte dalle due torri a forma ellittica alle estremità del ponte ed è composta in questo caso da una serie di 20 funi in acciaio ad alto limite di snervamento, ciascuna del diametro di 40cm e che si dispongono intrecciandosi attorno a sezioni ellittiche che man mano si riducono verso la mezzaria del ponte.

Come già spiegato, la particolare conformazione a tensostruttura a "sistema chiuso" risulta essere estremamente stabile nei confronti delle azioni del vento sia orizzontali che verticali e soprattutto torsionali: questo permette quindi di avere un impalcato estremamente leggero rispetto ai tradizionali ponti sospesi.

Le funi che compongono la rete esterna principale sono agganciate attorno ad una serie di "cerchianti" che, circa ogni 400 m, fungono da supporti estremi di una serie di sottoponti strallati interni a cui è appeso l'impalcato.

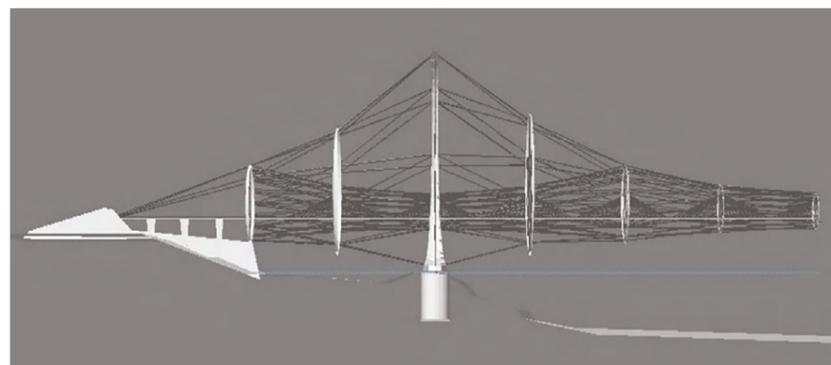
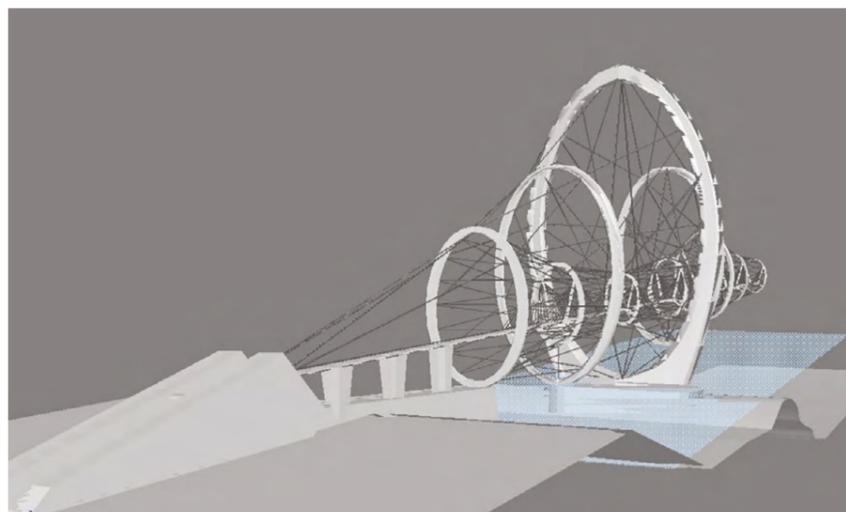
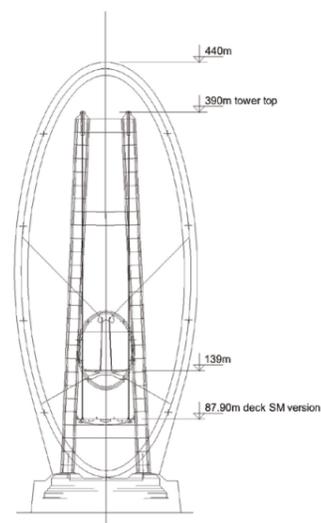
Con la nostra soluzione possiamo perciò ottenere un impalcato che pesa la metà rispetto a quello della proposta approvata in appalto (11t/m contro 20 t/m), mentre le stesse funi portanti e gli stralli dei sottoponti presentano un peso del 60% inferiore rispetto a quelli del progetto appaltato. Il peso inferiore delle funi e dell'impalcato compensa naturalmente il maggior peso derivante dalla presenza dei telai intermedi e del montaggio delle funi principali ad iperboloidi, che risulta più oneroso rispetto soluzione classica. Tutto questo è perciò possibile ottenerlo con uno schema più innovativo ed intrinsecamente sicuro.

Nella nostra proposta le torri saranno poggiate sulle stesse fondazioni già previste per le torri del progetto approvato, senza quindi modificare le opere di fondazione già previste.

Negli ultimi anni abbiamo eseguito molti modelli strutturali di calcolo all'elaboratore che hanno validato il principio strutturale del paraboloide iperbolico applicato al ponte di grande luce nelle sue varie versioni: da quella di 10 Km pensata per Gibilterra in cui naturalmente lo schema strutturale viene sfruttato al massimo della sua efficienza, ad una dimensione intermedia di 6 Km di luce libera (eventualmente utilizzabile per un percorso alternativo più vicino alla città di Messina) fino ad arrivare alla soluzione di 3.3 Km prevista per l'attraversamento classico previsto in appalto.

Tutte le calcolazioni hanno mostrato un ottimo comportamento del sistema strutturale in termini di deformazione sotto carico ma soprattutto di rigidità torsionale del sistema aspetto è molto importante nei confronti dell'azione del vento.

↓ Confronto tra le torri del progetto SM e del progetto di Marco Peroni.



←↑ La soluzione "di Gibilterra" applicata alla nostra proposta per lo Stretto di Messina (rendering di metà ponte).