

Francisco e il ponte Giovanni da Verrazzano di New York.

Poi cosa accadde?

Il progetto di massima riscosse l'interesse di molti colleghi di Sergio e presto arrivarono le proposte di collaborazione per le opere accessorie e la sistemazione ambientale, ma io insistevo per gestire il progetto internamente allo studio. Facemmo un primo modello e quindi una sezione degli impalcati e del sistema di sospensione. Poi Sergio, forse perché si rendeva conto delle implicazioni di carattere urbanistico e paesistico di una simile opera, accettò di lavorare con Quaroni e il suo gruppo, che appunto curò quell'aspetto.

Perché a Suo avviso la cosiddetta «soluzione Musmeci» ottenne molta attenzione ma poi rimase chiusa in un cassetto?

Una domanda difficile cui rispondere, quanto meno nella sua seconda parte. Circa il successo credo che il motivo sia evidente: la soluzione ideata da mio marito era rivoluzionaria perché, grazie all'impiego di una tensostruttura a doppio effetto, minimizzava la deformabilità orizzontale e riduceva l'importanza dell'impalcato a favore delle caratteristiche di tutta la struttura, concepita e dimensionata per resistere alle azioni del vento così come a quelle sismiche. C'è poi un altro aspetto di notevole importanza: l'aver riportato a 2.000 metri la luce libera grazie alle coppie di cavi che, partendo dalla sommità delle antenne, determinano dei punti di sospensione posti a 500 metri da esse. In sostanza il progetto aggira il problema dei 3.300 metri di luce libera, riportando i dimensionamenti entro limiti realizzabili.

Che il progetto sia stato tenuto nel cassetto, nonostante una legge - la 1158 del 17/12/71 - ne prevedesse il finanziamento per lo studio di fattibilità, è

purtroppo un dato di fatto. Ritengo che ciò sia avvenuto per via della mancanza di conoscenze specifiche di coloro che erano preposti a valutarlo. L'incontro con una soluzione innovativa in certi ambienti induce la paura, e quindi il rigetto; credo che sia un sentimento abbastanza comune.

Adesso che si è tornati a parlare del ponte quale è il Suo stato d'animo?

La discussione ovviamente mi coinvolge, non foss'altro perché ho la titolarità del progetto: da un punto di vista legale lo studio Musmeci continua

infatti ad esistere. Se devo, tuttavia, essere sincera non credo che il ponte sia di grande utilità sul piano infrastrutturale; è naturalmente un'opinione personale, ma mi pare che sia abbastanza diffusa anche fra gli addetti ai lavori.

In ogni caso ritengo che qualora si costruisse un'opera di quelle proporzioni si dovrebbe avere il coraggio di imboccare la via giusta, cioè la soluzione presentata nel progetto di Sergio Musmeci che vinse il concorso nel 1970.

Non è possibile che, dopo 22 anni e la spesa di più di cento miliardi, si sia invece prodotto

un progetto assolutamente banale, e che peraltro non da alcuna garanzia in fatto di affidabilità.

Dico questo con grande serenità e senza secondi fini, perché intendo donare la cosiddetta «soluzione Musmeci» alla cultura italiana. Ritengo che sarebbe una disgrazia per la comunità ingegneristica e scientifica nazionale se, nel realizzare un'infrastruttura di dubbia utilità, si trascurasse anche di renderla un simbolo della capacità progettuale e inventiva che ha sempre contraddistinto il nostro Paese.

S

TUDI ■ Lo studio della sensibilità all'azione del vento costituisce un capitolo fondamentale nella progettazione dei ponti sospesi di grande luce.

L'azione del vento su ponti sospesi di grande luce: regime di buffetting 3-D

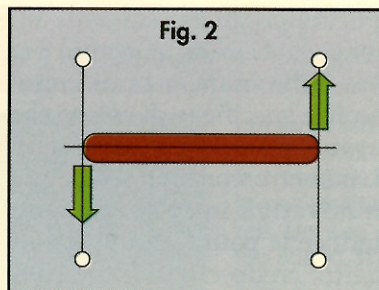
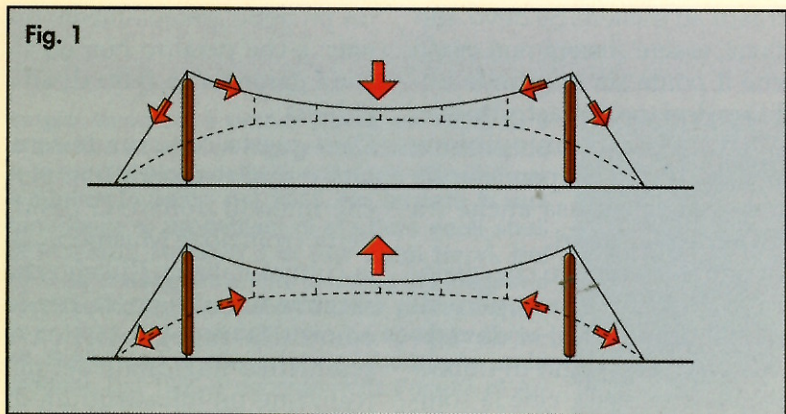
di MASSIMO MAJOWIECKI, STEFANO PINARDI

Università di Bologna

Nella progettazione dei ponti sospesi di grande luce lo studio della loro sensibilità all'azione del vento costituisce un capitolo fondamentale. Le ultime realizzazioni e i progetti attualmente in corso mettono in evidenza una net-

ta biforcazione del concetto progettuale attraverso la contrapposizione tra modelli d'impalcato «aerodinamici», e quindi trasparenti all'azione del vento, e modelli di impalcato rigidi.

Questa biforcazione sottolinea il grado di sensibilità del problema, l'importanza e la necessità di «nuove» concezioni strutturali. Tra queste, la riscoperta della soluzione in tensostruttura con cavi irrigi-



denti inferiori inclinati o meno rispetto al piano verticale. Le potenzialità di questa soluzione sono state messe in evidenza operando alcuni confronti con la soluzione classica mediante una analisi nel dominio delle frequenze effettuato con l'elaboratore su modelli bidimensionali (modello-sezione) e tridimensionali. A questo scopo, e continuando quanto esposto in precedenza, è stato implementato un programma di analisi nel dominio di frequenza di modelli tridimensionali che permette di valutare i parametri statistici dei g.d.l. e di drag, lift e twist delle sezioni.

CRITERI PROGETTUALI

Nel settore della progettazione dei ponti sospesi lo storico conflitto tra la soluzione ad impalcato aerodinamicamente trasparente e quella ad impalcato ad alta rigidità e conseguente alta resistenza all'azione del vento è oggi messo in evidenza dalle opere attualmente più importanti: il ponte sospeso sullo Storebelt (Danimarca), con luce centrale di 1624 m e con impalcato aerodinamicamente efficiente, e il ponte Akashi Kaikyo (Giappone) con luce centrale di 1990 m ed impalcato di tipo reticolare ad elevata rigidità. Il criterio di progettazione di base nel primo caso si pone come obiettivo la riduzione delle azioni dovute al vento, mentre nel secondo caso si affida ad un incremento della resistenza della strut-

tura. Questa biforcazione nei criteri di progetto rivela come si sia raggiunta oggi, nel campo dei ponti sospesi, una fase di incertezza che porta a domandarsi quali siano gli schemi d'impalcato da impiegare per le grandissime luci, oltre cioè i 2000 m, e se sia ancora opportuno riproporre lo schema classico del ponte sospeso senza introdurre elementi innovativi.

Tali domande si pongono ancora più pressanti passando all'analisi di applicazioni future come il ponte sullo stretto di Messina (luce = 3300 m) e il ponte a più campate sullo stretto di Gibilterra (luci di 5000 m).

Questi progetti futuri richiedono, infatti, per il salto di scala implicato, non solo un'analisi riguardante le prestazioni aerodinamiche dell'impalcato, ma anche l'introduzione di nuove risorse strutturali (in aggiunta a quelle fornite dallo schema classico).

Tali innovazioni devono far fronte alle incertezze che sono la vera causa della divergenza dei criteri progettuali: queste incertezze risiedono nella modellazione del sistema ed in particolare delle azioni, nei metodi d'indagine attualmente usati e che hanno portato alla realizzazione di gallerie del vento sempre più larghe per poter ospitare modelli in scala minore e quindi più fedeli alla struttura reale nelle loro caratteristiche geometriche, dinamiche ed aerodinamiche.

In numerosi recenti congressi sono state messe in evidenza da autorevoli esperti le incertezze derivanti dai risultati ottenuti con i vari metodi d'indagine a cui ancora oggi non si può rinunciare: sperimentali (come i tests in galleria del vento: si veda l'impossibilità di garantire l'uguaglianza dei numeri di Reynolds) e analitici (ad esempio l'artificiosa separazione di fenomeni tipicamente non lineari come il flutter e il buffeting).

Nella direzione di una revisione della concezione strutturale, va considerata la proposta di un ponte sospeso in tensostruttura a doppio effetto, secondo un modello ispirato all'idea progettuale di S. Musmeci per l'attraversamento dello stretto di Messina.

I punti salienti dell'idea di Musmeci sono essenzialmente due:

- 1) l'introduzione della fune traente (o fune stabilizzante) con curvatura contrapposta a quella della fune portante;
- 2) l'adozione dello strallo che permette di eliminare i pendi-

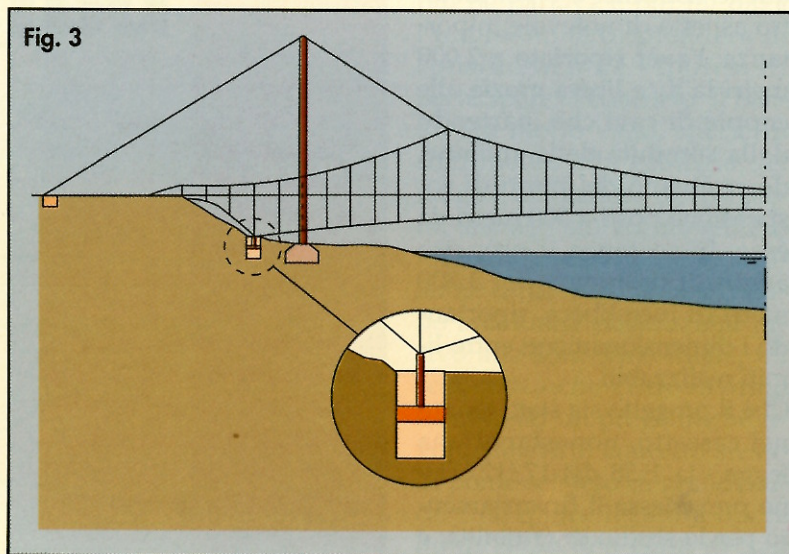
ni più lunghi (quelli in prossimità delle pile).

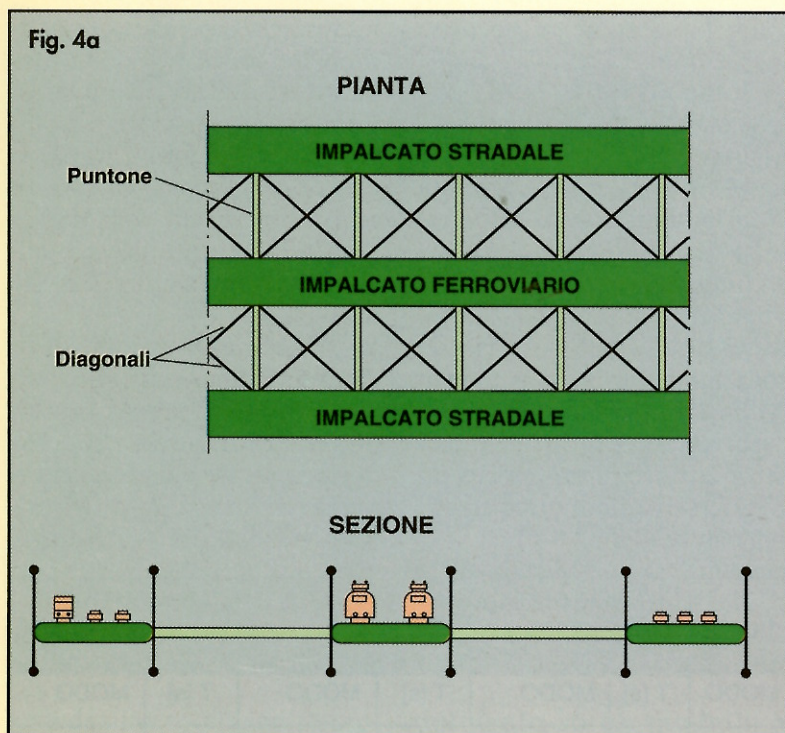
La presenza, accanto al sistema dei cavi portanti, di un sistema di cavi stabilizzanti porta ad avere una vera e propria tensostruttura, e i benefici che derivano da tale nuova concezione strutturale sono:

1) effetto stabilizzante nei confronti dei movimenti verticali (fig. 1): il ricorso a sistemi tensostrutturali nelle coperture di grande luce dimostra come questa soluzione rappresenti il sistema di stabilizzazione migliore rispetto ad altri (incremento delle masse, irrigidimento mediante elementi strutturali secondari) perchè economico, leggero e con ottime prestazioni dinamiche;

2) incremento della rigidità torsionale: la coppia di funi stabilizzanti si sostituisce all'impalcato nella funzione di garantire una sufficiente rigidità torsionale della struttura. La larghezza dell'impalcato rappresenta ora il braccio dell'azione stabilizzante esercitata dai due sistemi di cavi (fig. 2);

3) ulteriore riduzione dei pesi propri dell'impalcato a cui compete ora il meno impegnativo ruolo di struttura portante secondaria con il compito di trasferire i carichi ai pendini e quindi alla tensostruttura. Una prima importante conseguenza di ciò è la





possibilità di adottare box di altezza minore e quindi soggetti ad una azione di drag di minore intensità.

Il sistema di cavi traenti così ipotizzato può diventare non solo un sistema per introdurre ulteriore rigidità nella struttura (sistema che al contrario di quello classico non perde la sua efficacia all'aumentare della luce), ma anche sede di smorzamento strutturale se si prevede l'inserimento, in corrispondenza dei punti d'ancoraggio di tali cavi, di smorzatori viscosi o isteretici (fig. 3).

Il sistema strutturale così concepito dovrebbe quindi garantire una migliore prestazione aerodinamica: all'introduzione di queste riserve strutturali di rigidità e smorzamento dovrebbe corrispondere un incremento della velocità critica per flutter e una riduzione della risposta statica e dinamica all'azione del vento soprattutto in termini di spostamenti verticali e torsionali.

Per quanto riguarda la resistenza al drag si può riscontrare, nella soluzione in tensostruttura, un primo consistente beneficio in termini di azioni di minore intensità grazie

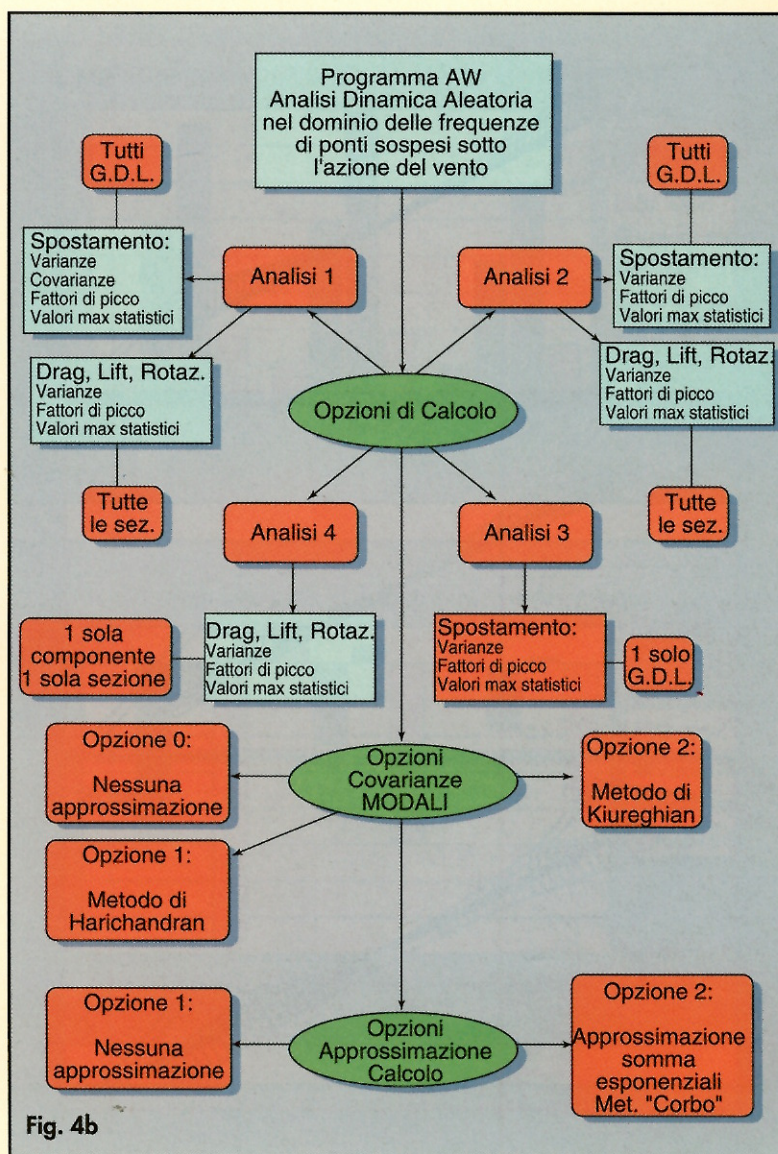
alla possibilità di adottare ora, per l'impalcato, box di altezza minore e quindi di minore ingombro e maggiore «trasparenza».

L'obiettivo di incrementare la resistenza in termini strutturali può essere invece raggiunto con due soluzioni:

1) la separazione delle tre corsie (due stradali e una ferroviaria) in tre distinti impalcati, ciascuno dei quali dotato di un proprio sistema di cavi portanti e stabilizzanti. Si prevede poi di collegare tra loro, a livello d'impalcato, i tre ponti che così si vengono a delineare mediante puntone trasversali e aste diagonali in modo da realizzare nel piano dell'impalcato stesso uno schema di trave reticolare la cui altezza (pari alla distanza tra gli impalcati esterni) può essere dosata in modo da garantire una sufficiente rigidità nei confronti dell'azione di drag (fig. 4).

Lo spazio compreso tra gli impalcati consente inoltre quella ventilazione della struttura che le prove in galleria hanno mostrato essere necessaria per ridurre l'azione del vento, in particolare quella di lift;

2) la disposizione dei cavi sta-



bilizzanti su piani non più verticali (come era stato ipotizzato fino ad ora) ma su piani inclinati in modo che la rigidità tensostrutturale (prima attiva solo in direzione verticale) acquisti ora anche una componente orizzontale tale da contrastare direttamente le azioni di drag.

IL PROBLEMA DEL BUFFETING IN CONDIZIONI D'ESERCIZIO

Convenzionalmente è possibile distinguere gli effetti del vento sui ponti in due categorie: quelli tipicamente non lineari che possono dare origine a fenomeni d'instabilità della struttura (flutter, torsional divergence, ecc.) e quelli come il buffeting dovuti alla variabilità del carico agente

per effetto della turbolenza del vento.

Mentre l'analisi dei primi gioca un ruolo fondamentale nella definizione della forma aerodinamica da dare all'impalcato volta ad escludere la possibilità di innesco di fenomeni d'instabilità aeroelastica, l'analisi del buffeting costituisce il problema principale nell'analisi della struttura in condizioni d'esercizio.

IL PROGRAMMA DI ANALISI DINAMICA SU MODELLI TRIDIMENSIONALI

Allo scopo di analizzare comparativamente la risposta in esercizio di diverse soluzioni strutturali è stato sviluppato un programma per l'analisi dinamica aleatoria dell'azione turbolenta del vento (buffet-

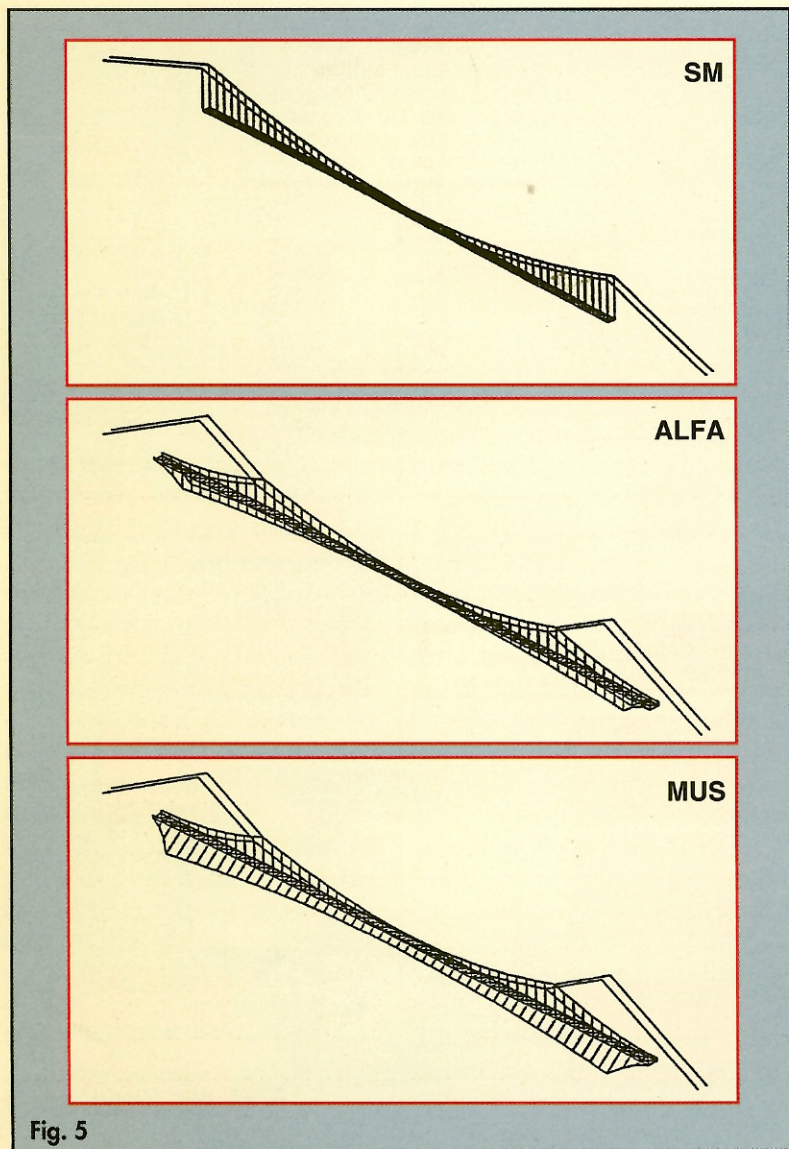


Fig. 5

ting) su modelli tridimensionali di ponti sospesi.

Con tale programma è possibile effettuare il calcolo e la successiva integrazione della matrice $[Sx(n)]$ delle varianze e covarianze dei gradi di libertà (g.d.l.) x_i del ponte giungendo così a determinare:

- a) parametri statistici (standard deviation, fattore di picco, valore di picco) dei g.d.l.;
- b) parametri statistici relativi al Drag, Lift e Rotazione di ciascuna sezione d'impalcato;
- c) grafici degli spettri delle componenti (x, y e z) di spostamento dei nodi e delle componenti (Drag, Lift e Rotazione) di spostamento delle sezioni.

Le ipotesi introdotte tendono principalmente alla linearizzazione del problema e a con-

sentire così l'applicazione dei metodi di analisi nel dominio di frequenza: 1) struttura con comportamento elastico lineare, 2) linearità del legame tra componenti fluttuanti della velocità del vento e forzanti, 3) stazionarietà e gaussianità del processo «vento», 4) uguaglianza tra le forze aerodinamiche in flusso turbolento e quelle in flusso laminare a parità di velocità media.

ALCUNI RISULTATI

Sono stati presi in esame tre modelli che rappresentano (fig. 5):

- 1) la soluzione di ponte proposta per l'attraversamento dello stretto di Messina (soluzione SM);
- 2) una soluzione derivata dalla proposta originaria di S. Musmeci, con cavi stabilizzanti

posti su piani verticali (soluzione ALFA);

3) come al punto 2) ma con cavi stabilizzanti inclinati (soluzione MUS).

Il confronto è stato effettuato a parità di sezione d'impalcato (e quindi di coefficienti aerodinamici), attribuendo agli impalcato dei modelli ALFA e MUS quello previsto per la soluzione SM.

Nella tabella seguente sono riportati i periodi dei primi sei modi di vibrare (dei venti complessivamente trovati) di ciascun modello:

I grafici successivi consentono un confronto delle prestazioni dei tre modelli in termini di spostamento in direzione del vento (Drag), in direzione verticale (Lift) e di rotazione della sezione di mezzeria ad un Livello 3 della velocità del vento ($V_{10}=46$ m/sec).

Va sottolineato come questi confronti siano stati effettuati ipotizzando lo stesso tipo di impalcato di quello proposto nel progetto dell'attraversamento dello stretto di Messina: sono stati utilizzati quindi

Nr. MODO	Modello SM		Modello ALFA		Modello MUS	
	T [s]	MODO	T [s]	MODO	T [s]	MODO
1	32.1	DRAG 1° Simm.	31.2	DRAG 1° Simm.	27.7	DRAG 1° Simm.
2	20.6	DRAG 1° Antim.	19.6	DRAG 1° Antim.	19.0	DRAG 1° Antim.
3	15.4	DRAG 2° Simm.	13.9	DRAG 2° Simm.	13.6	DRAG 2° Simm.
4	14.6	LIFT 1° Antim.	11.0	TORS. 2° Simm.	10.8	LIFT 2° Simm.
5	14.3	TORS. 1° Antim.	11.0	LIFT 2° Simm.	10.8	TORS. Simm.
6	13.3	LIFT 1° Simm.	10.7	LIFT 1° Antim.	10.6	LIFT 1° Antim.

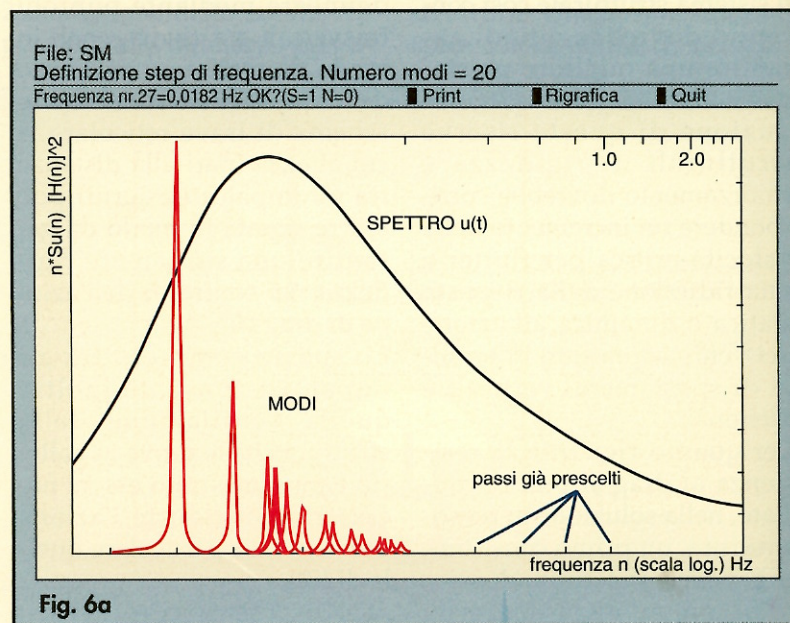


Fig. 6a

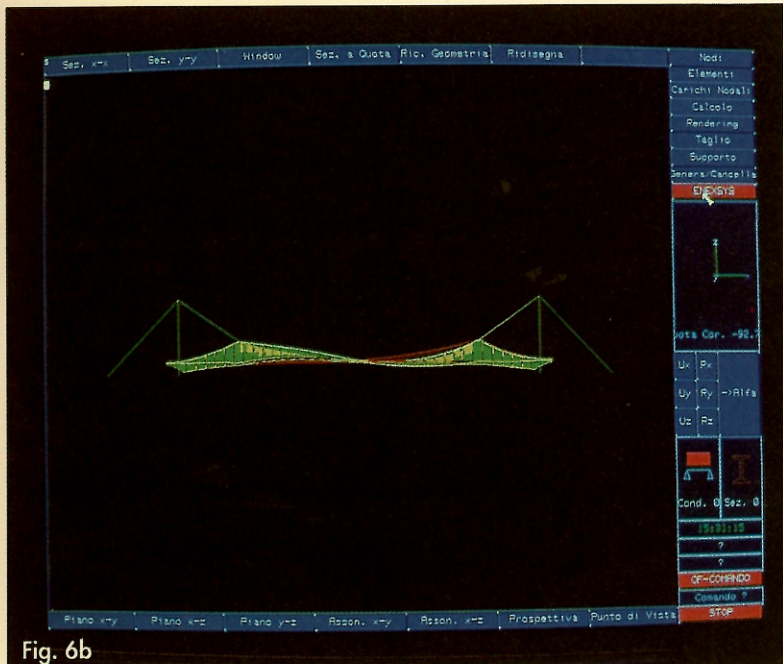


Fig. 6b

i medesimi coefficienti aerodinamici mentre è possibile prevedere, per le soluzioni in tensostruttura, l'adozione di un impalcato con caratteristiche di minore resistenza aerodinamica e quindi soggetto, mediamente, a forzanti di minore intensità. Nella colonna MUSR della tabella «Confronto DRAG» è riportata una stima degli effetti

del vento su un modello a tensostruttura tipo MUS ma con impalcato di minor ingombro aerodinamico (l'altezza dei box passerebbe dal valore originale di circa 3 m (box + alettone) a circa 1 m) e questo dovrebbe riflettersi, se solo consideriamo la componente media, in una riduzione dello spostamento di drag di circa un terzo.

CONFRONTO DRAG SEZIONE DI MEZZERIA LIVELLO 3 [M]							
Modello	SM	ALFA	Var. %	MUS	Var. %	MUSR	Var. %
Standard Deviation	1.87	2.09	+11.7%	1.55	-17.1%		
Valore medio	9.74	9.74	0%	7.42	-23.8%	3.3	-66%
Picco max	15.20	15.88	+4.5%	12.01	-21.0%		
Picco min	4.28	3.60		2.83			

CONFRONTO LIFT SEZIONE DI MEZZERIA LIVELLO 3 [M]					
Soluzione	SM	ALFA	Var. %	MUS	Var. %
Standard Deviation	0.20	0.168	-16%	0.121	-39.5%
Valore medio	-0.864	-0.441	-49%	-0.370	-57.2%
Picco max	-0.226	0.106		0.023	
Picco min	-1.502	-0.988	-34.2%	-0.764	-49.1%

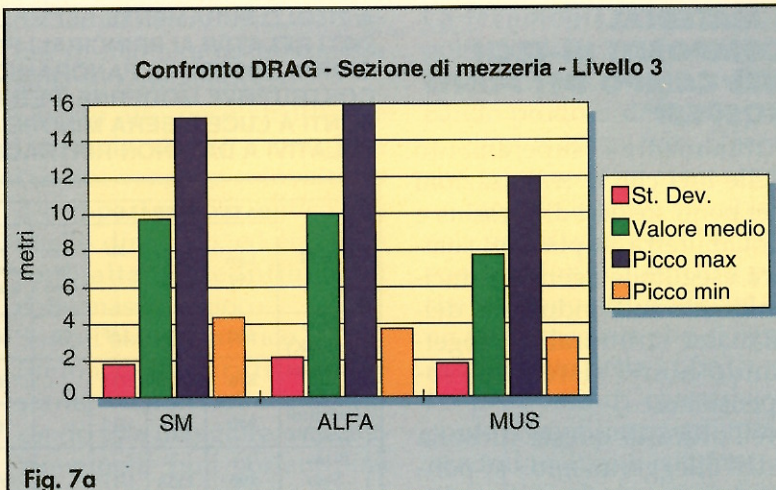


Fig. 7a

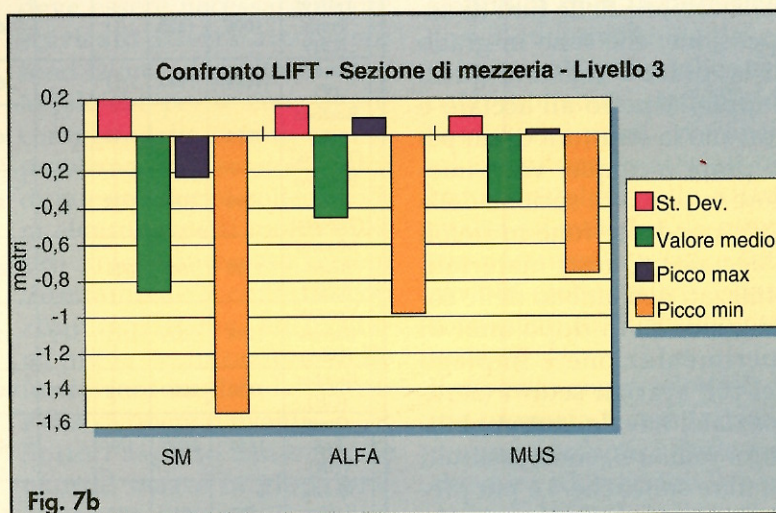


Fig. 7b

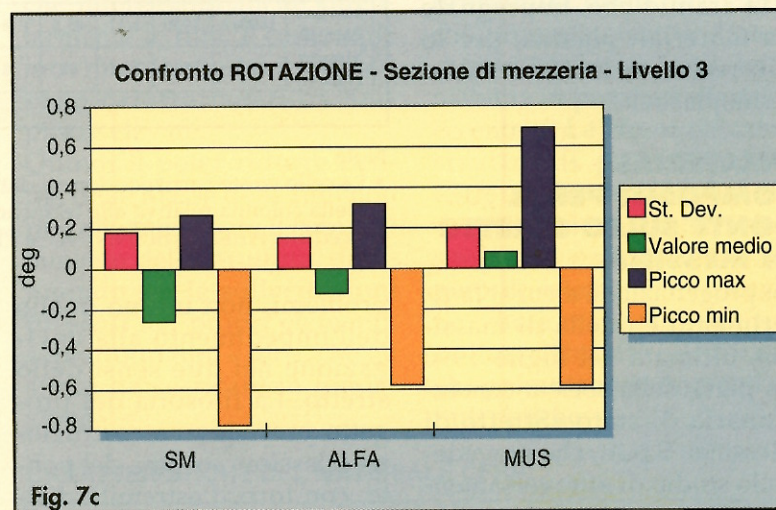


Fig. 7c

CONFRONTO ROTAZIONE SEZIONE DI MEZZERIA LIVELLO 3 [DEG]					
Soluzione	SM	ALFA	Var. %	MUS	Var. %
Standard Deviation	0.163	0.134	-17.8%	0.199	+22.1%
Valore medio	-0.262	-0.144	-45.0%	0.057	-78.2%
Picco max	0.260	0.294		0.700	
Picco min	-0.784	-0.583	-25.6%	-0.586	-25.3%

I MATERIALI COMPOSITI HI-TECH NEL CAMPO DEI PONTI SOSPESI*

Attualmente il superamento delle luci che le realizzazioni dei ponti sospesi di Messina e di Gibilterra implicano, sembra eseguibile agendo principalmente sulla riduzione delle masse strutturali e progettando nuovi sistemi di sospensione.

Nell'ottica di questa filosofia «dell'alleggerimento» si pongono i nuovi materiali per la realizzazione delle funi di sospensione, che sono in grado di lavorare a tensioni quasi doppie rispetto all'acciaio e gravano la struttura di un peso proprio cinque volte inferiore (a parità di sezione della corrispondente fune in trefoli d'acciaio). Questi materiali, utilizzati nell'ambito delle costruzioni civili dopo anni di sperimentazione e impiego nei più svariati settori (aerospaziale, navale, automobilistico, militare), sono costituiti da fibre sintetiche. Le più pregiate sono quelle di carbonio e le aramidiche, impregnate da materiali plastici, per lo più resine termoindurenti o termoplastiche.

I MATERIALI COMPOSITI PER IL PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA

La progettazione a cui si fa riferimento è quella di massima, ultimata nel luglio 1990 da parte della società concessionaria di stato «Stretto di Messina» S.p.A., che prevedeva lo studio di attraversamento dello stretto con due soluzioni base: un ponte sospeso a luce unica e un ponte sospeso a doppia luce con pilone centrale.

La soluzione che sembra ormai definitivamente accettata è quella a luce unica, dato che la costruzione delle tre torri sembra presentare molteplici

* M. Majowiecki, P. Ermeti
Università di Bologna

A TITOLO PURAMENTE ESEMPLIFICATIVO SI SONO RACCOLTI NELLA TABELLA SOTTOSTANTE I DATI RELATIVI AI PRINCIPALI PONTI SOSPESI REALIZZATI, O IN FASE DI STUDIO, DAGLI ANNI '60 AI GIORNI NOSTRI. LA PANORAMICA È MOLTO AMPIA E RACCOGLIE TUTTE LE FILOSOFIE COSTRUTTIVE MODERNE; PER FACILITARNE LA LETTURA SI SONO ORDINATI I DATI ANDANDO DAI PONTI A LUCE LIBERA MINORE A QUELLI A LUCE MAGGIORE. GLI SPAZI LASCIATI IN BIANCO SONO RELATIVI A DATI NON RINTRACCIATI O A SCELTE PROGETTUALI NON ANCORA COMPIUTE.

PONTI	DATI GENERALI						CAVI					TORRI		IMPALCATO				
	Luce (m)	Lunghezza (tot)(m)	f/L	Peso tot. (t/m)	N° corsie stradali	N° binari	Ø(cm)	N° cavi	Area tot. (m ²)	Lunghezza tot. (m)	Tecnica montaggio	Altezza pila (m)	Materiale	tipo	Peso tot. (t/m)	Peso (t/m) strutturale	Altezza (m)	Largh. (m)
Little Belt(DK)	600	1080	1/9	20	6	No	58	2	0.32	1500	PS	113	CLS	Alarc	16.5	11.3	3	33.3
Innaruto (JP)	876	1536	1/11		6	2	84	2	0.89	1690	PS	144	Acciaio	Reti-colare			14.2	34
Immotsui Seto(JP)	940	940	1/10		6	2	93	2	1.10	1460	AS	133.5	Acciaio	Reti-colare		29.7	14.8	35
Bisan-Seto (JP)	990	1538	1/11		6	2	100	2	1.25	1590	PS		Acciaio	Reti-colare		27.6	14.8	35
Tirth of Forth (GB)	1006	1822	1/11		6	no	61	2	0.46	2127	AS	145	Acciaio	Reti-colare	11	9.1	10	36
Lisbona (P)	1014	1982	1/11		6	no	59	2	0.44	2130	AS		Acciaio	Reti-colare			12.5	25.4
Bosforo 1 (Turchia)	1074	1074	1/12	14.5	6	no	56	2	0.41	1656	AS	164.6	Acciaio	Alarc	11.5	8	3	33.4
Bosforo 2 (Turchia)	1090	1090	1/12	23	8	no	74	2	0.73	1570	AS	110.1	Acciaio	Alarc	16	13	3	39.4
Minami Bisan-S. (JP)	1100	1648	1/11		6	2	106	2	1.42	1715	PS		Acciaio	Reti-colare		26.6	14.8	35
Verraza Narrow (USA)	1298	2039	1/11	54.9	12	no	91	4	2.05	2330	AS	192	Acciaio	Reti-colare	37	29.2	8.1	35.1
Humber (GB)	1410	2220	1/12	17	4	no	68	2	0.59	2290	AS	155.5	CLS	Alarc	11.5	7.7	4.5	28.5
Great Belt (DK)	1624	3000	1/9		6	no	85	2	0.94	3085	AS		CLS	Alarc	15.4	10.7	4	30
Akashi Kaikyo (JP)	1990	3910	1/10		6	no	110	2	1.60	3990		283	Acciaio	Reti-colare			15.8	35.5
Messina 2 luci (I)	1800x2	3930	1/11	45.5	8	2	87	4	2.00	4645		236.5	Acciaio	3 cass.	28.6	21.6	5.9	59
Messina 1 luce (I)	3360	3690	1/11	68	8	2	132	4	4.80	5215		380.5	Acciaio	3 cass.	28.6	21.6	5.9	59

Note

- Le celle vuote corrispondono a dati non rilevati o a scelte progettuali non ancora eseguite.
- Nella colonna relativa alle tecniche di montaggio le abbreviazioni AS e PS corrispondono rispettivamente alle procedure: AERIAL SPINNING e PREFABRICATED STRANDS.

problemi, non ultimo quello dell'impedimento alla navigazione nei due sensi dello stretto. La filosofia del progetto prevede una costruzione «classica» sospesa del ponte, con torri d'estremità d'altezza notevole atte a fornire la freccia necessaria alle funi per ottenere la dovuta stabilità, abbassando gli sforzi di trazione.

Gli agganci a terra delle funi di ripa distano tra loro sull'orizzontale ben 5088 metri, mentre la luce di campata è di 3360 metri.

Le torri sono costituite da profili tubolari a cassone, e vengono realizzate mediante

il montaggio in opera di conci di officina formati da lastre sagomate di acciaio Fe510. L'altezza delle torri sul livello del mare è di 376 m, mentre l'altezza effettiva delle stesse è di 390.45 m.

La sezione delle colonne è costituita da due poligoni, a 8 lati, ed ognuna delle due sagome è contenuta in un rettangolo dall'ingombro di 22.00 x 14.00 m.

Le colonne sono collegate internamente da traversi posti ad interasse verticale di 84 m, e la loro conformazione esterna è ad «A», con una inclinazione degli assi rispetto alla verticale di circa 2°. L'area

complessiva di base è stata valutata in 32.3 m² mentre quella di sommità vale 26.6 m²; lo spessore medio delle lastre di acciaio che conformano la parte iniziale della torre è di 76 mm.

Per quel che riguarda l'apparato di sospensione sono previste 4 funi principali Ø 132 (cm) realizzate in trefoli d'acciaio, che vengono messi in opera secondo la tecnica «Aerial-Spinning». La loro sezione complessiva è di 4.8 m² con un peso di 38.4 t/m.

Il punto di maggior rilievo del progetto è l'impalcato. Esso è stato oggetto di numerosi studi, che hanno portato alla

PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA: LE CARATTERISTICHE DELL'IMPALCATO.

Dati impalcato	Ponte a campata unica
Larghezza (m)	59.00
Altezza massima (m):	5.90
N. corsie stradali:	3+1 (emergenza) per ogni senso di marcia
N. vie ferroviarie:	2+2 corsie di servizio F.S.
Larghezza singola carreggiata (m):	11.25+3.20 (emergenza)
Larghezza carreggiata ferroviaria:	9.10+3.20+3.20 (di servizio)
Peso per m.l.	30 t
Sezione:	1.722 m ²
Momento di inerzia I _z :	1.703 m ³

definizione di un impalcato alveolato a triplice cassone.

La problematica connessa con la definizione dell'impalcato consiste proprio nell'alleggerirlo al massimo, visto che il contributo che la sua rigidità flessionale apporta alla rigidità del ponte è minimo. In questo senso sono stati condotti studi sull'influenza che la rigidità flessionale dell'impalcato produce sull'abbassamento in mezzera, per effetto di un carico costante distribuito, applicato su tutta la campata centrale. Sembra che aumentare di 10 volte l'inerzia del ponte implichi una riduzione dello 0.8% sulla freccia in mezzera. Si capisce quindi perché l'impalcato deve avere solamente funzione di lastra che assorbe i carichi locali e li ridistribuisce ai pendini, almeno per luci superiori ai 500 m.

In questo contesto gli elementi determinanti nella costruzione del ponte risultano proprio essere le funi, che assorbiranno in toto il compito di dare rigidità al ponte.

La possibilità quindi di limitare il carico permanente che le funi devono sopportare risulta di primaria importanza e la soluzione alveolata dell'impalcato, realizzata con lastre grigliate, sembra essere decisiva.

Un altro punto a favore di questo tipo di profilo di supporto consiste nel suo basso coefficiente aerodinamico di penetrazione; infatti le griglie poste tra i tre cassoni principali permettono la penetra-

zione dell'aria all'interno della fascia solida, favorendo così il processo di rottura dei vortici del moto turbolento, indotto dal primo contatto dei filetti fluidi con la sagoma della struttura. Questo profilo dunque permette anche di migliorare i coefficienti aerodinamici, diminuendo l'entità delle forze verticali indotte dall'incidenza del vento sulla struttura.

Le caratteristiche base dell'impalcato vengono riassunte nella tabella sopra riportata.

L'ESAME COMPARATIVO

La creazione dell'opera con l'impiego di funi in trefoli d'acciaio è penalizzata dal forte peso strutturale, essenzialmente fornito proprio dall'apparato di sospensione. Infatti le quattro funi sospese previste, di sezione complessiva di 4.8 m², assieme ai pendini distribuiti in campata centrale con passo costante pari a 30 m e di sezione complessiva per campo di 0.027 m², sviluppano un peso per metro lineare di estensione longitudinale pari a 40 t/m. Il peso apportato dall'impalcato, formato da tre cassoni a sviluppo alare collegati da fasce grigliate, comprensivo di tutte le infrastrutture, pavimentazioni, guard-rail, profili alari, che lo rendono idoneo al servizio, risulta di 30 t/m. In definitiva l'apparato di sospensione grava la struttura di un peso circa pari a quello che l'intero impalcato caricato

dai carichi accidentali, valutabili in maniera approssimata sulle 10 t/m, sviluppa.

Questo alto peso strutturale limita in duplice maniera l'opera: vengono coinvolti sia il comportamento statico che quello dinamico, ed entrambi sono altamente influenzati dalle masse in gioco.

Sotto l'aspetto statico il problema della struttura a sé stante viene risolto introducendo una maggiore sollecitazione nelle funi portanti, ma poi questo maggiore sforzo deve essere necessariamente scaricato a terra attraverso fondazioni adeguate, sia per le pile che per le zone di ancoraggio delle funi di ripa. Il problema dello scarico a terra di queste enormi sollecitazioni riveste aspetti molto delicati poiché interessa terreni direttamente a contatto con zone marittime, ed ovviamente la realizzazione delle fondazioni implica la costruzione di opere rilevanti.

Sotto l'aspetto dinamico le enormi masse in gioco presuppongono modi di vibrare che interessano anche singolarmente le funi, e comunque movimenti che se innescati sono caratterizzati da ampiezze elevate.

Quindi il poter ridurre l'entità delle masse delle funi non può che migliorare il comportamento della struttura, diminuendo sia le sollecitazioni presenti nei propri elementi, soprattutto funi e torri, che gli sforzi da scaricare in fondazione.

La tecnologia dei materiali polimerici fibrorinforzati si è notevolmente evoluta sviluppando prodotti dalle alte prestazioni meccaniche; si pensi che tali prodotti presentano un modulo elastico longitudinale pari a quello dell'acciaio, con tensioni di rottura più che raddoppiate, associate ad un peso specifico che si aggira al di sotto delle 2 t/m³.

La proposta di costruire il ponte con un sistema di funi e pendini realizzati con funi in fibra di carbonio o in fibra aramidica mira in primo luogo a diminuire l'entità dei pesi strutturali, per migliorare il comportamento statico e dinamico del ponte, ma anche ad introdurre materiali che hanno rivelato, alle ultime analisi scientifiche, un ottimo comportamento a fatica sotto carichi ciclici, oltre a bassi coefficienti di dilatazione termica.

Il modello che si adotterà come proposta è caratterizzato da una geometria delle funi che mira ad irrigidire la parte di impalcato localizzata in prossimità delle torri, zona che presenta strutturalmente caratteristiche di forte deformabilità in presenza di carichi eccentrici. Le stesse soluzioni strutturali proposte dalla «Stretto di Messina S.p.A.», vengono adottate sul modello proposto, nel quale si varia però il sistema di sospensione, che è realizzato con funi polimeriche fibrorinforzate che presentano le seguenti caratteristiche:

CARATTERISTICHE DEL MATERIALE CFRP.

Proprietà	Funi portanti	Pendini
Modulo elastico E (kg/cm ²)	1.900.000	1.900.000
Tensione di rottura σ_r (kg/cm ²)	27.000	27.000
Coeff. espansione termica (°C ⁻¹)	1·10 ⁻⁶	1·10 ⁻⁶
Peso specifico γ (kg/m ³)	1660	1660
Sezione equivalente (m ²)	4.8	0.02
Peso per u.l. (kg/m)	8.000	40

L'analisi è stata sviluppata in realtà per tre diverse tipologie di ponte; la prima, come già detto, costituita dalla proposta di massima della «Stretto di Messina S.p.A.», la seconda rappresentata dalle stesse soluzioni strutturali della prima ma con funi in CFRP e, l'ultima, il progetto proposto, secondo lo schema aggiornato della soluzione Musmeci, con nuova conformazione delle funi e realizzazione delle stesse in materiale CFRP.

Questo tipo di analisi di confronto ha permesso di rilevare l'adattabilità del nuovo materiale sia alla soluzione classica sia a un modello mirato. Lo schema strutturale della «Stretto di Messina S.p.A.» prevede la presenza di due torri alte 390.45 m distanti tra loro 3360 m con la classica disposizione delle funi di sospensione a catenaria e con pendini verticali disposti a passo costante.

Le zone di riva risultano antisimmetriche proprio a causa del loro raccordo con la situazione topografica esistente. La riva prospiciente alla Sicilia presenta una lunghezza sull'orizzontale del cavo di 928 m, mentre la riva che si collega alla Calabria risulta più corta, pari a 800 m. Il progetto proposto in questa sede adotta una soluzione con torri più alte, 440 m, per consentire l'inserimento di un elemento a «crocetta» che permette di ridurre la lunghezza dei pendini di estremità, che a causa della loro

lunghezza risultano molto deformabili.

Questo elemento risulta tenso-inflesso, e per ridurre i momenti agenti lungo la sua estensione, causati dalle forze concentrate scaricate dai pendini di impalcato, si sono inseriti degli stralli che partono dalla travata e vanno ad applicare il carico sulla sommità della torre.

Questa soluzione, come si vedrà, se da un lato incrementa lo sforzo normale nelle torri, per l'accresciuta quantità di materiale occorrente per la realizzazione delle torri e della travata di supporto, permette però di ridurre i tiri da scaricare agli ancoraggi e i momenti in fondazione, oltre a diminuire le frecce in campata.

Si riportano nella tabella qui sotto le caratteristiche delle sezioni del progetto.

COMPARAZIONE TRA ACCIAIO E MATERIALI COMPOSITI

I dati tabellati mettono in rilievo la notevole disparità degli sforzi presenti negli elementi.

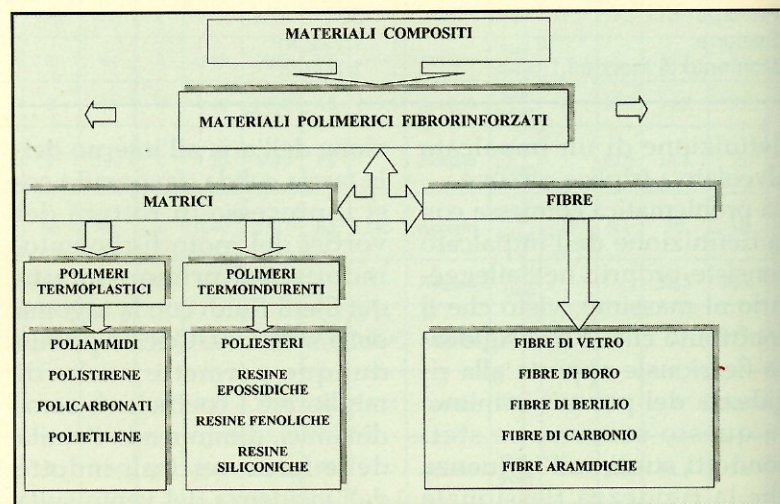
La riduzione delle sollecitazioni, apportata dalla introduzione del materiale in fibra rispetto alla soluzione che adotta trefoli in acciaio, è valutabile approssimativamente intorno al 40-50% a seconda della condizione di carico esaminata. Si è concentrato il monitoraggio degli sforzi presenti, soprattutto negli elementi di fune e di colonna, dato che i pendini risultano

essenzialmente tesi con la stessa sollecitazione in tutti e tre i progetti esaminati.

Per quello che riguarda, invece, la determinazione delle sollecitazioni presenti nell'impalcato, si può dire che questo studio di massima non è adatto ad esaminare il com-

portamento specifico di questa sottostruttura.

Occorre uno studio mirato sulle distribuzioni locali del carico per eseguire un'analisi che abbia come oggetto la determinazione delle molteplici sollecitazioni a cui l'impalcato risulta assoggettato.



Fibre	Diametro tipico (micron)	Peso specifico (g/cm ³)	Modulo Elastico (GPa)	Tensione di rottura (GPa)	Allungamento a rottura (%)
PAN-CARBON					
T-300	7	1.76	231	3.65	1.4
As	7	1.77	220	3.1	1.2
T-40	6	1.81	276	5.65	2.0
HSB	7	1.85	344.5	2.34	0.58
Fortafil 3	7	1.80	227	3.80	1.7
Fortafil 5	7	1.80	345	2.76	0.8
PITCH-CARB					
P-555	10	2.0	380	1.90	0.5
P-100	10	2.16	758	2.41	0.32
FIBRA ARAM					
Kevlar49	11.9	1.45	131	3.62	2.8
Twaron	12.0	1.45	127	3.6	2.5
Technora	12.0	1.39	74	3.5	4.6

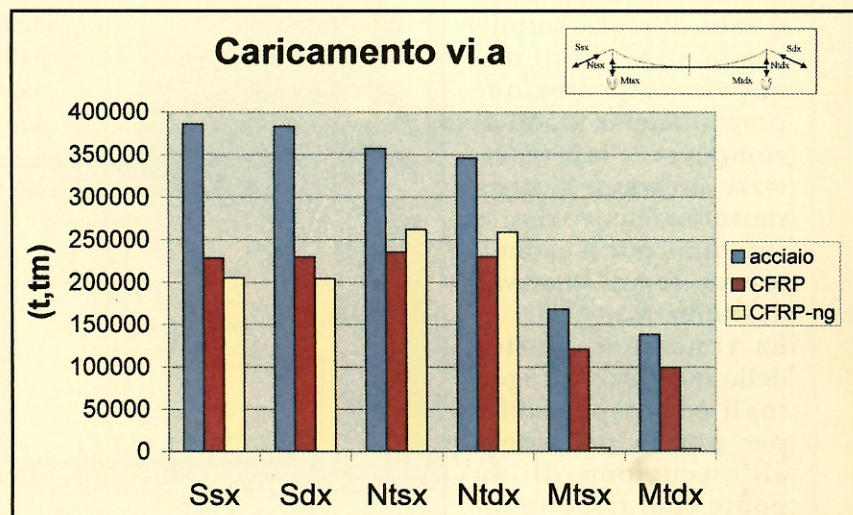
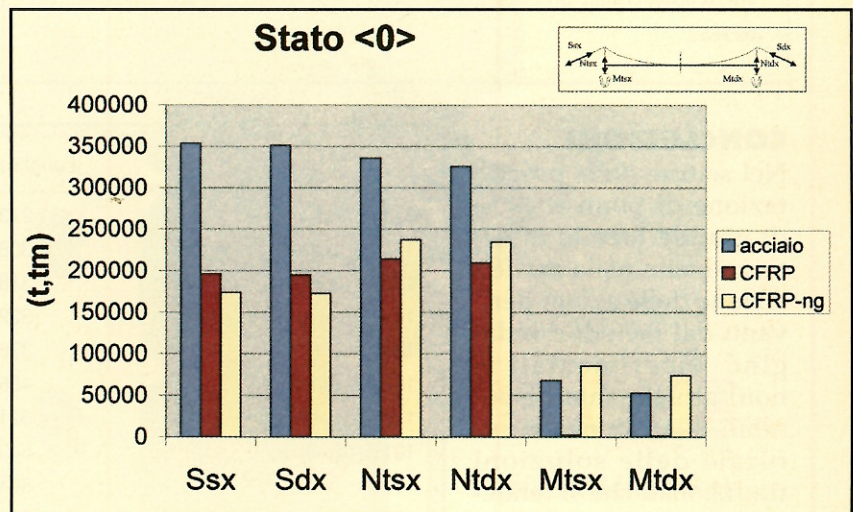
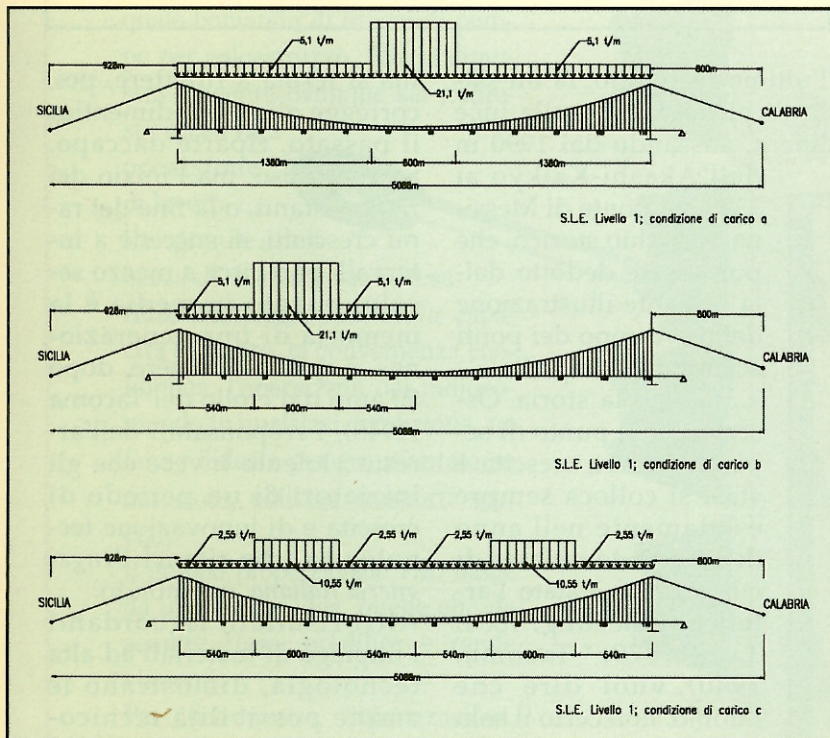
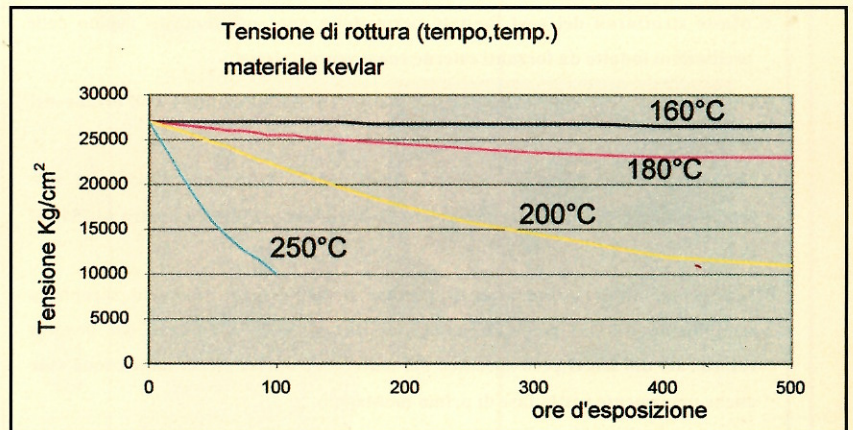
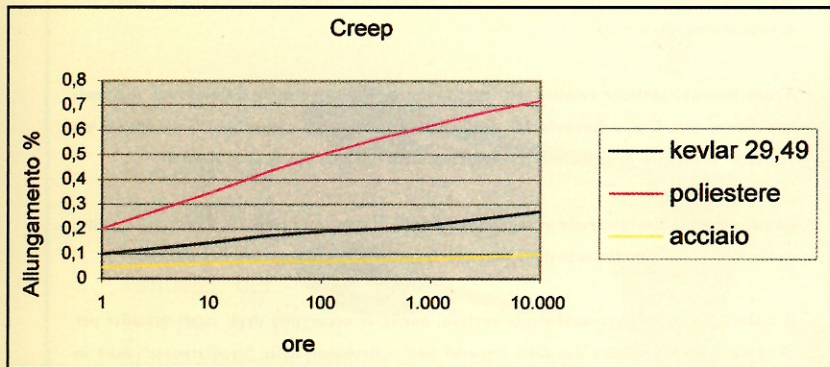
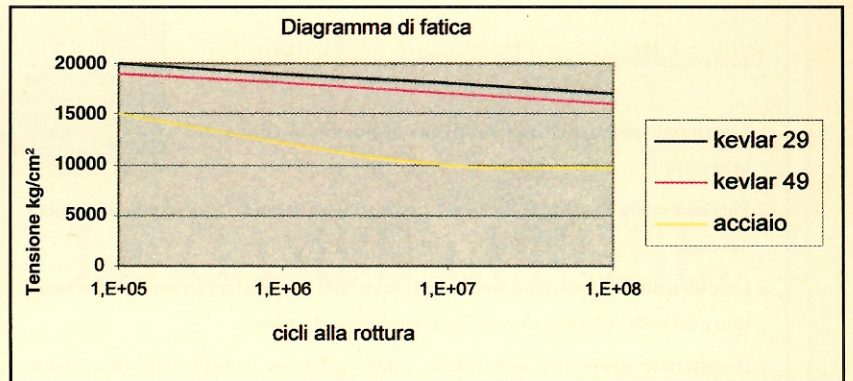
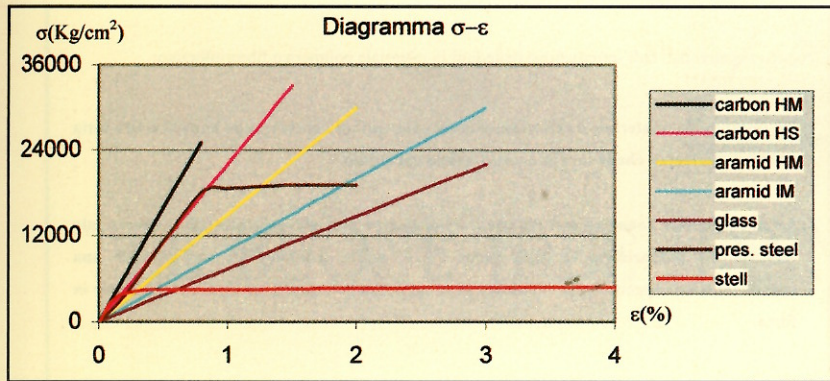
CARATTERISTICHE DELLE SEZIONI DI PROGETTO.

Sezione	Area (m ²)	I _z * (m ⁴)	E(t/m ²)
Impalcato	1.722	1.703	21000000
Funi portanti	4.8	0	19000000
Pendini	0.02	0	19000000
Torri	26.3/20	808	21000000
Trave «crocetta»	2	10	21000000
Stralli	0.1	0	19000000

*: Momento di inerzia relativo alla flessione nel piano della struttura

Materiale	XA-S High Performance	EXAS-HS1	Apollo IM43-600	Magnamite IM7X	Torayca T700S	Acciaio
Produttore	Hysol Grafil	Hysol Grafil	Hysol Grafil	Hercules	Toray	Bridon
Densità (g/cm ³)	1.57	1.61	1.57	1.60	1.61	7.86
Sforzo a rottura(kN)	30.3	36.6	46.7	59.1	53.9	35.7
Sforzo realizzato*	70%	66%	79%	78%	85%	-
σ _r (MPa)	1610	1800	2310	2930	2750	1820
Modulo Elastico (GPa)	136	159	194	193	153	200
Modulo Elastico realizzato*	94%	104%	98%	93%	98%	-

Tab. 2.4: Le proprietà meccaniche del cavetto φ5 mm di riferimento.
*: con la dicitura modulo e sforzo realizzato si intendono il confronto di queste proprietà del cavetto, con le equivalenti proprietà delle fibre "nude".



Peso elementi in tonnellate	Ponte con funi in acciaio soluzione S.M. S.p.a.	Ponte nuova geometria CFRP	Differenze %
Torri	180'530	160'956	10.8
Cavi	203'727	40'227	80.2
Totale sovrastrutture	480'050	339'522	29.2
Fondazioni	741'800	555'430	25.1
Ancoraggi di ripa	1'908'084	1'082'436	43.2
Peso totale opera	3'129'934	1'977'388	36.8

Aspetti positivi dati dall'introduzione delle funi in materiale polimerico fibrorinforzato:

1. I materiali polimerici non subiscono il potere corrosivo dell'aria e dei fluidi salmastri.
2. Permetterebbe l'uso della tecnica "prefabricated strands" per la messa in opera dei cavi.
3. I coefficienti di dilatazione termica dei materiali fibrorinforzati sono molto bassi, sino a 20 volte inferiori a quelli medi per le funi d'acciaio.
4. Il materiale polimerico non subisce effetti galvanici o dispersioni di corrente libere come avviene invece per i materiali ferrosi.
5. Masse strutturali dei cavi limitate permettono uno smorzamento rapido delle oscillazioni indotte da forzanti esterne come vento e sisma.
6. Ottimo comportamento a fatica associato a tensioni di strappo dell'ordine dei 30000 kg/cm².
7. Operazioni di tesatura dei cavi principali per la definizione dello stato <0> semplificata, dato l'inferiore pre-stress da introdurre (170000 t contro le 354000 t).
8. Le operazioni di sostituzione di pendini o elementi di supporto sarebbero semplificate sia dal modello geometrico che prevede lunghezze dei pendini ridotte, sia dal basso peso specifico del materiale; questa stessa indicazione vale anche ovviamente per la fase di primo montaggio.
9. Il peso complessivo dell'opera risulta ridotto di circa il 37%, con conseguenti effetti benefici sulle problematiche legate alle fondazioni e alle deformazioni del terreno.

Aspetti negativi dati dall'introduzione delle funi in materiale polimerico fibrorinforzato:

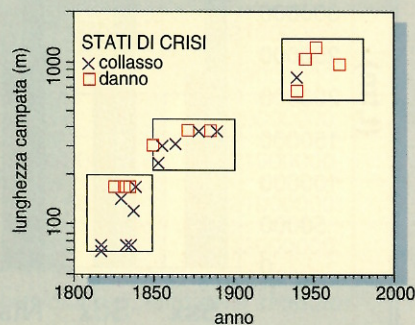
1. Lo sviluppo del materiale è relativamente recente, quindi occorrerebbe approfondire tutta una fase di ricerca che le funi in acciaio hanno già subito.
2. La problematica connessa con gli apparati di testata prevede un materiale il cui modulo elastico sia potenzialmente alto anche in direzione radiale. Occorre quindi una sperimentazione specifica per verificare la congruenza con questi requisiti del materiale in fibra.
3. La durezza superficiale limitata del materiale impone una protezione ad hoc per i pendini nei primi 10 metri di altezza dall'impalcato, per fornire una protezione passiva contro atti di vandalismo o sabotaggi.
4. Anche le problematiche relative alla protezione al fuoco, scaturito da eventuali incidenti dell'utenza stradale e ferroviaria, degli elementi di fune, suggerisce l'impiego di un "camice" protettivo per gli elementi direttamente a contatto con la sede stradale.
5. La suscettibilità del materiale ai raggi ultravioletti, il così detto pericolo d'invecchiamento, va limitato con il rivestimento delle funi con "camice" di assorbimento in polietilene.
6. Il materiale risulta particolarmente costoso, anche se occorrono degli studi specifici per determinarne l'incidenza dei costi rispetto alla costruzione della "tradizionale" fune in trefoli d'acciaio.

CONCLUSIONI

Nel settore della progettazione di ponti sospesi di grande luce le incertezze insite nella modellazione delle azioni derivanti dai metodi d'indagine (sperimentali e non) attualmente disponibili e la carenza strutturale delle soluzioni tradizionali che si tenderebbe ad applicare pur in presenza di consistenti salti di scala, sottolinea la necessità di una nuova impostazione progettuale in grado di compensare tali incertezze attraverso il conferimento di nuove risorse strutturali atte a garantire la necessaria «riserva» di sicurezza.

La rimozione «forte» delle incertezze progettuali è indispensabile per potere procedere all'esecuzione di un ponte che, rispetto al-

Anno	Ponte	Lunghezza
1834	Friburgo	273 m
1850	Wheeling	308 m
1851	Lewiston-Queenston	318 m
1867	Cincinnati-Covington	322 m
1869	Clifton	378 m
1883	Brooklyn	486 m
1890	Forth	521 m
1917	Quebec	549 m
1929	Detroit	564 m
1931	George Washington	1067 m
1937	Golden Gate	1280 m
1964	Verrazzano	1298 m
1982	Humber	1410 m
1997	Great Belt	1624 m
1998	Akashi-Kaikyo	1990 m



l'ultimo realizzato, fa un salto di più del 30% sulla luce libera, passando dai 1990 m dell'Akashi-Kaikyo ai 3300 del ponte di Messina. Il rischio storico, che può essere dedotto dalla brillante illustrazione dello sviluppo dei ponti sospesi nel tempo⁽¹⁾: «...rileggo la storia. Osservo che il punto di separazione fra crescita e stasi si colloca sempre esattamente nell'anno di un grande collasso di cui il vento è stato l'artefice (Wheeling, 1854; Tay, 1879; Tacoma, 1940). vuol dire che l'uomo, non certo il solo ingegnere, periodicamente si lascia carpire dal proprio istinto lanciando sfide terribili alla natura. Questa per un po' le subisce, poi vi impone un arresto violento. L'uomo dappri-

ma si ferma a riflettere, poi, corregge gli errori, dimentica il passato, riparte daccapo. Sarà un caso, ma l'inizio dei rami costanti, o la fine dei rami crescenti, si succede a intervalli pari circa a mezzo secolo, quanto in media è la memoria di una generazione», è quello di essere, dopo 50 anni dal crollo del Tacoma (1940), i responsabili dell'arresto violento invece che gli iniziatori di un periodo di crescita e di innovazione tecnologica, che rilanci l'Ingegneria Italiana nel mondo.

Altri risultati, riguardanti l'impiego di materiali ad alta tecnologia, dimostrano le ampie possibilità tecnico-economiche ottenibili nel campo delle tipologie di ponti sospesi di grandissima luce libera.

Tali risultati mettono in evidenza l'esistenza di ampi margini di miglioramento nella attuale concezione strutturale del ponte sospeso sullo stretto di Messina.

⁽¹⁾ (G. Solari, I ponti e il vento nel corso dei secoli, XV Congresso C.T.A., Riva del Garda, 15-18 ottobre 1995)