

Un aspetto particolarmente dibattuto negli ultimi venti anni riguarda il comportamento a fatica degli impalcati a piastra ortotropa dei ponti stradali in acciaio, che rappresentano la soluzione tipica per luci superiori agli 80-100 m (Fig. 1).

A seguito delle crisi per fatica manifestatesi diffusamente in Europa e negli Stati Uniti, a partire dagli anni 70, negli impalcati di età superiore a circa 10 anni, si è sviluppata un'intensa attività di ricerca che ha portato ad individuare i punti deboli del sistema e, conseguentemente, le soluzioni costruttive più idonee in termini di resistenza a fatica per ciascuna giunzione saldata tipica, lamiera-nervatura, nervatura-nervatura, trasverso-nervatura (Fig.2,3). Questi studi hanno avuto importanti ricadute anche a livello normativo. Infatti, se da un lato sono stati messi a punto gli spettri di carico aggiornati per le

Vengono illustrati alcuni aspetti evolutivi della costruzione dei ponti in acciaio che, suggeriti da recenti esperienze maturate nella progettazione e nella ricerca, possono costituire tematiche attuali di dibattito.

La trattazione è articolata in cinque punti: impalcati stradali; impalcati ferroviari; aspetti costruttivi: acciai speciali e saldatura; ponti di piccola luce; ponti di grande luce.

Steel bridges

A number of aspects in the evolution of the construction of steel bridges are illustrated which, on the basis of recent experience in design and research, could offer an up-to-date contribution to the debate.

The work is divided into five points: road beams, railway beams, construction aspects, special steel and welding, short span bridges and long span bridges.

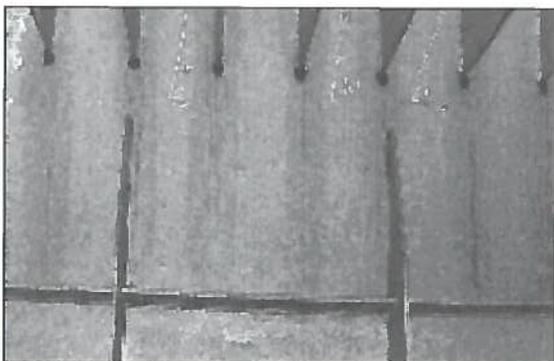


Figura 1 –
Piastra ortotropa
(anni '70)



Figura 4 – Prove
a fatica sul
dettaglio trasverso-
nervatura

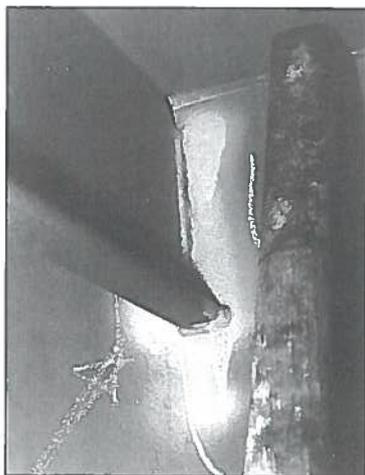


Figura 2 – Piastre ortotrope - Lesioni da fatica

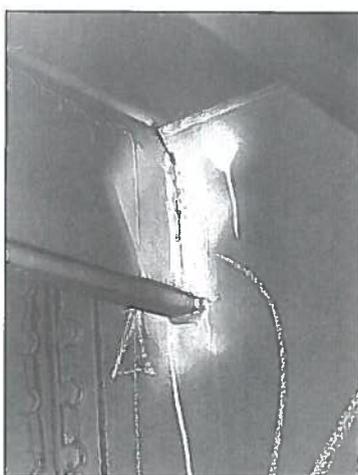


Figura 3 – Piastre ortotrope - Lesioni da fatica

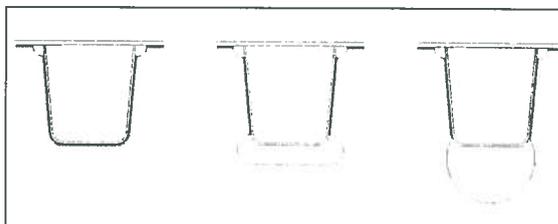
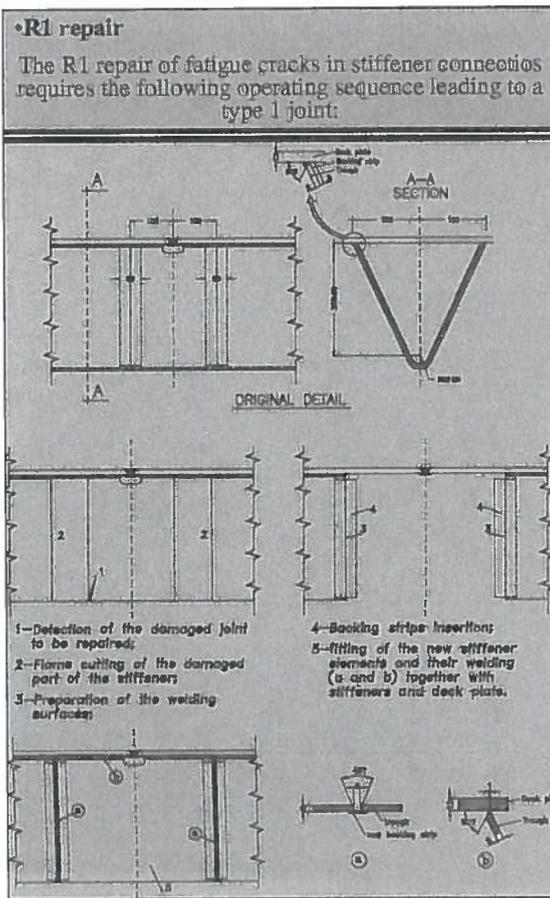


Figura 5 – Nervatura-Trasverso: tipi di cutout in sperimentazione

verifiche a fatica, dall'altro è stato possibile definire sperimentalmente la resistenza a fatica dei dettagli tipici e la relativa classificazione in termini di curve S-N. In particolare sono stati classificati i dettagli lamiera-nervatura e nervatura-nervatura. Per il dettaglio nervatura-trasverso la classificazione è molto complessa e non ancora pienamente risolta, anche se le conoscenze al riguardo sono state sensi-

bilmente approfondite. Attualmente, presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Pisa è in corso un'intensa attività di ricerca su tre tipologie di cutout, tutte con nervatura passante. Le prime due, usate in numerosi ponti esistenti, prevedono assenza di cutout e cutout di forma tradizionale; la terza, innovativa e ottimizzata, prevede un cutout di forma circolare (Fig.5).

<p>Main objectives:</p> <ul style="list-style-type: none"> - significant residual life after repair; - reduced traffic flow limitations during the works; - reduced operation period/not continuous/acting on cracked connections and damaged ones also if not cracked.
<p>Repair R1 : Removing and replacement of the cracked whole parts of the cracked connections and of the fatigue damaged but uncracked ones;</p>
<p>Repair R2 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cracked connections: repairing of the cracks and applying coverplates. - Damaged but uncracked connections: applying coverplates.



Un altro settore di indagine rilevante, anche per le sue implicazioni di carattere economico, riguarda la riparazione dei ponti esistenti lesionati per fatica (Fig.6). Allo stato attuale sono state messe a punto tecniche di riparazione eseguibili anche in esercizio, minimizzando i disturbi e le interruzioni del traffico ed i costi ad essi connessi. Per i dettagli così riparati è possibile, oggi, fare previsioni attendibili di vita residua (Fig. 7,8,9).

Nonostante i notevoli risultati raggiunti, le piastre ortotrope conservano caratteristiche di potenziale vulnerabilità, anche in conseguenza della progressiva aggressività del traffico pesante, in termini sia di intensità di flusso che di carico asse e di pressione locale (Fig.10).

Ciò è confermato dalla tendenza, in atto da alcuni anni nella costruzione dei veicoli pesanti, al pro-

Figura 6 - Tecniche di riparazione: obiettivi e criteri

Figura 8 - Tecniche di riparazione: prove esecutive

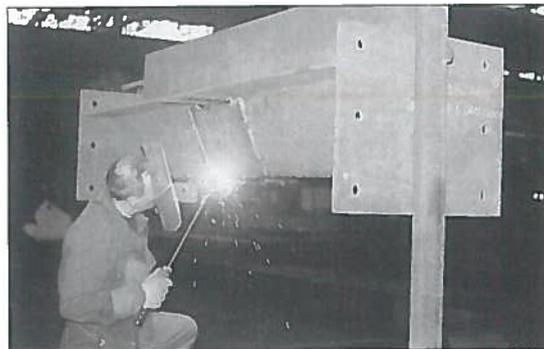


Figura 7 - Tecniche di riparazione: specifiche

Figura 9 - Tecniche di riparazione: prove esecutive



Figura 10 - Incremento dell'intensità del traffico

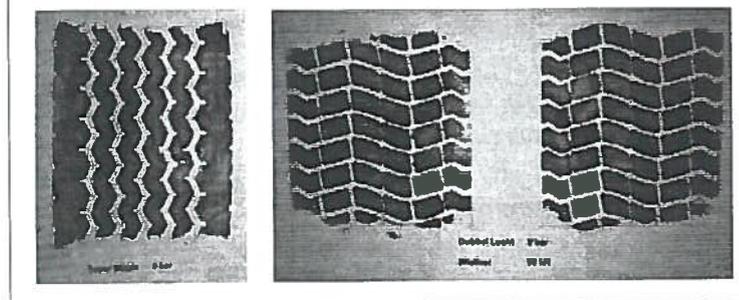
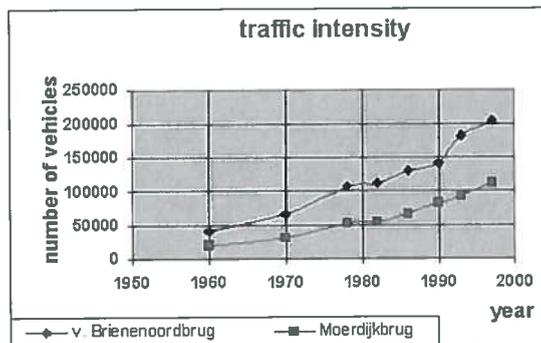


Figura 11 - Ruote gemelle e super single

gressivo passaggio da ruote accoppiate a pneumatici singoli ad alta pressione, i così detti super single (Fig.11).

A questo proposito è interessante notare come nell'Eurocodice 1 parte 2, dove sono individuati 5

spettri di carico, il modello 5 consiste nella diretta applicazione del traffico registrato, eventualmente modificato con estrapolazioni statistiche, volto a rappresentare più precisamente situazioni particolari di addensamento, consentendo così verifiche mirate.

Altro aspetto di particolare importanza è costituito dal danneggiamento delle pavimentazioni delle piastre ortotrope. I diversi tipi di pavimentazione sottile finora impiegati hanno dimostrato durate limitate.

Un'indagine condotta in Olanda, ha mostrato che la durata media delle pavimentazioni sui ponti in piastra ortotropa non supera i 5 anni.

La questione ha un notevole impatto economico in quanto al costo della sostituzione della pavimentazione, direttamente sostenuto dal Gestore, deve essere sommato l'onere, per così dire indiretto, sostenuto dagli utenti per le interruzioni ed alterazioni del traffico.

In effetti anche gli impalcati in c.a., sia nei ponti in c.a. che misti, hanno manifestato spesso con l'età fenomeni di corrosione delle armature, specie nelle tratte stradali dove viene fatto uso di sali antigelo, anche in presenza di impermeabilizzazione, sia perché i manti impermeabili hanno comunque durate limitate, sia perché l'aggressione può avvenire all'intradosso (Fig.12).

Tendenzialmente, tuttavia, il campo di applicazione delle soluzioni pesanti con solette in c.a. si è ampliato, a scapito delle soluzioni assai più costose a piastra ortotropa in acciaio, estendendosi anche a luci considerevoli, talvolta superiori ai 100m.

Dalle precedenti considerazioni sono emersi forti stimoli allo studio di soluzioni innovative di impalcato per ponti in acciaio e allo sviluppo di soluzioni durevoli per le loro pavimentazioni.

Il progetto di ricerca europeo BRUS - Bridge, Research, University, Steel Industry - "New Deck Design for Steel Bridge", coordinato da un consorzio di nove Paesi Europei, tra cui l'Italia, si propone di sfruttare i più recenti sviluppi tecnologici nei settori dei materiali e delle lavorazioni, in particolare nelle tecniche di formazione a freddo e della saldatura (Fig.13).

Il progetto, pur nell'ambito della costruzione metallica, non pone limiti alla libertà progettuale.

La riduzione dei costi di costruzione e manutenzione è obiettivo fondamentale al fine di un più largo impiego verso le medie piccole luci nelle quali gli impalcati sono attualmente realizzati in c.a.

Il programma delinea, come primo obiettivo, lo sviluppo di soluzioni innovative per tre tipologie di materiali: solo acciaio, acciaio-alluminio, acciaio-calcestruzzo.

Nelle soluzioni integralmente metalliche verranno esaminati sistemi innovativi sandwich, in analogia a quanto sta verificandosi negli impalcati navali, nei quali la riduzione dei cosiddetti "hard spots" determina un netto miglioramento in fatica (Fig.14).

L'anima dei pannelli sandwich può essere costituita da profili o da piatti piegati. Si ritiene che l'impiego di saldatura laser possa ridurre i costi e gli effetti delle distorsioni rispetto alla saldatura ad arco.

Nella predisposizione del programma si è manifestato molto interesse allo sviluppo di soluzioni in

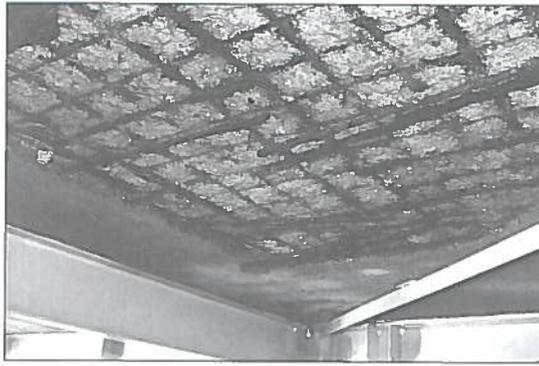


Figura 12 - Ammaloramenti in solette in c.a.

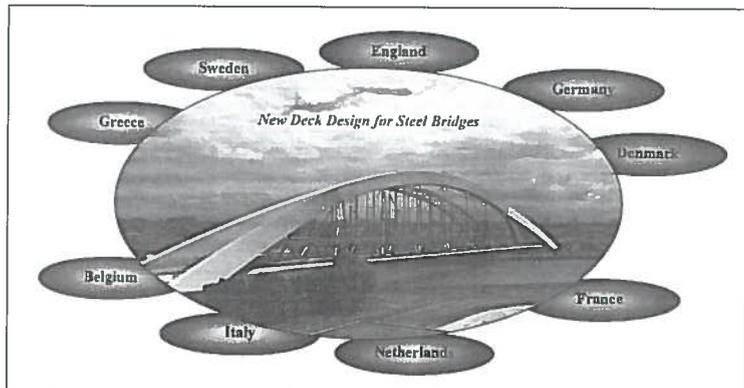


Figura 13 - Partecipanti al programma Europeo BRUS

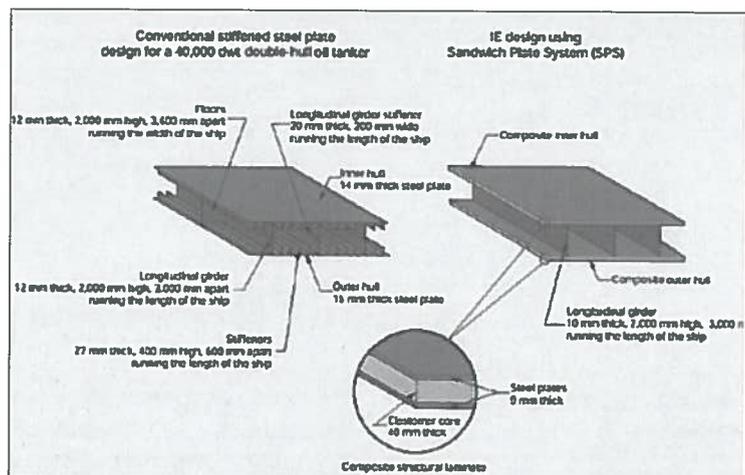


Figura 14 - Soluzione sandwich - solo acciaio

alluminio, non solo per le caratteristiche di leggerezza e durabilità alla corrosione, ma anche per la versatilità costruttiva connessa con la possibilità di estrusione di svariate forme di profilo.

Ciò può consentire di ridurre l'effetto degli hard spots e l'incidenza della saldatura.

Altro tipo di soluzione da indagare è costituita dalla cosiddetta piastra ortotropa mista, già da alcuni anni in studio presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Pisa (Fig.16).

Si tratta di piastre ortotrope molto leggere in acciaio, con nervature longitudinali di tipo aperto, fortemente distanziate e quindi con bassa incidenza di saldatura, combinate con una soletta collaborante in c.a., di 6-8 cm di spessore, che fornisce anche un buon supporto alla pavimentazione.

Per travate di luce intorno ai 100m la soluzione comporta pesi strutturali e costi d'impalcato inferiori sia alla soluzione mista che alla soluzione integralmente metallica (Fig.17).

E' evidente che il corretto funzionamento del siste-

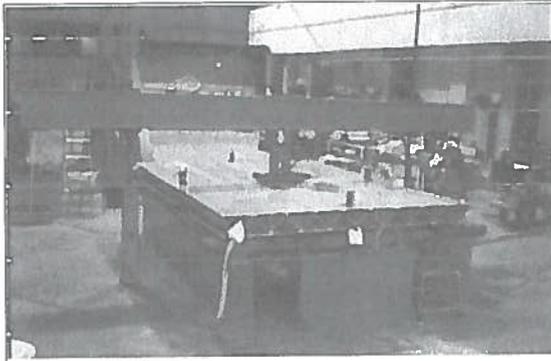


Figura 15 - Soluzioni in alluminio

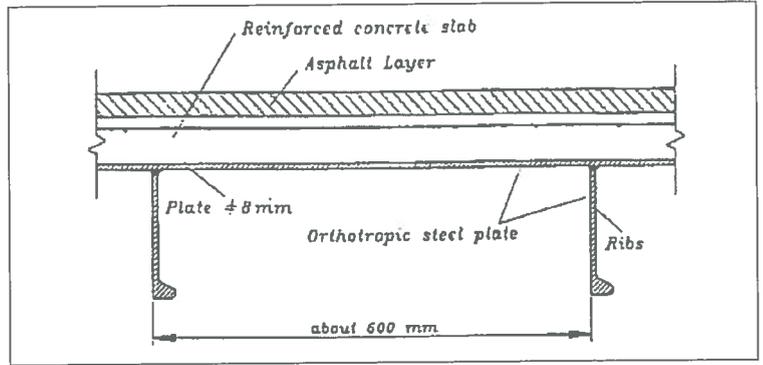
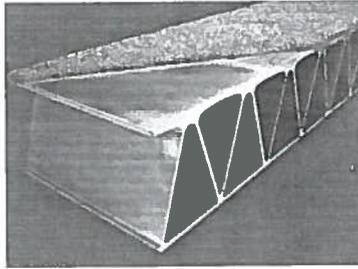


Figura 16 - Piastra ortotropica mista

ma sotto carichi statici e dinamici dipende fortemente dal tipo di connessione acciaio-calcestruzzo adottato. Nella fattispecie i pioli risultano particolarmente corti, per cui l'attenzione si è concentrata su sistemi di connessione alternativa, che sono attualmente in fase di studio e caratterizzazione, anche in termini di costo (Fig.18). Sempre nell'ambito delle soluzioni composte il programma BRUS si propone di studiare sistemi innovativi da applicare sulle medie e piccole luci nelle quali l'ala superiore delle travi aperte d'impalcato è costituita unicamente da calcestruzzo. In questo sistema costruttivo, che si presenta idoneo alla parziale prefabbricazione della soletta, la connessione è realizzata mediante pioli orizzontali

Figura 17 - Andamento dei costi

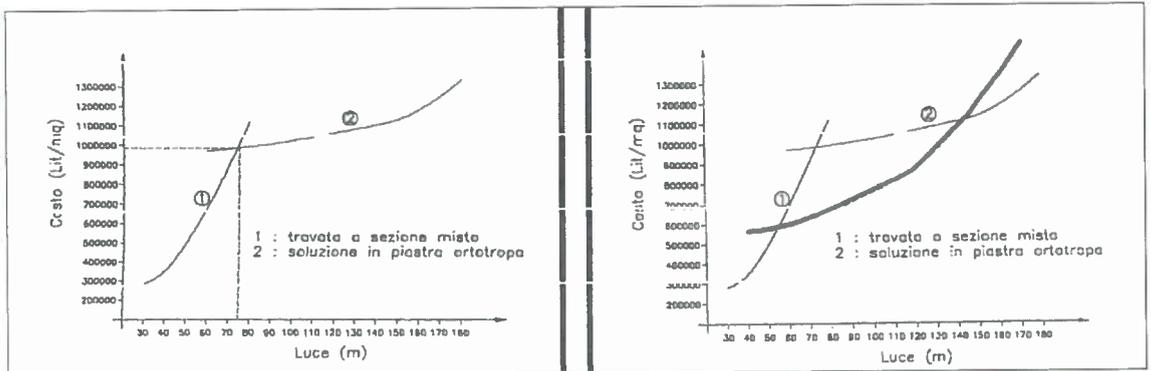
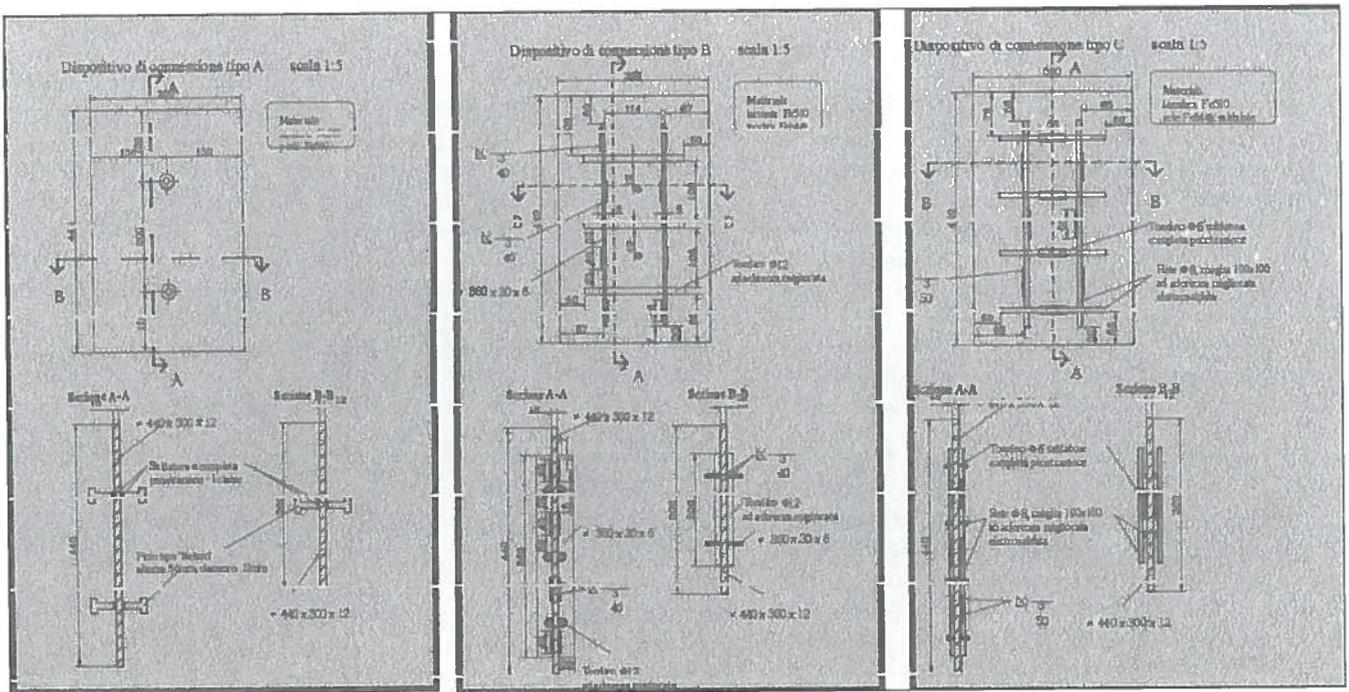


Figura 18 - Tipi di connessione



(Fig.19).

Il programma si propone inoltre di indagare gli effetti di collaborazione e di integrazione, in termini di mitigazione dello stato di tensione, dei diversi tipi di pavimentazione.

Infatti, se da un lato la collaborazione offerta da una sia pur sottile pavimentazione influenza apprezzabilmente la resistenza a fatica della piastra ortotropa, dall'altro la deformabilità della piastra stessa condiziona significativamente la durabilità della pavimentazione. Il comportamento del composito è fortemente influenzato dalla temperatura e pertanto la modellazione risulta assai complessa.

IMPALCATI FERROVIARI

Nell'ultimo decennio la costruzione di ponti ferroviari ha registrato in Europa un sensibile incremento connesso alla necessità di adeguamento e rinnovo delle linee esistenti e di realizzazione di nuove linee ad alta velocità. Tale processo è attualmente in corso ed impegnerà ingenti risorse economiche anche nei prossimi anni.

Ad un più vasto impiego delle soluzioni in c.a. sulle luci ordinarie, privilegiate da minori costi di costruzione e da maggiori rigidità rispetto alle soluzioni in acciaio, si è accompagnato un certo impiego dell'acciaio in soluzione mista per luci medie, mentre le soluzioni integralmente in acciaio sono state limitate alle luci più elevate.

Nella scelta delle tipologie degli impalcati ferroviari rimane comunque determinante il tipo di armamento.

Le esigenze di continuità, funzionali e di manutenzione, delle caratteristiche di linea portano, quasi sistematicamente, alla scelta di armamento su ballast anche in corrispondenza dei ponti.

Il ballast, contenuto nelle solette in c.a. o da cassoni di lamiera nelle soluzioni integralmente in acciaio, presenta indiscutibili vantaggi, sia in termini di comportamento dinamico e a fatica, sia dal punto di vista ambientale soprattutto in ambito urbano. Infatti l'incremento di rumorosità che, nel passaggio rilevato-ponte in acciaio con armamento su ballast, è stimato mediamente in 5dB, raggiunge livelli medi di 20dB nel passaggio rilevato-ponte in acciaio con armamento diretto.

D'altra parte, a svantaggio del ballast gioca il rilevante peso proprio, che ne rende proibitivo l'impiego nei ponti di grande luce, ove le soluzioni di impalcato più moderne prevedono l'attacco diretto dell'armamento su piastre ortotrope ferroviarie.

L'insieme delle prestazioni richieste a questi sistemi a piastra ortotropa in termini di sicurezza di comportamento dinamico, di comfort, di rumorosità, di durabilità, di possibilità e facilità di regolazione e manutenzione, unitamente agli stringenti requisiti di natura elettrica ed elettronica dei siste-

- | | | | |
|-----------------------------|----------|----------|-------|
| a) Pose leggere su piastra: | Minami, | Phonix, | Deift |
| | Monaco, | | |
| b) Posa su traverso: | Stedef, | | |
| | Toronto, | Jauntal, | |
| c) Posa su piastrone: | Vienna, | | |
| | Rheda, | BR, | IPA, |

Figura 20 -
Esempi realizzati
di tipologie di
posa

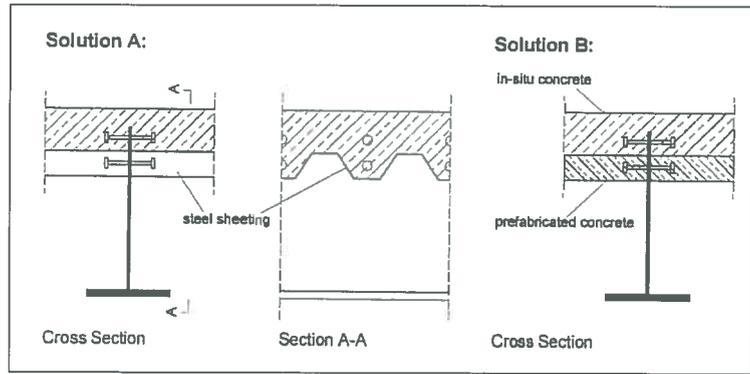


Figura 19 - Pioli
orizzontali

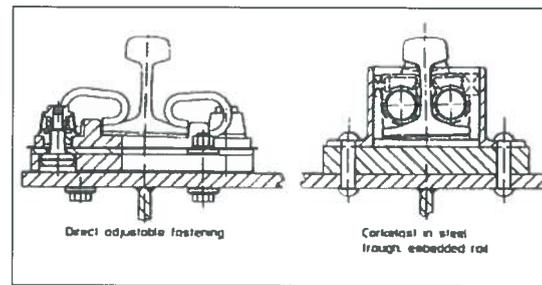


Figura 21 -
Esempi di pose
leggere su piastra

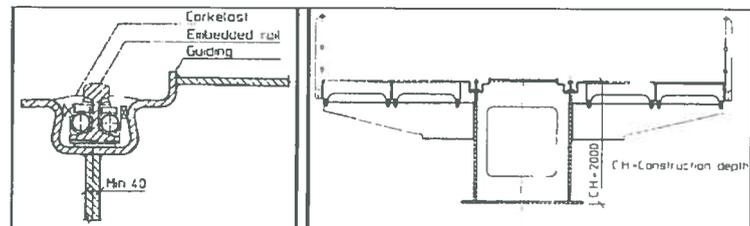


Figura 22 - Posa
entro canalette

mi di segnalamento e controllo della linea, pone condizionamenti progettuali così severi da portare a soluzioni operative estremamente complesse.

I molteplici sistemi finora studiati ed applicati sono riconducibili a tre tipologie di posa (posa leggera, posa su traverso e posa su piastrone) (Fig. 20).

In ambito delle soluzioni leggere è frequente la posa dell'armamento su piastre allettate su cuscinetti di elastomero, ma i risultati non sono sempre pienamente soddisfacenti e comunque fortemente dipendenti dalla tipologia dell'impalcato ed in particolare dalle rigidità locali e globali dipendenti dagli spessori, dal tipo e disposizione delle nervature delle piastre ortotrope (Fig.21).

Per questo sono state proposte molteplici soluzioni innovative, come ad esempio il sistema Roo de Vart sperimentato dalle ferrovie olandesi.

In questo sistema la rotaia viene messa in posizione geometricamente corretta su una striscia continua di elastomero, applicato al fondo di una robusta canaletta di acciaio che viene a sua volta riempita da un elastomero fluido che solidificando assicura la tenuta della rotaia. Un certo limite è costituito dalla possibilità di regolazione e manutenzione in esercizio.

Altra soluzione innovativa di posa della rotaia è quella proposta in Olanda dal Silent Bridge Group costituito nel 1993 (Fig.22).

Le rotaie, tenute orizzontalmente e verticalmente da elastomeri, sono alloggiare in speciali canalette pressopiegate, dotate di un'ala antisvio e sigillate con materiale di protezione facilmente removibile. Le canalette costituiscono parte integrante della

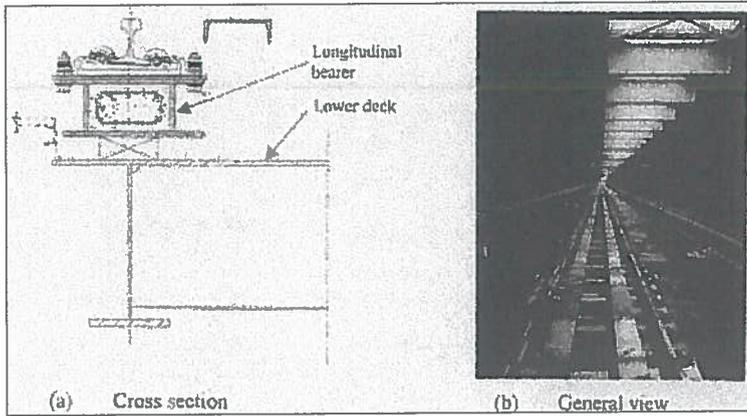


Figura 23 - Silent Bridge Group



Figura 25 - Piastre ortotrope ferroviarie

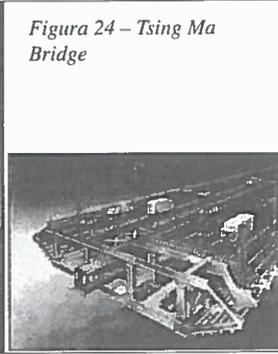


Figura 24 - Tsing Ma Bridge

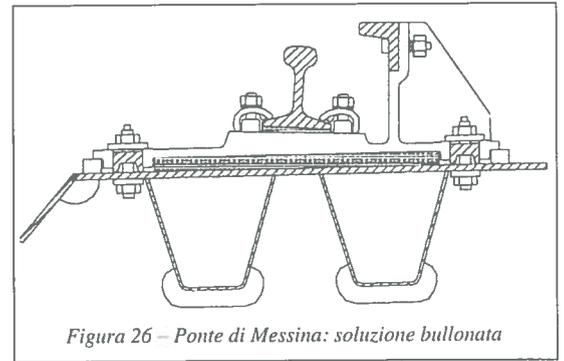
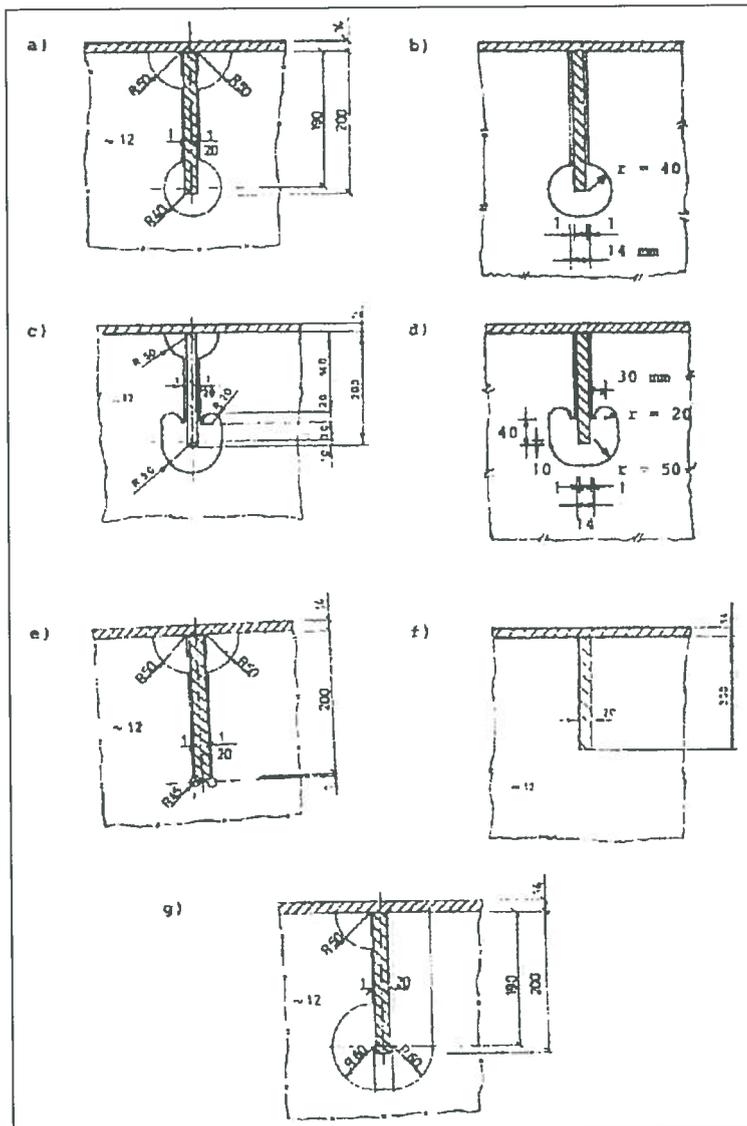


Figura 26 - Ponte di Messina: soluzione bullonata



Figura 27



struttura e nell'esempio riportato in figura 20 formano gli angoli superiori di un cassonetto ferroviario di circa 2 metri di altezza.

Nel ponte sospeso stradale e ferroviario Tsing Ma Bridge in Hong Kong, aperto al traffico nel 1997, quinto al mondo in ordine di luci, è stato adottato un innovativo sistema di posa leggera definito a doppio strato (Fig.23,24).

Le rotaie sono montate su piastre fissate su travi portanti miste acciaio-calcestruzzo collegate tra loro da traversi, a formare un grigliato vincolato verticalmente ed orizzontalmente alla struttura principale di impalcato da supporti elastici.

Le piastre ortotrope di supporto al binario (si stima che attualmente siano in esercizio in Europa circa 1000 ponti ferroviari a piastra ortotropa) sono state oggetto di numerose indagini. Così, come nel caso stradale, l'aspetto più delicato rimane la resistenza a fatica.

Una recente ricerca finanziata dall'UIC e dall'Istituto di Ricerca Europeo ERRI, coordinata dal prof. Fryba, è pervenuta alla definizione di specifiche per la progettazione e la costruzione.

In esse viene dato giustamente risalto, al dettaglio nervatura longitudinale-traverso. Sono raccomandate nervature longitudinali aperte di tipo simmetrico con slot. I cut-out possono essere omessi soltanto in casi particolari, adottando tecniche di saldatura avanzate che riducano al minimo le tensioni residue (Fig.25).

Per il ponte sullo Stretto di Messina è stata proposta e sperimentata una posa leggera con piastre in acciaio dotate di ala antisvio, poggiate su elastomero. Il sistema è collegato con clips a piastre bullonate alla piastra ortotropa del cassone ferroviario, che presenta canalette accoppiate sotto ciascuna rotaia (Fig.26).

La sperimentazione è stata indirizzata sia alla ve-

rifica dei livelli di comfort e di sicurezza, sia alla resistenza a fatica (Fig.27).

Al fine di evitare le forature del cassone ferroviario, che possono comportare problemi di tenuta all'acqua e all'aria, (il cassone è dotato di sistema di deumidificazione); è stata indagata anche una analoga soluzione con piastrine laterali saldate (Fig.28).

Con questa soluzione, ottenuta sperimentalmente con successivi affinamenti si sono raggiunti risultati soddisfacenti in termini di resistenza a fatica con uso di saldatura tradizionale ad arco. Si ritiene che l'impiego di tecniche avanzate di saldatura, ad esempio saldatura laser, possa portare ulteriori miglioramenti.

ASPETTI COSTRUTTIVI : ACCIAI SPECIALI E SALDATURA

Il Dipartimento dei Trasporti della Federal Highway Administration, nel marzo scorso, ha concluso un vasto programma di indagine sulle tecnologie di fabbricazione dei ponti in acciaio in Europa ed in Giappone. In Europa sono state esaminate le tecnologie di Germania, Italia e Regno Unito (Fig.29).

E' emerso che si è andata ormai definitivamente consolidando la costruzione saldata, anche in opera, e ciò grazie ai notevoli sviluppi sia della saldatura che della produzione siderurgica.

E' risultato anche particolarmente significativo l'impiego degli acciai termomeccanici di nuova generazione impiegati in soluzione saldata (Fig.30). In questi acciai all'incremento di resistenza si accompagna un sensibile incremento di tenacità e di saldabilità. E' per questo che per questi acciai, risulta più appropriata la denominazione "acciai ad alte prestazioni, HPS," piuttosto che la denominazione limitativa "acciai ad alta resistenza, HRS".

L'accresciuta saldabilità rispetto agli acciai ordinari è data soprattutto dalla possibilità di eliminazione, o forte riduzione, dei trattamenti termici pre e post saldatura; devono comunque essere prese specifiche cautele per ridurre i difetti nelle zone termicamente alterate, specie quando le resistenze sono particolarmente alte. E' noto infatti che per questi acciai, sono inefficaci i trattamenti termici correttivi in queste zone dove possono verificarsi sensibili cadute di resistenza.

I migliori risultati si ottengono con l'impiego di

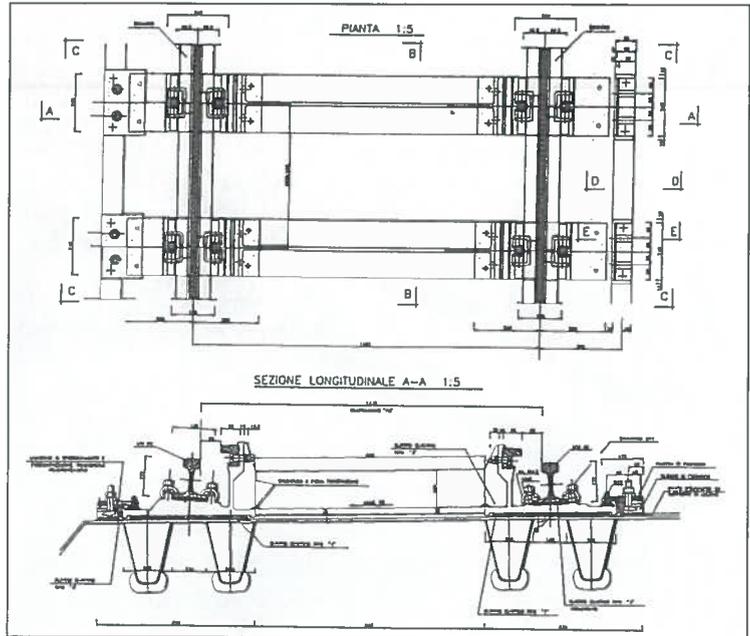


Figura 28 - Ponte di messina: soluzione saldata

Table 3.1: Nominal values of yield strength f_y and ultimate tensile strength f_u for hot rolled structural steel

Standard and steel grade	Thickness t mm ¹⁾			
	$t \leq 40$ mm		40 mm $< t \leq 80$ mm	
	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)
prEN 10025				
S 235	235	360	215	340
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	490
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	540	390	520
S 460 N/NL	460	570	430	550
S 275 M/M/L	275	380	255 ²⁾	360 ²⁾
S 355 M/M/L	355	470	335 ²⁾	450 ²⁾
S 420 M/M/L	420	520	390 ²⁾	500 ²⁾
S 460 M/M/L	460	550	430 ²⁾	530 ²⁾
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490

¹⁾ For flat products: 40 mm $< t \leq 63$ mm only;
²⁾ t is the nominal thickness of the element

Figura 30 - Tabella EC3

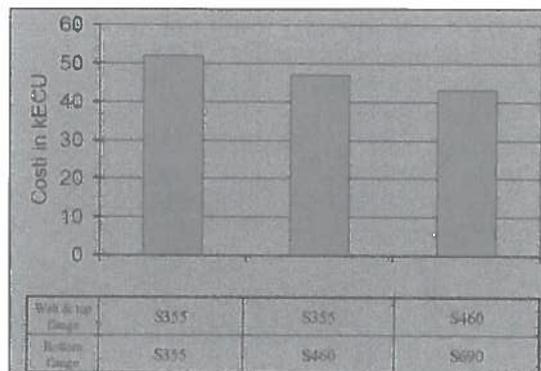


Figura 31 - Costi travi ibride



Figura 29 - Indagini in Europa e Giappone

particolari procedimenti di saldatura che tendano a ridurre la larghezza della zona termicamente alterata. In questo modo la inevitabile riduzione di resistenza in queste zone diviene ininfluenza sul grado di efficienza del giunto.

Nell'innovazione dei procedimenti di saldatura, così finalizzati, viene data anche particolare rilevanza allo studio dei materiali di apporto con la finalità di un sempre migliore adeguamento alle crescenti prestazioni del materiale base.

Nonostante le elevate prestazioni risulta, tuttavia, in genere assai difficile giustificare, a parità di soluzione strutturale, il passaggio dagli acciai ordinari agli acciai speciali. Il semplice risparmio in peso che si consegue in termini dimensionali, grazie alla

riduzione delle sezioni ed in particolare degli spessori, non è generalmente di per sé sufficiente a giustificare l'impiego. E' significativo, a questo proposito il confronto tra travate a sezione ibrida, molto diffuse in Giappone, con diversi tipi di composizione (Fig.31).

Al contrario, vantaggi economici consistenti si possono invece ottenere con studi progettuali mirati che prevedano, fin dall'inizio, la possibilità di impiego di acciai ad alte prestazioni.

Costituisce esempio significativo il progetto dei viadotti di accesso dell'attraversamento del Grande Baelt; le travate continue erano state originariamente progettate su luci di 164m in acciaio Fe 510. In sede di gara di appalto, l'offerta italiana si basò su una variante-alternativa che prevedeva l'impiego di acciaio S 420 ma su un diverso schema statico caratterizzato da travate continue con luci di 193m (Fig. 32,33,34).

La scelta di questa soluzione, che lasciava praticamente invariato il costo d'impalcato rispetto alla soluzione base, consentiva, però, di risparmiare tre pile a mare riducendone il numero da 24 a 21. Questo vantaggio si è tradotto non solo nella riduzione del costo di costruzione, ma anche in un notevole miglioramento delle condizioni di navigabilità. La variante proposta ha avuto un ruolo decisivo per la vittoria italiana nella gara.

Nella costruzione saldata dei ponti, nonostante il notevole avanzamento in atto, rimangono rilevanti le problematiche inerenti il controllo dei difetti dovuti alla inevitabile presenza delle tensioni e deformazioni residue da saldatura.

Questo problema costruttivo richiede ancora un importante impegno in indagini, studi, ricerche. Attualmente, nella prassi costruttiva, si ricerca la

soluzione caso per caso, affidandosi prevalentemente alla diretta esperienza acquisita. Infatti, per la complessità dei parametri influenti in gioco, i modelli teorici e numerici danno risultati insoddisfacenti ed è spesso necessario ricorrere a sperimentazioni mirate prima o durante la costruzione.

L'attività di ricerca relativamente allo studio degli stati di autotensione da saldatura è oggi molto attiva ed è volta da un lato allo studio di modelli previsionali teorico-numerici, dall'altro alla messa a punto di procedimenti di saldatura innovativi tendenti a minimizzarne gli effetti.

A questo proposito di particolare interesse risultano la saldatura laser e l'impiego di elettrodi rivestiti a bassa temperatura di trasformazione capaci di sviluppare tensioni residue di compressione nei giunti dovute alla significativa espansione del metallo di apporto in fase di raffreddamento in prossimità della temperatura ambiente (Fig.35).

Finora le prove di laboratorio con questi nuovi tipi di elettrodi hanno dato ottimi risultati dimostrando notevoli benefici nella resistenza a fatica e nella criccabilità in stress-corrosion delle giunzioni.

Un altro interessante problema oggetto di studio è dato dall'interazione delle deformazioni in campo plastico dovute ai carichi eccezionali e la rottura fragile. I danni causati dai terremoti nell'ultimo decennio in corrispondenza dei giunti saldati costituiscono un utilissimo riferimento.

PONTI DI PICCOLA LUCE

Nel recente passato l'attività tecnico scientifica di avanguardia nel settore dei ponti ha riguardato prevalentemente le grandi luci. Nei campi delle medie e piccole luci non si è registrata una significativa



Figura 32 –
Travata Great
Baelt

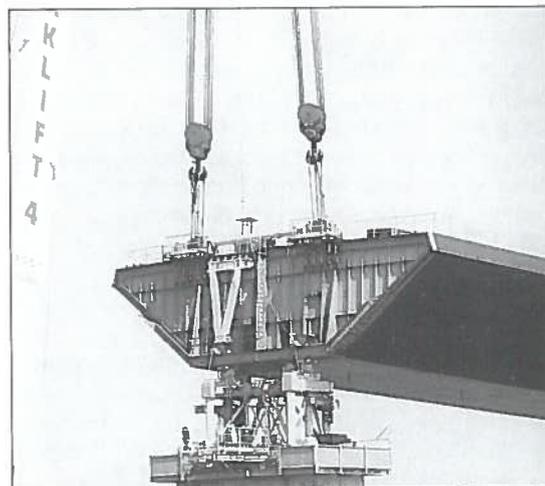


Figura 34 –
Travata Great
Baelt

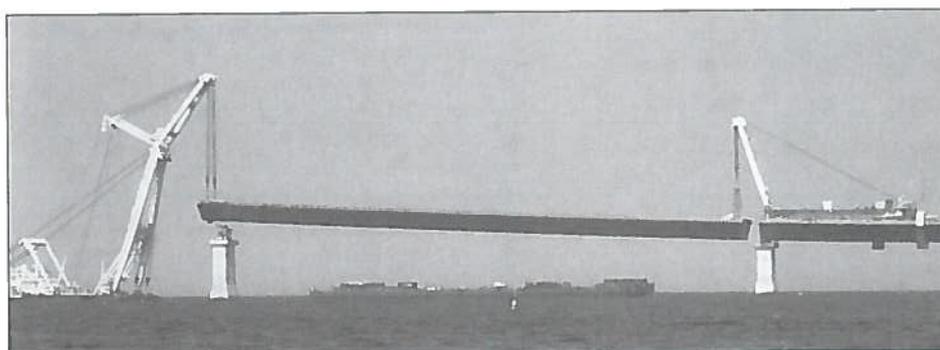


Figura 33 –
Travata Great
Baelt

attività scientifica e modesta è risultata l'innovazione.

Ciò risulta ingiustificato se si fa riferimento all'impatto economico della categoria dei ponti di piccola luce, con riferimento sia all'esistente che al nuovo (Fig.36).

In una recente indagine, condotta nei Paesi dell'Europa occidentale, è stata rilevata la distribuzione del numero dei ponti stradali, nei diversi materiali strutturali, in funzione della luce. E' risultato che ben il 65% dei ponti è caratterizzato da luci inferiori a 30m (Fig.37).

Negli interventi sulla viabilità esistente, la necessità di ridurre quanto più possibile i disturbi al traffico, durante la costruzione in opera, comporta una spinta sempre più forte alla prefabbricazione, più facilmente perseguibile per le piccole luci, e pertanto le soluzioni leggere in acciaio possono risultare privilegiate anche dal punto di vista economico, se si tiene debito conto di tutti i costi.

Da queste considerazioni nasce un nuovo impulso allo studio di soluzioni innovative in acciaio specie per le luci comprese tra 10 e 30m.

L'obiettivo principale è quello di spingere sempre più la prefabbricazione per ridurre quanto più possibile le operazioni in opera e permettere interventi sulla viabilità esistente con i minori disagi per il traffico. Le soluzioni in acciaio presentano, da questo punto di vista, indubbi vantaggi rispetto ai prefabbricati pesanti in c.a.

Nel programma di ricerca finanziato dalla CECA dal titolo "Lateral Torsional Buckling" viene indagata, da parte del gruppo di Ricerca dell'Università di Pisa, la resistenza allo svergolamento di travi aperte da ponte, su luci piccole, collegate solo dai traversi di estremità, soprattutto con riferimento alle fasi di montaggio nelle quali la soletta, prefabbricata o gettata in opera, non costituisce ancora un controvento orizzontale pienamente efficace (Fig.38-a).

Le indagini teoriche, già eseguite, hanno permesso finora di evidenziare il contributo, in diverse disposizioni costruttive, dei traversi di estremità (Fig. 38-b).

La sperimentazione in corso su prototipi di grandi dimensioni, dovrebbe mettere in luce anche il ruolo dell'attrito tra soletta e ali delle travi.

Sempre su questo filone si inserisce l'interesse per le opere provvisorie impiegate negli interventi sulla viabilità esistente, sia come ponti che come sopraelevate provvisorie.

Alla crescente necessità di questi tipi di struttura si contrappone una insufficiente disponibilità di soluzioni.

Nell'ambito dei cosiddetti "ponti da interruzione", le strutture Baylei, nate con scopo essenzialmente militare, continuano ad essere di gran lunga le più impiegate nel nostro Paese, anche se la loro disponibilità è limitata, oltre che all'esercito, solo a poche

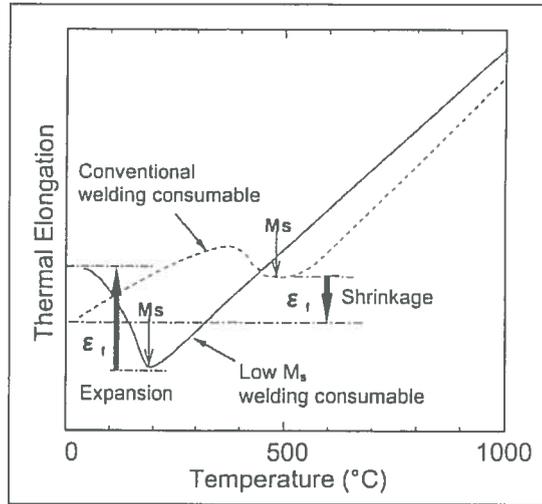


Figura 35 - Curve di dilatazione degli elettrodi

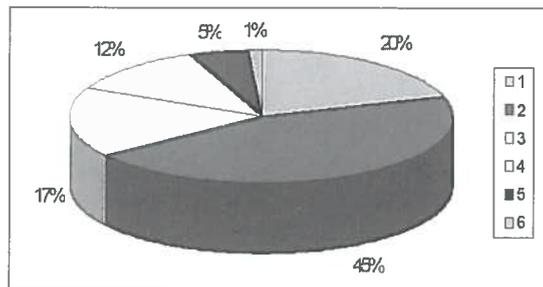


Figura 36 - Distribuzione delle luci

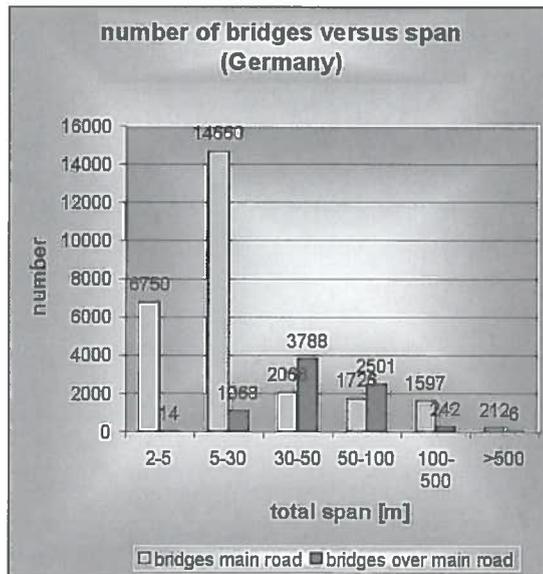


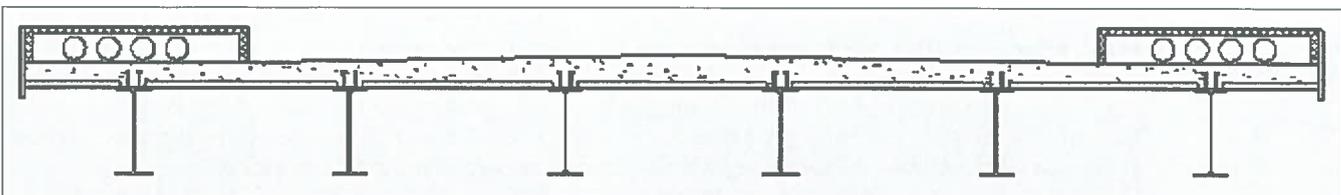
Figura 37 - Distribuzione delle luci

imprese (Fig.39).

Sono state recentemente proposte, anche con scopi militari, soluzioni alternative: le soluzioni leggere in alluminio presentano naturalmente indiscutibili vantaggi.

Presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Pisa sono iniziati promettenti studi progettuali su ponti provvisori a struttura in lega di alluminio (Fig.40).

Figura 38-a



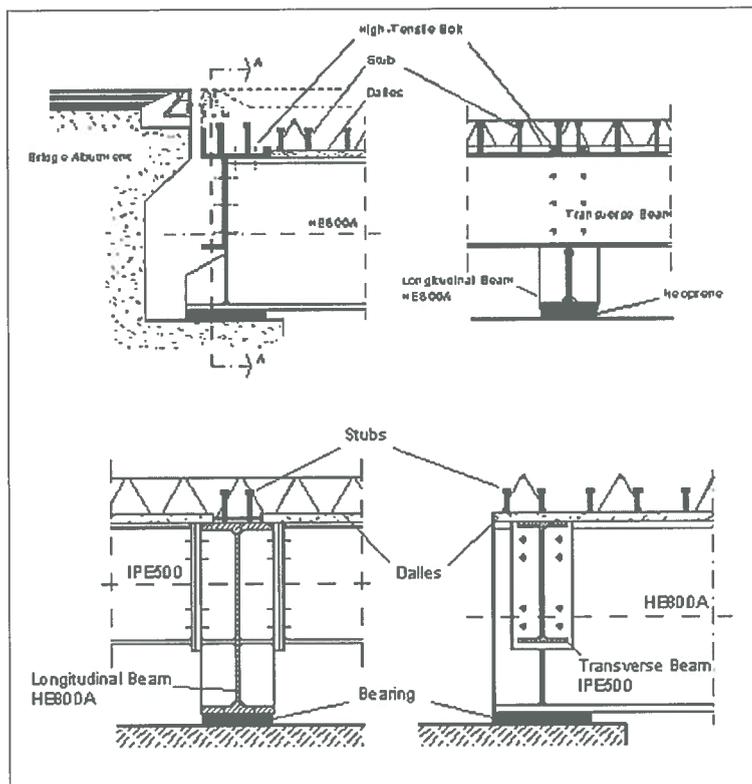


Figura 38-b - Impalcati misti con traversi d'estemità

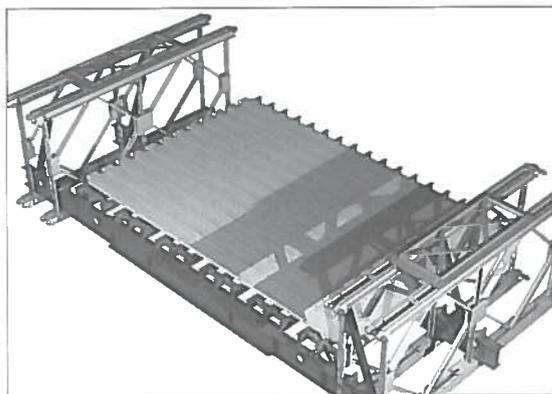


Figura 39 - Ponte Bayley

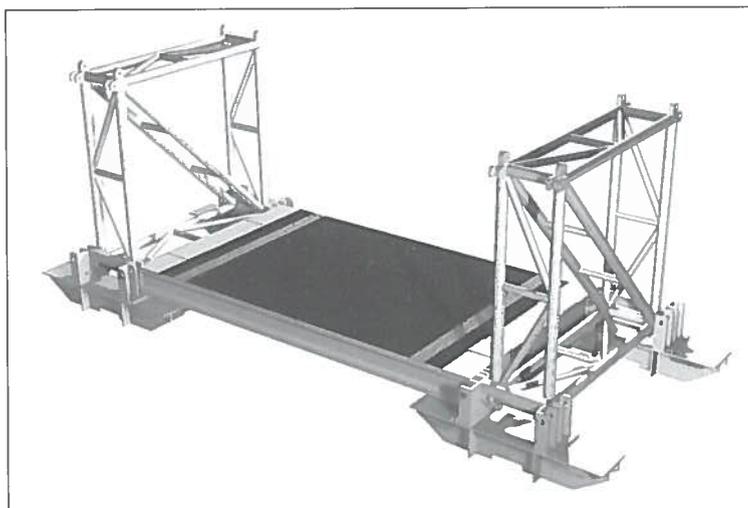


Figura 40 - Modulo di ponte da interruzione in alluminio

PONTI SOSPESI DI GRANDE LUCE

Dei 17 ponti sospesi esistenti di luce superiore a 1000 m, 7 sono stati costruiti negli ultimi 5 anni e di questi, come ben noto, 2 superano i 1500m. E' quindi fortemente probabile che nei prossimi an-

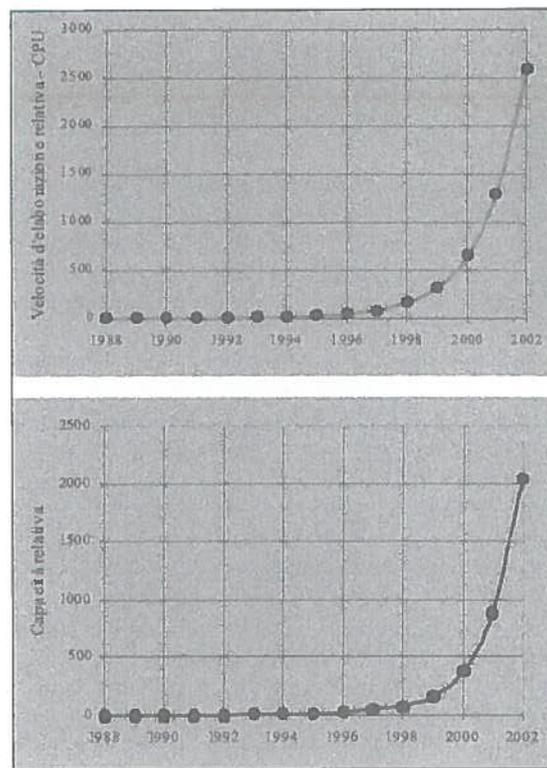


Figura 41 - Evoluzione hardware

ni si superino i 2000m e augurabilmente anche i 3000m.

Questa grande escalation delle luci ha coinciso, non a caso, con il notevolissimo sviluppo delle capacità di analisi strutturale consentita dall'evoluzione del software e dell'hardware, che hanno reso disponibili strumenti sempre più potenti e sofisticati.

L'hardware, in particolare, ha registrato progressi travolgenti, accompagnati da una drastica riduzione dei prezzi.

Nella Figura 41 è riportato il confronto tra le caratteristiche salienti di due PC di fascia alta, uno costruito nel 1988, l'altro nel 2001; sono riportati anche gli andamenti dei costi di memoria RAM e Hard disk nello stesso periodo.

A fronte di questa grande accrescimento di potenzialità di analisi, l'evoluzione delle tipologie costruttive nei ponti di grande luce è stata assai contenuta. Ora tuttavia, con le luci massime raggiunte, alcune prestazioni hanno attinto valori di soglia e si impone pertanto una forte evoluzione delle tipologie costruttive.

Sono da segnalare, in particolare, due di questi aspetti.

Il primo riguarda la formazione e le dimensioni dei cavi principali nei ponti sospesi, il secondo la tipologia delle sezioni di impalcato (Fig.42).

E' noto che nelle soluzioni sospese pure il sistema principale è costituito dai cavi dalle torri e dalle sottostrutture. L'impalcato assume, per così dire, funzione di livello inferiore in quanto elemento di trasferimento dei carichi verticali ai cavi principali, attraverso i pendini.

Pertanto uno degli obiettivi fondamentali nella progettazione di ponti sospesi di grande luce è quello di ridurre quanto più possibile le masse sospese, pesi propri e carichi permanenti.

Per luci sospese intorno ai 2500m il peso dei cavi



Figura 42 - Cavo principale di ponte sospeso

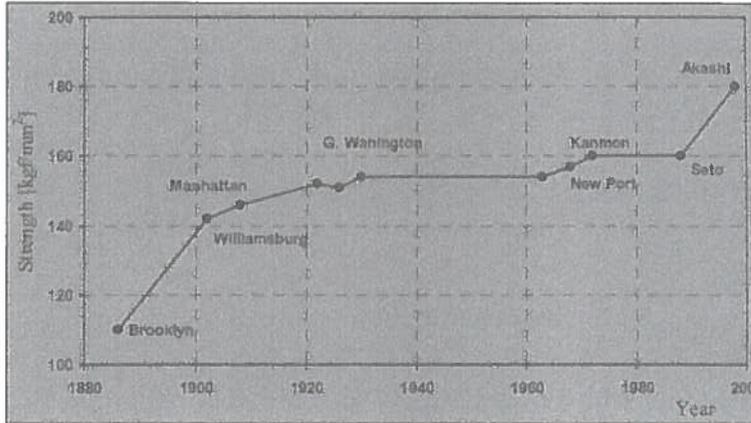


Figura 43 - Evoluzione delle resistenze del filo d'acciaio

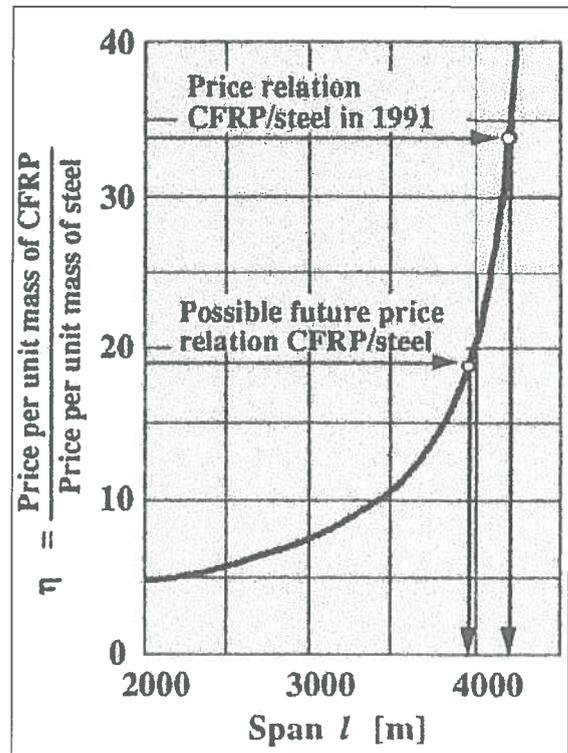


Figura 44 - Confronto costi filo acciaio-filo carbonio

supera quello dell'impalcato, divenendo l'azione che maggiormente contribuisce alla definizione del proprio stato tensionale e quindi della sicurezza sotto carichi statici. Più del 90% della sezione trasversale dei cavi è impegnata a portare il proprio peso ed il carico permanente dell'impalcato. Da ciò deriva l'opportunità di adottare, per i cavi, materiale di caratteristiche meccaniche quanto più elevate.

Ora nonostante i notevoli sviluppi della tecnologia degli acciai speciali la resistenza nominale dei fili impiegati nei ponti sospesi non è variata in maniera sensibile in circa 70 anni rimanendo la tensione di rottura intorno ai 1600 Mpa, la tensione di snervamento intorno ai 1300 Mpa con diametri dei fili di poco superiori ai 5mm (Fig.43).

Ciò è dovuto ai condizionamenti imposti dalla durabilità e dai procedimenti di montaggio.

Il trattamento di zincatura a caldo riduce infatti le caratteristiche meccaniche del filo e la riduzione è crescente al decrescere del diametro, vanificandosi così, almeno in parte i vantaggi in termini di resistenza dovuti alla trafilatura.

D'altra parte deve essere garantita una duttilità sufficiente a permettere una serie di operazioni al montaggio quali avvolgimento e svolgimento su matasse e bobine, passaggi su rulli e ruote, contatti con selle, pettini e morsetti, possibile mazzuolatura, compattazione e cerchiatura: tali livelli di duttilità sono generalmente incompatibili con le elevatissime resistenze.

Tuttavia recentemente si sono potuti ottenere sensibili progressi sul metodo di trafilatura e sul trattamento di zincatura agendo sulla composizione chimica, in particolare, aggiungendo silicio. Nella realizzazione dell'Akashi il filo adottato di diametro 5,38 è caratterizzato da tensioni di rottura di 1770 Mpa, tensioni di snervamento di 1375 Mpa; si è po-

tuto così contenere il diametro dei cavi in 1,1 m circa.

Soluzione del tutto analoga è stata adottata nel progetto del Ponte sullo Stretto di Messina, nel quale si è dovuto ricorrere alla soluzione a quattro cavi a coppie di due per rimanere in dimensioni degli stessi compatibili con le attuali tecnologie di formazione. In questo caso il diametro di ciascun cavo è di circa 1,2 m.

Si è compiuto pertanto un certo progresso ma sono auspicabili ulteriori sensibili avanzamenti sia nella qualità del filo che nella tecnologia di formazione del cavo.

L'attività di ricerca è attualmente principalmente indirizzata, in campo siderurgico, alla ottimizzazione del filo di acciaio per il particolare impiego ed è inoltre volta allo studio di materiali innovativi. Di particolare interesse sono i risultati sperimentali raggiunti su fili a fibre di carbonio. Si possono ottenere fili con tensioni di rottura di circa 3300 Mpa, con densità di massa di 1,6 g/cm³, e con ottime caratteristiche di resistenza a fatica ed alla corrosione (Fig.44).

I costi rimangono purtroppo molto elevati, per non dire proibitivi. Per darne una misura è stato calcolata in 4200m la "break-even span" cioè la luce sospesa alla quale la sostituzione del filo in acciaio con quello in fibre di carbonio potrebbe essere anche economicamente conveniente, con riferimento agli attuali prezzi di mercato.

Il secondo aspetto per il quale non è più possibile l'estrapolazione, per così dire, delle tipologie finora adottate, riguarda lo schema strutturale ed, in particolare, la conformazione della sezione, in relazione alla stabilità aerodinamica.

Nella gara in atto delle grandi luci abbiamo assistito ad un confronto fra due diverse filosofie progettuali: quella Giapponese che prevede l'impiego

Figura 45 -
Minami in
costruzione



Figura 46 -
Storebaelt

di sezioni aperte con travi reticolari alte e quella Europea che prevede sezioni a cassone sottile (Fig.45).

Nell' Akashy è stata ottenuta una velocità critica di flutter di 78 m/s, mentre nello Storebaelt è stata trovata in galleria del vento una velocità critica di flutter di circa 65 m/s in presenza di barriere laterali (Fig.46).

Ambedue i tipi di soluzione, oltre 2000 m, risultano non più praticabili e devono essere ricercate soluzioni innovative.

Gli studi connessi all'esperienza dello Stretto di Messina hanno mostrato che la soluzione di impalcato a cassone multiplo è molto promettente, per le grandi luci, non solo in termini di stabilità aerodinamica, ma anche per le caratteristiche di leggerezza e di facilità di costruzione e di manutenzione (Fig.47).

Anche su questo aspetto c'è da attendersi nei prossimi anni un ulteriore notevole impegno della ricerca .

BIBLIOGRAFIA

Meier Urs: Carbon Fiber-Rinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering. Structural Engineering International, 1-92.

Furuya N.; Tatsumi M.: Technical Innovation for Realization of Akashi-Naikyo Bridge. Proc. Engrs Structs & Bridge, 1994, 104.

Barsotti A.; Carracilli J.; Cuninghame J.; Caramelli S.; Croce P.; Froli M.; Kolstein M.H.; Leenderz J.S. Lehrke H.P.; Le Pautremat E.; Sanpaolesi L.:

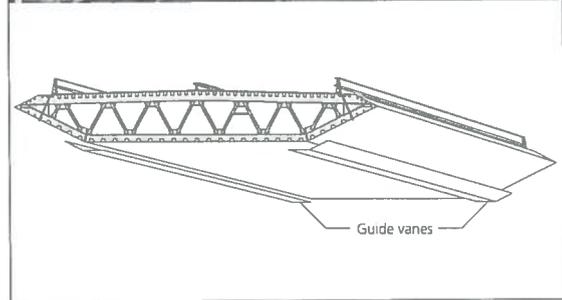
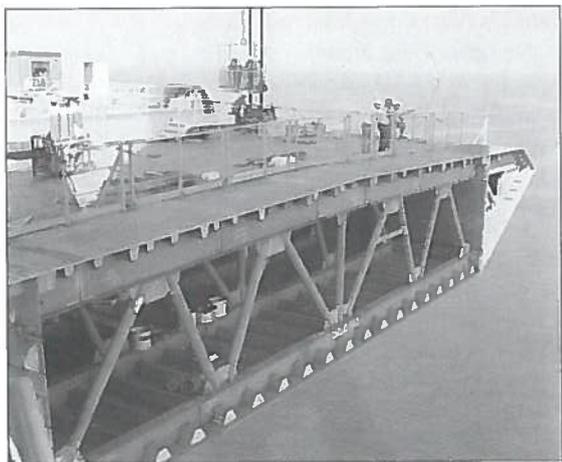
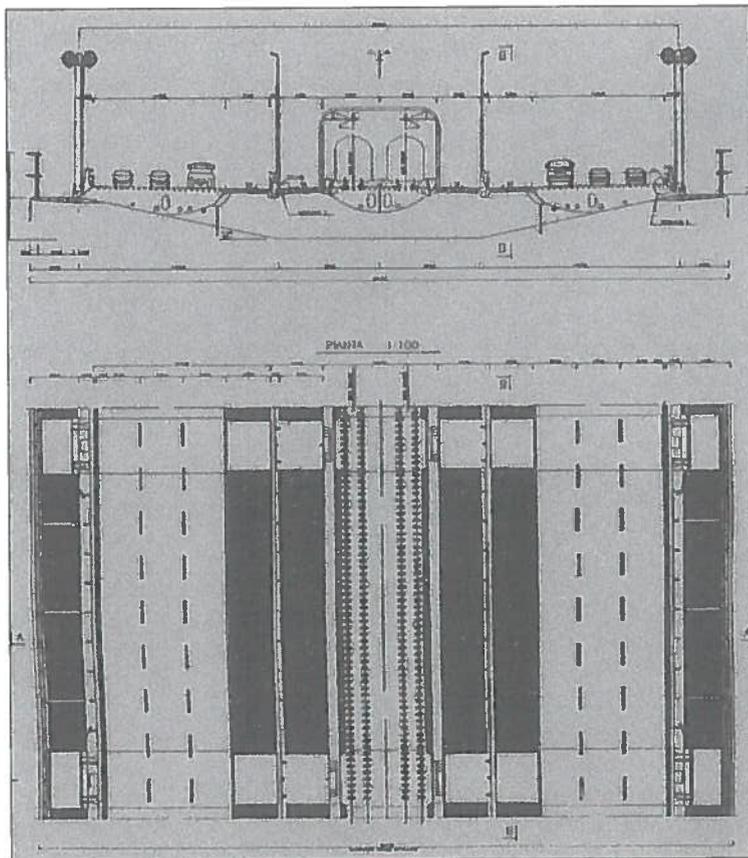


Figura 47 - Impalcato ponte di Messina



- Measurement and interpretation of dynamic loads in bridges. Phase 4: Fatigue strength of steel bridges. Synthesis report, Pisa, 1995 (in corso di pubblicazione, a cura della Commissione Europea, nella collana Technical steel research series, Luxembourg).
- Caramelli S.; Croce P.; Froli M.; Sanpaolesi L.: Repair techniques for the rehabilitation of fatigue cracked orthotropic steel bridges. IABSE Workshop on Evaluation of Existing Steel and Composite Bridges, Lausanne, 1997.
- Fryba L.: Design of Steel Orthotropic Decks on Railway Bridge. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 46:1-3, Paper N° 38.
- Bos J.A.; Bijl J.; Hesselink B.H.; Snijder H.H.: Steel Railway Bridge Design in Netherlands. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 4:1-3, Paper N°42.
- Davis D.C.C. : Tsing Ma Bridge, New Design Solution for NewDesign Challenger. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 46:1-3, Paper N° 247.
- Diana G.; Cheli F.; Zano A.; Collina A.; Bruni S.: Aereodynamic Design of Very Long-Span Suspension Bridges. IABSE Symposium, Kobe 1998.
- Caramelli S.; Croce P.; Froli M.; Sanpaolesi L.: Misure ed interpretazioni dei carichi dinamici sui ponti – Quarta fase: Resistenza a fatica dei ponti in acciaio. Relazione tecnica finale. Pisa, 1994; Technical steel research series, Luxembourg, 1998.
- De Meester B. : Development of base materials for welding. Proc. Univ. Cath. Louvain. Belgium 2000.
- Caramelli S.; Croce P.: Messina bridge: testing assisted deck fatigue design. Proceedings of the international conference Welded constructions, Florence, Italy, 13 July 2000.
- Hobbacher A.: Evolution of Design and Fabrication of Steel Structures. Rivista Italiana della Saldatura, 2/2001.

Prof. dr. ing. Stefano Caramelli

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Pisa

*XVIII CONGRESSO C.T.A. "NUOVE SFIDE PER L'ACCIAIO"
Isola San Giorgio Maggiore – Venezia 26-27-28 Settembre 2001*