

*"... Per lo studio e il perfezionamento della tecnica della costruzione metallica"*

C.T.A.  
COLLEGIO DEI TECNICI DELL'ACCIAIO

MEMBRO FAST  
FEDERAZIONE ASSOCIAZIONI SCIENTIFICHE E TECNICHE

20121 MILANO, PIAZZALE R. MORANDI, 2

TEL. 78.47.11

XIV  
CONGRESSO C.T.A.

VIAREGGIO, 24-25-26-27 OTTOBRE 1993

GIORNATE ITALIANE  
DELLA COSTRUZIONE IN ACCIAIO

ATTUALITÀ E PROSPETTIVE  
DELLA COSTRUZIONE IN ACCIAIO ITALIANA  
IN EUROPA E NEL MONDO

PROGETTAZIONE, LAVORAZIONE, MONTAGGIO



C.T.A. Collegio dei Tecnici dell'Acciaio

**GIORNATE ITALIANE DELLA COSTRUZIONE IN ACCIAIO**

VIAREGGIO: 24 - 25 - 26 - 27 ottobre 1993

**IMPIEGO DELL'ACCIAIO NELL'ALTA VELOCITÀ FERROVIARIA**

**ON THE USE OF STEEL STRUCTURES IN THE FIELD OF HIGH RAILWAY SPEED**

S. Caramelli (1), A. Castellani (2), G. Diana (2), G. Magnani (3), P. Pistoletti (4).

(1) Facoltà di Ingegneria, Università di Pisa.

(2) Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Milano.

(3) Consorzio CREA, Massa.

(4) Libero professionista, Lecco.

**Sommario**

Viene riferito in merito agli studi progettuali effettuati per l'impiego dell'acciaio nelle strutture dei viadotti destinati a linee ad alta velocità ferroviaria. Vengono riportati i risultati di alcune indagini circa aspetti particolari quali la percorribilità e gli effetti sismici ed alcune conclusioni preliminari circa le scelte progettuali di base, i risultati di casi di ottimizzazione strutturale e di confronto tecnico economico tra soluzioni miste e soluzioni in c.a.p.

**Abstract**

This paper deals with the use of the steel structures in the field of high speed railway bridges.

The results of some investigations about particular items like runability and seismic effects and the results of some cases of structural optimization and economic and technical comparison are presented.

**1. Introduzione**

Il recente impegno dell'Ente Ferrovie nello sviluppo dei trasporti su rotaia con il programma per la realizzazione di alcune tratte ad alta velocità, ha sensibilizzato l'attenzione delle imprese di costruzione e dei progettisti sulle tipologie costruttive più idonee. Il CREA, Consorzio per

ferroviarie ad alta velocità nel nostro Paese, avviando un programma di studio progettuale, indirizzato all'impiego di impalcati a sezione mista acciaio-calcestruzzo. Il programma prevede preliminarmente un approfondito esame delle problematiche specifiche e della normativa vigente per arrivare a fornire indicazioni sulle scelte di base da utilizzare nella stesura dei progetti esecutivi. E' previsto anche lo sviluppo esecutivo di alcune soluzioni tipiche.

Nel seguito viene riferito su alcuni risultati della prima fase degli studi progettuali effettuati.

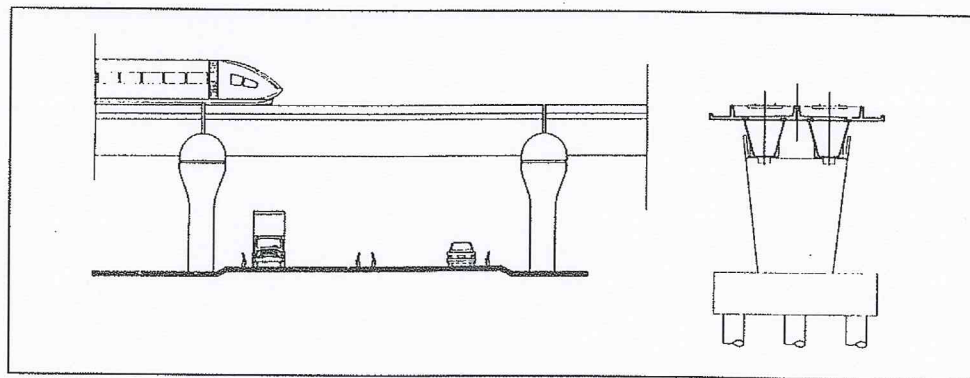


Fig.1

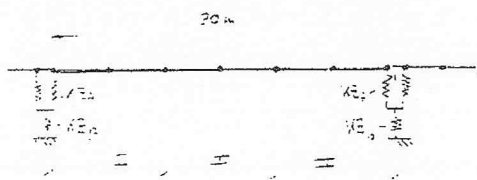
## 2. Percorribilità ferroviaria

Uno degli aspetti dominanti la progettazione riguarda l'interazione treno-rotaia-viadotto in relazione alla sicurezza di marcia ed al comfort. Le verifiche relative vengono indicate come verifiche di "percorribilità o di runability". L'attuale normativa Italferr-SIS-TAV prevede un fuso ammissibile delle frequenze proprie di impalcato e la verifica statica per il rispetto dei limiti del rapporto luce-freccia, limiti compresi fra 1200 e 3000 a seconda del numero delle campate. Queste prescrizioni, molto vincolanti la progettazione in particolare per le strutture in acciaio, sono state dettate dalla cautela supposta necessaria in relazione alle elevate velocità di progetto fino a 300 Km/h. Tale cautela deriva dalla consuetudine progettuale, nel settore ferroviario, che ha sempre imposto per i ponti limiti molto severi alla deformabilità. Tuttavia recentemente questa rigida impostazione della normativa ferroviaria è andata attenuandosi; basti pensare che i ponti della direttissima Firenze-Roma sono stati previsti per un rapporto luce-freccia di 4000 e che oggi questi limiti risultano ridotti con massimi, sia pure molto elevati, di 3000. Nonostante la persistente severità di tali limitazioni, la attuale normativa risulta fortemente innovativa in quanto consente di derogare da tali limiti se viene eseguita un'analisi dinamica di runability, in grado di valutare la sicurezza ed il comfort di marcia

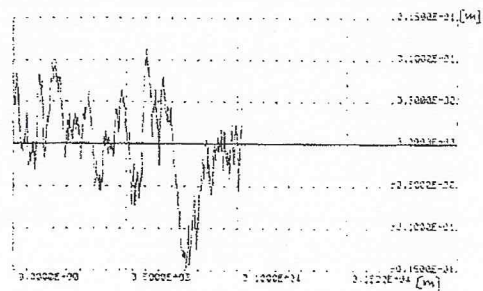
deroga che, nell'ambito degli studi effettuati, sono state condotte indagini di runability. Una prima indagine di inquadramento è stata condotta con un programma di calcolo automatico che effettua l'integrazione numerica delle equazioni del moto dei due sistemi treno-struttura in presenza di irregolarità di posa. L'integrazione viene eseguita separatamente e contemporaneamente, iterando ad ogni passo di integrazione tra i due sistemi attraverso le forze scambiate al contatto sala-binario.

La simulazione effettuata su di un viadotto di sette campate da 30 m ciascuna, con impalcato a sezione mista acciaio-calcestruzzo, percorso da un convoglio tipo ETR500 alla velocità di 80 m/sec (288 Km/h) (Fig.2a), con irregolarità verticali di posa del binario medie secondo la normativa ORE (Fig.2b), ha portato alle seguenti prime conclusioni:

- il valore di picco dell'accelerazione verticale subita dalla prima sala del locomotore di testa è pari a  $32 \text{ m/sec}^2$  ed è dovuta in massima parte all'irregolarità del binario (Fig.2c);
- lo stesso dicasi per l'azione trasmessa dal solo binario (Fig.2d);
- il livello delle accelerazioni in cassa indotte dalla sola deformabilità (valore massimo pari a  $0.11 \text{ m/sec}^2$ ) (Fig.2e) è nettamente inferiore al livello raggiunto in presenza di irregolarità (pari a  $0.505 \text{ m/sec}^2$ ) (Fig.2f);
- il comfort di marcia è stato verificato in base alle norme ISO 2361, il valore R.M.S. è risultato inferiore a  $0.25 \text{ m/sec}^2$ ;
- per il caso in esame i limiti di deformabilità compatibili con il soddisfacimento delle verifiche dinamiche si colloca intorno a 1700 contro il 2500 previsto in norma per 7 campate.



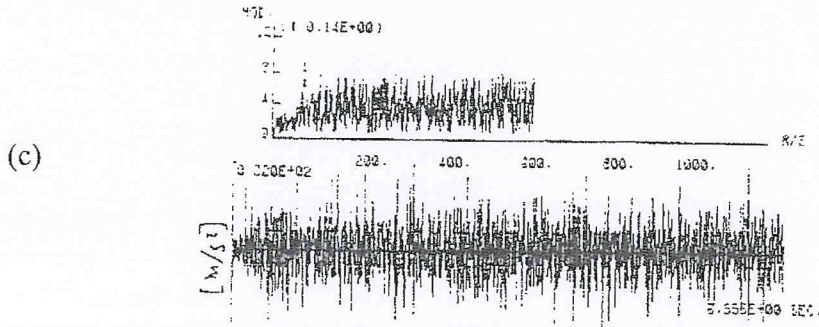
Schema di schematizzazione ad elementi finiti del viadotto proposto.



Profilo dell'irregolarità adottata nella simulazione.



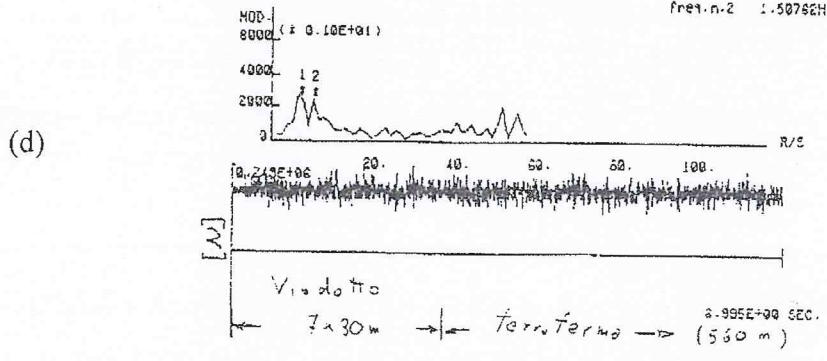
YMAX 01.56328 R.M.S. Y(t)= 1.0347-25  
 FILE TP01.000 Saio N. 1 direzione verticale  
 Accelerazione 4 M 3.10.8815E+01 freq.n.1 10.84552Hz



(c)

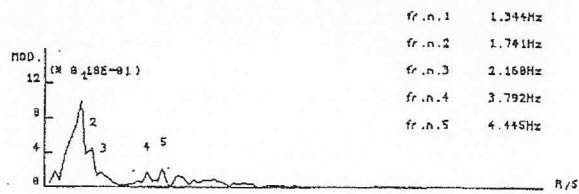
Accelerazione verticale sala anteriore locomotore.

YMAX 248784.0 R.M.S. Y(t)= 10347-25  
 FILE TP01.000 Saio N. 1 direzione verticale  
 Forza verticale 4 M 3.10.8815E+01 freq.n.1 0.89472Hz  
 freq.n.2 1.50762Hz



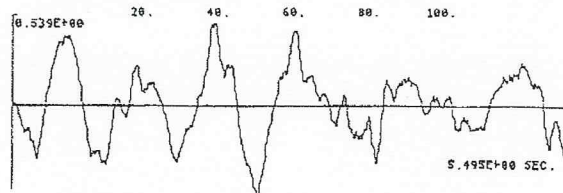
(d)

Forza verticale sala anteriore locomotore.



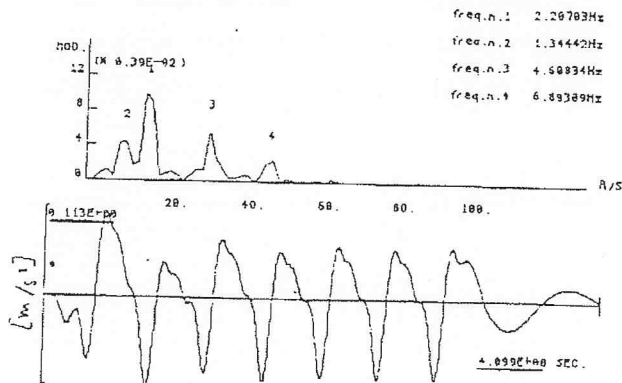
(e)

freq.n.1 1.344Hz  
 freq.n.2 1.741Hz  
 freq.n.3 2.168Hz  
 freq.n.4 3.792Hz  
 freq.n.5 4.445Hz

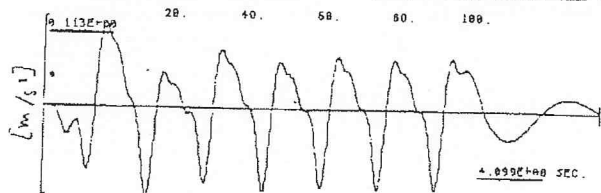


Accelerazione verticale cassa locomotore, con irregolarità.

(f)



freq.n.1 2.26783Hz  
 freq.n.2 1.34442Hz  
 freq.n.3 4.60834Hz  
 freq.n.4 6.89389Hz



4.699E+00 SEC.

### 3. Effetti sismici sulla stabilità del binario

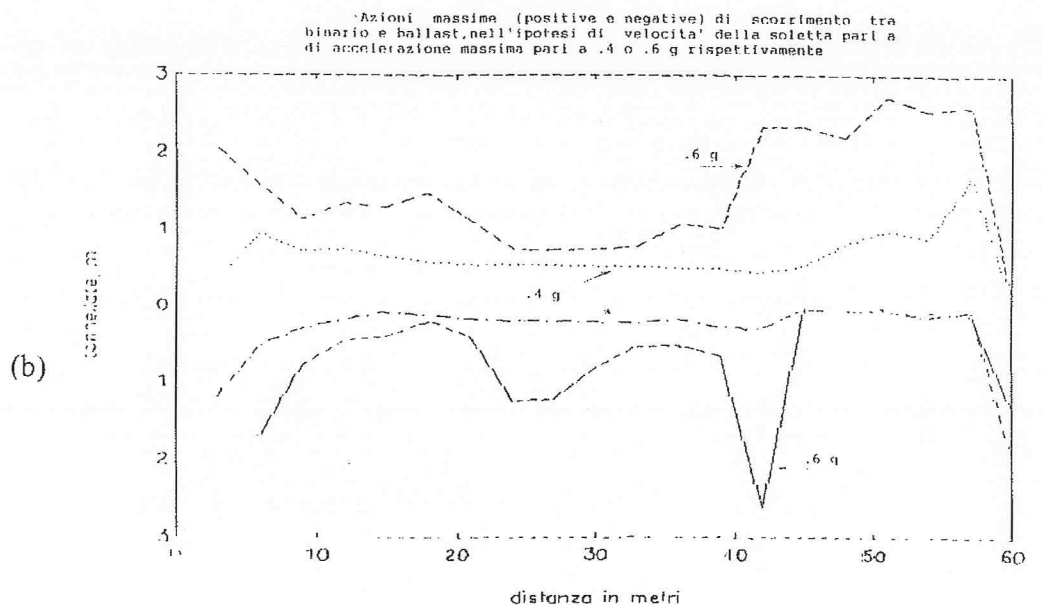
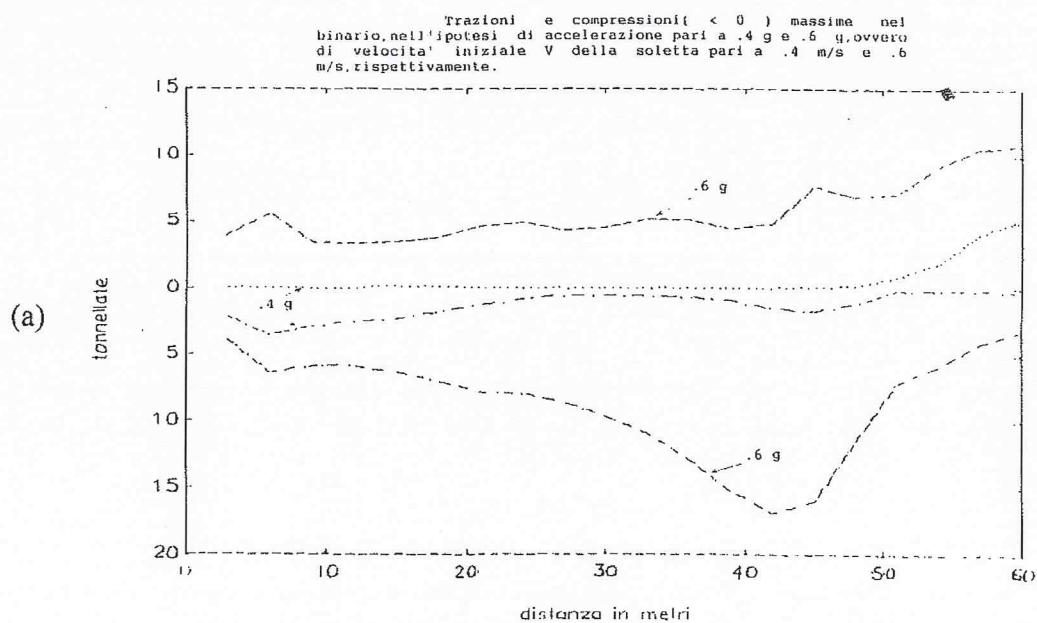
Oltre alle analisi sismiche del complesso strutturale, impalcato-sottostrutture, effettuate per le diverse soluzioni, è stato condotto uno studio preliminare per l'effetto sismico sulla stabilità del binario in viadotto con armamento a traversine su ballast ed impalcato in sistema misto. E' infatti noto che in presenza di sisma si presenta il problema della stabilità del ballast che si configura come un tipico terreno incoerente, sabbia o ghiaia, sia pure con una differente dimensione ed asperità dei grani. Al raggiungimento di un valor critico dell'azione longitudinale  $N$  si produce una mobilitazione di una porzione di ballast rispetto alla porzione sottostante che tende a creare un rigonfiamento localizzato e non reversibile del materiale. Su rilevato ferroviario i valori della massima compressione longitudinale sul ballast in presenza di sisma, rimangono in genere inferiori a quelli critici di mobilitazione o rigonfiamento. Su viadotto invece l'azione longitudinale sul ballast può raggiungere valori molto più elevati fino ai valori critici. I valori delle massime compressioni dipendono da molti fattori tra i quali l'intensità dell'eccitazione sismica, la lunghezza delle campate, l'attrito tra ballast e soletta, la massa strutturale e la rigidità degli apparecchi di appoggio. Perché si possano instaurare importanti compressioni occorre che, nelle condizioni di incipiente scorrimento, gli spostamenti non siano uniformi o che le caratteristiche di attrito soletta-ballast presentino discontinuità, ad esempio per le differenti componenti verticali di accelerazione tra punto e punto. I valori critici di rigonfiamento del ballast sono stati calcolati come resistenza passiva di un terreno incoerente, impedito di deformarsi lateralmente, dotato di attrito interno caratterizzato da un angolo interno  $f$  e di un attrito esterno con angolo rispetto al piano della soletta pari a  $35^\circ$ . Oltre alla resistenza passiva è stata considerata anche l'influenza dell'attrito laterale. Nel prospetto seguente vengono forniti i valori critici così ottenuti in funzione dell'angolo di attrito interni  $f$  del ballast.

*Tabella Resistenza passiva in KN ed attrito laterale in funzione del valore dell'angolo di attrito interno del ballast, per ciascuna soletta.*

$f$ ( $^\circ$ )	resistenza passiva	attrito laterale	resistenza totale
40	138	26	164
45	175	29	204
50	226	33	259
55	301	38	339
60	417	45	462

E' stata condotta un'analisi FEM su un modello piano lineare con codice di calcolo DRAIN 2D. Il modello di calcolo rappresenta separatamente il ballast ed il binario con elementi *truss* e l'attacco binario-ballast e ballast-soletta con elementi *infill panels*. I valori limite assegnati sono:

- attrito soletta-ballast 3.1 t/m
- resistenza a trazione del ballast 0.1 t
- resistenza a compressione 14 t (avendo conteggiato a parte l'attrito)
- resistenza dalla rotaia 50 t
- attrito limite binario-ballast 3.1 t/m.





Nella Fig.3a è riportata la distribuzione delle trazioni/compressioni massime nel binario, cioè nell'insieme delle due rotaie rappresentate nel modello. Trattasi di valori "massimi" ovvero dell'inviluppo delle azioni raggiunte durante il transitorio considerato.

Nella Fig.3b sono indicati sia i valori conseguenti all'ipotesi di accelerazione pari a  $0.4/0.1=4$   $m/sec^2$ , sia quelli corrispondenti all'ipotesi  $0.6/0.1=6$   $m/sec^2$ . Si può quindi osservare che il valore critico è appunto intermedio fra i due valori sopradetti. Infatti mentre per il primo caso le azioni massime nel binario sono attorno a 2÷3 t, nel secondo si raggiungono valori varie volte superiori.

Le verifiche preliminari condotte hanno permesso di constatare che un fattore determinante nel fenomeno è rappresentato dalla massa strutturale dell'impalcato, e che la soluzione mista, data la sua leggerezza, offre un buon comportamento a parità di altre condizioni.

#### 4. Scelte di base

Sulla base degli studi di inquadramento sono state definite alcune scelte fondamentali con riferimento a viadotti di luci comprese fra 25 e 60 m con armamento a traversine su ballast.

L'uso del *sistema misto acciaio-calcestruzzo* in travate a via superiore si presenta in grado di minimizzare i costi soprattutto se si prevede un sistema costruttivo in cui i lavori di carpenteria in officina remota ed in officina di cantiere siano fortemente integrati con i lavori per la costruzione delle sottostrutture e degli accessi. Il montaggio può avvenire, in relazione alle condizioni logistiche, oltre che dal basso con autogru o per autovaro anche mediante carrovaro.

Lo *schema statico* di semplice appoggio, risulta più conveniente quando non esistano ostacoli al suolo e si possano realizzare senza oneri indiretti viadotti su luci ripetitive.

La struttura continua può invece risultare vantaggiosa, mantenendo la lunghezza di espansione in 80 m, con soluzioni a tre o quattro campate in grado di differenziare l'interasse tra le sottostrutture in modo da non interferire con gli eventuali ostacoli al suolo; soluzioni di travate su luci diversificate in semplice appoggio risultano in genere antiestetiche per i bruschi salti nell'altezza di costruzione.

In relazione alla *sezione trasversale*, possono essere previsti impalcati separati per ciascun binario, rimanendo comunque unica la sottostruttura, o un unico impalcato.

Dal punto di vista prettamente statico la scelta non comporta particolari differenze anche se con gli impalcati separati il peso strutturale risulta maggiore per la maggiore incidenza delle anime delle



impalcato: l'impalcato unico per il doppio binario presenta il vantaggio di un più basso affaticamento delle strutture principali a parità di traffico. Per quanto riguarda la conformazione della sezione trasversale, i tipi di sollecitazione in gioco privilegiano soluzioni con sezioni caratterizzate da notevole rigidità torsionale primaria, a cassone chiuso e a travi controventate inferiormente. In Fig.4 vengono riportate alcune delle sezioni studiate.

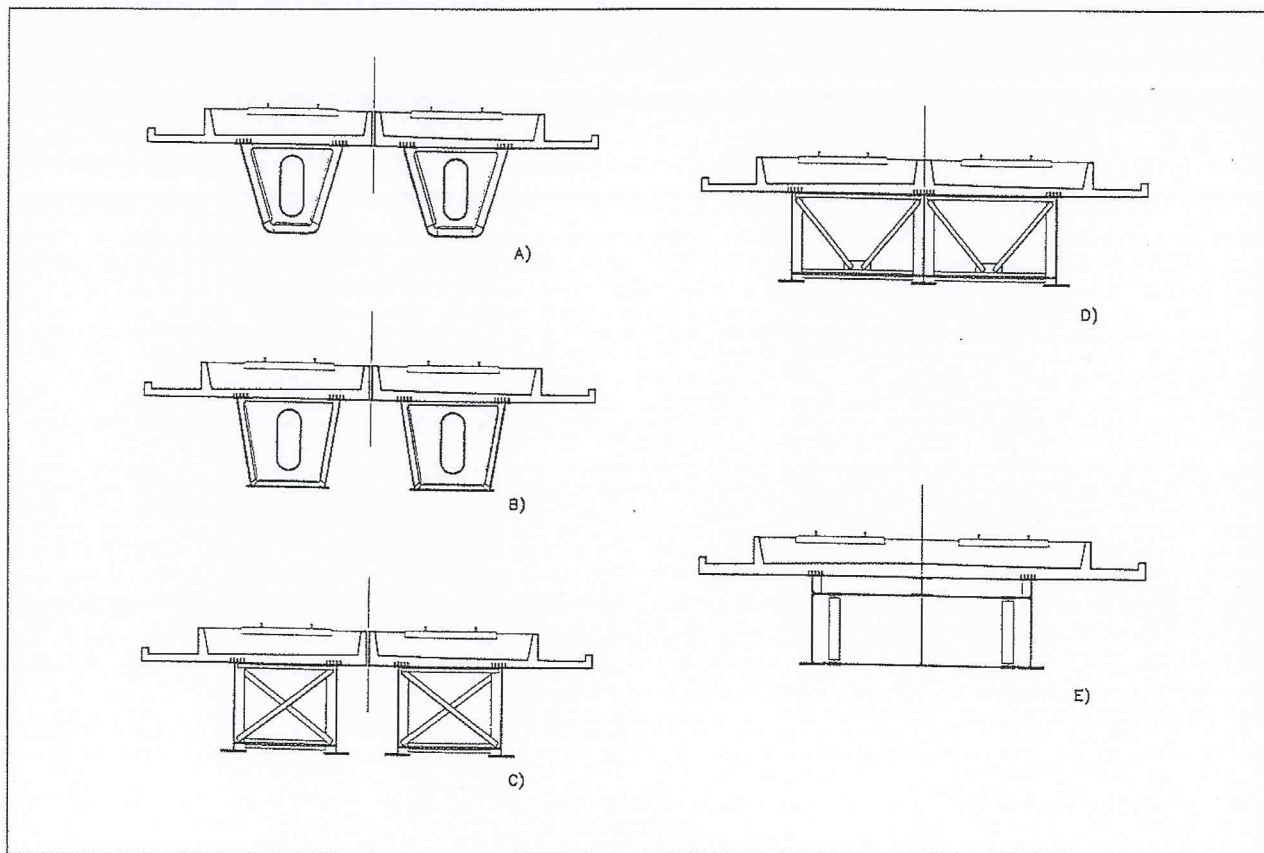


Fig.4

Sezione "A". Si tratta di una tipologia con impalcato separati e struttura metallica a cassone con due lamiere piegate di ugual spessore saldate longitudinalmente al centro. Questa tipologia può essere adottata nel caso di piccole luci e consente una notevole riduzione dei costi di lavorazione legati alla saldatura. L'inconveniente fondamentale è rappresentato dallo spessore dell'anima, che ne impedisce l'estensione a luci superiori a 20 m.

Sezione "B". Questa tipologia ottimizza le caratteristiche inerziali della sezione, utilizzando spessori diversi per piattabande ed anima. L'inclinazione delle anime non presenta particolari problemi se contenuta nel 15% in modo da poter utilizzare saldatrici automatiche.

Sezione "C". Il cassone chiuso, rettangolare o trapezio, descritto nella sezione "B" può essere

I vantaggi che si ottengono sono essenzialmente legati alla maggiore diffusione di lavorazioni automatiche ed alla riduzione di irrigiditori longitudinali. Questa soluzione con anime verticali rappresenta quella costruttivamente più semplice e più usuale nel campo della viabilità.

Sezione "D". Nel caso di adottare sezioni trasversali con piattaforma unica la disposizione di tre travi ad anima verticale realizza la maggiore economia in termini di costo di trasformazione. Parimenti la riduzione del numero delle anime porta ad una sensibile riduzione del peso di acciaio impiegato con piccole penalizzazioni in termini di grandezze inerziali.

Sezione "E". In alternativa alle tre travi può essere considerata la sezione con la trave di spina centrale e traverso ad anima piena. Questa soluzione consente un minor numero di appoggi e un maggior sfruttamento del traverso impegnato sia nella conservazione della forma della sezione che nel sostentamento della trave di spina centrale.

## 5. Ottimizzazione strutturale

E' stata effettuata un'indagine preliminare per definire, con riferimento alle situazioni prima riportate, le luci ottimali di un sistema misto acciaio calcestruzzo tenendo conto globalmente dei costi di impalcato e delle sottostrutture. E' stata anche stimata l'influenza dei limiti di deformabilità sui costi. Per l'analisi è stato fatto riferimento a soluzioni con impalcato indipendente con piano del ferro a 12 m rispetto al piano della fondazione costituita da plinti su pali. Per il dimensionamento delle fondazioni è stato fatto riferimento a situazioni tipiche richiedenti pali spinti alla profondità di 35 m. I minimi del costo totale si ottengono per luci intorno ai 25 m.

Il costo delle sottostrutture risulta decrescente con la luce. La sezione mista è stata studiata assumendo un rapporto luce-altezza pari a 9. I risultati dell'analisi sono riportati nel grafico di Fig. 5a.

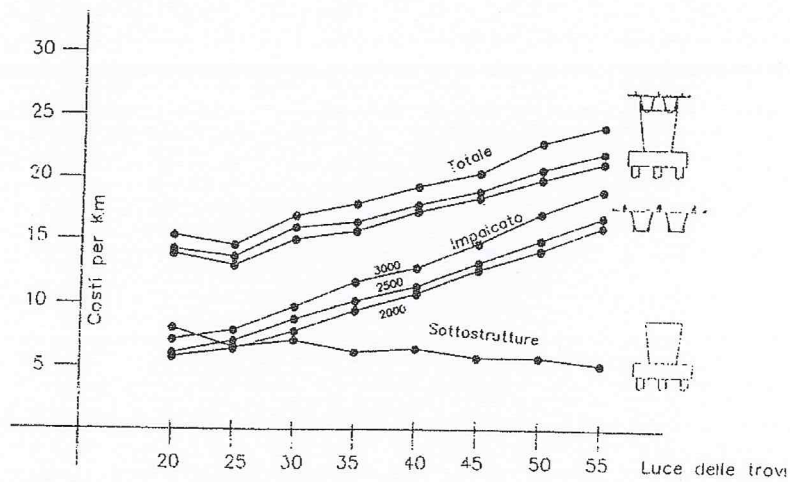
E' stato successivamente effettuato uno studio di ottimizzazione strutturale facendo variare anche il rapporto luce-altezza assumendo come funzione obiettivo il minimo costo complessivo dell'impalcato, travata metallica più soletta. L'ottimizzazione è stata condotta con programmazione non lineare facendo uso di calcolo automatico. Le funzioni di vincolo sono costituite da vincoli di tipo dimensionale quali dimensioni massime per il trasporto, spessori limite, rapporti limite larghezza



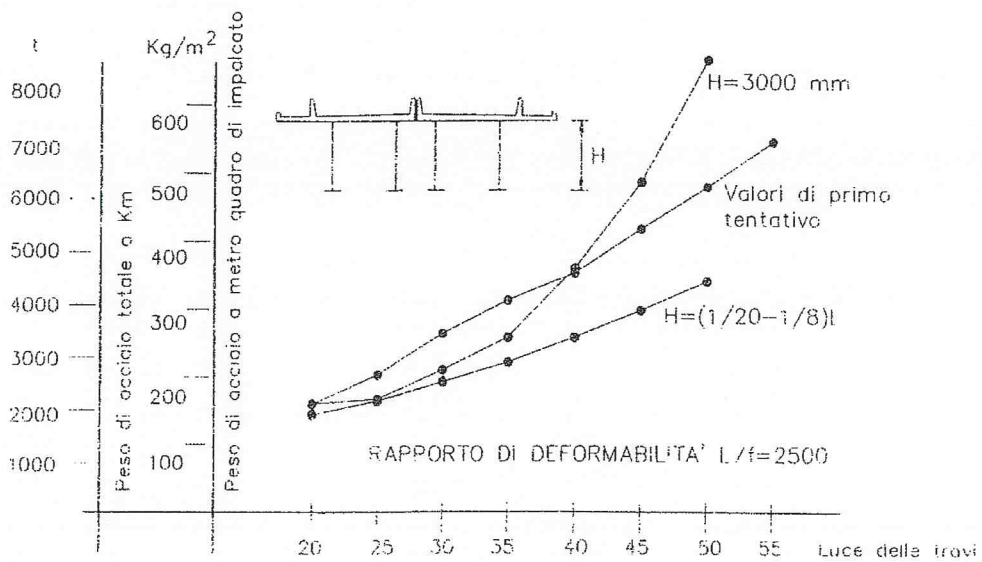
fatica e di deformabilità. Lo studio è stato parametrizzato in funzione della luce e del limite di deformabilità in termini di rapporto luce-freccia.

Nella Fig.5b è riportata la sezione presa a riferimento nello studio; nel diagramma è riportato l'andamento dei costi minimi in funzione della luce e del limite di deformabilità.

(a)



(b)



## 6. Confronto tra soluzioni in sistema misto e soluzioni in c.a.p.

E' stata effettuata un'analisi comparativa tra soluzioni in sistema misto e soluzioni in c.a.p. in relazione ai diversi aspetti e con particolare riguardo all'impatto ambientale ed ai costi.

In relazione all'impatto ambientale la soluzione in sistema misto si presenta vantaggiosa per i seguenti motivi:

- estrema versatilità nella modulazione delle luci laddove ciò sia richiesto da particolari esigenze, il che nel nostro Paese è poi la regola, e cioè da vincoli territoriali, quali l'attraversamento di esistenti infrastrutture, aree archeologiche, fasce ripariali dei fiumi, insediamenti residenziali; infatti in queste situazioni fiumi, strade, edifici, reperti archeologici etc. vengono "saltati", evitando sia i problemi connessi agli iter amministrativi con gli Enti interessati, sia i problemi tecnici ed economici che inevitabilmente si originano, come ad esempio quelli connessi alla manutenzione delle pile in alveo.
- sensibile riduzione dei quantitativi dei materiali da approvvigionare da cave sul territorio, stimata in circa il 20%, con conseguente attenuazione del problema dello sfruttamento e dell'apertura delle cave, sempre meno disponibili sul territorio; e quindi anche sensibile riduzione del traffico indotto sulle strade della normale rete viaria.
- notevole contenimento degli impatti in fase di costruzione determinati dalla formazione delle aree e delle piste di cantiere, che risultano meno invasive per essere i manufatti da trasportare e sollevare più leggeri e quindi bisognosi di mezzi meno pesanti e meno ingombranti.
- riduzione dei trasporti speciali che devono transitare sulla normale rete viaria, per le stesse ragioni di cui sopra, con evidenti vantaggi per il traffico.
- maggiore rapidità di esecuzione, con sicurezza dei tempi di realizzazione in officina e svincolo dalle incertezze che derivano dai problemi logistici di cantiere.
- equilibrio nella ripartizione della forza lavoro. La soluzione a struttura mista dà la possibilità di eseguire i lavori di prefabbricazione in officine anche molto lontane dal cantiere, molto più lontane di quanto economicamente si può ottenere con il c.a.p., a causa della differenza dei pesi da trasportare e quindi dei relativi costi. Questa prerogativa evita problemi sociali dovuti all'improvviso venir meno dell'impiego per la manodopera locale, provocata dal termine dei



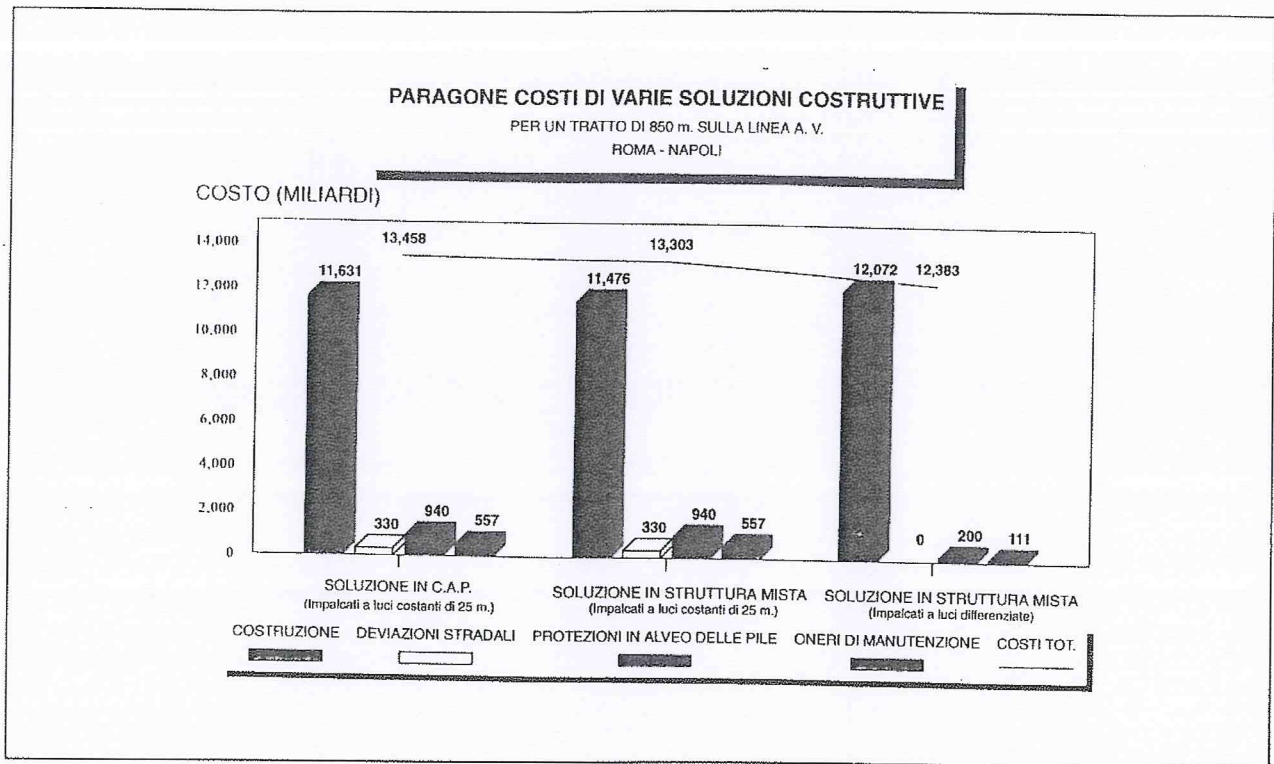


Fig. 6

Per quanto riguarda il confronto economico condotto con riferimento a viadotti di luce 25 m, quale luce tipica, questo evidenzia un lieve vantaggio delle soluzioni in c.a.p., rispetto alle soluzioni miste, se si effettua un confronto diretto dei costi dei viadotti tipo (Fig.6).

Tuttavia la maggior flessibilità delle soluzioni in acciaio nei confronti della diversificazione delle luci può spesso costituire elemento determinante per la convenienza del sistema misto quando il confronto non si limiti ai soli costi diretti di costruzione come può dedursi dal prospetto ottenuto esaminando una tratta A.V. della linea Roma-Napoli.