

SOLUZIONI INNOVATIVE PER L'ADEGUAMENTO E LA PROGETTAZIONE DI PONTI

T.Zordan^{*}, B.Briseghella^{*}, E.Siviero^{*}

^{*} Università IUAV di Venezia
Dipartimento Costruzione dell'Architettura
Ex Convento delle Terese
Dorsoduro 2206, I-30121 Venezia
e-mail: zordan@iuav.it

Sommario. *Nell'articolo presentato di seguito verranno brevemente descritti alcuni casi studio volti alla realizzazione di ponti e viadotti a carattere non convenzionale rispetto alla pratica corrente.*

Si tratta di casi in cui recenti esperienze di ricerca vengono implementate in soluzioni che, pertanto e per certi versi, possono essere considerate "sperimentali".

Il problema attualissimo che vede impegnata la gran parte degli Enti gestori di reti stradali è quello della gestione e della manutenzione. L'adeguamento funzionale di opere esistenti e la ricerca volta alla progettazione e realizzazione opere a "manutenzione zero" appaiono oggi come temi cruciali e in cui l'apporto della Ricerca Scientifica può risultare determinante.

1 INTRODUZIONE

La richiesta di realizzare opere la cui gestione sia virtualmente priva di oneri non programmati e di imprevisti sta recentemente divenendo sempre più pressante da parte di Enti gestori e committenza.

E' altresì noto come la performance temporale di un manufatto non dipenda unicamente dalla tenuta nel tempo dei singoli materiali da costruzione, ma anche dal loro reciproco accoppiamento, da una corretta concezione e realizzazione dei dettagli costruttivi e non ultimo da stati tensionali e deformativi, e quindi indirettamente da schemi statici, in grado di sfruttare al meglio i vincoli progettuali e condizioni al contorno.

Si può ipotizzare che un ponte o un viadotto che si possano definire moderni nel senso più ampio del termine vedano capovolta la scala delle priorità e degli obiettivi chiave di progetto mettendo al primo posto non tanto la scelta dei materiali da costruzione (peraltro di fondamentale importanza) quanto una concezione tipologica e strutturale capace di sfruttare al meglio i materiali impiegati.

Un'ipotetica classifica degli step di progetto in ordine di importanza, con tutti i limiti che una drastica semplificazione di un problema estremamente articolato e complesso come questo comporta, potrebbe allora, secondo quanto detto, essere così stilata:

- "conceptual design" o concezione strutturale globale;
- scelta dei materiali e delle tecnologie;
- ideazione del dettaglio costruttivo.

Ciascuna di queste fasi va chiaramente supportata da un punto di vista della calcolazione con modelli sia globali che locali e in riferimento allo schema di montaggio previsto che, come noto, risulta spesso essere dimensionante.

Nel seguito verranno presentate tre diverse esperienze di progetto, ritenute significative dagli autori per differenti ragioni, ma il cui filone comune è rappresentato dalla durabilità.

Nel primo caso è presentato un viadotto sull'autostrada in corrispondenza del nuovo casello di Trento sud. L'opera, realizzata in struttura mista, costituisce quello che in letteratura viene definito come un ponte integrale: appoggi e giunti sono eliminati; il collegamento tra spalle e sovrastruttura avviene in modo diretto e all'ingresso del ponte è prevista una soletta di transizione per evitare nel tempo dannosi battimenti. Parti cave della struttura metallica sono riempite in calcestruzzo per ragioni non solamente strutturali ma anche al fine di accrescere la performance del manufatto nel tempo.

Il secondo caso riguarda uno studio per un'opera tipo, con caratteristiche quindi ripetibili. La possibilità che la struttura sia costruita in zona sismica ha portato alla concezione delle spalle secondo i criteri del "capacity design" con l'introduzione di elementi deboli da sacrificare nel caso di evento sismico, la cui sostituzione sia facilmente attuabile. Un sistema stabile di tiranti regolabili è stato introdotto per imprimere delle coazioni all'impalcato durante le fasi di montaggio e per limitare gli effetti introdotti in esercizio da eventuali cedimenti fondazionali.

L'ultimo caso, l'unico che descriva l'intervento su un'opera già esistente, prevede la trasformazione di un impalcato a travi precomprese prefabbricate in semplice appoggio in un impalcato continuo con l'eliminazione della quasi totalità di giunti e appoggi.

2 UN ESEMPIO DI PONTE INTEGRALE

Il viadotto sull'autostrada del Brennero, in corrispondenza del previsto nuovo casello di Trento sud rappresenta un esempio di ponte integrale, secondo quanto anticipato in precedenza .

La struttura è organizzata secondo uno schema statico ad arco-telaio (fig.1). L'impalcato è realizzato in struttura mista acciaio-calcestruzzo con travi parallele a sezione aperta collegate (fig.2), con collegamento a completo ripristino di resistenza con una soletta gettata in opera.

Gli archi metallici, a sezione scatolare cava, sono riempiti in calcestruzzo (fig.2).

Le caratteristiche geometriche e generali dell'opera sono elencate di seguito (tab.1).

LUNGHEZZA TOTALE:	60 M	
SCHEMA STATICO:	ARCO TELAIO	
NUMERO CAMPATE:	3	
NUMERO TRAVI PER CAMPATA:	6	
LUNGHEZZA CAMPATE DI RIVA:	19,22 M	
LUNGHEZZA CAMPATA CENTRALE:	19 M	
LARGHEZZA IMPALCATO:	11,1 M	
ALTEZZA TRAVI (SEZ. TRASV.):	VAR.	MIN: 650MM MAX: 1130MM

Tabella 1 : Caratteristiche generali dell'opera

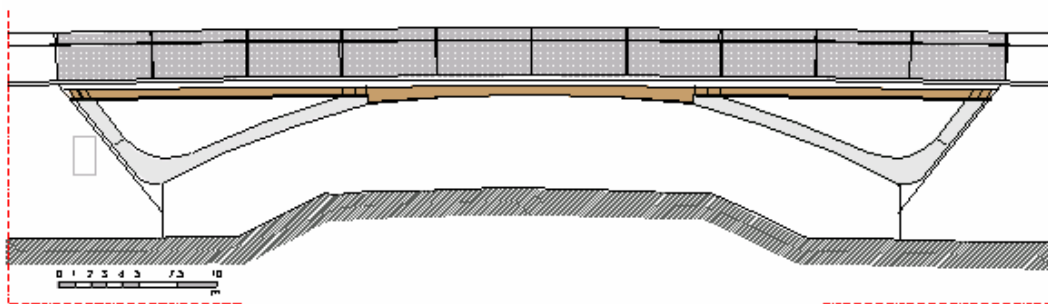


Figura 1: Profilo laterale

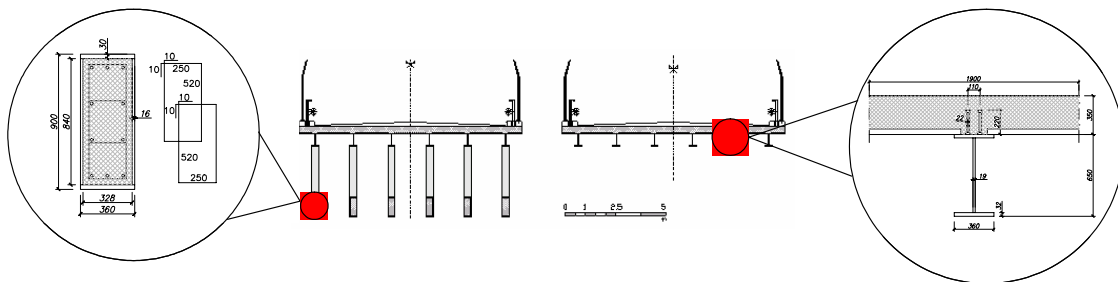


Figura 2: Sezioni trasversali e particolari degli archi metallici e dell'impalcato

Per ciò che riguarda la risposta strutturale a livello globale, lo schema ad arco-telaio viene realizzato incastrando gli archi all'impalcato e trasferendo la spinta all'imposta degli stessi in parte alle spalle in modo diretto e in parte all'impalcato attraverso la presenza dei puntone diagonali di collegamento proprio in corrispondenza delle spalle tra la base degli archi e l'impalcato. Lo schema ipotizzato (fig.3) dipende fortemente dall'interazione terreno-fondazioni, nell'ipotesi di spalle rigide.

In corrispondenza delle spalle è previsto un sistema di ritesatura dell'impalcato (fig.3) per mezzo di barre regolabili per far fronte ad eventuali cedimenti differenziali non previsti. L'operazione può essere effettuata da un corridoio di ispezione.

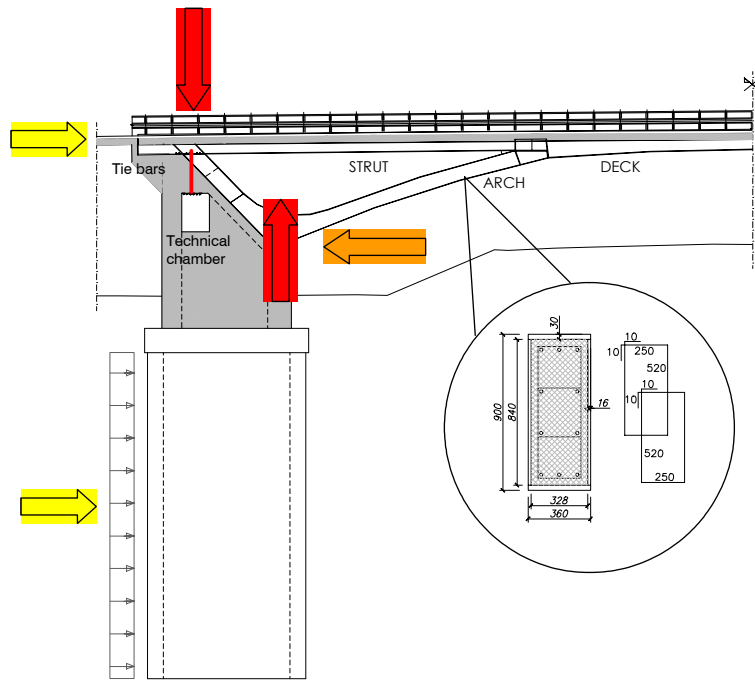


Figura 3: Schema di funzionamento strutturale del ponte

Le caratteristiche salienti dell'opera ai fini della durabilità, come citato nell'introduzione, possono essere riassunte come di seguito.

A) Eliminazione dei giunti

L'eliminazione dei giunti all'ingresso del ponte, consente un maggiore comfort di marcia unito a maggiori prerogative di durabilità complessive (fig. 4). Lo schema adottato è riportato in figura 5 e prevede il collegamento alle spalle di una soletta armata gettata su un terreno appositamente trattato e in grado di scorrere seguendo le dilatazioni e contrazioni delle spalle.

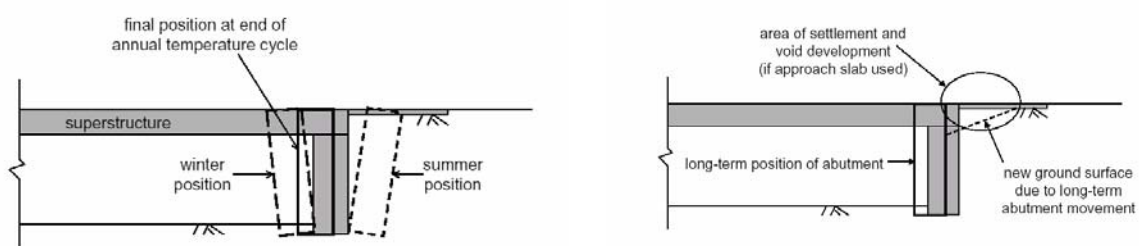


Figura 4: I cicli di carico dovuti alle dilatazioni termiche provocano assestamenti del terreno a ridosso delle spalle

B) Eliminazione degli appoggi;

L'eliminazione degli appoggi consente una gestione facilitata del manufatto durante la sua vita utile di progetto. Infatti, in misura ancora maggiore rispetto ai giunti, la sostituzione degli appoggi comporta operazioni delicate e costose che necessitano il sollevamento dell'impalcato e il restringimento della carreggiata con conseguenti evidenti disagi per gli utenti.

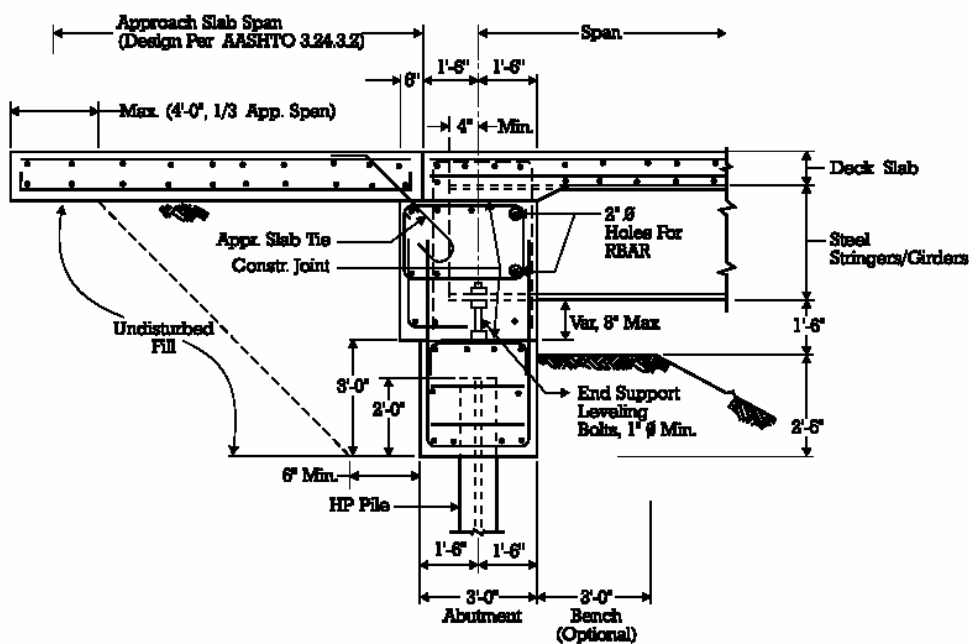


Figura 5: Esempio di dettaglio costruttivo di una soletta di transizione

C) Iniezione dei profili metallici degli archi con calcestruzzo;

Il riempimento della sezione metallica cava degli archi con un getto di calcestruzzo viene fatta per ragioni strutturali e di durabilità.

Oltre ad originare un aumento di resistenza della sezione, il calcestruzzo possiede maggiori caratteristiche di duttilità proprio grazie all'effetto di sconfinamento esercitato dall'incamiciatura metallica. Il trasferimento degli sforzi dall'acciaio al calcestruzzo è ottenuto totalmente per attrito, in assenza di collegamenti meccanici. La zona di trasferimento degli sforzi è localizzata in circa metà del diametro o della dimensione caratteristica minore della sezione trasversale (fig.6).

La resistenza plastica di progetto della sezione trasversale in questo modo risente dei contributi dell'acciaio, del calcestruzzo e dell'armatura:

$$N_{pl,Rd} = \underbrace{A_a \frac{f_y}{\gamma_{Ma}}}_{\text{Acciaio}} + \underbrace{A_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c}}_{\text{Calcestruzzo}} + \underbrace{A_s \frac{f_{sk}}{\gamma_s}}_{\text{Armatura}} \quad \begin{array}{l} \gamma_c = 1.6 \\ \gamma_a = 1.1 \\ \gamma_s = 1.15 \end{array} \quad (1)$$

La risposta strutturale sotto i carichi di progetto è stata studiata sia con modelli agli elementi finiti sia globali che locali (fig.7).

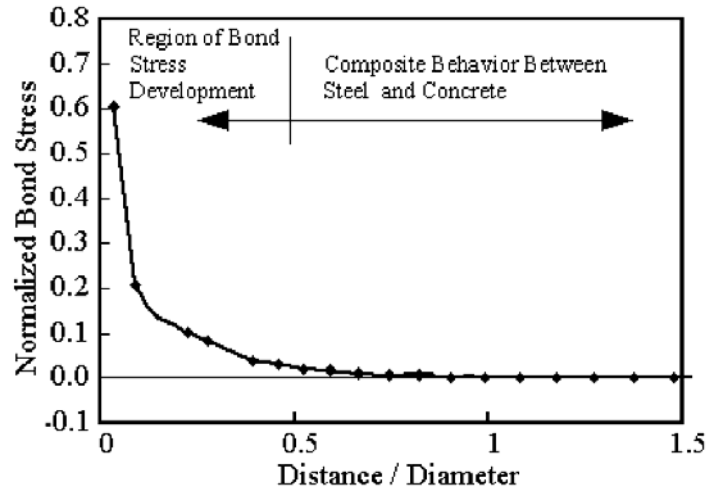


Figura 6: Zona di trasferimento degli sforzi per attrito tra un profilo metallico cavo e il calcestruzzo di riempimento

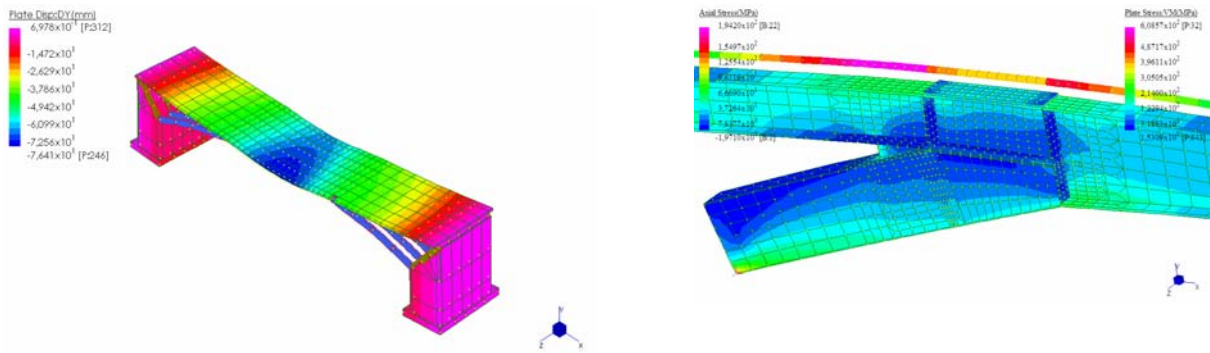


Figura 7: Modello agli elementi finiti del ponte ed esempio di modello locale il corrispondenza della connessione tra gli archi e l'impalcato



Figura 8: Fotoinserimento

3 UN ESEMPIO DI VIADOTTO TIPO

La concezione di un'opera tipo prevede, per definizione, la sua potenziale realizzazione anche in contesti con caratteristiche sostanzialmente differenti. Per questa ragione particolare attenzione è stata rivolta alla progettazione di una struttura il più versatile possibile sia da un punto di vista strutturale che formale.

In tabella 2 sono riportate le caratteristiche generali dell'opera.

LUNGHEZZA TOTALE:	41,8 M
SCHEMA STATICO:	TRAVE CONTINUA
NUMERO CAMPATE:	3
NUMERO TRAVI PER CAMPATA:	4
LUNGHEZZA CAMPATE DI RIVA:	3,6 M
LUNGHEZZA CAMPATA CENTRALE:	34,6 M
LARGHEZZA IMPALCATO:	12,4 M
ALTEZZA TRAVI (SEZ. TRASV.):	VAR. MIN:1050MM MAX:2350MM

Tabella 2 : Caratteristiche generali dell'opera

La recente classificazione dell'intero suolo Nazionale come zona sismica ha posto l'accento sulla necessità di creare una struttura con prerogative antisismiche. Il tema è stato affrontato secondo i criteri del "capacity design" espressi dall'Eurocodice 8 e ripresi dall'Ordinanza 3274 con la "gerarchia delle resistenze".

L'impalcato, in struttura mista acciaio-calcestruzzo con travi metalliche a sezione variabile disposte parallelamente (fig.9), poggia allora non direttamente su una struttura di fondazione in c.a. ma bensì su un telaio metallico controventante (fig.10) con elementi sacrificali facilmente sostituibili e in grado di localizzare la plasticizzazione e quindi il danno in sezioni ben definite.

Il sistema descritto è completamente ispezionabile grazie alla presenza di una cameretta tecnica.

In corrispondenza delle spalle è inoltre prevista la realizzazione di un incastro cedevole per mezzo di un sistema di tiranti regolabili (fig.10). Tale sistema, in grado di fornire coazioni all'impalcato durante le fasi transitorie per sfruttare al meglio la resistenza dei materiali nelle diverse sezioni trasversali, risulta anche utile qualora si verificano cedimenti differenziali nelle fondazioni.

Anche per il caso in esame, come per quello precedente, sono stati eliminati i giunti e gli appoggi al fine di aumentare le caratteristiche complessive di durabilità limitando gli interventi di manutenzione.

L'estetica del manufatto è basata su un disegno estremamente "pulito" e accurato, con linee tese e semplici facilmente collocabili in contesti diversi (fig.11). Una fibra ottica, posta in corrispondenza dell'intradosso dei profili metallici, sottolinea il carattere sinuoso del profilo laterale nelle ore notturne (fig.12).

La risposta strutturale sotto i carichi di progetto è stata studiata con modelli agli elementi finiti (fig.13).

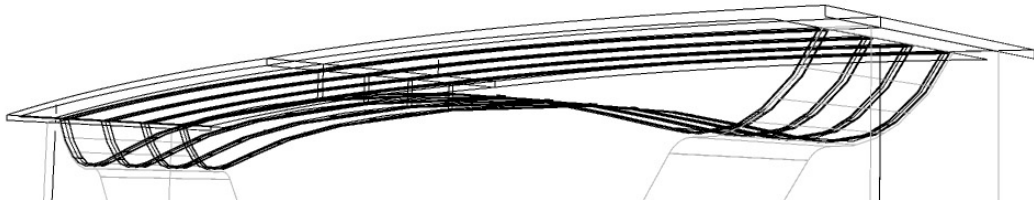


Figura 9: Schema dell'impalcato

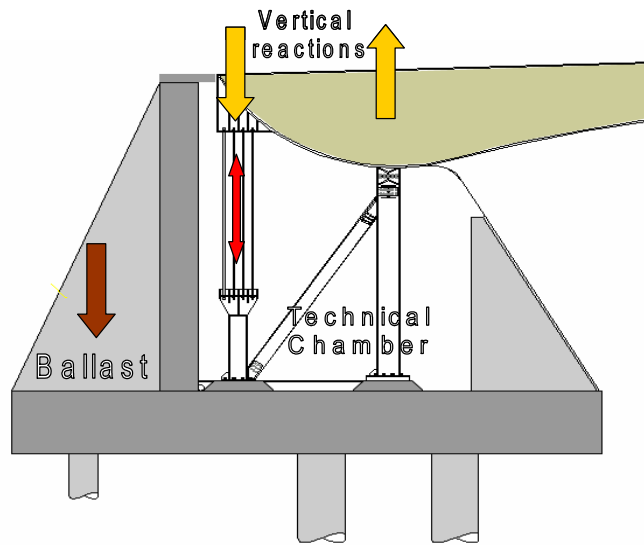


Figura 10: Schema dell'impalcato

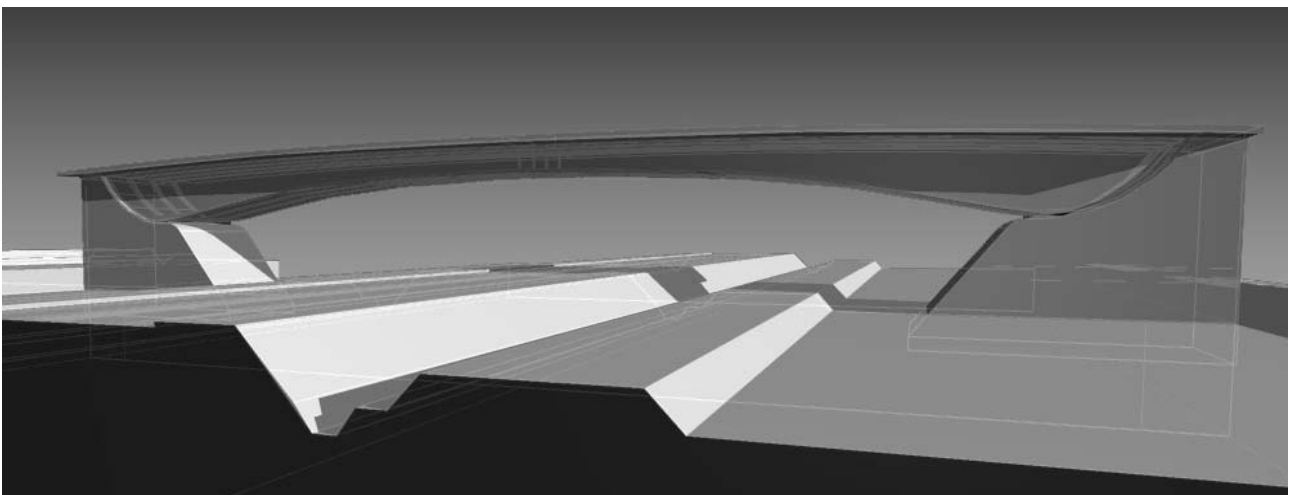


Figura 11: Renderizzazione del viadotto

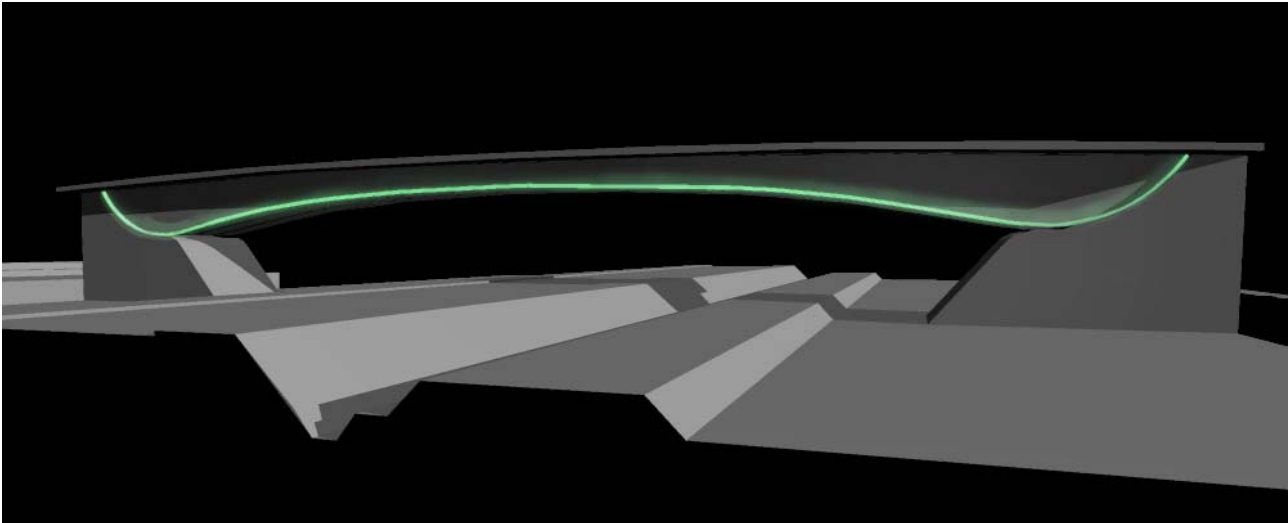


Figura 12: Vista notturna con l'illuminazione a fibre ottiche

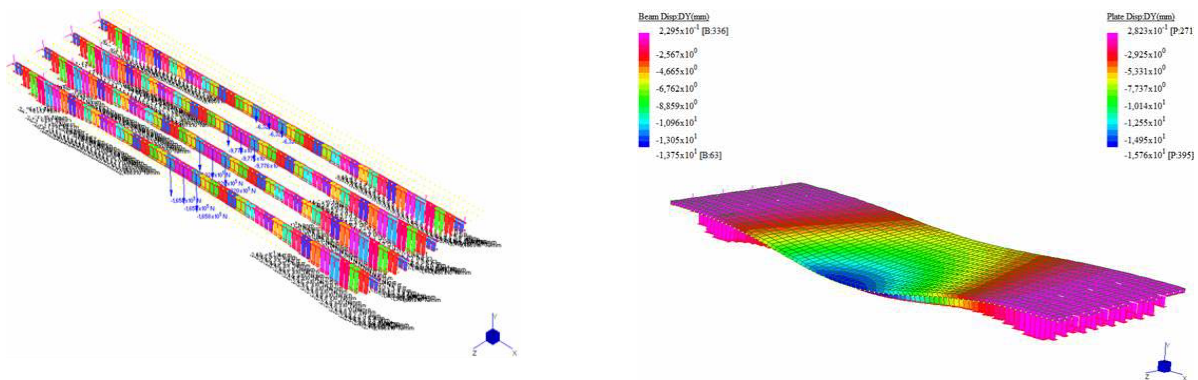


Figura 13: Modellazione agli elementi finiti

4 UN ESEMPIO DI ADEGUAMENTO FUNZIONALE

L'esempio di seguito illustrato descrive l'intervento di adeguamento funzionale su un viadotto a travi prefabbricate precomprese in semplice appoggio, tipologia in uso in Italia dal dopoguerra ad oggi senza sostanziali cambiamenti. Il caso in esame riguarda un viadotto esistente, ad Isola della Scala (VR), per il quale si è prevista una variazione dello schema statico al fine di giungere ad una soluzione continua. Le caratteristiche generali dell'opera sono riportate in tabella 3.

LUNGHEZZA TOTALE:	401 M
SCHEMA STATICO:	TELAI SU 3 O 4 CAMPATE
NUMERO CAMPATE:	13
NUMERO TRAVI PER CAMPATA:	6
LUNGHEZZA CAMPATE DI RIVA:	29,9 M
LUNGHEZZA CAMPATE CENTRALI:	31 M
LARGHEZZA IMPALCATO:	13,5 M
ALTEZZA TRAVI (SEZ. TRASV.):	150+20-30 CM

Tabella 3 : Caratteristiche generali dell'opera

Il passaggio da uno schema statico di impalcato a travi in semplice appoggio a quello di impalcato continuo su n appoggi ha consentito, ancora una volta, l'eliminazione di un consistente numero di appoggi e giunti a vantaggio della durabilità e dei costi di manutenzione.

Nel caso in esame, si è intervenuti su un'opera parzialmente costruita che vedeva porzioni di impalcato già realizzate assieme alla totalità delle pile, dei pulvini e delle spalle. L'eliminazione degli appoggi non prevede la loro rimozione fisica con il conseguente sollevamento delle travi bensì la loro inertizzazione a seguito del conglobamento all'interno di un nuovo getto in c.a..

La variazione di schema statico proposta è evidenziata in figura 14.

Per quanto riguarda le fasi costruttive dell'intervento proposto, si prevede la realizzazione di nuovi traversi in corrispondenza delle pile, il collegamento a taglio tra le travi prefabbricate e i nuovi traversi con l'inserimento di connettori a piolo e successivo getto di completamento, il collegamento tra i traversi e i pulvini con l'inserimento di profili metallici in grado di trasferire alle pile le forze normali derivanti dalle variazioni termiche e il potenziamento dell'armatura in soletta per il trasferimento dei momenti flettenti negativi in corrispondenza degli appoggi.

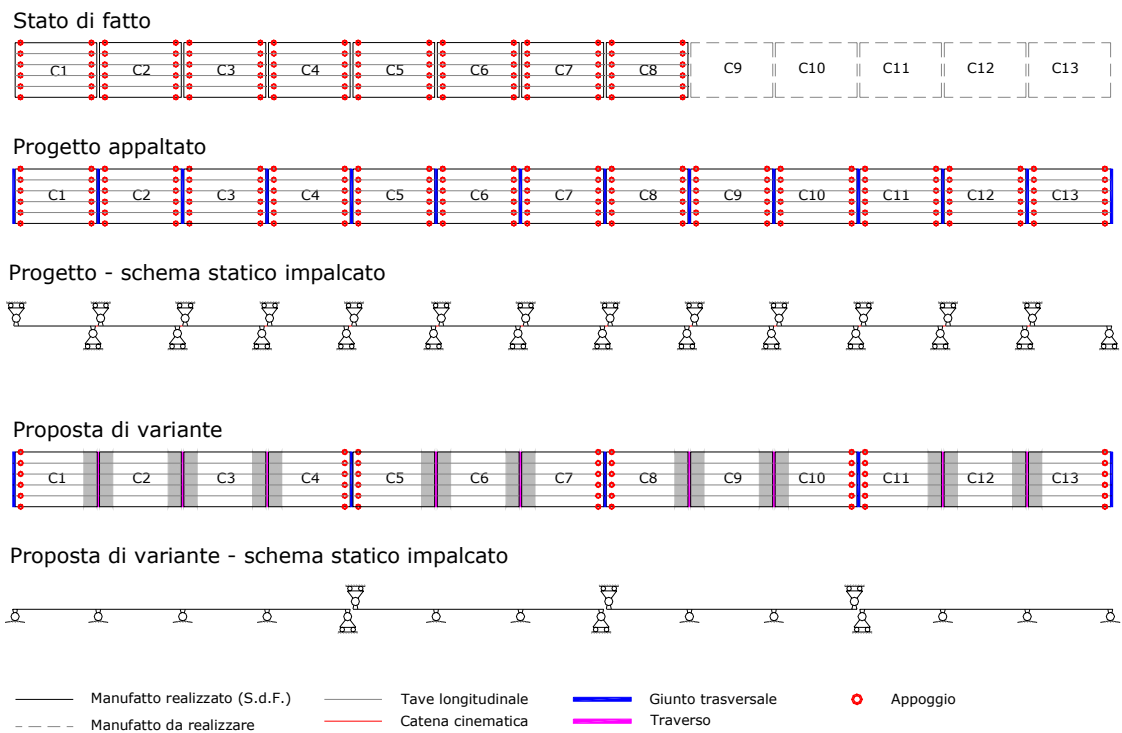


Fig.14: Variazione di schema statico di progetto

Le sequenze realizzative dell'intervento descritto sono evidenziate in figura 15.

L'analisi strutturale ha messo in luce la bontà dell'idea iniziale e la sua realizzabilità all'interno del budget previsto. Un aumento dei costi totali dell'opera di circa il 20% è stato ritenuto accettabile in virtù di futuri potenziali risparmi in costi di gestione.

La forma tozza delle pile (fig.17), con conseguente elevata rigidità, ha richiesto particolare attenzione in fase di fase di modellazione nella ricerca delle effettive sollecitazioni trasmesse dall'impalcato alle fondazioni.

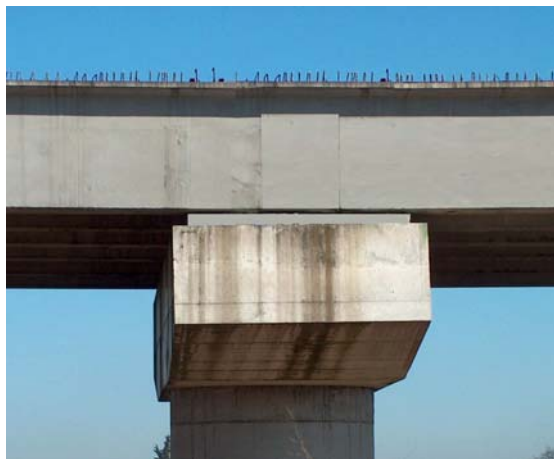
La risposta strutturale è stata studiata con modelli agli elementi finiti (fig.16).



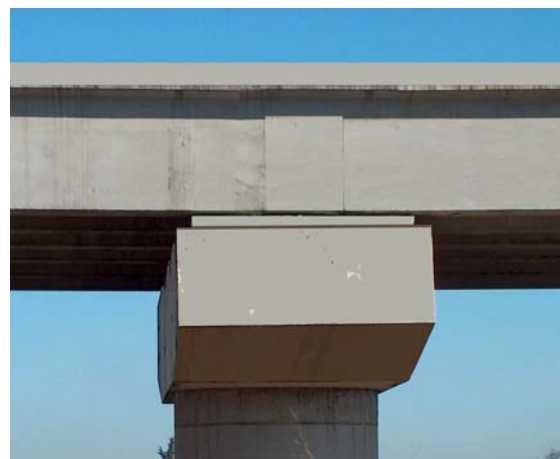
Fase 1: Preparazione inghisaggi traverso all'estradosso pulvino e infissione connettori all'interno delle travi



Fase 2: Getto baggiolo con appoggi inglobati e zona infissione connettori cls-cls evidenziata



Fase 3: Getto traverso



Fase 4: Getto della soletta

Fig.15: Fasi realizzative

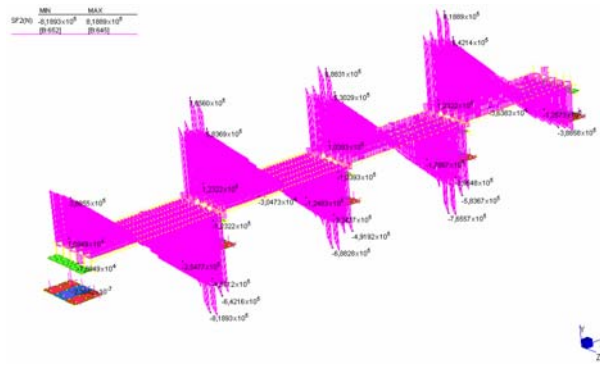
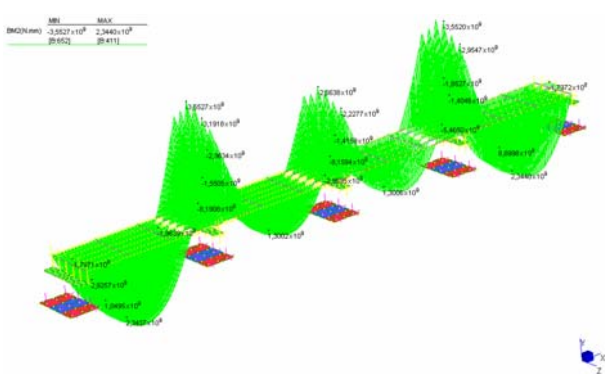


Fig.16: Modellazione strutturale FEM dell'impalcato continuo: massimi diagrammi M_f e T su 4 campate



Fig. 17: Renderizzazione dell'impalcato ad intervento ultimato

5 CONCLUSIONI

Nell'articolo presentato si sono esaminati in estrema sintesi tre casi studio per tre opere con caratteristiche differenti ma accomunati da una ricerca attenta finalizzata alla minimizzazione dei costi di gestione.

Da quanto emerso si deduce che, a fronte di un incremento nei costi di costruzione di circa il 20%, è possibile realizzare opere con elevati standard in termini di durabilità ed accresciuta rigidità strutturale in grado di ripagare nel tempo il maggior investimento iniziale con costi di gestione più bassi.

Le soluzioni proposte si collocano in un contesto che vede l'applicazione di risultati forniti recentemente dal mondo della Ricerca.

In questo campo la sinergia tra Università e Professione è in grado di fornire risultati concreti per l'adeguamento del patrimonio esistente e l'effettivo miglioramento di quello futuro.

E' convinzione degli autori che opere a carattere innovativo o comunque non convenzionale sotto un profilo tecnico non possano sposare canoni formali convenzionali ma, al contrario, debbano sottolineare i contenuti innovativi con una ricerca estetico-formale altrettanto efficace collocandosi a pieno titolo nell'ambito dell'Architettura Strutturale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] BA 42/96 Amendment No. 1 – *The Design of Integral Bridges* – Design manual for roads and Bridges, 2003
- [2] B. Briseghella, E. Siviero, T. Zordan – *A new integral bridge in southern Trento, Italy*, Beton und Stahl Beton Bau, 2004. (accepted)

- [3] B. Briseghella, T. Zordan – *Adjustable deck solutions for Veneto Strade flyovers* – Proc. IABSE Symposium Towards Metropolitan Habitats and Infrastructure, Shanghai, China, Sept. 2004. Paper n. 116.
- [4] B. Briseghella, E. Siviero, T. Zordan – *An integral composite bridge in Trento, Italy: Design and Analysis* – Proc. IABSE Symposium Towards Metropolitan Habitats and Infrastructure, Shanghai, China, Sept. 2004. Paper n. 117
- [5] M.P. Jr. Burke – *The design of integral concrete bridges*, Concrete International – Vol. 15, June - pp. 37-42, 1993
- [6] M.P. Jr. Burke – *An introduction to the design and construction of integral bridges* – Workshop on Integral abutment bridges, November 13-15, 1996, Pittsburgh, PA, pp. 64, 1996
- [7] England G L, Tsang N C M and Bush D I., *Integral Bridges – A fundamental approach to the time temperature loading problem*. Thomas Telford, 2000.
- [8] J. S. Horvath – *Integral Abutment Bridges: Problems and Innovative Solutions Using EPS Geofam and Other Geosynthetics* – Manhattan College Research Report No. CE/GE-00-2, 2000
- [9] G. Huber – *Semi-continuous beam-to-column joints at the Millennium Tower in Vienna, Austria* – International AISC/ECCS Workshop on Connections in Steel Structures IV, Roanoke Virginia, 2000
- [10] M. Pecce, G. Fabbrocino, E. Cosenza – *Le colonne e i telai composti: tecnologia e metodi di analisi* – Strutture Composte nelle Nuove Costruzioni, nel Recupero e nei Ponti – Tecniche di Progetto Avanzate – CISM (International Centre for Mechanical Sciences), Udine, 24 – 26 marzo 2003.
- [11] C. W. Roeder – *Seismic Behaviour of Steel Braced Frame Connections to Composite Columns* - International AISC/ECCS Workshop on Connections in Steel Structures IV, Roanoke Virginia, 2000
- [12] M. Wolde-Tinsea, J. E. Klinger - *Integral abutment bridge design and construction*, Final Report, FHWA/MD-87/04, Maryland DOT, Baltimore, MD, 71 p., 1987