

qualora risultino danneggiati, a seguito del degrado o di un impatto, trefoli o cavi di post-tensione. Un utilizzo mirato in grado di ripristinare la capacità portante della struttura anche nei confronti dello stato limite di esercizio consiste nella pretensione di lamine in fibra di carbonio, tecnologia questa che consente di applicare una coazione alla trave alla stessa stregua della precompressione impressa mediante trefoli di acciaio armonico.

Nella presente nota viene illustrata l'applicazione di questo innovativo sistema di precompressione esterna al caso del ripristino di un ponte situato nella zona portuale di Ravenna, recentemente consolidato sulla base di un progetto redatto dagli Autori nell'ambito di un contratto di Global -Service affidato dal Comune di Ravenna a SISTEMA 2, Società Consortile costituita dalle Imprese ACMAR e CMC di Ravenna.

2. CARATTERISTICHE DEL PONTE

L'intervento di ripristino in oggetto riguarda il sovrappasso sito lungo la S.S. 67 Classicana nella zona portuale di Ravenna. Il sovrappasso in esame è a campata singola, ha una luce tra gli appoggi di 32.00 m, mentre la larghezza della sede stradale, comprensiva dei marciapiedi, è di 11.60 m.

L'impalcato è composto da 6 travi aventi forma a doppio T, del tipo precompresso mediante post-tensione

applicata con cavi scorrevoli. Le nervature portanti sono alte 140 cm, hanno una forma simmetrica con larghezza delle basi di 70 cm e spessore dell'anima di 22 cm (fig.1)

Le travi sono disposte ad interasse costante di 190 cm e sono solidarizzate in opera da una soletta di 20 cm di spessore.

Sono inoltre presenti cinque traversi, due agli appoggi e tre in campata, che delimitano campiture di lunghezza pari ad un quarto della luce.

Il ponte è stato costruito alla fine degli anni '60 ed è stato progettato per portare, oltre ai pesi propri ed ai carichi permanenti, i carichi mobili previsti all'epoca della costruzione dalla Circolare del Ministero dei LL.PP. nr. 384 del 14/2/1962.

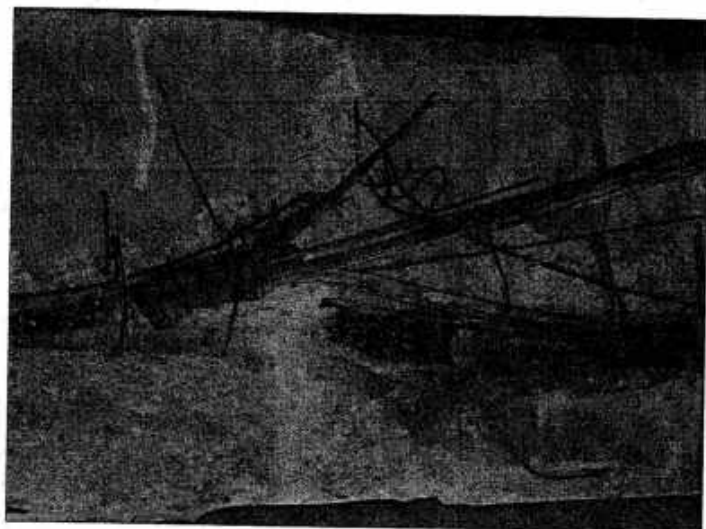
A causa del violento impatto di un autoarticolato in transito nella sottostante strada di accesso al Porto Intermodale SAPIR, la trave di bordo ha riportato seri dissesti tra cui il completo tranciamento di tutti i fili di un cavo interno di post-tensione (fig.2), in una sezione prossima ad uno dei traversi intermedi.

3. SOLUZIONE ADOTTATA

La soluzione di seguito illustrata per il consolidamento della trave danneggiata è apparsa la più indicata date le condizioni operative e logistiche del caso in esame. L'intervento di demolizione con ricostruzione o sostituzione della trave danneggiata è stato escluso per ragioni soprattutto di tempi, dovendosi limitare al minimo possibile il periodo di chiusura della sottostante strada di accesso al porto.

L'impiego di precompressione esterna impressa con trefoli in acciaio armonico non aderenti è stato scartato per motivi di ingombro e di sicurezza mentre un semplice placcaggio passivo non avrebbe a sua volta consentito il recupero della precompressione perduta, requisito invece essenziale per il ripristino della zona impattata.

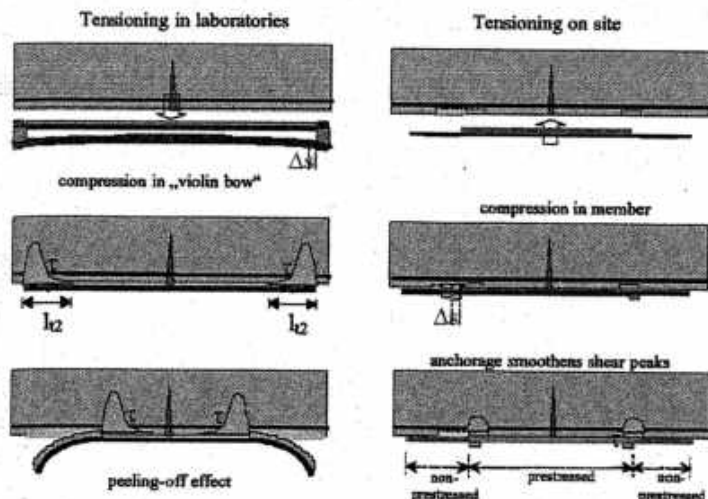
Si è scelto allora di imprimere la precompressione esterna per mezzo di lamine in fibre di carbonio placcate all'intradosso della trave e messe in tensione durante la fase di polimerizzazione della resina per mezzo di martinetti che, ancorandosi a contropiastre preventivamente inserite alle estremità della trave, inducono per contrasto una compressione eccentrica (Fig. 3). La successiva polimerizzazione della resina rende poi solidali alla trave le lamine, che in tal modo fungono anche da armatura aderente nei confronti delle sollecitazioni indotte dai carichi mobili.



2 - Vista dell'intradosso della zona d'impatto.



3 - Schema di precompressione con lamine pretese.



4 - Effetto peeling-off in lamine pretese non ancorate e ruolo delle piastre d'ancoraggio (da Andrà & Maier [1]).

L'aspetto qualificante di questo particolare sistema di precompressione risiede nel ruolo delle piastre di ancoraggio permanente che vengono inserite alle estremità del composito prima di rimuovere i martinetti e che stringono mediante il serraggio di perni la lamina alle contropiastre alloggiata nella trave. Questo meccanismo consente di incrementare la resistenza allo scorrimento per attrito in virtù dell'elevata pressione conseguita con il serraggio, al punto tale che l'intero sforzo di trazione impresso alla lamina viene assorbito nella breve lunghezza dell'ancoraggio stesso.

Con la pressione del serraggio viene poi inibito il distacco per peeling del composito dal supporto, fenomeno che renderebbe inefficace la precompressione e che può manifestarsi al rilascio dei martinetti nel caso in cui l'estremità della lamina pretesa sia semplicemente placcata alla trave (fig. 4). In questo caso infatti lo sforzo nel composito e la risultante delle tensioni tangenziali equilibranti che si sviluppano nell'adesivo all'interfaccia con la trave risultano agire su piani tra loro sfalsati. La coppia che si genera viene equilibrata da tensioni normali ortogonali alla lamina che risultano essere di trazione all'estremità del composito, dove possono raggiungere picchi di elevata intensità.

Questo regime di tensioni normali e tangenziale produce una tensione principale di trazione che tende rapidamente a provocare il distacco del rinforzo dal supporto data la modesta resistenza a trazione del calcestruzzo al crescere dello sforzo applicato alla lamina.

La pressione indotta dal serraggio fornisce invece una presollecitazione che mantiene compressa ed aderente la lamina al supporto in acciaio.

Nel sistema in esame, denominato SLC II dall'acronimo dei componenti, la lamina è placcata all'interno del dispositivo di ancoraggio sia all'estradosso, alla contropiastra inserita nella trave, che all'intradosso, alla piastra di ancoraggio permanente. Le tensioni tangenziali nella lamina sono quindi ora azioni mutue interne all'ancoraggio e l'eccentricità insorge in questo caso tra lo sforzo di trazione agente nella lamina e la reazione equilibrante che si sviluppa all'estradosso

della contropiastra inserita nella trave nell'interfaccia tra resina e calcestruzzo. Il momento associato, denominato "tilt-up moment", richiede anch'esso per equilibrio l'insorgere di uno sforzo di trazione verticale che viene assorbito, con un modesto incremento del livello tensionale, dai perni che fissano la contropiastra alla trave.

4. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DELLA TRAVE IMPATTATA

a) Definita la tipologia della soluzione strutturale, per poter progettare l'intervento di rinforzo si è provveduto dapprima alla caratterizzazione meccanica della trave impattata. Allo scopo sono state effettuate un'indagine Sonreb e prove di carbonatazione mediante viraggio di fenofitalina, volte a definire le caratteristiche del calcestruzzo, nonché prove di trazione per individuare le caratteristiche meccaniche dell'acciaio armonico.

La resistenza caratteristica del calcestruzzo è risultata essere dell'ordine di 55 MPa mentre la profondità dello strato carbonatato rilevata è stata di pochi millimetri, risultati entrambi che indicano un buon stato di conservazione della struttura.

Dai rilievi effettuati è poi emerso che il cavo impattato era composto da 18 fili di acciaio armonico del diametro di 7 mm.

Allo scopo di valutarne la portanza sono state eseguite prove di trazione su 6 spezzoni di fili prelevati dal cavo tranciato. Ai risultati sperimentali è stata applicata la statistica di Student valida per piccoli campioni, secondo la procedura indicata dalla norma UNI 7680 in base alla quale il valore caratteristico si deduce sottraendo dal valore medio lo scarto quadratico amplificato di un coefficiente denominato di protezione unilaterale. Nel caso in esame, valendo i seguenti parametri statistici:

Numerosità del campione = 6

Frattile del valore caratteristico $(1-\alpha) = 5\%$

Livello di confidenza $(1-Q) = 95\%$

Coeff. di protezione unilaterale $K = 3.78$

è stato ricavato un valore della tensione caratteristica a rottura dei fili di:

$$f_{ptk} \approx 1650 \text{ Mpa}$$

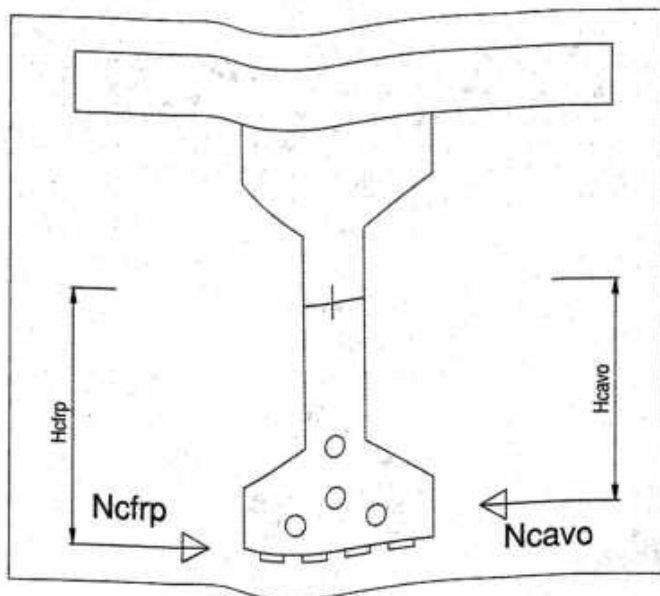
ossia un valore tipico per l'acciaio armonico per cavi di post-tensione utilizzato all'epoca di costruzione del ponte. La tensione in esercizio ammessa per questo tipo di armatura era a sua volta pari a:

$$\sigma_{ap} = 0.60 f_{ptk}$$

e pertanto lo sforzo massimo di precompressione che a perdite scontate il cavo poteva sopportare a lungo termine risulta valere ($n_f = 18$; $A_f = 385 \text{ mm}^2$; $\sigma_{ap} = 990 \text{ MPa}$):

$$N_{cavo} = n_f A_f \sigma_{ap} = 686 \text{ KN}$$

b) Come operazione complementare alla caratterizzazione meccanica è stato eseguito anche il rilievo del tracciato dei cavi e della posizione delle armature lungo la trave danneggiata mediante un rilievo GPR



5 - Sezione trave impattata.

(Ground Probing Radar) che si basa sulla riflessione e sull'assorbimento di impulsi elettromagnetici, fenomeni fisici che dipendono entrambi dalle caratteristiche dielettriche dei materiali attraversati. La posizione delle armature lente e dei cavi di post-tensione viene individuata mediante sezioni radar-stratigrafiche. Il risultato del rilievo è stato utilizzato per definire, evitando interferenze con i cavi attivi, le posizioni ove ubicare nella trave i perni di ancoraggio delle contropiastre.

5. DIMENSIONAMENTO DEL RINFORZO

Per la valutazione preliminare del numero di lamine e dell'intensità dello sforzo da applicare si è seguito un criterio di equivalenza flessionale imponendo nella sezione di mezzaria l'eguaglianza tra il momento di precompressione indotto originariamente dallo sforzo presente nel cavo tranciato ed il momento di precompressione indotto dallo sforzo agente nelle lamine (fig. 5). Avendo il cavo tranciato e le lamine bracci diversi rispetto al baricentro della sezione, dalla condizione di equivalenza:

$$N_{cavo} h_{cavo} = N_{cfrp} h_{cfrp}$$

si ricava lo sforzo totale in esercizio nelle lamine:

$$N_{cfrp} = N_{cavo} h_{cavo} / h_{cfrp}$$

Tale sforzo si compone a sua volta di due aliquote. La prima, che è quella dominante, è dovuta alla pre-tensione iniziale delle lamine, mentre la seconda è quella conseguente alla dilatazione della fibra di intradosso della trave indotta dai carichi mobili che, nell'ipotesi di assenza di scorrimento, viene impressa per aderenza anche alla lamina in fibra di carbonio. In termini matematici si ha quindi:

$$N_{cfrp} = (1-\alpha) N_0 + n \Delta\sigma_{c,q} A_{cfrp}$$

relazione nella quale N_0 è lo sforzo iniziale di pre-tensionamento, α è la perdita di tensione nelle lamine a lungo termine, n è il coefficiente di omogeneizzazione

tra i moduli elastici della lamina e del calcestruzzo. $\Delta\sigma_{c,q}$ è l'incremento di tensione indotto all'intradosso della trave dai carichi mobili mentre A_{cfrp} è l'area complessiva delle lamine. Lo sforzo iniziale nella lamina si ricava quindi dalla espressione seguente:

$$N_0 = [N_{cfrp} - n \Delta\sigma_{c,q} A_{cfrp}] / (1-\alpha)$$

Nel caso in esame sono state utilizzate 4 lamine di 10 cm di larghezza e di 1,4 mm di spessore aventi un modulo elastico di 167 GPa le cui caratteristiche, uguali a quelle dell'adesivo, sono riportate in Tab. I e Tab. II. Il modulo del calcestruzzo è invece stato assunto pari a 40 GPa, in base al valore stimato della resistenza caratteristica. Sostituendo i valori numerici si ricava lo sforzo iniziale di pre-tensionamento, che in sede operativa è stato assunto pari a:

$$N_0 = 640 \text{ KN}$$

La precompressione è stata impressa frazionando il tiro complessivo nelle lamine in due sforzi da 320 KN applicati rispettivamente a due lamine più lunghe ancorate ai due lati ad una distanza di circa un metro dagli appoggi, e a due lamine più corte, ancorate ai due lati in prossimità delle sezioni di inizio delle strombature, ossia in corrispondenza di zone ove l'introduzione degli sforzi interessa sezioni trasversali di area maggiore.

6. ANALISI STRUTTURALE

a) Stimata l'entità della precompressione perduta e dello sforzo da applicare alle lamine è stata effettuata la valutazione in termini di stato tensionale sia del danno subito dalla trave che dell'efficacia dell'intervento di ripristino, in base alle considerazioni di seguito riportate. Sia la perdita di precompressione dovuta al tranciamento del cavo di post-tensione che l'applicazione della precompressione esterna impressa mediante lamine in fibra

Tab. I - Scheda tecnica delle lamine Sika Carbodur V99

Base fibra di carbonio armata con una matrice epossidica
Tenore volumetrico in fibra >68%
Modulo di elasticità: >165.000 N/mm²
resistenza a trazione: >2.800 N/mm²
Valore medio della resistenza a trazione a rottura = 3.050 N/mm²
Allungamento a rottura >1,7%
Densità: 1,5 gr./cmc
Spessore: 1,4 mm.
Larghezza: 90 mm.

Tab. II - Scheda tecnica della resina Sikadur 30

Peso specifico: 1,77 kg/l (A+B)
Post life 40 minuti: (a 35 °C)
Open time *30 minuti: (a 35 °C)
Sag flow (colatura)* da 3 a 5 mm (a 35 °C)
Modulo Elastico statico* 12.800 N/mm²
Adesione al calcestruzzo > 4 N/mm²
Resistenza al taglio* > 15 M/mm²
Coeff. di dilataz. termica lineare: 9x10-5 per °C (da -10 °C a +40 °C)

di carbonio agiscono su uno schema caratterizzato da una iperstaticità diffusa, conseguente alla solidarizzazione delle travi alla soletta ed ai traversi.

La valutazione delle tensioni indotte dalla causa esterna sollecitante deve pertanto necessariamente tenere in debito conto di tale solidarizzazione, pena una sopravvalutazione sia del danno provocato dall'impatto che del beneficio conseguibile con la aggiunta di precompressione esterna.

La valutazione degli effetti iperstatici è pertanto decisiva e va effettuata avvalendosi di un modello di analisi strutturale che consenta di tenere in debito conto del comportamento d'insieme dell'impalcato. Nel presente caso è stato utilizzato un modello agli elementi finiti discretizzando la struttura con elementi tipo shell, ossia con elementi dotati sia di rigidità membranale che di rigidità flessionale, mediante i quali si è provveduto a schematizzare le travi, i traversi e la soletta costituenti l'impalcato.

In entrambi i casi analizzati lo stato tensionale indotto dall'azione esterna (sia essa conseguente al tranciamento del cavo od alla precompressione aggiuntiva) è valutabile in base ai carichi equivalenti che il cavo di precompressione tranciato o le lamine pretese trasmettono al conglomerato. Indicati al solito con N lo sforzo

di precompressione e con R il raggio di curvatura locale, tali carichi sono riconducibili a:

1) forze concentrate applicate negli ancoraggi del cavo o della lamina;

2) forze distribuite di intensità pari a N/R lungo il tracciato del cavo o della lamina (nel caso in cui la lamina sia applicata ad un intradosso curvo).

b) Per quanto attiene la valutazione del danno, il tranciamento del cavo ha comportato la perdita nella trave di bordo dell'azione di compressione e di sostentamento da questo esercitata, ossia dei carichi equivalenti alla precompressione che esso trasferiva alla trave in esame. In termini statici ciò corrisponde ad applicare alla trave tali carichi equivalenti invertiti di segno (fig. 6). La rottura del cavo può pertanto essere simulata dalla condizione di carico che cumula i due sforzi di trazione nel conglomerato applicati in corrispondenza degli ancoraggi di estremità e le forze di sospensione dirette verso il basso applicate lungo il tracciato del cavo tranciato. A fronte di tali carichi l'impalcato reagisce nel suo insieme, ripartendoli alla stregua di un carico esterno tra le varie travi per mezzo dell'azione dei traversi e della soletta che, mediante la propria rigidità flessor-torsionale, chiamano a collaborare anche le travi adiacenti a quella impattata.

Sulla base del criterio indicato e del rilievo del tracciato sono stati individuate l'eccentricità e la curvatura del cavo tranciato e sono stati definiti i carichi equivalenti alla precompressione che, indicati con L_a la distanza tra gli ancoraggi e con f_c la freccia del cavo, risultano essere:

1) $N = n_l A_l \sigma_{sp}$ concentrate negli ancoraggi del cavo

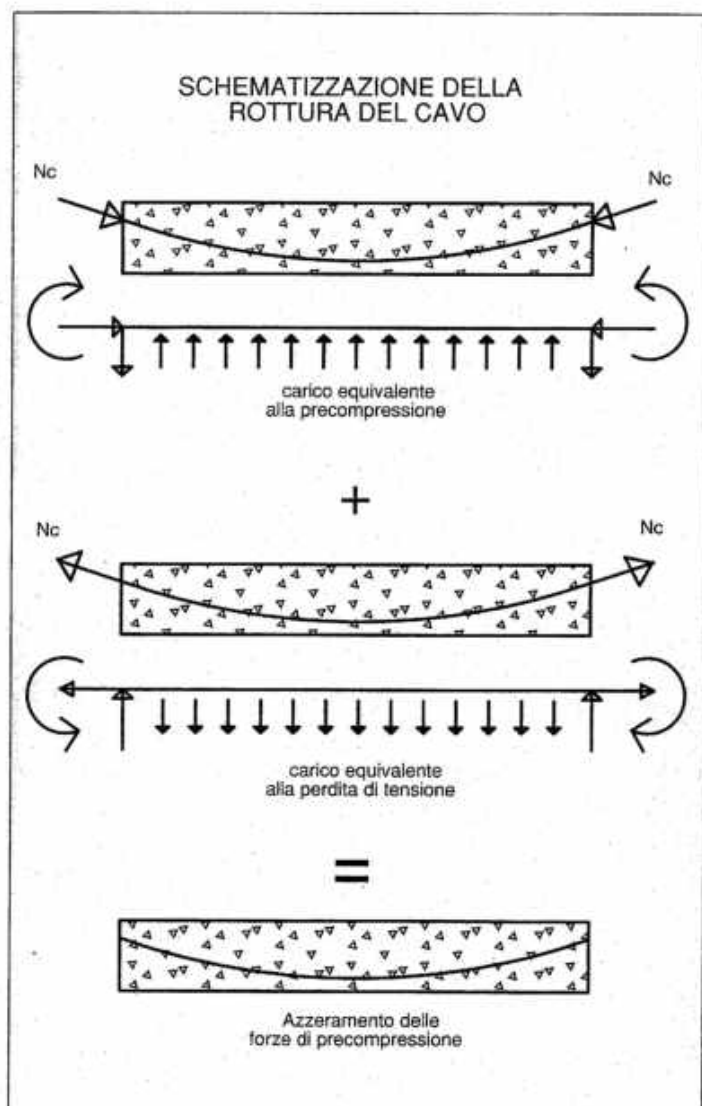
2) $q = 8f_c N / L_a^2$ distribuite lungo il cavo.

Applicando al modello agli elementi finiti dell'impalcato questi carichi con verso opposto si ricava che la perdita di tensione nel cavo produce nella sezione di mezzera della trave danneggiata una decompressione dell'ordine di:

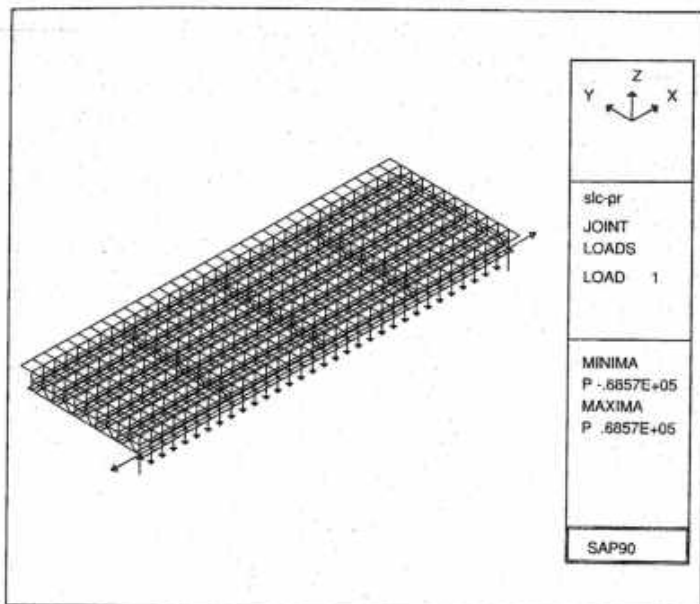
$$\Delta\sigma = + 1.4 \div 1.5 \text{ MPa}$$

come riportato in fig 7-8-9, che mostra lo stato tensionale all'intradosso delle sei travi dell'impalcato nella zona compresa tra i traversi di campata. Come si può notare, se da un lato il valore della decompressione nella trave di bordo, pur significativa, non è stata esiziale in virtù del sostentamento fornito dalle travi adiacenti, dall'altro lato la ripartizione operata dai traversi e dalla soletta ha comportato che la decompressione dovuta all'impatto abbia interessato in modo tangibile l'intero impalcato.

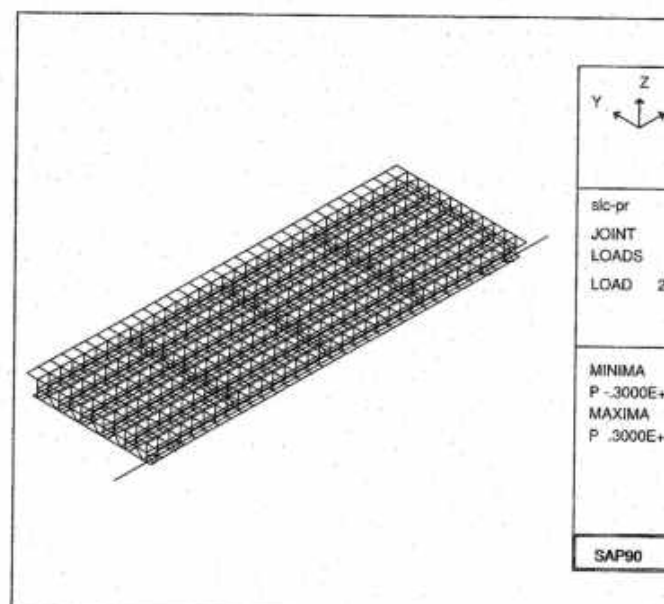
c) In termini analoghi va valutato anche l'effetto indotto dalla precompressione aggiuntiva, che direttamente applicata alla trave da ripristinare, non può ovviamente sortire l'effetto valutato in condizione isostatiche poiché anche in questo caso la solidarizzazione non consente la libera deformazione verso l'alto della trave di bordo. Per valutare l'efficacia teorica dell'intervento di rinforzo sono stati quindi applicati nel modello agli e.f. gli sforzi di pretensione ridotti delle perdite a lungo termine [$N=N_0(1-a)$] nelle sezioni della trave di bordo ove sono inseriti gli ancoraggi delle lamine. Il risultato dell'analisi strutturale è riassunto in fig 10-11-12 che riporta l'andamento delle tensioni di compressione impresse all'intradosso delle travi e da cui si evince il sostanziale recupero in tutte le travi della precompressione perdu-



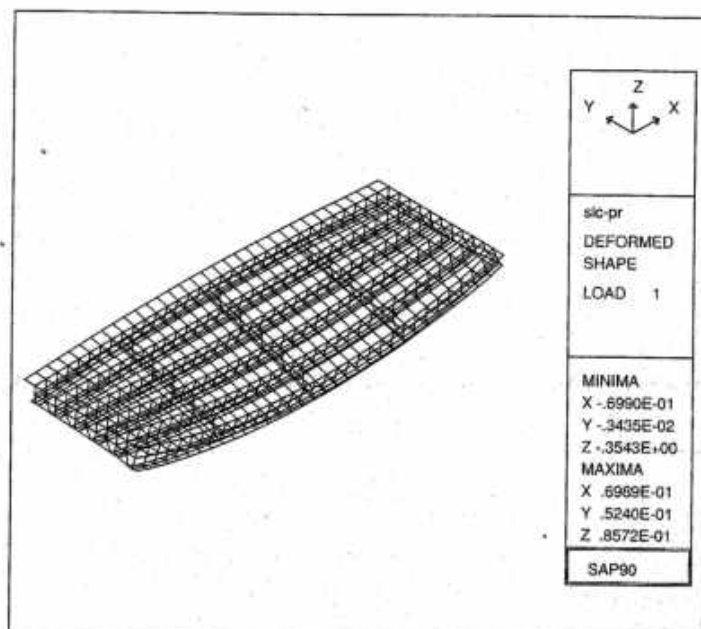
6 - Carichi equivalenti alla precompressione.



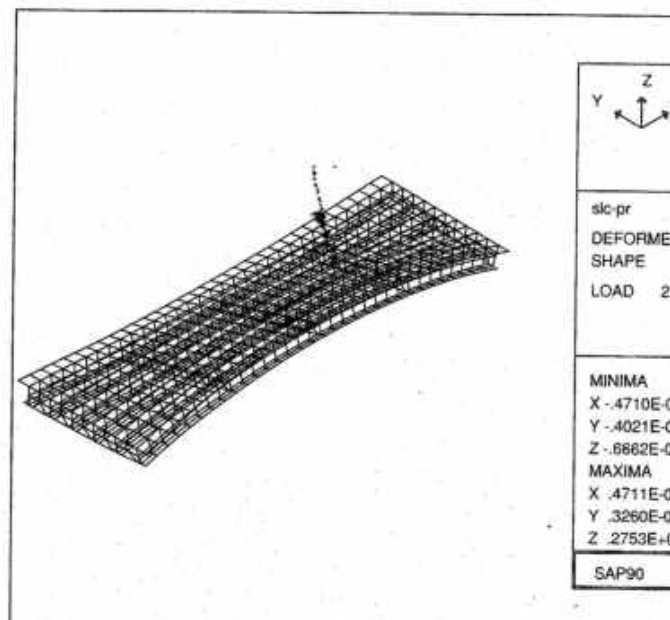
7 - Carichi equivalenti - rottura del cavo.



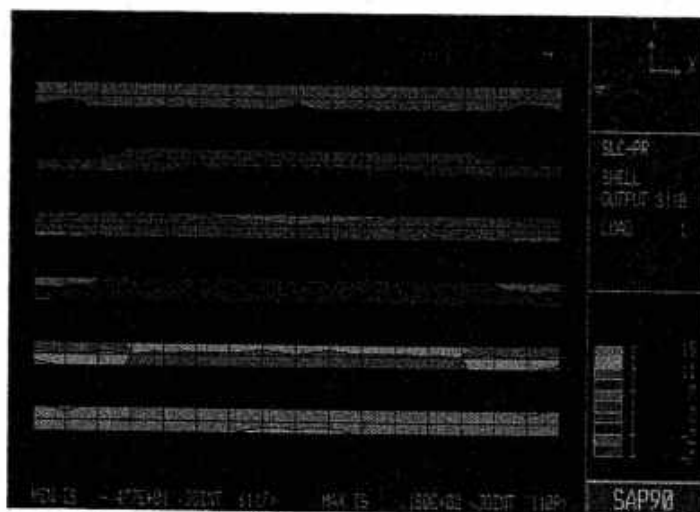
10 - Forze di precompressione impresse con le lamine.



8 - Deformata conseguente alla rottura del cavo.



11 - Deformata conseguente alla precompressione.



9 - Tensioni normali all'intradosso conseguenti alla rottura.



12 - Tensioni normali all'intradosso conseguenti alla precompressione esterna.



13 - Applicazione della resina per l'ancoraggio della contropiastra.



14 - Fissaggio della contropiastra.

ta. In particolare nella sezione di mezzera della trave consolidata viene indotta una compressione

$$\Delta\sigma = - 1.4 \text{ MPa}$$

analoga in valore ed opposta in segno alla decompressione ivi indotta dalla rottura del cavo. Lo stato di sollecitazione complessivo nel calcestruzzo della trave di bordo si ottiene includendo anche l'effetto dei carichi mobili e risulta inferiore a quello antecedente all'impatto tenuto conto dello sforzo assorbito dalle lamine placcate come fungono da rinforzi esterni aderenti

7. ASPETTI ESECUTIVI

E' stato accennato che la tecnica di precompressione impressa mediante lamine in composito sfrutta l'accoppiamento di strisce in fibra di carbonio e di un sistema di tesatura ancorato alla struttura mediante piastre di contrasto che mette in tensione la lamina placcata alla struttura durante l'intervallo di tempo in cui la pasta epossidica ha ancora una consistenza tixotropica.

Nel seguito si delineano i caratteri essenziali di questa interessante tecnologia che utilizza lamine Carbodur V914, placcate con resina Sikadur30 e poste in trazione da un dispositivo di tensionamento, denominato Leoba II, messo a punto dallo Studio Leonhardt, Andrà & Partner di Stoccarda. Come per i sistemi di precompressione tradizionali la coazione viene impressa al calcestruzzo per mezzo di un sistema di forze applicate negli ancoraggi che bloccano la lamina in tensione. Questa viene tesata da un lato mediante un martinetto che agisce alla estremità da tendere mentre all'altro lato la lamina è collegata alla struttura da un dispositivo di ancoraggio fisso che nel caso in esame è un secondo martinetto a scorrimento provvisoriamente bloccato.

Come per i trefoli, anche nel caso delle lamine è necessario offrire ai martinetti il contrasto di una piastra inserita nella trave. A differenza però dei trefoli per i quali le piastre di contrasto sono ortogonali al tracciato del cavo, nel caso delle lamine le piastre di contrasto sono invece parallele alle stesse lamine e sono alloggiare all'estremità della trave in nicchie ricavate all'intradosso. Le piastre di contrasto vengono fissate al calcestruzzo

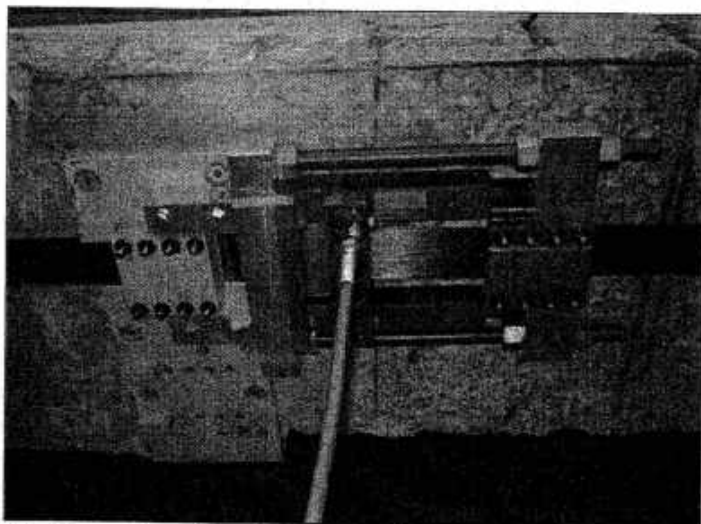
mediante resina e perni passanti M16 con testa a scomparsa (in modo tale da non ostacolare il successivo posizionamento delle lamine) e sono dotate di fori filettati nello spessore della piastra nei quali vengono inseriti sia i bulloni che sostengono i martinetti che i perni che serrano gli ancoraggi permanenti.

Eseguiti i ripristini del calcestruzzo e la regolarizzazione delle superfici, la procedura esecutiva prevede in una prima fase la realizzazione nello spessore del copriferro delle nicchie alle estremità della trave necessarie per lo scorrimento dei martinetti e nelle quali vengono inserite le contropiastre che hanno l'estradosso ed i perni resinati (Fig.13-14). A polimerizzazione della resina avvenuta fa seguito una seconda fase nella quale, dopo l'usuale pulizia delle superfici, si procede alla applicazione della resina alla lamina e alla trave mentre si effettua nel contempo il montaggio dei martinetti. Si provvede poi al placcaggio del composito alla trave (fig.15) ed al serraggio a secco dei perni che stringono il composito al dispositivo solidale ai martinetti che trascinano da un lato o che bloccano dall'altro la lamina da tendere.

Successivamente, mentre la resina è ancora nella fase di polimerizzazione (pot-life), si esegue la tesatura della lamina operando in più fasi alternativamente dai due lati. Una volta completata questa operazione la lamina viene fissata alle estremità per mezzo di piastre di anco-



15 - Posa della lamina.



16 - Dispositivo di tensionamento delle lamine.

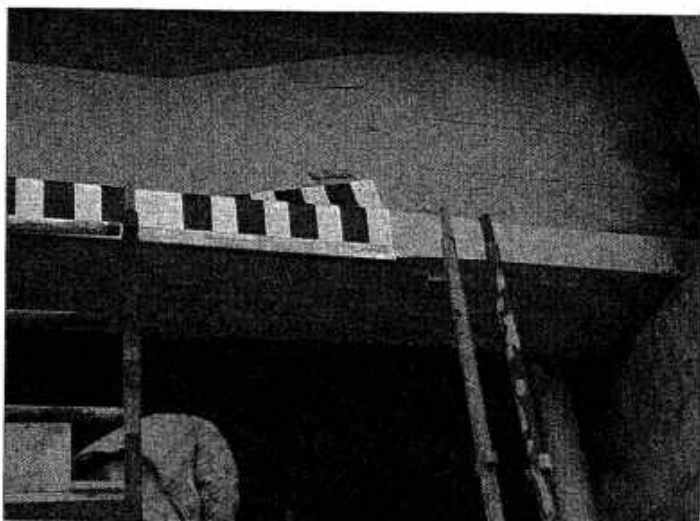
raggio permanenti alle contropiastre, prima mediante pasta epossidica e poi, una volta che questa è indurita, con la pressione del serraggio che viene impressa stringendo i perni ancorati alle contropiastre.

I martinetti vengono quindi scaricati diminuendone la pressione con sequenza inversa a quella seguita durante le fasi di tesatura, trasferendo in modo graduale lo sforzo dai martinetti agli ancoraggi permanenti mentre la lamina di carbonio rimane aderente all'intradosso della trave per effetto della adesione fornita dalla resina epossidica (Fig.16-17)

Come fase conclusiva si provvede poi al riempimento con malta antiritiro delle nicchie ricavate per consentire lo scorrimento dei martinetti, al placcaggio delle parti terminali non pretese della lamina (fig.18) ed alla applicazione di un strato di protezione di colore chiaro a base di vernice acrilica all'acqua che una volta essiccata forma una pellicola elastica impermeabile all'acqua ed al CO₂ e permeabile al vapore.

8. MONITORAGGIO DELLA PRECOMPRESSIONE

Durante le operazioni di tensionamento delle lamine sono stati effettuati i controlli necessari per verificare



18 - Particolare ancoraggi delle lamine.



17 - Particolare del dispositivo SLCII.

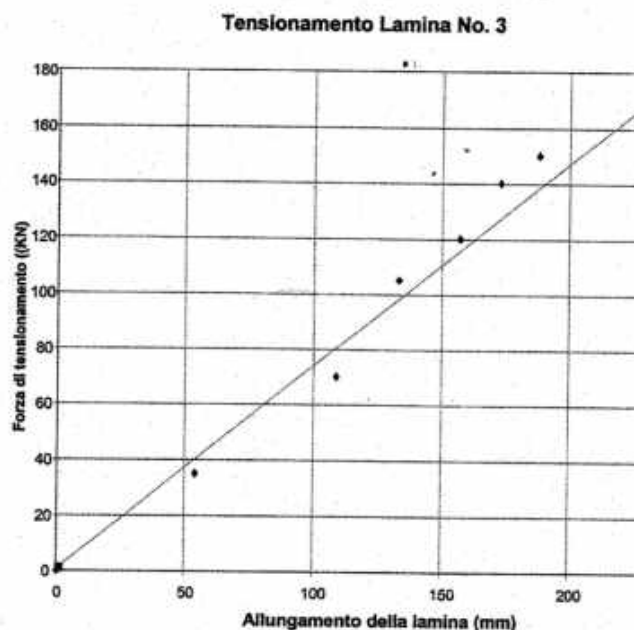
l'efficacia della precompressione applicata. Nello specifico sono stati misurati l'allungamento delle lamine, l'innalzamento dell'intradosso della trave di boia, la corrispondenza dei punti di connessione tra la trave interna della trave consolidata ed i traversi.

A titolo esemplificativo in fig. 19 sono riportati i dati dell'allungamento di una delle quattro lamine considerate, sommando gli allungamenti registrati alle due estremità, essendo state condotte le fasi di tesatura alternamente dai due lati.

Con questa procedura si è voluto bilanciare lo sforzo di precompressione impresso ai due estremi della trave, sono stati resi compatibili gli allungamenti delle lamine con la corsa dei martinetti.

Come si può notare i punti sperimentali sono raggruppati attorno alla curva teorica a comportamento iperbolico-lineare, riscontro questo di un sostanziale accordo tra misura e previsione.

In fig. 20 è invece riportato il diagramma delle forze e delle frecce esibite durante le fasi di precompressione.



19 - Allungamenti della lamina n. 3 durante il tensionamento.

trave di bordo consolidata. Come si può notare il valore sperimentale, misurato con flessimetri centesimali, risulta molto prossimo al valore teorico dedotto dal modello agli e.f. dell'impalcato. Il riscontro sperimentale è decisivo e conferma come in buona sostanza, coerentemente con il grado di iperstaticità interna del sistema, sia stato impresso nella trave di bordo il livello di precompressione previsto.

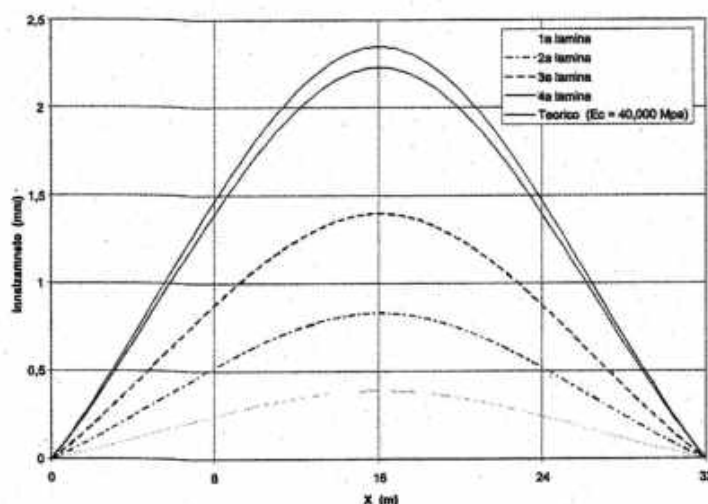
9. PROVA DI CARICO

Al termine dei lavori si è provveduto ad effettuare una prova di carico disponendo sull'impalcato un peso totale di 2483 kN tramite otto automezzi a tre assi, allineati su due colonne disposte eccentricamente in senso trasversale e con i pesi degli assi disposti in modo simmetrico in senso longitudinale, in modo da riprodurre le massime sollecitazioni flessionali nella trave di bordo consolidata (Fig.21).

Il riscontro sperimentale è riportato in fig. 22 che mostra l'andamento nella sezione di mezzzeria delle frecce delle sei travi e dal quale si evince la buona rispondenza tra i valori teorici e sperimentali.

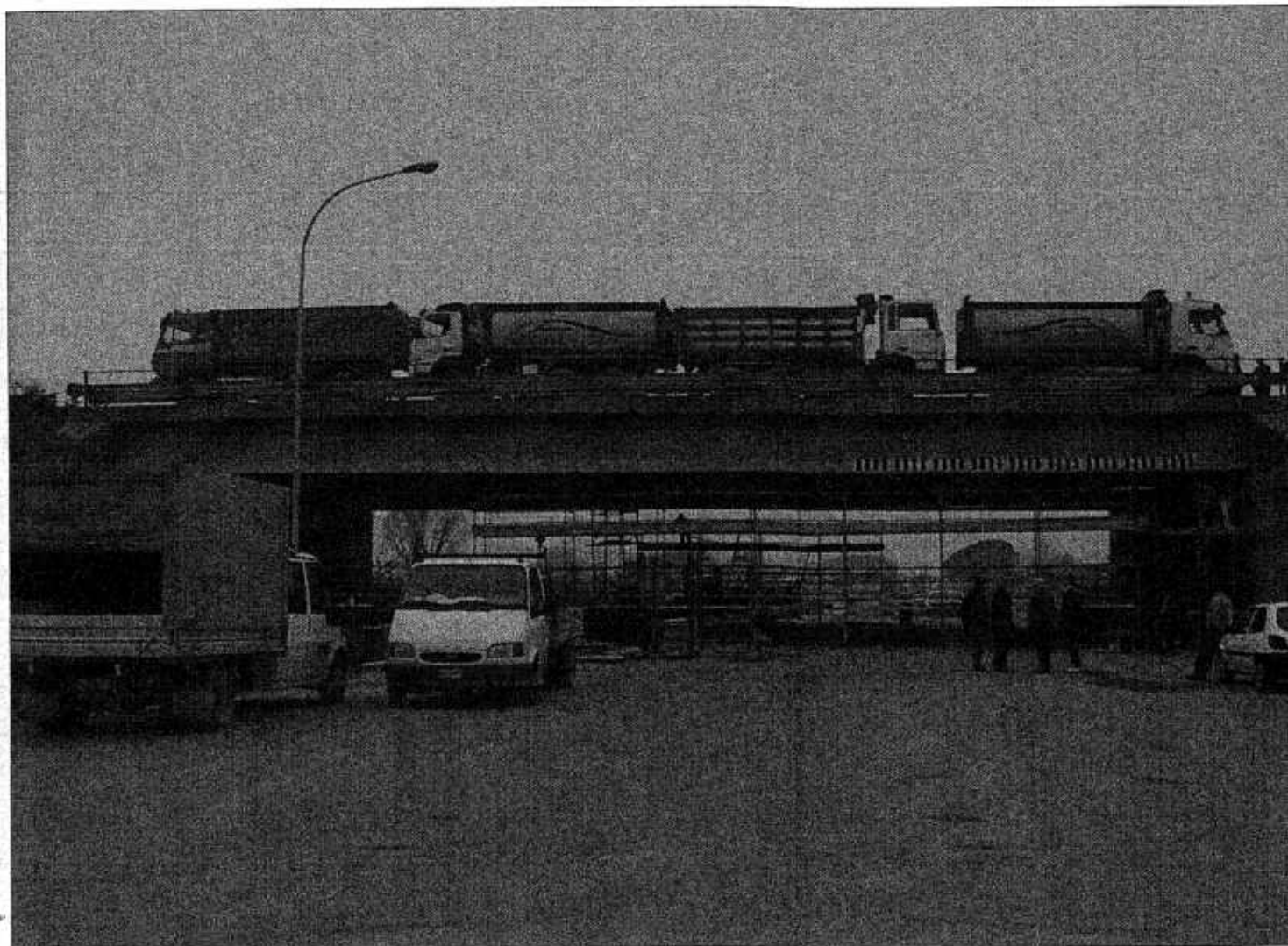
In fig. 23 è poi riportato l'andamento della frecce in

FASE DI TENSIONAMENTO DELLE LAMINE
INNALZAMENTO DEL LATO INTERNO DELLA TRAVE DI BORDO

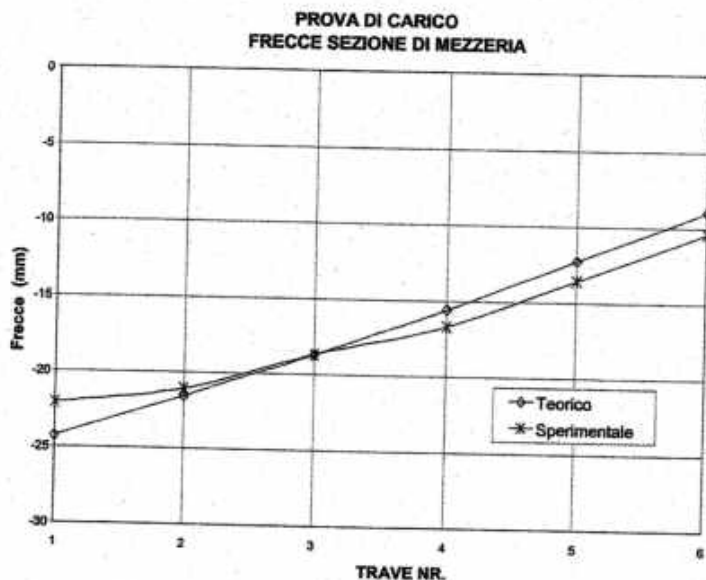


20 - Rilievo delle controfrecce indotte dalla precompressione.

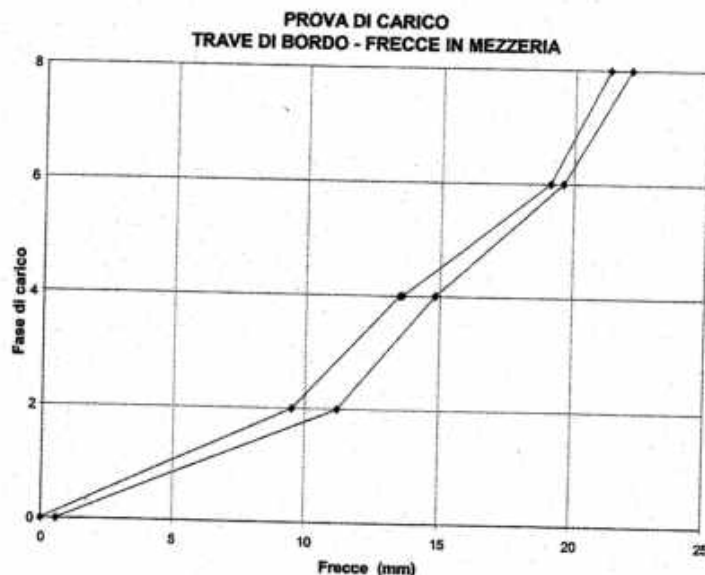
mezzzeria della trave consolidata durante le varie fasi della prova. In particolare si può notare l'affinità tra la fase di carico e quella di scarico ed il modestissimo



21 - Prova di carico dell'impalcato.



22 - Abbassamenti delle travi nella sezione di mezzeria.



23 - Frecche nella sezione di mezzeria della trave consolidata.

residuo registrato a ponte appena scaricato, indici entrambi di un comportamento elastico.

10. OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

L'intervento illustrato rappresenta una applicazione certamente innovativa nel campo del consolidamento strutturale e costituisce il primo esempio di impiego in Italia del brevetto di pretensione delle lamine denominato SLCII (Sika Leoba Carbordur II) e commercializzato da Sika Italia. La sua applicazione richiede una cura particolare nella messa a punto dei dettagli costruttivi e del piano di controllo, operazioni necessarie e propedeutiche per conseguire in opera rapidità di esecuzione e qualità dell'intervento. Un'adeguata pianificazione delle varie fasi consente poi di effettuare un ripristino in tempi ridotti che mantiene le prerogative di semplicità dei placcaggi passivi.

SCHEDA TECNICA DELL'INTERVENTO

Intervento	Manutenzione straordinaria struttura del sovrappasso in Via Classicana, zona port Sapor - Ravenna
Committente	Comune di Ravenna
Progettisti	Ing. Maurizio Lenzi Ing. Roberta Osti Ing. Paola Campana
Responsabile del Procedimento	Arch. Marta Magni
Direttore dei Lavori	Ing. Massimo Camprini
Collaudatore	Ing. Valentino Natali
Impresa esecutrice	SISTEMA2 - Soc. Cons. ACMAR-CMC, Ravenna
Capoprogetto	Geom. Giorgio Morigi
Direttore di cantiere	Geom. Roberto Guerrini
Capocantiere	Sig. Alfredo Nasser
Applicazione delle lamine	CLAREM s.r.l., Napoli Geom. Francesco Cervaso
Consulenza Tecnica	Ing. Gaetano Cicatiello Studio CKC, Napoli
Assistenza Tecnica	Ing. Alberto Grandi - Sika Italia
Monitoraggio	Ing. Giancarlo Olivucci Ing. Giulio Venturi
Rilievo dei cavi tramite GPR	CME - Albignasego, Padova

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia sentitamente l'Ing. Andrea Ga dell'ACMAR per i suoi preziosi suggerimenti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] H.P. Andrà, M. Maier *Post-Strengthening v Externally Bonded Prestressed CFRP St* Proceedings of the 16th IABSE Congress, Lucerne 2000.
- [2] Documento Tecnico CNR - DT 106/98 *L'impiego armature non metalliche nel calcestruzzo arma* Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, 2000.
- [3] Fib - Federation Internationale du Beton *Extern Bonded FRP Reinforcement for RC Structu* Technical Report, Bulletin nr.14, Losanna, 2001.
- [4] T. Keller *Use of Fibre Reinforced Polymers in Bric* Construction SED, Structural Engineering Document n. 7, IABSE, Zurigo, Luglio 2003.
- [5] M. Lenzi, A. Gambi *Rinforzo con materiali compo di strutture murarie e precomprese* Atti del Convegno "Dalla Terra Cruda ai Materiali Compositi" AIAA Ravenna, Dic. 2003.