

INNOVAZIONI SU ISPEZIONI, MONITORAGGIO E INTERVENTI SUI PONTI

Konrad Bergmeister

1. Ispezione di ponti e viadotti

Un controllo sistematico delle condizioni delle strutture va effettuato non solo nei riguardi della sicurezza al collasso, ma anche e soprattutto nei riguardi delle condizioni di esercizio. Ciò consente non solo la conservazione della struttura per l'intero periodo di vita previsto, ma anche una corretta programmazione di interventi in modo da ottimizzare i costi di manutenzione.

Numerose e diversificate sono le tecniche di indagine su strutture e ed elementi. Tuttavia, mentre tali tecniche offrono risultati con buon grado di affidabilità nel caso di elementi in acciaio, la disomogeneità intrinseca del materiale riduce tale grado di affidabilità nel caso di opere in calcestruzzo. Sulla base di tale premessa, è opportuno ricordare la necessità di una valutazione effettuata sulla base di una esperienza globale sull'argomento, piuttosto che sull'esito di una singola prova.

1.1 Prove distruttive

Tali prove vengono realizzate su campioni standard, che hanno in comune con il materiale della struttura solo la composizione della miscela di partenza. Prima di essere sottoposto alla prova, il provino subisce pose, vibrazioni, stagionature diverse da quelle subite dai materiali della struttura. Ciò implica una non conoscenza del reale grado di rappresentatività fisica dei provini rispetto al calcestruzzo in opera.

Tra le prove distruttive si distinguono:

- prove a compressione: la resistenza a compressione si determina in base al carico di rottura per schiacciamento
- prove a trazione: il provino viene sottoposto a trazione e portato a rottura per valutarne la resistenza a trazione. A seconda della geometria si distinguono prova di trazione diretta, prova brasiliana, prova per flessione e prova double-punch.

Spesso, per meglio approssimare le condizioni reali di esercizio, i provini utilizzati per tali prove vengono prelevati direttamente in situ, utilizzando le tecniche del carotaggio e

del microcarotaggio, volte ad arrecare un danno praticamente trascurabile alla struttura e per questo definite anche metodi semidistruttivi.

1.2 Prove non distruttive

Tali prove consentono di mantenere l'integrità della struttura indagata, forniscono informazioni su zone limitate, ma anche sulla struttura nel suo insieme e sono generalmente molto rapide. A seconda delle tecnologie utilizzate, le prove non distruttive sono classificate in metodi meccanici, elettromagnetici, microsismici, dinamici e chimici (fib, 2003).

1.2.1 Determinazione della resistenza

La resistenza a compressione del calcestruzzo a 28 giorni $f_{c,cil}(28)$ si ottiene sulla base di prove sperimentali su provini di geometria cilindrica, aventi altezza di 300 mm e diametro di 150 mm.

Nel caso in cui il provino prelevato sia cilindrico, ma abbia dimensioni differenti da quelle standard, il valore della resistenza a compressione $f_{c,cil}(28)$ può comunque essere ottenuto a partire dalla resistenza misurata sui provini prelevati $f_{c,prel}$:

$$f_{c,cil}(28) = \frac{f_{c,prel}}{0,65 + \frac{0,7}{\left(1 + \frac{d_c}{20}\right) \cdot \left(\frac{h_c}{d_c}\right)^{1,25}}}$$

In presenza di una barra metallica nel cilindro il valore della resistenza a compressione $f_{c,cil,bar}$ si riduce a:

$$f_{c,cil,bar} = f_{c,cil} \cdot \left(1,0 + 1,5 \cdot \frac{d_s}{d_c} \cdot \frac{h_s}{h_c}\right)$$

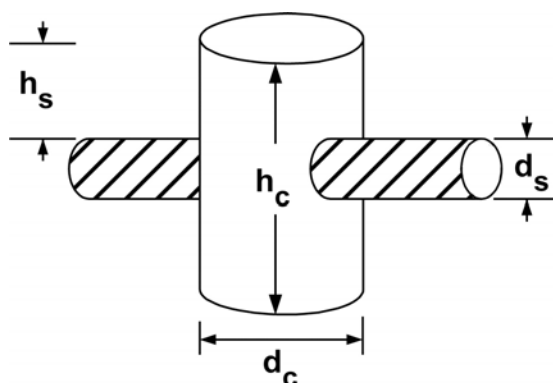


Fig. 1: Barra metallica nel cilindro prelevato

A seconda del tipo di cemento, può essere determinata inoltre la resistenza del calcestruzzo in funzione del tempo con la formula:

$$f_c(t) = \exp\left[s\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right] \cdot f_c(28)$$

C 32,5: $s = 0,8$

C 32,5R + C 42,5: $s = 0,25$

C 42,5R + C 52,5: $s = 0,20$

1.2.2 Metodi meccanici

Sono i metodi più comunemente impiegati per stimare le caratteristiche meccaniche dei materiali. Sono generalmente di semplice applicazione, ma i risultati offerti sono fortemente influenzati dalle condizioni superficiali della zona indagata.

Il pull out permette di calcolare la resistenza del materiale dalla misura della forza necessaria per estrarre uno stelo di acciaio annegato nel calcestruzzo in fase di getto o per espansione. Nella prova del pull off, un elemento circolare viene fissato alla superficie del calcestruzzo utilizzando una resina epossidica. Essendo la resistenza a trazione del vincolo maggiore di quella del calcestruzzo, quest'ultimo cederà per trazione. Dall'area di rottura e dalla forza applicata è possibile calcolare la resistenza a trazione.

Lo sclerometro permette di valutare la durezza superficiale del calcestruzzo. La misura si ottiene misurando l'impronta o il rimbalzo di una massa metallica che con una data energia urta contro la superficie del calcestruzzo. Tale metodo ha il pregio di poter essere realizzato anche in situ.

La sonda di Windsor, infine, permette di valutare la resistenza del materiale dalla profondità di penetrazione di un'asta metallica che viene infissa nel calcestruzzo dall'esplosione di una carica.

1.2.3 Metodi elettromagnetici

Tali metodi sfruttano le caratteristiche di assorbimento, emissione, diffusione di onde elettromagnetiche a cui vengono sottoposti i materiali. Tuttavia, la loro applicazione nel settore civile presenta notevoli problemi, soprattutto strumentali.

La radiografia x o gamma si basa sul principio dell'attenuazione selettiva dei fotoni attraverso la materia, dovuta alla presenza di discontinuità lungo il loro percorso. Si ottengono immagini radiografiche del manufatto analizzato e dei difetti non visibili ad occhio nudo.

Nel caso della termografia viene misurata la distribuzione della emissività termica della superficie della struttura, legata alla distribuzione delle temperature superficiali e quindi alla morfologia del materiale.

Il metodo del radar permette di individuare discontinuità, lesioni e vuoti. L'antenna emittente irradia impulsi elettromagnetici che, incontrando una discontinuità, vengono riflessi. Tali segnali riflessi vengono raccolti dall'antenna ricevente ed elaborati per fornire informazioni sul materiale.

1.2.4 Metodi microsismici

La metodologia microsismica si basa sullo studio della modalità di propagazione di onde di vibrazione nel materiale in esame. La determinazione dei tempi di propagazione degli impulsi di vibrazione permette di ricavare la velocità di tale propagazione, direttamente connessa al modulo di elasticità ed al coefficiente di Poisson del materiale. In presenza di disomogeneità, la velocità di propagazione varia perché tali discontinuità possono assorbire parzialmente le onde di vibrazione.

A seconda delle caratteristiche del materiale utilizzato, i metodi microsismici si suddividono in:

- prove ultrasoniche: materiali omogenei (metalli)
- prove sismiche: materiali eterogenei per distanze medio-grandi
- prove microsismiche: materiali intrinsecamente eterogenei per distanze fino a qualche metro.

1.2.5 Metodi dinamici

Con tali metodi, le proprietà dinamiche di una struttura o di parte di essa si ricavano tramite l'applicazione di carichi arbitrari, non legati cioè alle sollecitazioni reali. Dalla risposta dinamica rilevata con accelerometri e con opportune tecniche di elaborazione, è possibile ricavare i parametri caratteristici del comportamento della struttura.

Le prove a frequenza di risonanza vengono effettuate eccitando il provino rispetto alle sue oscillazioni naturali per ricavare le frequenze proprie di vibrazione da cui si risale alle caratteristiche elastomeccaniche. A seconda della direzione di vibrazione imposta, si distinguono le prove a risonanza estensionale (longitudinale all'asse), flessionale (perpendicolare all'asse) e torsionale (momento torcente parallelo all'asse).

1.2.6 Metodi chimici

Misura della profondità di carbonatazione. Con tale metodo si determina la misura del pH del calcestruzzo. Soluzione di fenolftaleina in etanolo viene spruzzata sulla superficie interessata e, a seconda della colorazione assunta, si determina lo stato di carbonatazione.

Analisi quantitativa dello ione-cloro. La quantità locale dello ione-cloro è significativa per i problemi di corrosione dei ferri d'armatura. Il provino viene sottoposto a diversi reagenti in modo da ottenere superfici di colorazione dipendente dalla quantità di ione-cloro.

1.3 Ispezione visiva

L'osservazione dell'opera nel suo complesso e dei suoi componenti singoli da parte di un osservatore esperto consente di dare indicazioni fondamentali sulla situazione della struttura. Macchie d'umidità, ferri scoperti, fessure o lesioni del calcestruzzo, corrosione

dell'acciaio sono difetti facilmente individuabili da un occhio esperto e danno preziose indicazioni sulla ottimizzazione della modalità e della tempistica di eventuali interventi.

Per eseguire una opportuna ispezione, è necessario assicurare l'accessibilità diretta alle parti strutturali essenziali dell'opera, in modo da recare il minimo intralcio al pubblico e al traffico. Un ruolo importante riveste la fase di indagine sulle fondazioni. Si possono prevedere scavi con eventuali cinturazioni con opere di sostegno o rilievi in alveo mediante interventi con sub. Di tutto ciò è dunque opportuno tenere conto già in fase di progetto dell'opera.

1.4 Indagini sperimentali

In seguito all'ispezione visiva, al fine di ottenere una serie di informazioni esaustive sulle condizioni e caratteristiche meccaniche del materiale, è necessario individuare una metodologia di controllo in grado di individuare le tecniche di indagine più appropriate. Nella maggior parte dei casi è opportuno impiegare più metodologie in combinazione tra loro per un reciproco confronto e una visione del problema in termini globali.

1.5 Prove di carico

Le prove di carico si realizzano applicando alla struttura sollecitazioni e rilevandone le conseguenti deformazioni. Esse possono essere finalizzate a verificare la corrispondenza sperimentale con quella teorica su strutture di cui si conoscano gli elementi costituenti e i parametri caratteristici (prove di verifica) oppure ad analizzare e determinare le effettive caratteristiche di resistenza in strutture di cui non si conosce nulla (prove di analisi).

Di particolare interesse è la tecnica inclinometrica. L'elaborazione computerizzata dei dati ricavati dalla misura con inclinometri consente di rilevare la deformata e di conseguenza di studiare l'evolversi del comportamento flessionale.

Gli strumenti impiegati nelle prove di carico sono celle di carico, trasduttori di fattori ambientali, trasduttori estensimetrici, di spostamento lineare o angolare, sonde ed elettrodi, trasduttori di accelerazione, velocità, spostamento e di forza.

1.6 Monitoraggio strutturale

La misura delle deformazioni nelle sezioni del calcestruzzo è uno dei sistemi non distruttivi più efficaci per verificare l'integrità dei materiali e le prestazioni strutturali durante tutta la vita di esercizio delle opere. Gli strumenti utilizzati fino a pochi anni or sono per il monitoraggio di tali parametri erano degli "Strain gauge" di carattere induttivo. Da alcuni anni vengono utilizzati per le misure di deformazione dei sensori a fibra ottica, i quali, grazie alla loro eccezionale stabilità, garantiscono una estrema precisione per l'osservazione a lungo termine. Tali sensori permettono anche una facile applicazione essendo immediatamente solidarizzabili alle strutture in cemento armato tramite delle elementari operazioni di incollaggio.

1.6.1 Comportamento flessionale della struttura

Particolarmente interessante per la verifica dello stato di consistenza di ponti e viadotti risultano le considerazioni relative al comportamento flessionale delle strutture e alle relative variazioni registrate nel tempo. Gli inclinometri, posizionati in punti fondamentali delle strutture, forniscono un segnale elettrico legato alla rotazione rilevata, il quale viene digitalizzato e trasferito ad un sistema computerizzato per le opportune elaborazioni.

1.6.2 Misura diretta della freccia flessionale

Per realizzare tale sistema di misura si possono utilizzare strumenti ad emissione di raggi laser ad alta precisione e di rilevatori continui di segnale disposti sugli estremi opposti. L'asse "orizzontale" del sistema è definito dalla traccia, ad un certo istante T_0 , di un raggio laser inviato da un proiettore solidale al cassone in corrispondenza della pila maggiore.

Per quanto concerne gli appoggi più sollecitati, ovvero quelli disposti in corrispondenza dei giunti di dilatazione, si adotta un sistema di rilevamento e di monitoraggio di vari parametri operanti in campo statico. In particolare vengono registrati in maniera continuativa e archiviati attraverso un sistema di telecontrollo i carichi applicati sugli appoggi per mezzo di celle di carico. Trasduttori di spostamento lineare permettono di rilevare in continuo l'apertura dei giunti di dilatazione lungo l'asse longitudinale dei viadotti e la misura delle rotazioni dei dispositivi d'appoggio nella direzione longitudinale dell'impalcato. Infine, trasduttori di temperatura misurano sempre in continuo le temperature degli impalcati, per correlarle alle deformazioni rilevate. In tal modo, ogni comportamento anomalo della struttura e dei suoi componenti viene immediatamente segnalato agli operatori, che possono provvedere alle necessarie verifiche della sicurezza dell'opera.

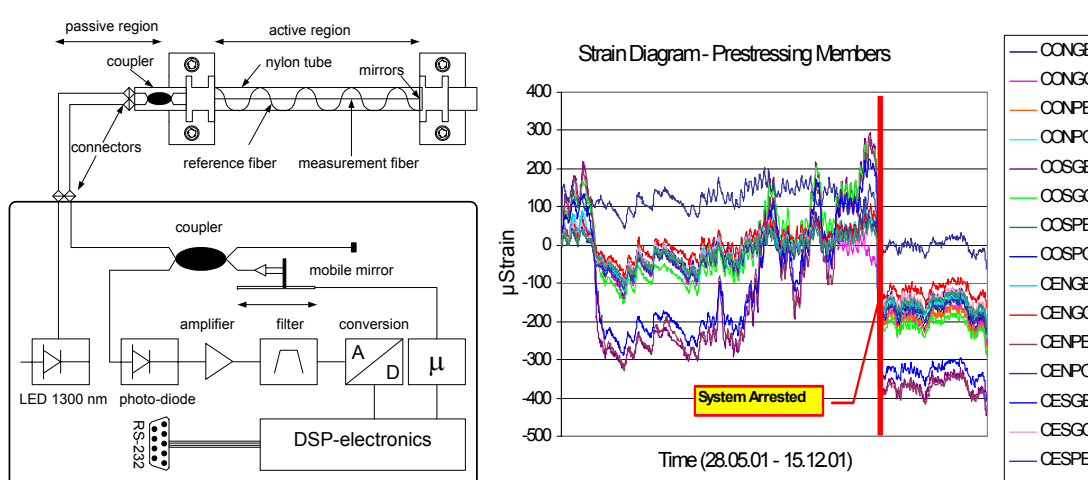


Fig.2: Schema di funzionamento del sensore SOFO ed esempio di evoluzione della deformazione di un elemento della struttura

Il sensore di deformazione a fibre ottiche SOFO è basato sul principio dell'interferometria low-coherency. Un raggio di luce infrarossa emesso da un diodo viene sdoppiato, per mezzo di un accoppiatore direzionale, lungo due fibre ottiche. La fibra di misurazione è in contatto meccanico con la struttura stessa e segue dunque le sue deformazioni. La seconda fibra, di riferimento, è invece installata non in contatto con l'elemento da monitorare. Specchi, posti alle estremità di entrambe le fibre, riflettono i due raggi di luce verso l'accoppiatore direzionale, che li ricombina e li indirizza verso l'analizzatore (vedi Figura 2). Le deformazioni della struttura si ottengono analizzando l'interferenza tra i due raggi. Questo tipo di sensore ha una risoluzione di 2 μm e, come la maggior parte degli strumenti a fibre ottiche, è insensibile a temperatura, umidità, vibrazioni, corrosione e campi elettromagnetici.

Per un viadotto di circa 1 km, i costi relativi alle ispezioni ed al monitoraggio strutturale sono quantificabili in 0,1% all'anno dei costi globali di costruzione dell'opera. L'esperienza fatta dalla Società Autostrada del Brennero sul viadotto Colle Isarco è risultata molto positiva permettendo, non solo di mantenere continuamente monitorati gli elementi strutturali dell'opera, ma anche di ottimizzare i futuri interventi di ripristino. Ciò consentirà un enorme risparmio di risorse economiche, ma anche lavorative, più che giustificando l'impegno economico iniziale.

2. Strategia degli interventi

Secondo un'indagine svolta negli anni dal 1995 al 2000, le voci di manutenzione per i ponti e i viadotti si articolano nel modo seguente:

Pavimentazioni e impermeabilizzazioni:	45%
Cordoli, barriere di sicurezza:	15%
Giunti, appoggi:	15%
Manutenzione – elementi corrosivi:	10%
Interventi costruttivi:	15%

Tenuto conto di ciò, è opportuno studiare una strategia di conservazione ottimale, che può essere formulata nel modo seguente:

$$C_{\text{total}, t} = C_{\text{Insp}} + C_{\text{Maint}} + C_{\text{Repair}} + C_{\text{road}} + C_{\text{Fail}}$$

$$C_{\text{total}, t} = \text{costi totali di un manufatto per una certa "durata di vita t"}$$

$$C_{\text{Insp}} = \text{costi di ispezione (Inspection)}$$

$$C_{\text{Maint}} = \text{costi di manutenzione (Maintenance)}$$

$$C_{\text{Repair}} = \text{costi di riparazione (Repair)}$$

C_{Road} = costi di deviazioni stradali (Road)

C_{Fail} = costi di rotture (Failure)

Per minimizzare i costi di manutenzione e per garantire un minimo indice di sicurezza è necessario eseguire controlli frequenti e regolari (monitoraggio continuativo). Tali controlli devono verificare che il livello di sicurezza non scenda al di sotto di un determinato valore limite β . Con un sistema di controllo continuo gli intervalli Δt tra due successivi controlli vengono praticamente ridotti a zero, anche se i lavori di manutenzione vanno svolti comunque con cura. In tal modo si possono evitare interventi di rinnovo di grande entità. Il livello di sicurezza è normalmente stabilito per un periodo di riferimento di 1 anno (Tabella 1).

β	P_f	Verifica
4,7	$1,3 \cdot 10^{-6}$	Stato ultimo
3,0	$1,5 \cdot 10^{-3}$	Stato di servizio

Tabella 1: Livelli di sicurezza

La durabilità può essere espressa come elemento decisivo per garantire la funzionalità sia allo stato ultimo, sia allo stato di esercizio. Normalmente essa riferita alla vita di una struttura senza considerare interventi di ripristino, ma solo manutenzione ordinaria.

3. Interventi di ripristino

Per una serie di cause concatenate (uso di sali disgelanti, cicli di gelo-disgelo, fenomeni di fatica, ecc.), lo stato di degrado delle opere infrastrutturali in generale ed anche di quelle dell'autostrada del Brennero si manifesta in maniera crescente. In Tabella sono mostrate le frequenze dei vari interventi, espresse in percentuale sul totale degli interventi realizzati.

Intervento	Frequenza
Impermeabilizzazione / Pavimentazione	30%
Giunti di dilatazione	22%
Cordoli laterali / Barriere di sicurezza	18%
Interventi costruttivi/strutturali	15%
Sostituzione appoggi	10%
Altro	5%

Tabella 2: Frequenza degli interventi di ripristino

Dai dati in Tabella 2 si nota come più del 50 % degli interventi di ripristino siano legati alla presenza di giunti di dilatazione (impermeabilizzazione degli impalcati e sostituzione dei giunti di dilatazione). La loro presenza è dovuta al fatto che i ponti e i viadotti attualmente in uso sono realizzati assemblando elementi prefabbricati. Le priorità degli interventi di ripristino in generale sono dunque (Direttiva, 2003):

- diminuzione del numero dei giunti;
- impermeabilizzazione della struttura;
- ripristino degli appoggi;
- verifica e ripristino degli elementi critici dell'opera:
 - copriferro;
 - protezione dei cavi di precompressione;
 - sistemi di drenaggio;
- rinforzo della struttura portante:
 - precompressione esterna;
 - applicazione di elementi tensionanti esterni: fibre di carbonio;
 - aggiunte di nuovi manti di calcestruzzo.

3.1 Sostituzione dei giunti di dilatazione e modifica del sistema statico

Essendo le principali anomalie da attribuire alla scarsa tenuta dei giunti di dilatazione, negli interventi di ripristino dell'Autostrada del Brennero si è cercato di minimizzare il numero dei giunti stessi. Ciò si è realizzato collegando longitudinalmente gli impalcati dei viadotti mediante un elemento di soletta la cui rigidità sia molto inferiore a quella delle travate (a tale scopo è stato adottato un conglomerato cementizio polimerico a basso modulo elastico). In tal modo la soletta di collegamento influisce in modo trascurabile sulle rotazioni degli impalcati che continuano perciò a comportarsi come travi semplicemente appoggiate. Contemporaneamente, le sollecitazioni che nascono nelle sezioni d'incastro della soletta di collegamento risultano sufficientemente piccoli da essere sopportati dalla stessa. Tale intervento ha richiesto la modifica degli appoggi (dimensionati per assorbire i movimenti di una sola campata) poiché devono ora assorbire le escursioni derivanti da più campate collegate fra loro. L'eliminazione dei giunti è vincolata alla capacità delle pile di sopportare l'aumento delle sollecitazioni orizzontali dovute alla modifica dello schema statico. Gli elementi di soletta inseriti, costituiti da calcestruzzo ad alta resistenza con armature specificatamente realizzate, si comportano come cerniere, permettendo la rotazione reciproca alle travi, ma vincolandole nella traslazione orizzontale.

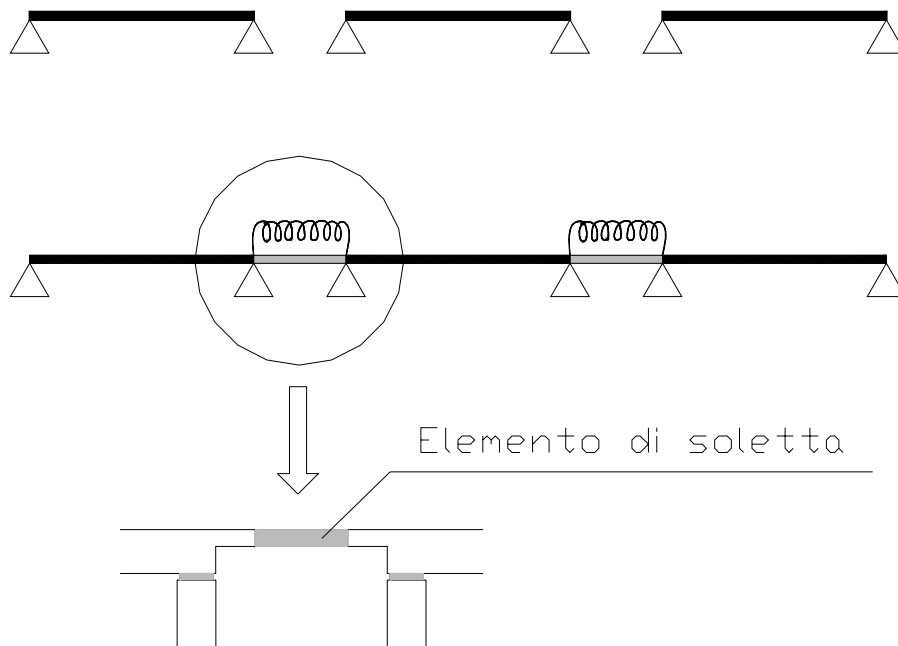


Fig. 3 : Modifica del sistema statico. L'elemento di soletta si comporta come una cerniera tra le travi, che originariamente non erano vincolate tra loro

3.2 Allargamento dell'impalcato

Nell'ambito degli interventi di risanamento delle opere si è ritenuto opportuno, per motivi di sicurezza, aumentare la larghezza della corsia di emergenza portandola da 2,50 metri a 3,00 metri. Essendo la sovrastruttura dei ponti composta da due impalcati, uno per ciascuna carreggiata, affiancati e distanziati di 1,40 m e la larghezza di ciascuna carreggiata di 11,30 metri, l'intervento di allargamento è stato realizzato collegando longitudinalmente i due impalcati.

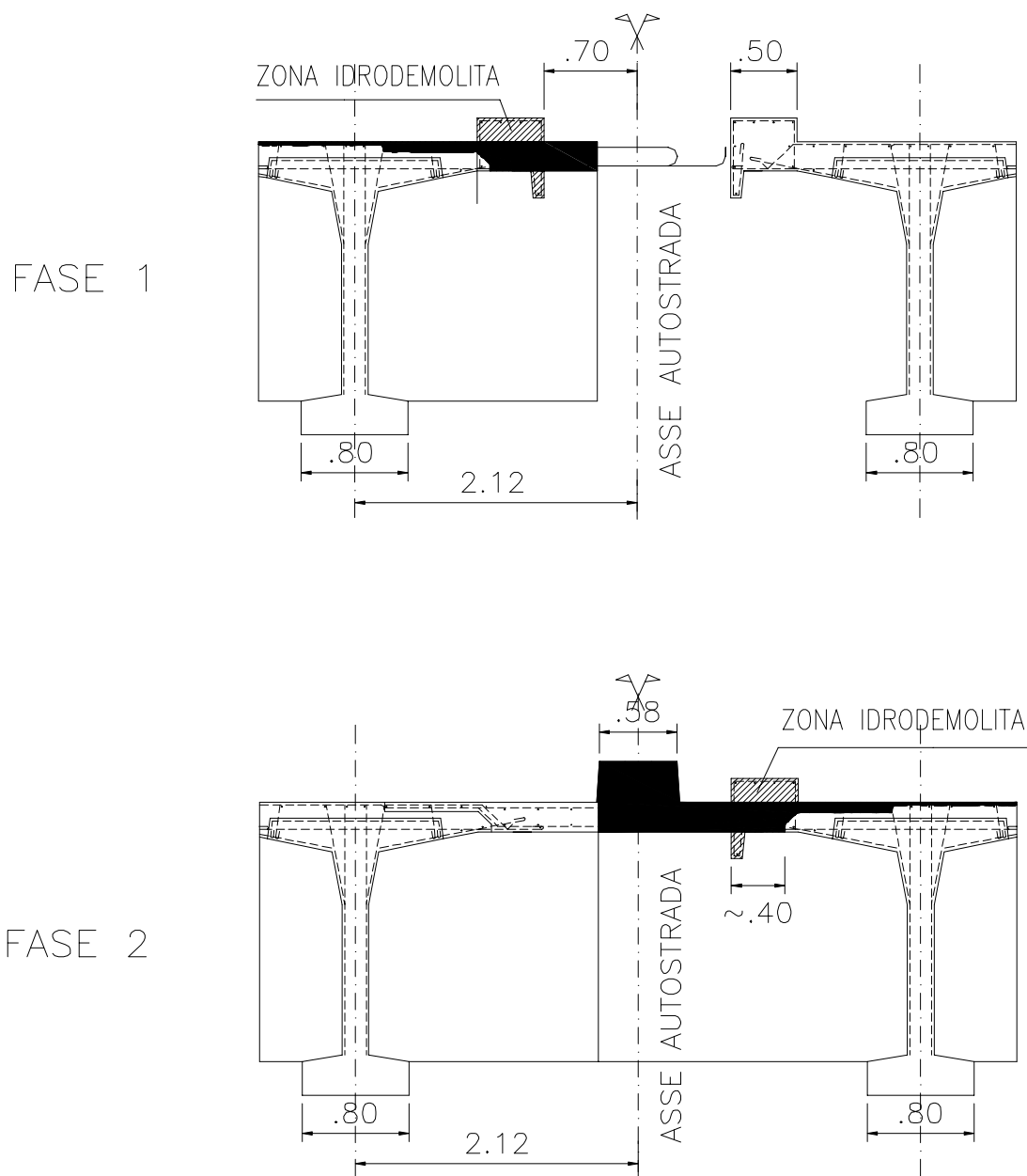


Fig. 4: Fasi del collegamento degli impalcati

La sovrastruttura ottenuta è quindi costituita da un unico impalcato. Tale intervento ha comportato il collegamento sia della soletta che dei traversi, i quali sono in questa nuova condizione molto più sollecitati e hanno necessitato quindi di un rinforzo mediante nuovi traversi costruiti in adiacenza a quelli esistenti ed armati con barre in acciaio del tipo GEWI per permettere la loro facile giunzione ed ancoraggio.

4 Rinforzi con lamelle in fibra di carbonio

4.1 Aspetti generali

I materiali accoppiati in fibre di carbonio stanno acquistando sempre più importanza soprattutto nella riparazione dei manufatti in calcestruzzo. Oltre alle lamelle vengono impiegati anche strati, tessuti, cavi ed anche fibre corte in fibra di carbonio.

Le lamelle in fibra di carbonio possono essere sia incollate superficialmente che innestate in appositi intagli. Sia le lamelle che i cavi in fibra di carbonio possono essere pre-tesi al fine non solo di migliorare la sicurezza statica, ma anche di ridurre la formazione di fessure (Bergmeister, 1999). Unico accorgimento per assicurare una ottimale applicazione delle fibre è quello di evitare di stenderle in presenza di concavità della struttura aventi una freccia superiore a circa 5 mm su una lunghezza di 2 m.

Nei lavori di ripristino della Autostrada del Brennero, l'utilizzo di fibre di carbonio in forma di lamelle ha permesso di aumentare la sicurezza allo stato ultimo della struttura. La Figura 5 mostra l'applicazione delle fibre sulla trave di un viadotto della autostrada del Brennero.



Fig. 5: Applicazione delle fibre di carbonio sulla trave di un viadotto della Autostrada del Brennero

4.2 Lunghezza dell'ancoraggio

Neubauer (2000) sulla base di 64 prove di accoppiamenti ha definito nel modo seguente il valore caratteristico della forza di rottura della struttura composita (percentile 5%) e la relativa lunghezza dell'accoppiamento. Il valore caratteristico della forza di rottura degli elementi compositi (lamelle in fibra di carbonio) T_k e la relativa lunghezza l_t possono essere così calcolate:

$$T_{k,\max} = 0,5 \cdot b_{cf} \cdot k_{cf} \cdot \sqrt{E_{cf} \cdot t_{cf} \cdot f_{ctm}}$$

$$l_{t,\max} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{E_{cf} \cdot t_{cf}}{f_{ctm}}}$$

$$k_{cf} = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_{cf}}{b}}{1 + \frac{b_{cf}}{400}}} \quad b_L; b \text{ [mm]}$$

Il valore teorico limite per la resistenza a trazione superficiale del calcestruzzo f_{ctm} viene così stabilito

$$f_{ctm} \leq 3,0 \text{ N/mm}^2$$

Per un'armatura in fibra di carbonio a n_L strati la lunghezza dell'ancoraggio può essere calcolata nel modo seguente (Niedermeier, 2001):

$$l_{t,k} = 0,55 \sqrt{E_{cf} \cdot t_{cf}} \cdot \left(\frac{1}{f_{ck}}\right)^{\frac{2}{9}} \cdot (n_{cf})^{\frac{1}{6}}$$

La lunghezza minima di ancoraggio per lamelle in fibra di carbonio non deve tuttavia essere inferiore ai seguenti valori:

$$l_{b,cf} > 25 t_{cf}$$

$$l_{b,cf} > 200 \text{ mm}$$

4.3 Coefficienti di sicurezza

Per il dimensionamento delle materie plastiche fibrorinforzate, in particolare per elementi in fibra di carbonio, sono stati definiti anche fattori di sicurezza parziali per una probabilità di rottura $P_f = 10^{-6}$ (intervallo di tempo di calcolo 1 anno) risp. per un indice di sicurezza di $\beta_{\min} = 4,7$.

Sulla base di analisi probabilistiche sono stati definiti i seguenti valori (Bergmeister, 2003).

Resistenza a trazione e allungamento a trazione di lamelle e cavi in fibra di carbonio:

$$f_{cf,d} b_{zw} \varepsilon_{cf,d} = \frac{f_{cf,k} b_{zw} \varepsilon_{cf,k}}{\gamma_{cf} \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_f \cdot \gamma_m}$$

$$\gamma_{cf} = 1,2$$

Resistenza a trazione e allungamento a trazione di strati (tessuti) in fibra di carbonio:

$$f_{cf,s,d} b_{zw} \varepsilon_{cf,s,d} = \frac{f_{cf,s,k} b_{zw} \varepsilon_{cf,s,k}}{\gamma_{cf,s} \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_f \cdot \gamma_m}$$

$$\gamma_{cf,s} = 1,3$$

Effetti di distacco: eventuali effetti di distacco o pericoli di desquamazione dell'armatura di rinforzo esterna in fibre di carbonio si possono ridurre limitando le deformazioni. A tal fine è stato introdotto il fattore di sicurezza parziale γ_1 .

$\gamma_1 = 1,0$, se non si verifica un distacco precoce a causa di eccessive deformazioni nel calcestruzzo (peeling-off).

$\gamma_1 = 1,4$, se esiste il pericolo di eccessive deformazioni nel calcestruzzo e dei conseguenti effetti di distacco.

Produzione degli elementi in fibra di carbonio: in caso di una produzione controllata in modo continuo (certificazione di qualità) si può presupporre un

Fattore di sicurezza parziale $\gamma_f = 1,0$

Solo in caso di controllo di qualità non regolare della produzione questo fattore dovrà essere ridefinito, aumentandolo in modo corrispondente.

Qualità del montaggio:

In caso di montaggio costantemente controllato ed eseguito da personale qualificato:

Fattore di sicurezza parziale relativo al montaggio $\gamma_m = 1,1$

In caso di montaggio controllato:

Fattore di sicurezza parziale relativo al montaggio $\gamma_m = 1,2$

In caso di qualità del montaggio normale con condizioni di impiego in parte non controllate:

Fattore di sicurezza parziale relativo al montaggio $\gamma_m = 1,4$.

4.4 Dimensionamento di travi inflesse rinforzate

Per il calcolo delle forze e delle deformazioni di una trave inflessa rinforzata con materiali accoppiati in fibra di carbonio si assumono i seguenti presupposti:

- mantenimento della planarità delle sezioni – ipotesi di Bernoulli (vale in media su un elemento di fessurazione)
- nessun pre-allungamento dei ferri di armatura al momento dell'applicazione del rinforzo in fibra di carbonio
- il momento di fessurazione risulta dal valore della resistenza a trazione del calcestruzzo, dove nella sezione del calcestruzzo non fessurata l'asse neutro passa attraverso il baricentro ideale
- linea di tensione-allungamento idealizzata per i materiali
- forza di trazione sul calcestruzzo trascurabile

Gli allungamenti possono essere calcolati in base ai parametri geometrici dalle condizioni lineari di deformazione.

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \frac{d-x}{x} \leq \frac{f_y}{E_s}$$

$$\varepsilon_{cf} = \varepsilon_{cu} \frac{h-x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{cf,d}$$

$$A_{cf} = b_{cf} \cdot t_{cf}$$

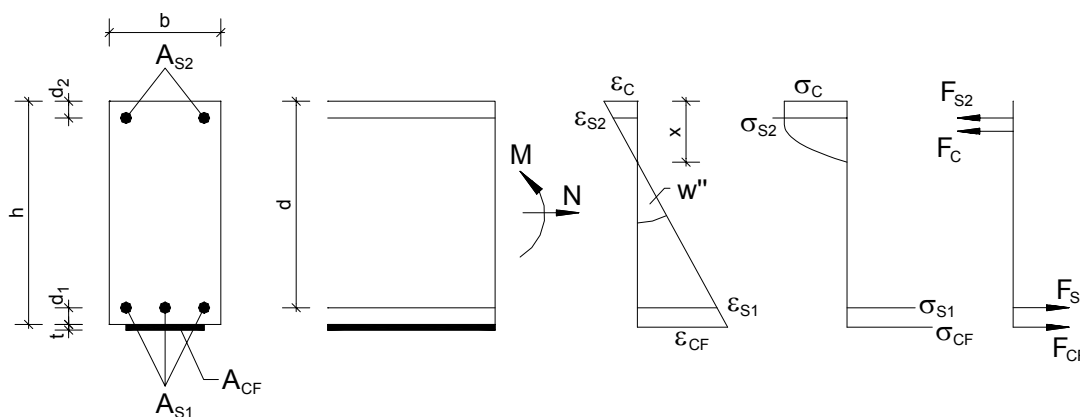


Fig. 6: tensioni e deformazioni della sezione rinforzata

L'allungamento iniziale nelle fibre estreme in trazione della sezione di calcestruzzo prima dell'applicazione del rinforzo è contrassegnato con ε_0 .

Se nel rinforzo in fibra di carbonio al momento dell'applicazione sono già presenti delle deformazioni $\varepsilon_{cf,0}$, ad es. in conseguenza di inflessioni causate dal peso proprio, oppure

se il rinforzo in fibra di carbonio viene pre-teso (pre-allungamento $\varepsilon_{cf,p}$), queste deformazioni possono essere prese in considerazione nell'equazione per semplice sottrazione o addizione (lamelle pre-tese).

In ogni caso si deve garantire che gli allungamenti esistenti non superino in nessun punto le deformazioni massime ammissibili ε_{ud} :

Deformazione a compressione del calcestruzzo	$\varepsilon_{c,ud} = - 3,5 \text{ ‰}$
Allungamento del ferro di armatura	$\varepsilon_{s,ud} = + 10,0 \text{ ‰}$ secondo la qualità dell'acciaio
Allungamento del rinforzo in fibra di carbonio	$\varepsilon_{CF,ud} = da + 6 a + 10 \text{ ‰}$

Tabella 3: Deformazioni ammesse

Il momento flettente di dimensionamento, tenuto conto del rinforzo in fibra di carbonio incollato esternamente, può essere calcolato nel modo seguente.

$$M_{Rd} = A_{s1} f_{yd} (d - \delta \cdot x) + A_{cf} E_{cf} \varepsilon_{cf,d} (h - \delta \cdot x) + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} (\delta \cdot x - d_2)$$

con $\delta = 0.4$

4.5 Dimensionamento per il taglio in travi inflesse rinforzate

Il calcolo della forza di taglio è stato sviluppato da Jansze sulla base di MC 90 e di Eurocodice 2 e verificato per travi rinforzate esternamente sia con lamelle in acciaio che in fibra di carbonio. Gli attuali metodi di calcolo della resistenza al taglio di elementi costruttivi senza armatura di rinforzo resistente al taglio in molte norme internazionali presentano lo stesso carattere semi-empirico. Su questa base è stata sviluppata anche la teoria estesa ad elementi in calcestruzzo armato pre-teso (compressione indotta dalla precompressione: σ_{cp})

con armatura in fibre di carbonio incollata esternamente (Matthys, 2000). È stato dimostrato che, tenuto conto della pre-tensione (pressione di segno negativo) e di un fattore moltiplicativo per il rinforzo esterno si sono potute ottenere le resistenze al taglio necessarie e sufficienti.

$$V_{Sd} \leq V_{Rd,ct} = \left[\left(\sqrt[3]{3 \cdot \frac{d}{a_L}} \right) \cdot 0,1 \cdot \eta_L \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_s \cdot f_{ck}) - 0,12 \cdot \sigma_{cp} \right] b_w \cdot d$$

$$\kappa = 1 + \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d[\text{mm}]}} \right) \leq 2,0$$

$$\rho_s = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$$

$$\eta_1 = 0,4 + 0,6 \cdot \frac{\rho_s [\text{kg} / \text{m}^3]}{2200}$$

$$a_L = \sqrt[4]{d \cdot L^3 \cdot \frac{(1 - \sqrt{\rho_s})^2}{\rho_s}}$$

$$a > L + d \quad , \quad a_L < a$$

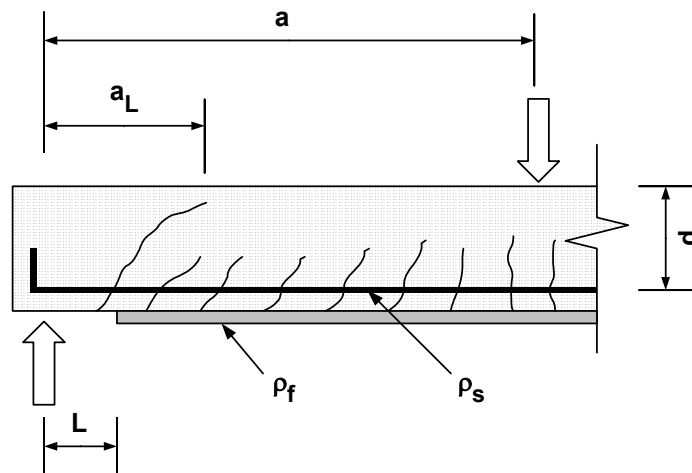


Fig. 7: Parametri geometrici nel calcolo della forza di taglio

5. Conclusioni e previsioni per il futuro

L'esperienza maturata in anni di lavori di manutenzione su importanti opere d'arte quali ponti e viadotti, ha indicato l'esigenza di un accurato monitoraggio continuo delle strutture. Esso contribuisce non solo a mantenere alto il livello di sicurezza delle opere, ma anche ad ottimizzare la programmazione e la realizzazione degli interventi di ripristino.

L'adozione di sempre nuovi materiali, dalle migliorate proprietà fisico-meccaniche, permette non solo di ripristinare efficacemente le strutture e gli elementi soggetti ad ammaloramento, bensì in molti casi anche di migliorare le loro caratteristiche resistenziali, come nel caso della applicazione delle fibre di carbonio su ponti e viadotti.

6 Bibliografia

- *Bergmeister, K. (2003): Fibre di carbonio nell'ingegneria civile. Ernst & Sohn Verlag, Berlino*
- *Direttiva: Manutenzione e riparazione di manufatti in calcestruzzo normale e armato. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik. Vienna 2003*
- *Fib bulletin 22 (2003): Monitoring and Safety Evaluation of Existing Concrete Structures*
- *fib TG 9.3 (2001): Armature esterne in polimeri fibrorinforzati per strutture in calcestruzzo armato. Convenor Triantafillou. Lausanne*
- *Holzenkämpfer, P. (1993): Modelli ingegneristici dell'accoppiamento di armature incollate su elementi costruttivi in calcestruzzo. Dissertazione Istituto per materiali da costruzione, costruzioni massicce e tutela antincendio. TU Braunschweig, 1993*
- *Jansze, W. (1997): Rinforzo di elementi in calcestruzzo armato in flessione con lamelle in acciaio incollate esternamente – Calcolo dello sforzo di taglio nelle travi e delle piastre di ancoraggio. Dissertazione TU Delft*
- *Matthys, St. (2000): Comportamento strutturale e dimensionamento di elementi in calcestruzzo rinforzati esternamente con polimeri fibrorinforzati. Dissertazione Ghent University, 2000*
- *Neubauer, U. (2000): Resistenza dell'accoppiamento con lamelle incollate in fibra di carbonio – Materiali accoppiati per rinforzo di elementi costruttivi in calcestruzzo. Dissertazione Istituto per materiali da costruzione, costruzioni massicce e tutela antincendio. TU Braunschweig, 2000*
- *Niedermeier, R. (2001): Assorbimento degli sforzi di trazione in elementi costruttivi rinforzati con armature incollate. Dissertazione, TU München 2001*