



Interventi di manutenzione programmata e valutazione della vita residua delle infrastrutture ferroviarie da ponte a struttura metallica

Dott. Ingg. Alessio PIPINATO^(), Carlo PELLEGRINO^(*), Claudio MODENA^(*)*

SOMMARIO – L'incremento della mobilità e del traffico nelle infrastrutture di trasporto, ha portato ad un conseguente accrescimento di velocità e dei carichi viaggianti sui ponti in generale, ed in particolare su quelli ferroviari. Allo stesso tempo, questi manufatti costituiscono la parte strategica di una rete nazionale in alcuni casi al limite della capacità di traffico e al limite della vita utile di progetto. I gestori delle reti sono consapevoli di questo stato di fatto, e si interrogano sulle molteplici possibilità offerte dalla manutenzione programmata, che basandosi sul monitoraggio delle opere, offre valutazioni in merito alla vita residua dei manufatti, agli interventi di recupero, fino alla sostituzione integrale. Al fine di rispondere a queste domande, sono richieste competenze scientifiche, riguardanti in particolare i meccanismi di degrado dei materiali, la loro resistenza di base e dell'intera struttura ai carichi ciclici. In questo scritto, viene introdotta la problematica generale della manutenzione delle opere d'arte infrastrutturali con particolare riguardo alla valutazione della vita residua a fatica, e viene presentato un recente progetto sperimentale effettuato in collaborazione con RFI su un ponte dismesso a struttura metallica.

1. Introduzione

Il patrimonio edilizio e infrastrutturale del nostro Paese comprende diversi esempi di costruzioni a struttura metallica, soprattutto tra quelle destinate ad ospitare attività di tipo industriale o infrastrutture di trasporto. Come accade per tutte le tipologie strutturali molte di esse necessitano di interventi di riabilitazione dovuti a difetti progettuali, a degrado di elementi portanti, a variazione della destinazione d'uso o al cambiamento dell'intensità dei carichi gravanti. In particolare, per quanto riguarda l'Italia, il patrimonio storico è ricco di significativi esempi in carpenteria metallica, che hanno avuto un ruolo essenziale nella crescita della civiltà industriale. I primi materiali utilizzati sono stati la ghisa e il ferro forgiato (o lavorato o puddellato) che ebbero in seguito rapido sviluppo con l'evoluzione di tecniche di fusione del minerale di ferro. I principi di conservazione delle origini storiche e del costruito che caratterizza i luoghi sono alla base delle principali motivazioni culturali che spingono ad eseguire interventi di recupero e ripristino delle più antiche costruzioni metalliche. I fenomeni di degrado più diffusi, nei ponti con struttura d'acciaio della seconda metà del

XIX secolo e della prima metà del XX secolo, sono costituiti in generale da mancanza di adeguata manutenzione, corrosione, dettagli strutturali sensibili al fenomeno della fatica; in particolare, in relazione ai materiali costituenti, anche se raramente riscontrabile, la ghisa grigia presenta spesso rotture da impatto data la sua fragilità e lesioni provocate da sbalzi termici, mentre per i manufatti in ferro forgiato i danni più frequenti sono correlabili alle riduzioni di sezione resistente legate ai fenomeni di corrosione (CNR-DT 202/2005). Il fenomeno più insidioso ai fini della valutazione della sicurezza di queste strutture, è quello della fatica: esso comporta la modificazione strutturale localizzata progressiva e permanente di dettagli costruttivi dei manufatti soggetti a cicli di tensione (defor-mazione) ripetuti.

2. Caratteristiche generali dei manufatti ed estensione della rete nazionale ferroviaria

2.1. I ponti metallici

L'età dei manufatti da ponte della rete nazionale ferroviaria risale non di rado all'età dell'infrastruttura di linea in cui essi sono inseriti, e parte di essi risale al ventennio 1900-1920. I ponti metallici solitamente fanno riferimento a schemi statici ricorrenti che possiamo così brevemente riassumere:

^(*) Dipartimento di costruzioni e trasporti, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Padova.

SCIENZA E TECNICA

- travature standard, luci costanti, schema statico in semplice appoggio al fine di prevenire fenomeni di cedimenti alle imposte, alle pile o alle connessioni e al fine di facilitare la sostituzione degli apparecchi di appoggio;
- luci non rilevanti, travatura unica per ogni singola linea, possibilmente indipendente per ogni singola linea al fine di evitare la completa interruzione del traffico nel caso di problemi in una delle due direzioni.

Va notato che non essendo frequente il passaggio contemporaneo dei treni in ambedue le direzioni, i ponti a doppio binario sono caratterizzati da una sollecitazione totale statisticamente inferiore a quella relativa ai ponti a linea singola.

2.2. La rete nazionale

L'estensione della rete nazionale ferroviaria si attesta oggi sui 16.00 km. La rete nazionale, nel periodo 2000-2003, ha incrementato di circa 250 km la parte elettrificata, raggiungendo quindi i 10.966 km totali di estensione (CNIT - Ministero delle Infrastrutture 2003)(tab. 1).

TABELLA 1
ESTENSIONE DELLA RETE FERROVIARIA
(CONTO NAZIONALE DEI TRASPORTI - CNIT 2003)

	2000 [km]	2001 [km]	2002 [km]	2003 [km]
Electrified net	10.714	10.864	10.891	10.966
Total net	15.974	16.035	15.985	15.965
Double track	6.156	6.230	6.265	6.298

3. Elementi generali

3.1. Vita residua di manufatti metallici da ponte

Si riassumono di seguito i fattori che maggiormente influenzano la vita residua di manufatti metallici, al fine di ottenere una panoramica completa del fenomeno. In particolare, gli aspetti che possono concorrere ad influenzare la durata dell'esercizio di un manufatto possono dipendere da (FISCHER et al. 1990; DI BATTISTA et al. 1998; MATAR e GREINER 2006):

- qualità dei materiali impiegati;
- qualità nell'esecuzione delle connessioni strutturali;
- problemi di corrosione;
- disomogeneità di materiali utilizzati;
- preparazione e tipologia delle forature;
- forze di attrito nelle connessioni, effetto clamping;
- imperfezioni geometriche locali nelle membrature;

- imperfezioni geometriche globali del manufatto;
- fenomeni di fatica in esercizio;
- frequenza della manutenzione e del monitoraggio.

3.2. Le curve di WÖHLER

Il primo passo che deve essere effettuato per la valutazione della vita rimanente di esercizio dei manufatti da ponte con riguardo ai problemi della fatica, consiste nell'uso delle curve di WÖHLER.

Rotture per fenomeni di fatica si presentano in elementi soggetti a carichi ciclici di entità significativamente inferiori rispetto a quelli di rottura in condizioni statiche: le prime indagini sul fenomeno della fatica vennero condotte proprio da WÖHLER (1860) nel campo ferroviario. L'espressione che regola il rapporto tra numero di cicli N e stress range $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ (la differenza algebrica tra i due valori estremi di un ciclo di tensione) può essere rappresentata su scala logaritmica come una retta. Tale linea viene detta curva di WÖHLER, o curva S-N. La resistenza a fatica è definita da una serie di curve di WÖHLER, ciascuna applicabile ad una precisa categoria di dettaglio, ovvero alla designazione data a ciascun dettaglio strutturale, sia esso rivettato, bullonato e così via. Tali curve si ottengono sperimentalmente tramite rottura ad alto numero di cicli di dettagli appartenenti alla stessa categoria, e da osservazioni statistiche sui risultati ottenuti. Generalmente la parte lineare delle curve di WÖHLER viene così definita:

$$N_i = (\Delta\sigma_i / \Delta\sigma_R)^k \cdot N_R \quad (1)$$

o

$$N_i = C \Delta\sigma_i^k \quad (2)$$

In cui

$$C = N_R \Delta\sigma_R^k \quad (3)$$

o

$$\log N_i = \log (N_R \Delta\sigma_R^k) - k \log \Delta\sigma_i \quad (4)$$

dove:

$\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2$ = singoli cicli di tensione nello spettro di progetto;

n_i = numero di ripetizioni dell' i -esimo ciclo di tensione $\Delta\sigma_i$;

N_i = numero di ripetizioni del ciclo di tensione $\Delta\sigma_i$;

$\Delta\sigma_2$...che portano a rottura corrispondentemente alle n_1, n_2, \dots ripetizioni dei cicli di stress applicati;

$N_R = 2 \times 10^6$ cicli;

$\Delta\sigma_R$ = resistenza a fatica degli N_R cicli;

K = inclinazione della retta.

Esistono diverse forme di curve di WÖHLER che possono essere usate per il calcolo del danno:

- con unica inclinazione, in cui anche bassi livelli di tensione contribuiscono all'affaticamento del materiale;

SCIENZA E TECNICA

- con unica inclinazione e limite di cut-off, ovvero in cui si considera che esista un limite inferiore di tensione, al di sotto del quale il danneggiamento a fatica non abbia contributo;
- con due inclinazioni (solitamente $K=3$ e $K=5$) in cui si considera che anche piccole variazioni di tensione contribuiscano al danno; spesso anche queste descrizioni del danneggiamento comprendono un limite di cut-off.

Valgono le seguenti osservazioni:

- le curve di WÖHLER sono determinate per via statistica, per cui vanno considerate prudenzialmente osservazioni fatte su un numero limitato di test;
- le curve di WÖHLER si basano su sperimentazioni spesso eterogenee, infatti seppur con riferimento a dettagli strutturali identici (categorie di dettaglio), risulta complesso realizzare prove high cycle in condizioni identiche di prova, con riferimento a materiali dello stesso genere ed in condizioni statiche (o di danno) di partenza identiche;
- la categorizzazione di dettaglio è per sé incompleta, non potendo comprendere l'universalità dei dettagli esistenti nei manufatti metallici: a tale scopo sono spesso ammesse dalle norme valutazioni ingegneristiche basate su analogie strutturali se fondate su assunti a favore di sicurezza, ovvero con riferimento alla categoria di dettaglio che meglio approssima il particolare strutturale in esame che presenta la curva a $\Delta\sigma_R$ più basso a parità di N_R .

$$N_i = N_R \Delta\sigma_R^k / \Delta\sigma_i^k = C / \Delta\sigma_i^k \quad (7)$$

$$N_e = N_R \Delta\sigma_R^k / \Delta\sigma_e^k = C / \Delta\sigma_e^k \quad (8)$$

dove

e = equivalente

C = costante definita per $N = 2 \times 10^6$

Tramite opportune sostituzioni tra (6), (7), (8) si ottiene la seguente relazione:

$$\frac{n_1 \Delta\sigma_1^k}{C} + \frac{n_2 \Delta\sigma_2^k}{C} + \dots + \frac{n_i \Delta\sigma_i^k}{C} = \frac{n_e \Delta\sigma_e^k}{C} \quad (9)$$

ovvero

$$\sum n_i \Delta\sigma_i^k = n_e \Delta\sigma_e^k \quad (10)$$

I valori delle escursioni di tensione possono essere valutati come (eq. 11):

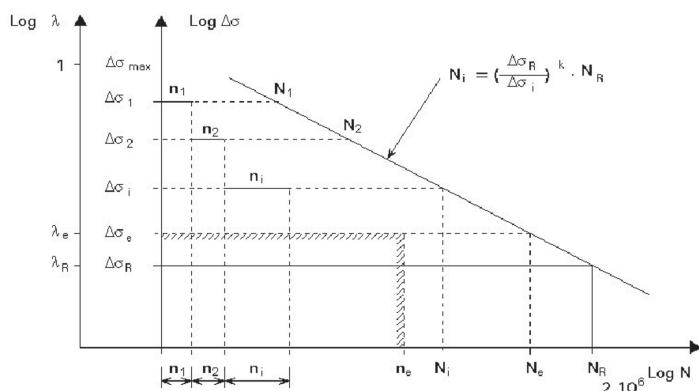


Fig. 1 - Trasformazione della "storia di tensione" nel diagramma S-N.

3.3. La regola di Palmgren-Miner

Il danno accumulato indotto da differenti carichi gravanti su una struttura nel corso della sua vita di esercizio può essere stimata in prima approssimazione tramite la seguente espressione:

$$S = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad (5)$$

Questa equazione può essere trasformata in questo modo (fig. 1)

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_e}{N_e} \leq 1 \quad (6)$$

Dall'equazione (1), per la parte lineare della curva S-N, valgono le relazioni:



Fig. 2 - Operazioni di dismissione.

Sezione A.B.

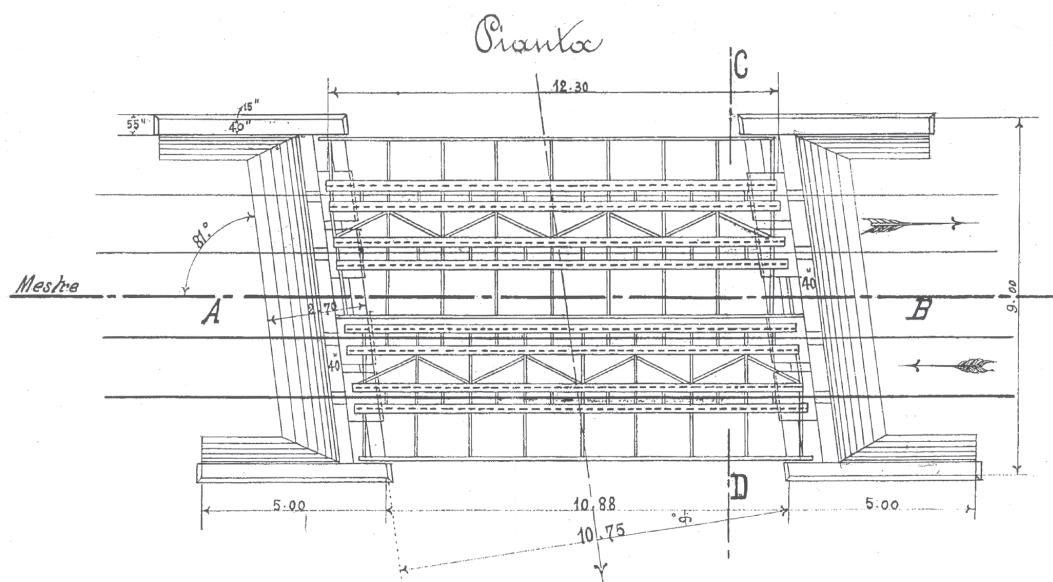
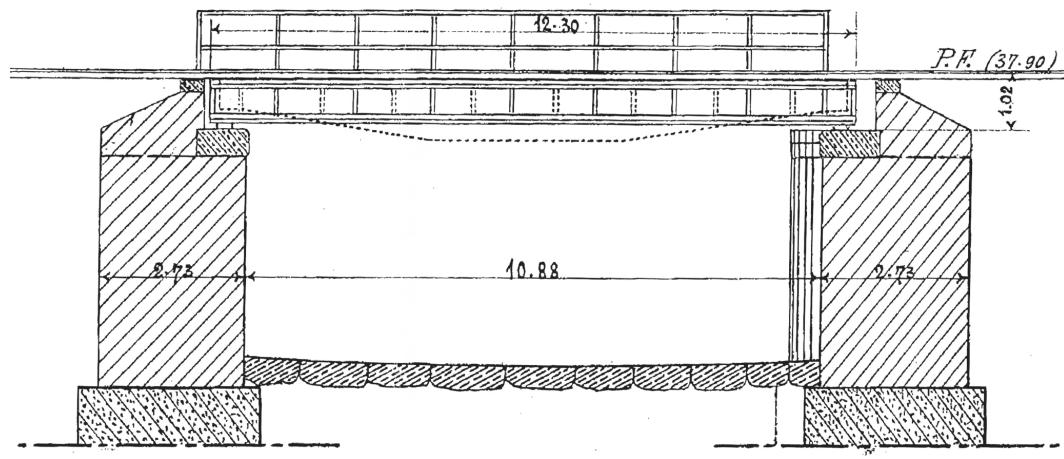


Fig. 3 - Progetto originale, sezione e pianta.

$$\Delta\sigma_{(norma)} = \max \sigma_{(norma)} - \min \sigma_{(norma)} \quad (11)$$

ovvero con riferimento alle indicazioni di calcolo che ciascuna norma fornisce in merito alla stima dell'escursione di tensione con riferimento al modello di carico. L'espressione matematica che esprime l'equivalenza tra le aree geometriche rappresentate nella figura è la seguente:

se

$$\lambda = \Delta\sigma_i / \Delta\sigma_{(norma)} \quad (12)$$

allora

$$\sum n_i \Delta\lambda_i^k = n_e \cdot \lambda_e^k \quad (13)$$

3.4. Il coefficiente dinamico

L'effetto dinamico di un convoglio in movimento viene solitamente conteggiato come aliquota del carico statico. Nella generalizzazione del problema, si prende in considerazione quanto suggerito dallo standard dell'Union Internationale des Chemins de Fer (UIC), per il quale il coefficiente dinamico è esprimibile come:

$$1 + \rho \quad (14)$$

dove

$$\rho = a_1 \rho' + a_2 \rho'' \quad \rho < 1 \quad (15)$$

ρ' riferimento al piano viabile integro;

ρ'' per tener conto delle imperfezioni;

a_1, a_2 si riferiscono rispettivamente alla tipologia di trazione e alla qualità del piano viabile.

Appare invece superfluo accennare qui a quanto sufficientemente noto e apprendibile analogamente dall'Eurocodice 1 (EN 1991-2 2003). Va però qui sottolineato che risulta di grande importanza approfondire con cura il valore del coefficiente dinamico da applicare, al fine di evitare sottostime o sovrastime grossolane del fenomeno di fatica che potrebbero condurre a risultati di verifica non corretti.

4. Procedimenti per la valutazione della sicurezza a fatica di ponti ferroviari esistenti

Le tradizionali verifiche da effettuare riguardo ai fenomeni di fatica previste dalle norme vigenti riguardano due aspetti fondamentali:

- la verifica a fatica;
- la verifica a danneggiamento.

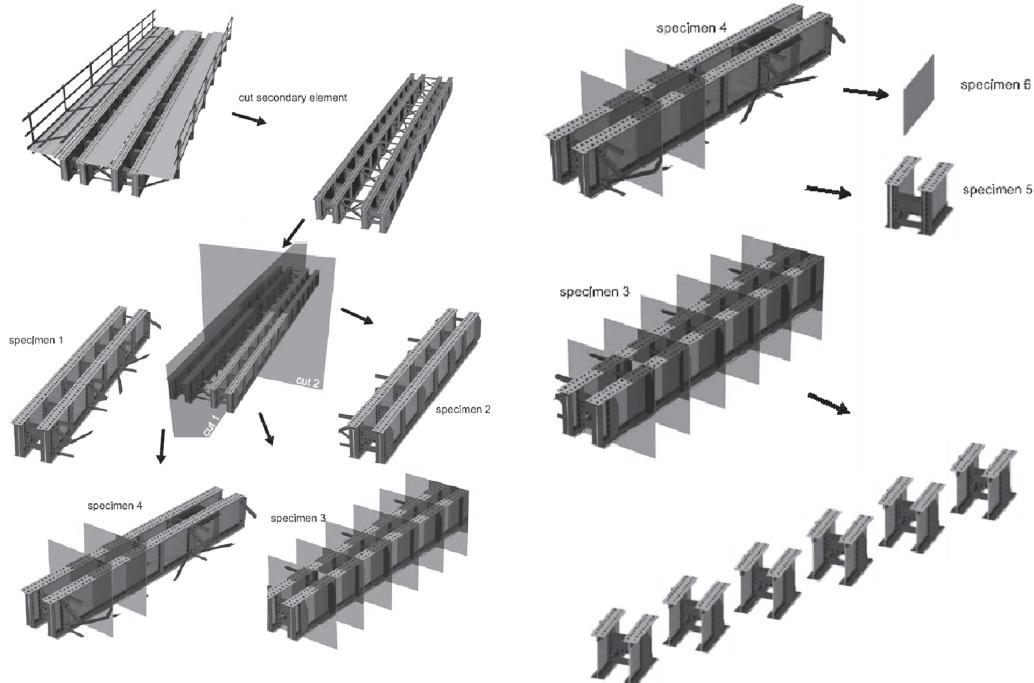


Fig 4. - Piano di smontaggio del ponte per le operazioni sperimentali.

Esse possono essere effettuate seguendo quanto descritto nell'Istruzione 44/f o nell'Eurocodice 3 (EN 1993-1-9 (2003).

Tali metodologie di verifica si basano spesso su alcuni dati di carattere deterministico. Va notato però che tra questi, ad esempio nella verifica a danneggiamento, ha notevole incidenza la valutazione del traffico storico che ha percorso il manufatto: l'assunzione di valori di carattere deterministico, difficilmente applicabile per la non nota distribuzione nel tempo del traffico e dei carichi, potrebbe così condurre ad errate valutazioni in merito alla vita residua utile del manufatto. Per tali motivazioni, appaiono più affidabili modelli di valutazione che si riconducono sostanzialmente alle seguenti metodologie di indagine:

- modelli probabilistici semplificati;
- modelli probabilistici (full probabilistic).

Semplificando, in entrambi i casi il procedimento consiste nel basare le verifiche su distribuzioni probabilistiche di traffico storico e futuro, derivate da indagini statistiche riportate in letteratura (PRPINATO 2007) e nell'assumere due (metodi semplificati) o più (full probabilistic) parametri dedotti a partire da distribuzioni di variabili di tipo gaussiano, log-normale, di Weibull e così via. A partire da tali tipologie di *assessment* è poi possibile giungere a delle stime sul decadimento della affidabilità del sistema strutturale ponte (valutazione dell'indice β , di *reliability*), o di singoli elementi strutturali ritenuti critici al variare del tempo.

5. Caso studio: valutazione sperimentale della vita residua di un ponte ferroviario

5.1. Il ponte Meschio

Il Dipartimento di Costruzioni e Trasporti dell'Università di Padova collabora dal 2003 con Rete Ferroviaria Italiana-Compartimento di Venezia nell'ambito di un Master in Progettazione di Infrastrutture. La dismissione da parte di RFI di un ponte a

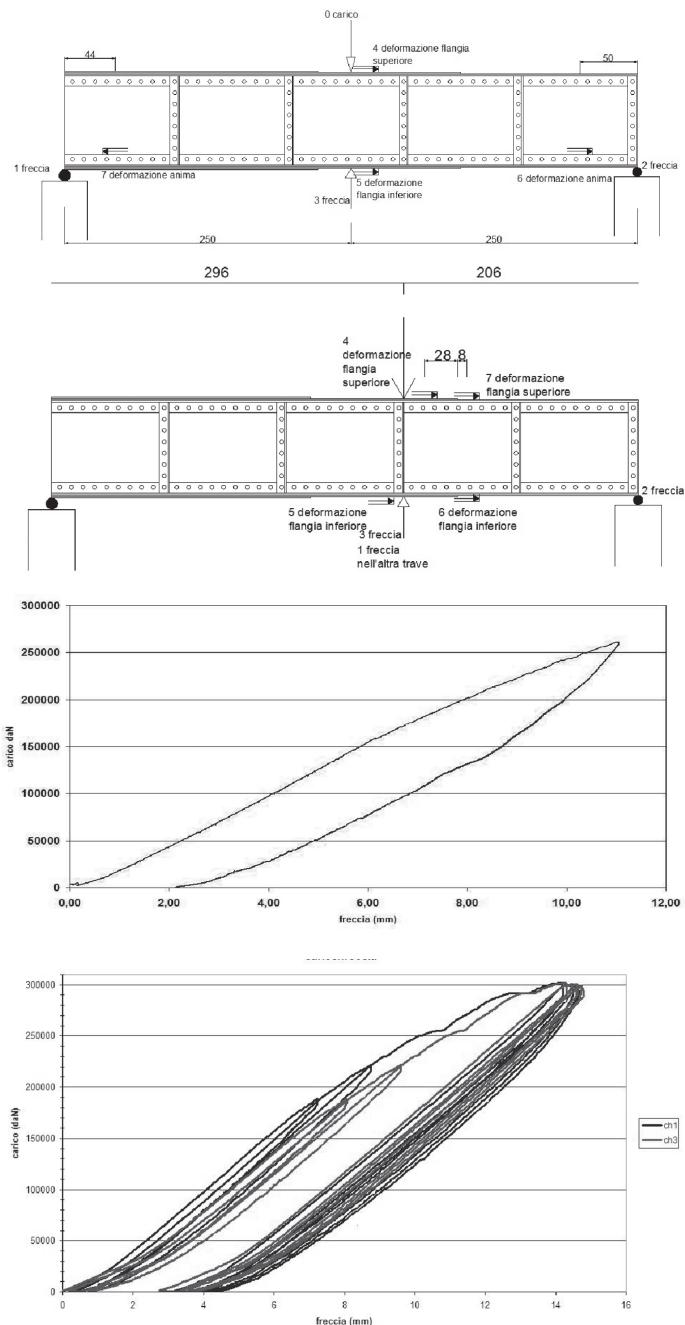


Fig. 5 - Test statico e ciclico, set up di prova e grafici carico-spostamento

SCIENZA E TECNICA

travi gemelle del 1916, appartenente alla linea Mestre-Cormons, sul tronco Conegliano-Casarsa (attraversamento del fiume Meschio), risalente al 1916, è stato motivo per considerare l'opportunità di sottoporre il manufatto a prove di laboratorio. Il ponte è rimasto in esercizio presso Sa-cile (Pordenone) fino al Settembre 2006 (figg. 2, 3 e 4).

5.2. Sintesi dei test effettuati

Si riporta di seguito una sintesi dei test fisico-chimici e meccanici effettuati ad oggi sui diversi elementi del ponte. Si sottolinea come ad oggi sia in corso la caratterizzazione a fatica dell'elemento strutturale hot spot della struttura, tramite la ripetizione di test ad alto numero di cicli su pezzi simili.

Descrizione	Esito
<i>Geometria degli elementi sottoposti a prova</i>	Quattro travi a doppio T, lunghe 12,3 metri e alte 80,5 cm, collegate a coppie mediante controventi e diagonali. La lunghezza totale della trave, già dimezzata (6,15 m) rispetto alla realtà, è stata poi ulteriormente ridotta a 5 metri per l'esecuzione delle prove, in modo da far corrispondere agli appoggi i rinforzi dell'anima
<i>Proprietà meccaniche</i>	<p><i>Prove a trazione:</i> f_y media = 264 MPa f_u media = 353 MPa E media = 172000 MPa</p> <p><i>Prove di resilienza:</i> R media = 10 J</p>
<i>Prove fisico-chimiche</i>	<p><i>Prova quantometrica:</i> C (0.025), Mn (0.35), Cr (0.006), N (0.02), Mo (0.001), Co (0.01), P (0.036), S (0.050) Risultato: ghisa, lega ferro-carbonio (2.5% <C<4.5%)</p> <p><i>Prova metallografia:</i> struttura ferritica, con evidenti tracce di sulfuri</p>
<i>Prova a flessione su sezione non rinforzata, 0 → 261 kN</i>	Esito: uscita dell'anima dal piano medio in una delle due travi. Fino al verificarsi di tale deformazione, la freccia in mezzeria ha subito una variazione lineare con il carico. L'imbozzamento dell'anima, si è verificato solo in una delle due travi: il fatto che tale deformazione non si sia verificata in entrambe, può essere la conseguenza di un difetto geometrico globale dell'intero pezzo, oppure potrebbe essere dovuto a imperfezioni locali della flangia, dell'anima, o dei chiodi.
<i>Prova ciclica a flessione su sezione rinforzata</i> <i>1 X 0 → 30 kN</i> <i>1 X 0 → 100 kN</i> <i>1 X 0 → 150 kN</i> <i>1 X 0 → 180 kN</i> <i>1 X 0 → 220 kN</i> <i>4 X 0 → 300 kN</i>	Raggiunti 260 kN e 290 kN si è registrata un'accentuata fase plastica caratterizzata da un cambiamento di pendente della curva carico-freccia. Una volta arrivati al carico massimo di 300 kN, la freccia delle due travi nei successivi tre cicli, da 0 a 300 kN, è stata per lo più la stessa. Il grafico carico/deformazione evidenzia maggiormente la tendenza alla fase plastica. Durante l'esecuzione delle prove, e soprattutto al termine, si è osservato tra l'anima della trave e l'angolare, un distacco della vernice, in quei punti in cui non erano presenti irrigidimenti delle flange; i distacchi più evidenti si sono avuti tra angolari e anima nelle sezioni più vicine al punto di applicazione del carico.
<i>Prova statica a flessione su sezione rinforzata, 1 X 0 → 106 kN</i>	Rottura del calastrello per taglio della chiodatura, soprattutto senza preavviso alcuno.
<i>Prova ciclica a flessione su trave di corsa</i>	$F_{min} = 10 \text{ kN}$ - $F_{max} = 290 \text{ kN}$ - Stress range = 62 MPa Stress ratio $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 0.35$ - Rif. Trave 3a - $F = 0.95 \text{ Hz}$ Numero di cicli effettuato: 2.500.000 Esito: si è riscontrata l'integrità strutturale del pezzo al termine dei cicli effettuati, mentre si sono controllate in continuo per 28 giorni l'accrescimento di alcune cricche, le deformazioni e gli spostamenti dei punti di controllo.

5.3. Osservazioni

I test descritti, facenti parte di una estesa campagna di prove mettono in luce la notevole capacità di resistenza statica del manufatto dopo un prolungato periodo di servizio. Anche i piccoli deterioramenti locali riscontrati, come ad esempio fenomeni di corrosione diffusi o localizzati alle imposte, non sono risultati punti deboli della struttura. La prova statica si è spinta fino a 3000 kN, ovvero al limite della fase elastica ed ha messo in luce come le riserve di resistenza del manufatto siano tali da poter confermare uno stato di ottima conservazione dopo cento anni di funzionamento. Le prove a fatica hanno evidenziato anch'esse un buon comportamento strutturale del manufatto, ovvero l'assenza di deterioramenti, difetti, o la propagazione di evidenti cricche ritenute pericolose. La metodologia utilizzata per la caratterizzazione dello stato di questo manufatto permette di affrontare con maggiore sicurezza future indagini su manufatti metallici ferroviari, anche in maniera non distruttiva, avendo realizzato una estesa analisi bibliografica e formalizzato un database di indagini sperimentali analoghe realizzate dall'800 ad oggi in università ed enti di ricerca che si sono occupati dell'argomento su scala internazionale (figg. 5 e 6).

6. Manutenzione programmata e affidabilità strutturale

I ponti costituiscono un bene critico nelle reti di trasporto: per tale motivo, l'attenzione che si pone nella loro conservazione va via via crescendo, tanto più oggi che l'intera rete infrastrutturale italiana sta raggiungendo il limite di vetustà delle principali e più critiche opere di nodo. Oltre alle tradizionali tecniche di *bridge management* oggi utilizzate che sono alla base degli interventi di manutenzione programmata, ma che si basano solitamente su analisi superficiali e non approfondite dei manufatti, costituisce importanza fondamentale per i gestori delle reti dotarsi di elementi di mappatura di sistema e valutazioni analitiche di manufatti singoli riguardo alla affidabilità strutturale dei ponti, in particolare per quanto concerne la vita residua a fatica per i ponti metallici. La manutenzione programmata in quest'ottica si colloca quindi alla fine di un processo di valutazione strutturale che va delineato per fasi, a partire da una rete infrastrutturale fino al singolo elemento costruttivo *hot-spot* (fig. 7).

Viene di seguito presentata una metodologia di indagine al passo, che può generalmente essere utilizzata per analisi complesse di reti infrastrutturali: essa si basa sull'assunto che l'elemento di partenza per l'avvio di estese campagne di analisi comparativa dell'affidabilità strutturale è costituito da dubbi inerenti la capacità residua di elementi nodali di rete per sopralluoghi limiti di esercizio,

interventi di riparazione e mantenimento, che difficilmente riescono ad assicurare livelli qualitativi di percorribilità e sicurezza paragonabili a quelli di un nuovo manufatto. Tuttavia si riscontra sia nella letteratura scientifica, sia nelle recenti sperimentazioni, una buona qualità delle strutture storiche oggi esistenti riguardo sia ai materiali impiegati che alla manifattura, ed un

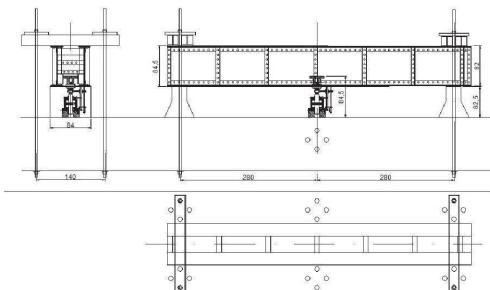


Fig. 6 - Test a fatica high cycle, set up di prova.

o presunti tali. La flow chart (fig. 8) rappresenta un procedimento di riqualificazione per ponti al fine di incrementare i carichi o prolungare la vita di servizio del manufatto: il processo è di tipo adattivo, basato su approfondimenti successivi di affinamento delle metodologie di analisi strutturale riguardo allo stato presente e futuro del manufatto e al suo comportamento. La valutazione strutturale si basa innanzitutto sull'analisi della documentazione a disposizione, sull'ispezione delle strutture, sui test fisico-chimici dei materiali costituenti, sui test delle performance strutturali, sull'affinamento numerico delle analisi e sulla pianificazione delle future ispezioni.

7. Conclusioni

Molti ponti ferroviari stanno oggi sperimentando condizioni più gravose che in passato, e le previsioni di incremento di traffico e di velocità media risultano avere trend di crescita continuamente al rialzo. Al passare inesorabile degli anni, e al corrispondente invecchiamento dei ponti stessi, corrispondono solo in parte sostituzioni di interi manufatti, conseguentemente la condizione generale dello *stock* di ponti in esercizio viene mantenuta sufficientemente sicura da

conseguente sufficiente grado di sicurezza anche nei confronti degli attuali traffici e carichi agenti: il pericolo può rilevarsi ugualmente per fenomeni di degrado localizzato, che conducono, nel caso delle strutture metalliche storiche, alla riduzione della sezione resistente

o alla più probabile propagazione di cricche da affaticamento del materiale anche in maniera lenta, ma inesorabilmente tendente a stati limite ultimi penalizzanti per i manufatti e i relativi mezzi in esercizio. La capacità di gestire manufatti complessi ed ancor più reti estese, e la previsione della loro vita utile va quindi sempre più indirizzandosi verso analisi strutturali crescentemente sofisticate sia a livello di manufatto che a livello di sistema strutturale, che introducano elementi predittivi di danno in relazione a proiezioni di input variabili di carattere probabilistico. E' quindi possibile oggi gestire una rete infrastrutturale e la sua relativa manutenzione in relazione a analisi e mapature di livello avanzato, e

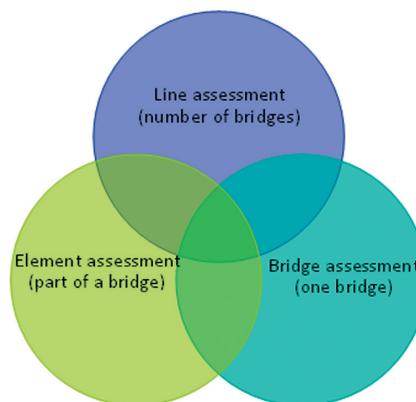


Fig. 7 - Tipologie di valutazione strutturale.

conseguentemente programmare la riparazione o la sostituzione di quei manufatti che presentino carenze evidenti o possibili inadeguatezze in relazione alla variazione della domanda prestazionale.

SCIENZA E TECNICA

BIBLIOGRAFIA

- [1] J.D. DI BATTISTA, D.E. ADAMSON, G.L. KULAK (1998): "Evaluation of remaining fatigue life for riveted truss bridges", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 25, 1998, pp. 678-691.
- [2] J.D. DI BATTISTA, D.E. ADAMSON, G.L. KULAK (1997): "Fatigue Strength of Riveted Connections", Journal of Structural Engineering, Vol. 124, No. 7, July 1997, pp. 792-797.
- [3] EN 1991-2 (2003) . Eurocode1, Action on structures, part 2, traffic loads on bridges, CEN, Brussels.
- [4] EN 1993-1-9 (2003). Eurocode 3: Design of steel structures – part 1-9: Fatigue, CEN, Brussels.
- [5] J.W. FISHER, B.T. YEN, D. WANG, 1990: "Fatigue Strength of Riveted Bridges Members", Journal of structural Engineering. Vol. 116, No. 11, pp 2986-2981.
- [6] Instruction n. 44 F del 30/1/1992 "Verifica a Fatica dei Ponti Ferroviari".
- [7] E.B. MATAR, R. GREINER (2006): "Fatigue Test for a Riveted Steel Railway Bridge in Salzburg", Structural Engineering International, Vol. 16, No. 3, August 2006, pp. 252-260.
- [8] E.B. MATAR (2007): "Evaluation of Fatigue Category of Riveted Steel Bridge Connections", Structural Engineering International, No. 1, 2007, pp. 72-78.
- [9] G.L. KULAK "Fatigue Strength of Riveted Shear Splices", Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 2(1), 1-10, 2000.
- [10] G.L. KULAK (1996): "Fatigue Strength of Riveted Connections", Stahlbau, Vol. 11, November 1996, pp. 445-451
- [11] G.L. KULAK, and I.F.C. SMITH (1995): "Analysis and design of fabricated steel structures for fatigue: a primer for civil engineers", Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland.
- [12] G.L. KULAK discussion of "Fatigue Strength of Riveted Bridge Members", by J.W. FISHER, B.T. YEN, D. WANG, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 8, August 1992.
- [13] Ministero delle Infrastrutture (2003): "Conto Nazionale dei Trasporti".
- [14] A. PIPINATO, C. GHISI, M. BACCHI, C. MODENA (2006): "Il

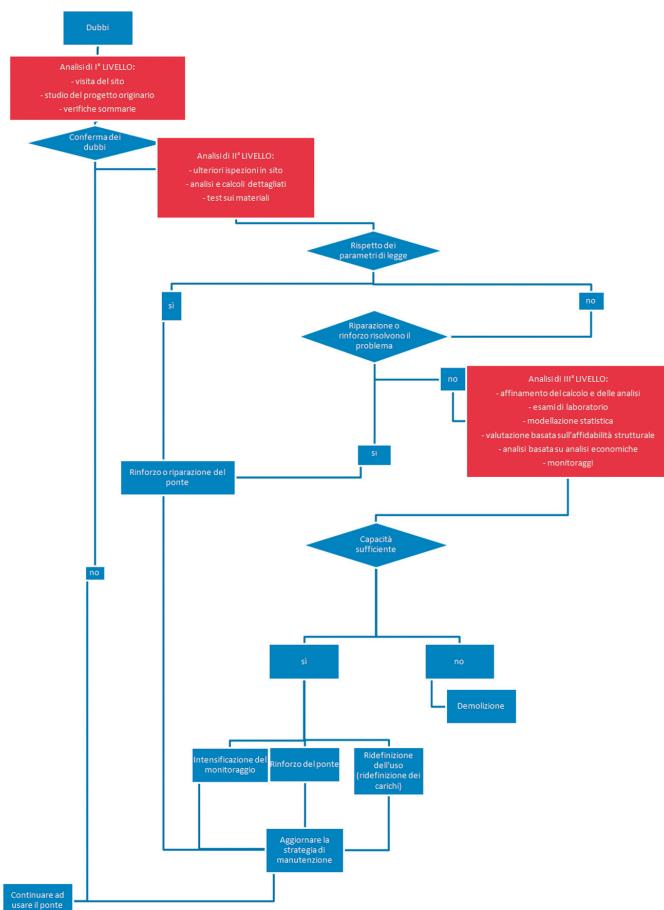


Fig. 8 - Diagramma di flusso per la valutazione dello stato strutturale di ponti in esercizio.

progetto del nodo AV-AC di Bologna", vol. 1, pp. 1-340, ISBN: 887784-264-4 Collaborazione tra TAV - Treno Alta Velocità Spa e Università degli Studi di Padova: Libreria Internazionale Cortina (ITALY).

- [15] A. PIPINATO (2007): "High cycle fatigue behaviour of metal historical riveted railway bridges", PhD Thesys, Universitiy of Padova – University of Trento, Italy.
- [16] A. WOHLER (1860): "Versuche über die festigkeit eisenbahnwagenachsen". Z Bauwens 1860-10.
- [17] Union Internationale des Chemins de Fer (UIC), UIC Code 776-1.
- [18] Y.E. ZHOU: "Assessment of Bridge Remaining Fatigue Life through Field Strain Measurement", Journal of Bridge Engineering, Vol. 11, No. 6, November 2006, pp.737-744.

SCIENZA E TECNICA

Sommaire

Summary

Zusammenfassung

INTERVENTIONS D'ENTRETIEN PROGRAMME ET EVALUATION DE LA VIE RESIDUELLE DES INFRASTRUCTURES FERROVIAIRES DE TYPE PONT A STRUCTURE METALLIQUE

L'augmentation de la mobilité et de la circulation dans les infrastructures du transport, a amené à un conséquent accroissement de la vitesse et des charges voyageant sur les ponts en général, et en particulier sur les ponts ferroviaires. En même temps, ces manufactures constituent la partie stratégique d'un réseau nationale dans certains cas à la limite de la capacité de trafic et à la limite de la vie utile d'un projet. Les gérants des réseaux sont conscients de ce-la, et ils s'interrogent sur les multiples possibilités offertes par l'entretien programmé, qui en se basant sur le monitoring des œuvres, offre des évaluations au sujet de la vie résiduelle des manufactures, aux interventions de récupération, jusqu'au remplacement intégrale.

au but de répondre à ces questions, des compétences scientifiques sont demandées, qui concernent en particulier le mécanismes de dégradation des matériaux, leur résistances de base et de la structure entière aux charges cycliques. Dans ce mémoire, on introduit la problématique générale de l'entretien des œuvres d'art d'infrastructure avec attention particulière à l'évaluation de la vie résiduelle à la fatigue, et on présente un projet expérimental récent réalisé en collaboration avec RFI sur un pont condamné à structure métallique.

SCHEDULED MAINTENANCE ACTIONS AND RESIDUAL LIFE EVALUATION OF RAILWAY INFRASTRUCTURES FOR METALLIC STRUC- TURE BRIDGES

Mobility and traffic increase in transport infrastructures has caused a consequent increase in both the speed and the loads running over bridges in general and over railway bridge in particular.

At the same time these structures represent the strategic part of a national network and in some cases they are at the limit of their traffic capacity and project useful life. Network managers are aware of this situation and consider the different possibilities offered by scheduled maintenance that, based on infrastructure monitoring, offers evaluations of structure residual life, recovery actions and full replacement too.

Specific capacities are required to answer these questions, regarding mainly material degradation mechanisms, material basic resistance and complete structure resistance to cyclic loads. This paper deals with the general problem of infrastructural work maintenance with specific regard to the evaluation of the fatigue residual life; it moreover illustrates a recent experimental project carried out in collaboration with RFI on a disused metallic structure bridge.

GEPLANTE INSTANDHALTUNGSTATIGKEITEN UND BEWERTUNG DER RESIDUALEN NUTZDAUER VON METALLISCHEN EISENBAHNBRÜCKEN

Der immer intensiver Eisenbahnverkehr hat mit sich höhere Geschwindigkeiten und Achslasten gebracht, die die Brücken beanspruchen – Diese wichtige Infrastrukturen haben in einigen Fällen, die Grenzen ihrer zeitlichen Nutzung

gen Fällen, die Grenzen ihrer zeitlichen Nutzung erreicht.

nahmen erlauben.
Um solche Probleme zu lösen sind hochwissenschaftlichen Kenntnisse notwendig, die das Verfallverfahren des Werkstoffes, seine Festigkeit wie die ganze Strukturfestigkeit einschließen.

Dieses Problem wird hier erfasst und in Beziehung auf einem spezifischen Fall diskutiert; eine Stahlbrücke der italienischen Eisenbahnnetze RFI wurde demontiert und an einem spezifischen Experimentierprogramm unterworfen. Analyse der Resultaten.