



Problemi di sicurezza nelle valutazioni strutturali di ponti esistenti

Assessment of existing bridges: safety and security issues

Dott. Ing. Alessio PIPINATO^(*)

1. Introduzione

Nel presente articolo vengono presentati i principali problemi che si evidenziano sempre più nelle reti infrastrutturali ed in particolare nei ponti. Si tratta di problemi di danneggiamento locale o globale per eventi ambientali normali o eccezionali. Oltre ad una prima panoramica sul problema, vengono presentati i danneggiamenti più frequentemente riscontrati, le possibili cause, ed i metodi di prevenzione da adottare.

2. La sicurezza nei ponti esistenti

I ponti esistenti rappresentano una parte assai strategica delle reti infrastrutturali. Nonostante la crescente vetustà, e pur sottoposte a un incremento notevole in termini di numero di traffico sopportato, tali reti si trovano in una situazione di buona salute strutturale, a testimoniare



Fig. 1 - Il collasso di un piccolo ponte ferroviario in Scozia (2009), causato dal deragliamento di un treno. *Collapse of a small railway bridge in Scotland (2009), caused by a train derailment.*

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

1. Introduction

In this study the principle safety and security issues evidenced in the infrastructural nets, and especially on bridges are discussed. Global or local damage failures are the most common problems evidenced in literature either due to particular or exceptional events. The study, after a general overview on the matter, presents the most common damage problems, possible causes and prevention methods to avoid failures or collapses.

2. Safety and security in existing bridges

Existing bridges represents strategic components of infrastructural nets. Despite their increasing age, and even if subjected to an increasing traffic, these nets stands generally in a good structural health, testified also by very rare cases of prolonged out of service due to structural problems.

Nevertheless, it is important to highlight the major causes of degradation reported in bridges, so that to achieve an adequate maintenance and a design stage aware that new structures should ensure - during the lifetime - growing capacity and structural performance (fig. 1).

3. Seismic issues

One of the most common cause of bridge failure is represented by seismic events (fig. 2).

The introduction in the new Italian code, *Norme Tecniche per le Costruzioni (2008)*, of an updated version of the seismic hazard map, has led to a different seismic scenario in existing buildings and constructions. In detail, as the relation between seismic demand and capacity is not linear for the entire range of structural vibration, before to explicitly anticipate the impact it has with the seismic risk assessment, it would be necessary to evaluate the change in the level of seismic risk by calculating the seismic vulnerability of existing structures with different pe-

^(*) Ph.D. University of Padova, Department of construction and transportation, Engineering Faculty.

za di cui si evidenziano gli assai rari casi di fuori servizio prolungati causati da problematiche strutturali.

Nonostante ciò, appare rilevante mettere in luce le maggiori cause di degrado sempre più diffuse a livello internazionale nei ponti, affinché la manutenzione risulti adeguata, e la progettazione sia consapevole che l'opera dovrà garantire durante il suo servizio crescenti capacità e performance strutturali (fig. 1).

3. Fenomeni sismici

Uno dei fenomeni più rilevanti che sottopone le strutture da ponte a problematiche strutturali, è costituito dal fenomeno sismico (fig. 2).

L'introduzione nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (2008) di una versione aggiornata della mappa di pericolosità sismica, definita per diversi periodi di ritorno e per svariati valori di ordinate spettrali, ha condotto dei cambiamenti sul livello di rischio sismico di tutto l'edificato italiano. In particolare, poiché la relazione tra domanda e capacità non è lineare per tutto il range di periodi di vibrazione strutturale, prima di anticipare esplicitamente l'impatto che essa ha con la valutazione dei livelli di rischio sismico, sarebbe necessario valutare il cambiamento del livello di rischio sismico calcolando esplicitamente la vulnerabilità sismica di strutture esistenti con diversi periodi di vibrazione, per diversi stati limite e considerando sia la nuova che la precedente definizione di pericolosità. Recenti lavori hanno dimostrato che la mappa di pericolosità sismica (fig. 3), porta a dei livelli di rischio più realistici e meno allarmanti, rendendo leggermente meno gravoso, anche se non privo di problematiche, il panorama attuale di rischio in Italia (CROWLEY et al. 2006).

Occorre però pensare che al momento della loro progettazione, una considerevole parte delle opere da ponte italiane non furono progettate per resistere ad azioni orizzontali, e questo induce chiaramente ad un problema considerevole di sicurezza della rete esistente. In merito alle modalità cogenti dal punto di vista normativo, ovvero sul come si possano adeguare o migliorare le opere esistenti, il DM 14/01/2008 e la relativa Circolare esplicativa (2009) sono assai chiari: in particolare per quanto concerne le opere pubbliche strategiche con finalità di protezione civile o suscettibili di conseguenze rilevanti in caso di collasso (tra cui sicuramente vanno inclusi i ponti ferroviari perlomeno delle linee fondamentali), nel caso in cui si manifesti l'inadeguatezza di un'opera rispetto alle azioni ambientali, non controllabili dall'uomo e soggette ad ampia variabilità nel tempo ed incertezza nella loro determinazione (ovvero nel caso del sisma) "... non si può pensare di imporre l'obbligatorietà dell'intervento o del cambiamento di destinazione d'uso o, addirittura, la messa fuori servizio dell'opera, non appena se ne riscontri l'inadeguatezza. Le decisioni da adottare dovranno necessariamente essere calibrate sulle singole situazioni (in relazione alla gravità dell'inadeguatezza, alle conseguenze, alle disponibilità economi-



(U.S. Geological Survey/MCT)

Fig. 2 - Il collasso del ponte Million Dollar in Alaska (1964). *The Million Dollar bridge collapse in Alaska (1964).*

riods of vibration, for different limit states and considering both the new and the previous definition of hazard. Recent works have demonstrated that these maps (fig. 3), lead to more realistic risk level, making it slightly less heavy, although not without problems, the current risk in Italy (CROWLEY et al. 2006).

It should, however, be clear that at the time of their design, a considerable part of the structural Italian bridge works were not designed against horizontal actions, and this clearly leads to a major problem of security in the existing network. The current Italian panorama related to the seismic assessment and structural improvement is based on the DM 14/01/2008 and on the Circolare esplicativa (2009): in detail, with regard to strategic public structures related to civil protection or subjected to serious consequences in case of collapse (in which will undoubtedly be included the main lines of railway bridges), where are evident the inadequacy of the structure with regard to environmental actions, not controllable by humans and subjected to a wide variation over the time and uncertainty in their determination (for e.g. in the seismic case) "...it should not be imposed compulsory intervention or change of use or even the structure decommissioning, as soon as this has been defined inadequate. The decisions to be taken must necessarily be chosen in relation to individual situation (in relation to the severity of the inadequacy, of the consequences, of the availability and economic implications in terms of public safety). Owners or managing agencies of the individual works, whether public or private bodies or individuals, will define the most appropriate measure, possibly by identifying one or more levels of actions, commensurate with the remaining nominal life and the class of use in respect of which interventions are necessary to increase security within a specified time".

Going on with a detailed reading of the DM 14/01/2008



Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della protezione civile
 Ufficio prevenzione, valutazione e mitigazione del rischio sismico

Classificazione sismica al 2010

Recepimento da parte delle Regioni e delle Province autonome dell'Ordinanza PCM 20 marzo 2003, n. 3274.

Atti di recepimento al 31 marzo 2010. Abruzzo: DGR 29/3/03, n. 438. Basilicata: DCR 19/11/03, n. 731. Calabria: DGR 10/2/04, n. 47. Campania: DGR 7/11/02, n. 5447. Emilia Romagna: DGR 21/7/03, n. 1435. Friuli Venezia Giulia: DGR 1/8/03, n. 2325. Lazio: DGR 22/5/09, n. 387. Liguria: DGR 24/10/08, n. 1308. Lombardia: DGR 7/11/03, n. 14964. Marche: DGR 29/7/03, n. 1046. Molise: LR 20/5/04, n. 13. Piemonte: DGR 19/01/10, n. 13058-790. Puglia: DGR 2/3/04, n. 153. Sardegna: DGR 30/3/04, n. 15/31. Sicilia: DGR 19/12/03, n. 408. Toscana: DGR 16/6/03, n. 604. Trentino Alto Adige: Bolzano, DGP 6/11/06, n. 4047; Trento, DGP 23/10/03, n. 2813. Umbria: DGR 18/6/03, n. 852. Veneto: DCR 3/12/03, n. 67. Valle d'Aosta: DGR 30/12/03, n. 5130.

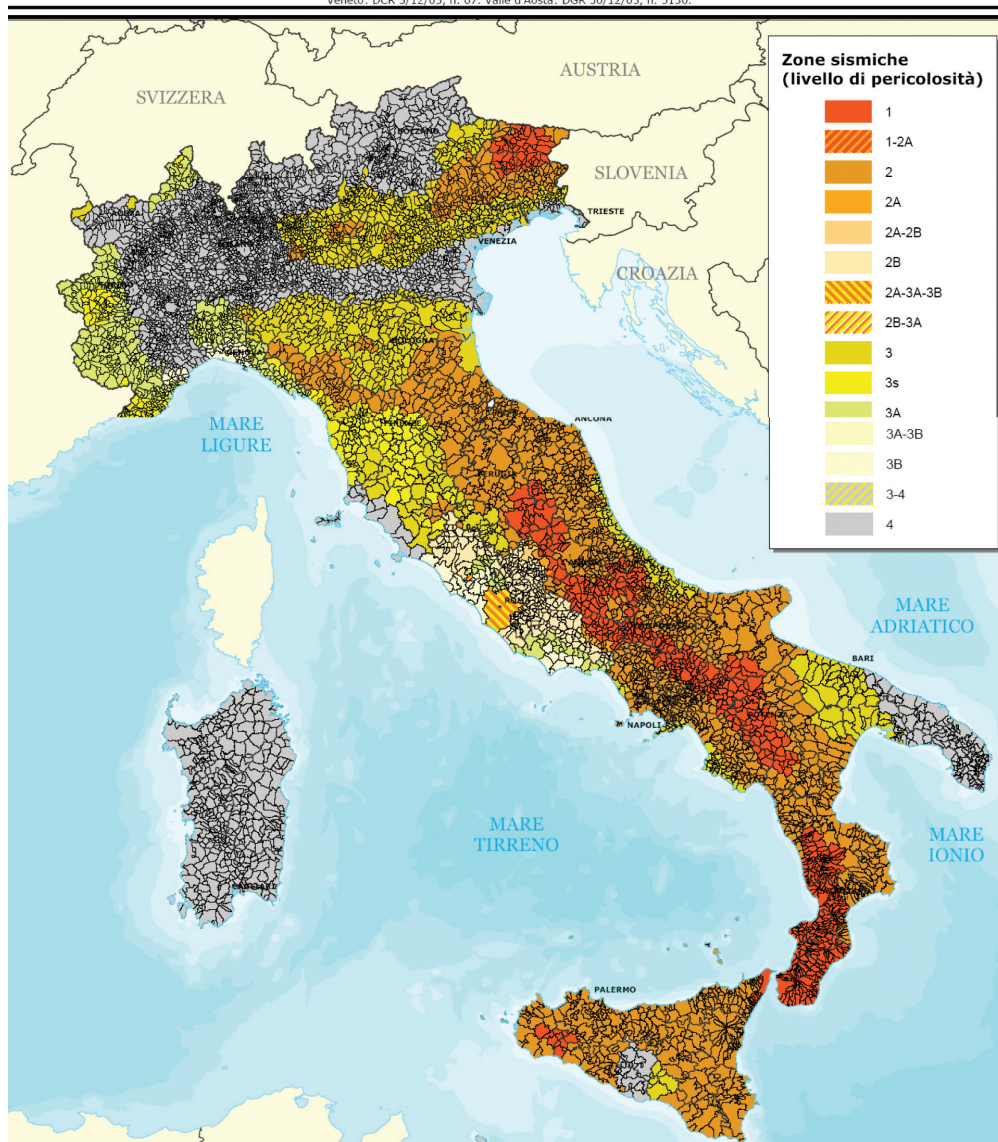


Fig. 3 - Protezione Civile, Classificazione sismica del territorio nazionale (2010). *Protezione Civile, Seismic map classification of the National territory (2010).*

che e alle implicazioni in termini di pubblica incolumità). Saranno i proprietari o i gestori delle singole opere, siano essi enti pubblici o privati o singoli cittadini, a definire il provvedimento più idoneo, eventualmente individuando uno o più livelli delle azioni, commisurati alla vita nominale restante e alla classe d'uso, rispetto ai quali si rende necessario effettuare l'intervento di incremento della sicurezza entro un tempo prestabilito".

In sostanza, proseguendo nella lettura attenta del combinato disposto dalla norma e dalla Circolare, sta al gestore individuare le modalità di miglioramento o adeguamento sismico che si rendono via via necessarie a seguito di precise verifiche di sicurezza effettuate sulle singole strutture.

Una delle problematiche più evidenti sta quindi nel grado di priorità degli interventi, ovvero nell'individuazione di quali siano le opere che dovranno essere prioritariamente sottoposte agli interventi necessari a seguito di apposita verifica. In tal caso, una delle metodologie adottate consiste nel dare priorità maggiore alle opere ricadenti in zone a più alto livello di pericolosità: tale metodologia potrebbe essere però fuorviante, o per lo meno renderebbe vani i tentativi di stabilire gradi di priorità ad esempio laddove vi fosse un considerevole numero di opere ricadenti nella stessa zona sismica e appartenenti allo stesso gestore.

4. Casi studio

Uno dei primi ben documentati episodi di collasso di un ponte per cause sismiche, è costituito dal "Grande terremoto del Giappone del 1891". Il terremoto, verificatosi il 28 ottobre 1891 colpì le zone delle prefetture di Gifu e Aichi colpendo fortemente una assai estesa area del Giappone. I danni riportati a persone e strutture furono molto drammatici, diversi ponti vennero danneggiati, due in particolare vennero completamente messi fuori servizio dal terremoto, ed in particolare venne colpito duramente il ponte Nagara Gawa, un ponte reticolare metallico chiodato (figg. 4 e 5).



Fig. 4 - Ponte di Nagara Gawa, Giappone (1891). Nagara Gawa bridge, Japan (1891).

and on the *Circolare esplicativa* (2009), the managing agencies is the responsible body who has to identify ways of improving or retrofitting that gradually become necessary as a result of specific security checks carried out on individual structures.

One of the most obvious problem is therefore the priority actions to be performed, so the identification of what are the bridges which will be subjected to interventions due to previous checks and verifications. In this case, one of the methodologies is to give higher priority to bridges falling in areas with the highest level of hazard, but at the same time, this method may be misleading, for example where there are a considerable number of structures falling under the same seismic zone belonging to the same operator.

4. Case studies

One documented collapse episode in a railway bridge for seismic actions, was represented by the great Japan earthquake of 1891. The episode fallen in October 28th, 1891, hit areas in the prefectures of Gifu and Aichi, and forcefully struck a very large area of Japan. Damage reported to people and structures were very dramatic, several bridges were damaged, two in particular were completely taken out of service by the earthquake, and in particular the Nagara Gawa Bridge, a riveted truss metal bridge, was hit hard (figg. 4 and 5).

Another earthquake case study was the most recent, happened in 1994 in Los Angeles, California: the earthquake lasted about a minute, but damaged a densely populated area of the United States affecting over 114,000 structures and smashing down the transport system of an entire region. The federal agency FEMA (Federal Emergency Management Agency) counted for 25 billion dollars damages. The more consistent damage of the so called Northridge earthquake were recorded on I-5 highway, the main road connecting Southern California with Los An-

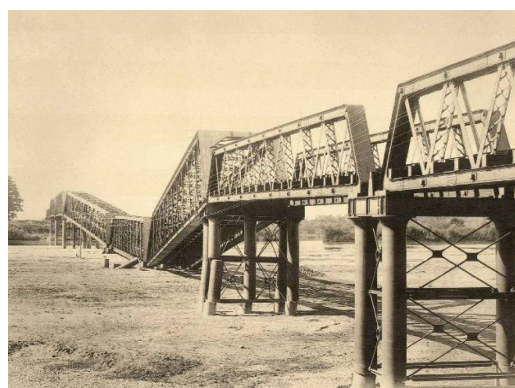


Fig. 5 - Ponte di Nagara Gawa, Giappone (1891). Nagara Gawa bridge, Japan (1891).



Fig. 6 - Ponte sulla I5, Gavin Canyon (1994). *I5 bridge, Gavin Canyon (1994).*

Altro terremoto assai studiato fu quello più recente, ed avvenuto nel 1994 a Los Angeles-California: il terremoto durò circa un minuto, ma danneggiò un'area densamente popolata degli USA colpendo oltre 114.000 strutture e mettendo in ginocchio i trasporti di un'intera regione.

L'agenzia federale FEMA (Federal Emergency Management Agency) conteggiò danni per 25 miliardi di dollari. I danni più ingenti del terremoto c.d. di Northridge vennero registrati sulla I-5, la maggiore arteria di connessione della California del sud con Los Angeles (fig. 6).

Seguì di lì a pochi anni il terremoto di Kobe (o di Hanshin) in Giappone, in cui persero la vita oltre 6000 persone, e numerose infrastrutture tra cui diversi ponti e viadotti vennero seriamente danneggiati; tra le infrastrutture più colpite il viadotto urbano della Hanshin Expressway, arteria principale di connessione tra Osaka e Kobe (fig. 7).

5. Il progetto sismico

Molti altri esempi potrebbero essere riportati dalla ricca letteratura, ma si ritiene in questo luogo di proseguire sviluppando alcuni concetti base inerenti le misure da adottare per isolare i ponti sismicamente. Ciò che è certo, ed è ormai letteratura anche questa, è che ogni terremoto ha fatto scuola nel mondo delle costruzioni (si veda a tale scopo la *lectio* di CALVI, 2010).

Alla base dell'ingegneria sismica moderna vi è un concetto di base che è opportuno ricordare: il *capacity design* o gerarchia delle resistenze (PARK e PAULAY 1975): in questo studio si spiegava esemplificando come per rendere duttile una catena fatta di anelli fragili bastasse sostituire un solo anello con uno duttile, a condizione che avesse resistenza anche di poco inferiore agli altri, in modo che raggiungendo lo snervamento impedisse alla forza di crescere ulteriormente, proteggendo quindi tutti gli altri anelli.

Tradotto per gli ingegneri sismici: come impedire rotture fragili per taglio facendo in modo che i meccanismi



Fig. 7 - Hanshin Expressway elevated road, Giappone (1995). *Hanshin Expressway elevated road, Japan (1995).*

geles (fig. 6). It followed after few years, the Kobe earthquake (or Hanshin) in Japan, which killed over 6000 people, and many facilities including several bridges and viaducts were severely damaged; the most affected urban viaduct was the Hanshin Expressway, the main artery connecting Osaka and Kobe (fig. 7).

5. Seismic design

Many other examples could be given analyzing the very rich literature, but it is believed in this place to continue developing some basic concepts concerning the measures to be taken in existing bridges. What is clear, and is now even literature, is that each earthquake has made school in understanding building behavior under horizontal actions (see for this purpose the *lectio* of Prof. CALVI, 2010).

At the base of the modern earthquake engineering is a basic concept that it should be noted: the capacity design or the hierarchy of design elements (PARK and PAULAY 1975). In this mentioned study has been explained, for exemplifying, how to make ductile a chain made of brittle elements: it was enough to replace a single ring with a ductile element, provided that the resistance of it was a little lower than the others, so that reaching the yield strength it allow to prevent forces to grow further, thus protecting all other rings.

Translated for earthquake engineering: how to prevent brittle fracture for shear so that the collapse mechanisms for bending are weaker? It will be necessary to induce plastic hinges in the beams making them weaker of the columns to be linked with, to prevent damage to the foundations with a more robust design than vertical elements connected, and so on. It's the logic that in electronics stands in fuse: these elements are introduced into sacrificial areas, to prevent the collapse of the entire structure.

di collasso per flessione siano più deboli? Occorrerà indurre cerniere plastiche nelle travi facendole più deboli dei pilastri a loro connesse, impedire danni alle fondazioni progettandole più robuste degli elementi verticali da esse retti, e così via. E' la logica che in elettronica sta nel fusibile: si introducono nella struttura elementi/zone sacrificali, in modo da prevenire se non altro il collasso dell'intera struttura.

Il *capacity design* è ora parte anche delle norme attualmente in vigore in Italia, il DM 14/01/2008 e la relativa circolare applicativa 617/2009. Forse molto meno viene detto nella norma a riguardo dell'isolamento sismico: gli obiettivi principali dell'isolamento sismico delle strutture in generale e dei ponti in particolare, consistono nella protezione di pile e spalle da fenomeni di danno, nel tentativo di ottenere una risposta strutturale regolare e nel concentrare la deformazione in componenti facili da sostituire anche in casi di danneggiamento.

Alla base dell'isolamento, vi è il tentativo da un lato di aumentare la flessibilità ovvero il periodo delle oscillazioni del sistema, dall'altro di dissipare energia riducendo forze e spostamenti nel sistema. I componenti di un sistema di isolamento detti anche dispositivi, hanno la funzione principale di ridurre la rigidità in direzione orizzontale, ed eventualmente di dissipare energia e/o ricentrare il sistema.

Nel sistema strutturale isolato è possibile introdurre vincoli supplementari rispetto al design statico allo scopo di creare un vincolo tra pile e impalcato in caso di sisma per mezzo di c.d. vincoli idraulici, chiavi di taglio ecc. I metodi di analisi sono quello statico lineare, il modale (dinamica lineare), il metodo statico non lineare e il dinamico non lineare.

Tutti i requisiti inerenti le modalità di applicazione dei vari approcci di calcolo sono elencati nella norma (DM 14/01/2008). Va osservato ancora che la combinazione di carico sismica è associata alla considerazione del 20% dei carichi da traffico (formula 3.2.16 DM 14/01/2008) laddove rilevante, e ancora che per l'analisi dei ponti va considerata sempre anche la componente sismica verticale. In particolare per quanto concerne gli isolatori la capacità di spostamento di tutti i dispositivi deve tener conto degli effetti termici sulla struttura nel quale il dispositivo è inserito, i cui spostamenti indotti dovranno essere sommati a quelli prodotti dal terremoto.

In generale, la norma (DM 14/01/2008) individua le seguenti tipologie di dispositivi:

- *Dispositivi di vincolo temporaneo*: questi dispositivi sono utilizzati per obbligare i movimenti in uno o più direzioni secondo modalità differenziate a seconda del tipo e dell'entità dell'azione. Si distinguono in: *Dispositivi di vincolo del tipo "a fusibile"*: caratterizzati dall'impedire i movimenti relativi fra le parti collegate sino al raggiungimento di una soglia di forza oltre la quale, al superamento della stessa, consentono tutti i movimenti. Abitualmente sono utiliz-

The capacity design is now introduced also in the Italian codes, as in DM 14/01/2008 and in the *Circolare esplicativa* (2009). Perhaps much less is said about the standard seismic isolation: the main objectives of seismic isolation structures in general and of the bridges in particular, stands in the protection of piers and abutments from the effects of damage in an attempt to obtain a structural response finalized to concentrate and adjust the deformation in easily replaceable components, even in damage cases.

The most important aspect of isolation, is the attempt by one side to increase the flexibility so the system oscillations period, the other to dissipate energy by reducing forces and displacements in the system.

The components of a isolation system, also called "devices", have the main function of reducing the stiffness in the horizontal direction, and moreover to dissipate energy and / or re-centering the system. In the isolated structural system it can be introduced additional constraints if compared to the static design, in order to create a link among piers and the deck by means of so-called hydraulic devices, shear key etc.. The methods of analysis are the linear static, the modal (linear dynamics), the static non-linear and dynamic non-linear.

All the requirements and the rules for the application of a method rather than another are listed in accordance with the code (DM 14/01/2008). It should be noted again that the combination of seismic load is associated with the account of 20% of the traffic live loads (formula 3.2.16 DM 14/01/2008) where relevant, and even for the analysis of the bridges should be considered also the vertical seismic component. In particular with regard to the displacement capacity of all devices, it has to be accounted also for the thermal effects on the structure in which the device is operating, whose movements have to be added to those induced by the earthquake actions.

The code provide also a description of the devices types (DM 14/01/2008):

- *temporary constraint devices*: these devices are used to constrain one or more movements in different directions depending on the type and magnitude of the action. They are divided into: "fuse control devices" featured from preventing relative movements between the related parts until it reaches a threshold beyond which the force, to overcome it, allow all movements, usually used to exclude the system of seismic protection in service conditions, allowing the free functioning during the design earthquake, without changing the behavior. Temporary (dynamic) devices constraint: characterized by the ability to join the linking elements, in presence of relatively fast movements, such as seismic, and to set them free or nearly so, in the presence of relatively slow movements imposed or due to thermal effects;
- *displacement device dependent*, in turn divided into:

zati per escludere il sistema di protezione sismica nelle condizioni di servizio, consentendone il libero funzionamento durante il terremoto di progetto, senza modificarne il comportamento. *Dispositivi (dinamici) di vincolo provvisorio*: caratterizzati dalla capacità di solidarizzare gli elementi che collegano, in presenza di movimenti relativi rapidi, quali quelli sismici, e di lasciarli liberi, o quasi, in presenza di movimenti relativi lenti imposti o dovuti ad effetti termici;

- *Dispositivi dipendenti dallo spostamento*, a loro volta suddivisi in:
 - *Dispositivi a comportamento lineare o "Lineari"*: caratterizzati da un legame forza spostamento sostanzialmente lineare, fino ad un dato livello di spostamento, con comportamento stabile per il numero di cicli richiesti e sostanzialmente indipendente dalla velocità; nella fase di scarico non devono mostrare spostamenti residui significativi.
 - *Dispositivi a comportamento non lineare o "Non Lineari"*: caratterizzati da un legame forza spostamento non lineare, con comportamento stabile per il numero di cicli richiesti e sostanzialmente indipendente dalla velocità;
 - *Dispositivi dipendenti dalla velocità detti anche Dispositivi a comportamento viscoso o "Viscosi"*: caratterizzati dalla dipendenza della forza soltanto dalla velocità o da velocità e spostamento contemporaneamente; il loro funzionamento è basato sulle forze di reazione causate dal flusso di un fluido viscoso attraverso orifizi o sistemi di valvole;
 - *Dispositivi di isolamento o "Isolatori"*: svolgono fondamentalmente la funzione di sostegno dei carichi verticali, con elevata rigidità in direzione verticale e bassa rigidità o resistenza in direzione orizzontale, permettendo notevoli spostamenti orizzontali. A tale funzione possono essere associate o no quelle di dissipazione di energia, di ricentraggio del sistema, di vincolo laterale sotto carichi orizzontali di servizio (non sismici). Essendo fondamentalmente degli apparecchi di appoggio, essi debbono rispettare le relative norme per garantire la loro piena funzionalità rispetto alle azioni di servizio.

La norma (DM 14/01/2008) individua poi le seguenti tipologie di isolatori:

- *Isolatori Elastomerici*: costituiti da strati alternati di materiale elastomerico (gomma naturale o materiali artificiali idonei) e di acciaio, quest'ultimo con funzione di confinamento dell'elastomero, risultano fortemente deformabili per carichi paralleli alla giacitura degli strati (carichi orizzontali);
- *Isolatori a scorrimento*: costituiti da appoggi a scorrimento caratterizzati da bassi valori delle resistenze per attrito;

- linear behavior devices or "linear" characterized by a linear relation between force and displacement, up to a given level of displacement, with a stable behavior for the number of cycles required and substantially independent from speed; during unloading they should not show significant residual movement;
- not linear devices: characterized by a non linear force-displacement relation, with a stable behavior for the number of cycles required and substantially independent from speed;

- *viscous behavior devices*: characterized by the dependence of force and speed or speed and displacement at the same time; their operation is based on the reaction forces caused by the flow of viscous fluid through an orifice or valve systems;
- *isolation devices* basically play the role of supporting the vertical loads, with a high stiffness in the vertical direction and low stiffness or strength in the horizontal direction, allowing for significant horizontal displacements. To this function may be associated or not those of dissipation of energy, of re-centering of the system, or of lateral constraint under horizontal service loads (not seismic). Since they are basically support devices, they must adhere to the code to ensure their full functionality under external actions.

The code (DM 14/01/2008) identifies then the following types of isolators:

- *elastomeric devices*: made by alternating layers of elastomeric rubber (suitable natural or artificial materials) and steel, the latter with confinement of the elastomeric function, strongly deformable by parallel loads to the layers (horizontal loads);
- *sliding isolators*: made by sliding bearings characterized by low resistance to friction;
- *combined devices*, made by a combination of the above categories.

At the installation phase of the devices, the Works Director (*il direttore dei lavori*) must verify, acquiring a copy, that the device has a certificate of conformity (DPR 246/93 – CE mark) or, if not met the cases referred to paragraphs A and C of § 11.1 of DM 14/01/2008, which is equipped with a certificate of qualification of the Technical Central Service, that is equipped with the mark request from the DM 14/01/2008 and that the installation procedures comply with the installation manufacturer's specifications of the system. The Works Director (*il direttore dei lavori*) must also reject any non-conforming supplies and make appropriate acceptance tests which shall include in any case, verification of geometric and dimensional tolerances as well as any evaluation of the main mechanical characteristics as described in more detail in Chapter 11 of DM 14 / 01/2008.

- Dispositivi costituiti da una combinazione delle precedenti categorie.

All'atto della posa in opera dei dispositivi il Direttore dei Lavori deve verificare, acquisendone copia, che il dispositivo sia dotato di attestato di conformità di cui al DPR 246/93 (marcatura CE) ovvero, ove non ricorrano i casi di cui ai punti A e C del §11.1 del DM 14/01/2008, che sia dotato di attestato di qualificazione del Servizio Tecnico Centrale, che sia dotato del marchio previsto nel DM 14/01/2008 e che le procedure di posa in opera siano conformi alle specifiche tecniche del produttore del sistema stesso. Il Direttore dei Lavori deve inoltre rifiutare le eventuali forniture non conformi ed effettuare idonee prove di accettazione che comprendano in ogni caso la verifica geometrica e delle tolleranze dimensionali nonché eventualmente la valutazione delle principali caratteristiche meccaniche secondo le modalità descritte più estesamente al capitolo 11 del DM 14/01/2008.

6. Fenomeni di fatica

Oltre ai fenomeni sismici appena citati, meritano di essere investigati con particolare attenzione dei gestori anche i fenomeni collegati al progressivo indebolimento strutturale connessi ai fenomeni di fatica. Si parla prevalentemente in questi casi di manufatti metallici, anche se la ricerca in tema di fatica in materiali come il calcestruzzo è già abbastanza consolidata (si veda ad es. BRÜHWILER e SCHLÄFLI, 1998). 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;
- frequenza della manutenzione e del monitoraggio.

Per quanto concerne il fenomeno della fatica, va detto che non si osserva talora sufficiente attenzione al tema soprattutto da parte dei progettisti, che spesso in sede di progettazione trascurano l'esecuzione delle apposite procedure di verifica.

Dal lato manutenzione, si rilevano in alcuni casi numerose carenze negli standard manutentivi e nelle procedure di controllo e verifica dell'esistente. Va invece osservato come determinati gestori siano in grado di assicurare una accurata attenzione, e ciò va detto in particolare per i ponti della Rete RFI: prescrizioni capitolari, istruzioni tecniche e raccomandazioni per progettazione, costru-

6. Fatigue phenomena

In addition to the aforementioned seismic problems, phenomena related to the progressive structural weakening linked to fatigue deserve to be investigated with particular attention for managing authorities. Metal structures are particularly investigated in this context, although research on the subject of fatigue in materials such as concrete is already quite established (see eg. BRÜHWILER and SCHLÄFLI, 1998). In particular, those aspects which could help to influence the lifetime of a building may depend on (FISCHER et al. 1990; DI BATTISTA et al. 1998; MATAR and GREINER 2006):

- quality of materials used;
- quality in structural connections;
- corrosion problems;
- non homogeneity of materials used;
- preparation and type of drilling;
- friction forces in connections, clamping effect;
- local geometric imperfections in members;
- overall geometric imperfections of the structure;
- the frequency of maintenance and monitoring.

Regarding the fatigue phenomenon, it must be said that sometimes is not observed enough attention to this special design issue, especially from who often overlook the designing implementation and their verification procedures.

On the maintenance side, several deficiencies are found in some cases in maintenance standards and procedures for monitoring and verifying the existing structures. It should however be noted how certain managing authorities are able to ensure careful attention on the matter, and this should be mentioned in particular for the bridges of the railway network: chapter requirements, technical instructions and design recommendations, construction and maintenance of bridges, procedures for the monitoring operations of bridges and computerization of the checks carried out in time, activities carried out by technical staff in the preparation or review of construction projects, from testing in course of construction until the installation, activities of the bridge teams with regular checks, are all activities that ensure a correct understanding and use of bridge network, and thus enable to ensure their safe operation with an accurate maintenance phase. The theme itself has a major importance, and finds more and more extensive attention in countries such as China, the U.S. or the north - in Europe where existing infrastructure are analyzed with a high level of quality maintenance and inspections, either with remote analysis and on on-field testing, and recalling that the useful designed lifetime is gradually increasing for major infrastructure (AASHTO 2010).

We recall briefly that fatigue is a mechanical phenomenon whereby a material subjected to varying loads in

zione e manutenzione dei ponti, procedure per le visite ai ponti e informatizzazione dei riscontri effettuati nel tempo, attività capillari svolte dal personale tecnico incaricato per la redazione o revisione dei progetti costruttivi, per i collaudi in corso di costruzione fino alla posa in opera, attività delle Squadre Ponti con verifiche periodiche, sono tutte attività che assicurano una corretta concezione ed utilizzo dei ponti, e consentono quindi di poterne assicurare un sicuro esercizio con una accurata fase manutentiva.

Il tema presenta comunque notevole rilevanza, e trova maggiore e più estesa attenzione in quei paesi come la Cina, gli USA o il nord Europa in cui le infrastrutture "storiche" vengono analizzate con un alto grado di qualità manutentiva e pedissegue analisi ed ispezioni sul campo, nonché ricordando che la vita utile che va via via diffondendosi nelle maggiori opere infrastrutturali, imposta dai committenti ancor prima che dalla normativa, va via via incrementando per le infrastrutture più rilevanti (AASHTO 2010).

Ricordiamo per sommi capi che la fatica è un fenomeno meccanico per cui un materiale sottoposto a carichi variabili nel tempo si danneggia fino a rottura nonostante l'intensità massima dei carichi in questione sia sensibilmente inferiore a quello di snervamento del materiale stesso: l'eventualità di crollo improvviso per fenomeni di fatica esiste non solo in letteratura, ma è divenuto anche fatto di cronaca assai recente.

Rimane evidente la problematica di poter effettuare verifiche a fatica per orizzonti temporali sempre più dilatati, a causa della difficoltà di poter stimare spettri di traffico così protratti nel tempo, e con una evoluzione anche statisticamente difficile da poter essere stimata.

7. Caso studio: il ponte I35W sul Mississippi

Per far capire l'importanza del problema, viene riportato un caso studio collegato a fenomeni di fatica: il crollo è accaduto nell'anno 2007 a Minneapolis nel ponte I35W, ponte che per tipologia assomiglia a moltissimi altri ponti a struttura mista diffusi in USA; il crollo ha coinvolto un ponte a tre campate, realizzato in struttura reticolare in acciaio e con soletta di impalcato in c.c.a..

La modalità del crollo è stata ricostruita a cura del NTSB-National Transportation Safety Board (2008), e di tale studio si riportano le notizie più rilevanti (figg. 8, 9 e 10):

- il ponte era sotto stretta osservazione da parte degli enti gestori, veniva periodicamente ispezionato in tutte le sue parti;
- alcuni danneggiamenti da fatica erano stati rilevati anche prima del crollo: in particolare già dal 1997 in poi, le visite periodiche riportavano la presenza di cricche sviluppatesi a partire da numerose saldature e da numerose connessioni rivettate o bullonate;
- per far fronte ad un quadro di fratture così esteso, vennero effettuati alcuni lavori di manutenzione, consistenti per lo più nella realizzazione dei cosiddetti *stop-holes*,

time fails even though the maximum intensity of the loads in question is considerably lower than that of yielding: cases of sudden collapse for fatigue phenomena exist not only in literature but has also become very recently a real news case.

It is relevant in the fatigue assessment field the issue of being able to carry out this check for very long time period, due to the difficulty of estimating the traffic load spectra of a so far time period, and at the same time with a trend also statistically difficult to be estimated.

7. Case study: the I35W bridge on the Mississippi river

To understand the importance of this last issue, a case study related to fatigue is reported in the following: the collapse happened in 2007 in Minneapolis I35W bridge, a structural type that looks like many other common composite bridges in the U.S.; this collapse has involved a three spans bridge, made of a steel space frame and a reinforced concrete deck slab.

The collapse modality has been reconstructed by the NTSB-National Transportation Safety Board (2008), and this study reports the most relevant key facts (fig. 8, 9 and 10):

- the bridge was under close observation by the managing authorities and was periodically inspected in all its sub-structural parts;
- some fatigue damage were detected even before the collapse, in particular as from 1997 onwards, regular visits reported the presence of cracks that developed from a variety of welds and numerous connections, rivets or bolts;
- to solve such a complex a framework of extensive fractures, some maintenance work were carried out, mainly consisting in the production of stop-holes, holes drilled in the vicinity of the cracks to prevent the uncontrolled spread of the crack itself;
- after a series of investigations carried out by universities, consultants and research centers, the MSN-DOT (Minnesota Department of Transportation) established in July 2006 that the bridge should be repaired: unfor-

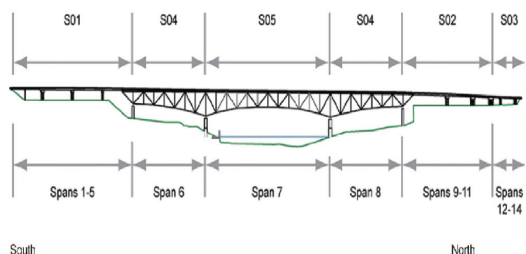


Fig. 8 - I35W, ponte sul fiume Mississippi, Missouri (2007). I35W bridge, Mississippi river, Missouri (2007).

fori eseguiti a trapano nelle vicinanze delle cricche, per evitare la diffusione incontrollata della cricca stessa;

- dopo una serie di approfondimenti richiesti a Università, consulenti e centri di Ricerca, il MSN-DOT (Minnesota Department of Transportation) stabilì nel luglio del 2006 che il ponte dovesse essere riparato: purtroppo la riparazione era stata programmata a gennaio 2008 (NSTB 2008, pag. 59) a causa della difficoltà "...nel procurarsi l'acciaio ad alta resistenza utilizzato per la realizzazione delle piastre...";
- dall'esame della struttura crollata, l'analisi agli elementi finiti, e la registrazione video del crollo è emerso che le seguenti cause non sono state né causali né strettamente correlate al crollo del ponte I-35W: danni da corrosione trovati sulle piastre di rinforzo in taluni nodi e altrove, la frattura di una trave/traverso, fratture preesistenti nella struttura reticolare e nelle campate di approccio, effetti di temperatura e cedimenti nelle pile; sostanzialmente il crollo appare essere stato invece correlato a una inadeguata capacità strutturale del ponte dovuta a errore progettuale, specificamente in un ben preciso nodo, che collassò sotto la combinazione di una serie di cause, tra cui: un incremento del peso del ponte per modifiche strutturali intervenute nel corso dell'esercizio, una combinazione particolare di eccessivo traffico e lavori in corso concentrati su una determinata porzione di impalcato; contribuì poi al crollo una inadeguata attenzione dei progettisti e del gestore alle piastre dei nodi di connessione della struttura reticolare.

8. Problemi di invecchiamento

Occorre quindi citare tutti quei fenomeni che si manifestano durante l'esercizio di un ponte esistente, e che vanno annoverati sotto il generico nome di degrado dei materiali. Il deterioramento, provocato da vari fattori, con diversi gradi di gravità per la capacità portante della struttura e con o senza segnali visibili della sua presenza, può manifestarsi con rotture di parti della struttura che ne modificano la capacità resistente, vistose deformazioni e fessurazioni nelle sezioni maggiormente sollecitate.

Non è detto però che fenomeni di corrosione delle armature o reazioni alcali-silice del calcestruzzo non possano essere in atto anche senza evidenti segnali esterni che diventano visibili solo quando raggiungono uno stato avanzato che potrebbe aver già compromesso l'affidabilità della struttura: si parla in tal caso di difetti latenti, secondo la denominazione introdotta da ABDUNUR C. (2000).

Comunemente si ritiene che il cemento armato sia un materiale molto durevole: in realtà a causa della sua struttura capillare, è soggetto nel tempo all'infiltrazione di gas e di acqua presenti nell'ambiente che lo circonda. La penetrazione di sostanze aggressive è consentita dalla permeabilità del calcestruzzo dovuta a cavità porose della pasta di cemento interconnesse tra loro. Tale struttura rende



Fig. 9 - I35W, crollo del ponte sul fiume Mississippi, Missouri (2007). *I35W, collapse of the bridge on the Mississippi river, Missouri (2007).*



Fig. 10 - I35W, crollo del ponte sul fiume Mississippi, Missouri (2007): dettaglio di alcune cricche diffuse da un giunto rivettato. *I35W, collapse of the bridge on the Mississippi river, Missouri (2007): some crack detail on a riveted joint.*

fortunately the repair had been planned in January 2008 (NSTB 2008, p. 59) because of the difficulty in obtaining the "... high-strength steel used to make the plates ...";

- from the examination of the collapsed structure, the finite element analysis, and the video recording of the collapse, it has been shown that the following causes were neither causal nor closely related to the collapse of the bridge I-35W: corrosion damage found on the plates reinforcement in certain nodes and elsewhere, the fracture of a cross to beam connection, pre-existing fractures in the lattice structure and on the approach spans, temperature effects and subsidence displacement in the abutment; essentially the collapse appears to have been related to an inadequate structural capacity of the bridge due to design error, especially in a well-defined node, which broke under the combination of a number of causes, including: the increasing weight of the bridge for structural changes during exercise, a particular combination of excessive traffic and work in progress concentrates on a specific por-

il calcestruzzo molto suscettibile al degrado che può avvenire sia per meccanismi fisici (gelo/disgelo), che fisico-chimici (ASR), che per processi chimici (carbonatazione).

Quando gli agenti esterni reagiscono con gli idrati possono formare composti solubili o espansivi; il calcestruzzo può anche essere soggetto a rigonfiamenti interni distruttivi e dovuti a composti chimici incompatibili in esso contenuti. Le zone di struttura in cui il conglomerato non risulta sufficientemente protetto possono essere soggette a cicli di gelo e disgelo che causano una variazione del volume dell'acqua libera contenuta nei pori, con conseguente sfaldamento.

Condizioni necessarie affinché si verifichi il fenomeno sono: la presenza di acqua all'interno dei pori; la permeabilità del calcestruzzo; l'oscillazione della temperatura attorno agli 0°C. L'aumento di volume dell'acqua dovuto a congelamento è stimato attorno al 10%; tale incremento aumenta ulteriormente la pressione della fase liquida rimanente, a sua volta contrastata dallo strato impermeabile di ghiaccio che procede dall'esterno verso l'interno. Si producono in tal modo sfaldamenti e rigonfiamenti che interessano gli strati superficiali e disgregano la pellicola di malta di cemento che si forma all'atto del getto contro le casseforme, questo rende la superficie ruvida e maggiormente esposta ad un nuovo processo e provoca una diminuzione dello spessore del copriferro. Se non sono prese adeguate precauzioni, i fenomeni di ritiro del calcestruzzo possono indurre varie forme di rottura (fessurazione) nei diversi stadi formativi del materiale.

Le prime fessure possono manifestarsi nel giro di poche ore dal getto e sono dovute all'assestamento del calcestruzzo nelle casseforme. La fessurazione aumenta all'aumentare del rapporto acqua/cemento, della sedimentazione e della quantità di cemento nell'impasto; per contro diminuiscono all'aumentare del contenuto di umidità del conglomerato e da questa osservazione nasce la pratica comune di bagnare le superfici del getto dopo la presa per alcuni giorni. Dopo la rimozione delle casseforme possono seguire, a causa della naturale contrazione per essiccazione del conglomerato, fessurazioni capillari superficiali che diventano tanto più ampie e profonde anche grazie all'elevato calore di idratazione. Nel lungo termine le fessurazioni dovute a deformazione da essiccazione sono originate dalla successiva perdita di acqua libera. Queste problematiche facilitano l'accesso degli agenti aggressivi aumentando la velocità di degrado. L'ambiente in cui è inserito il ponte gioca un ruolo fondamentale per la determinazione dei tipi di attacco chimico al calcestruzzo, atmosfere industriali e marine risultano particolarmente aggressive così come terreni a bassa resistività. Per di più la presenza di basse temperature induce i gestori della rete stradale l'uso dei già citati sali antigelo che risultano ulteriormente dannosi nei confronti del conglomerato cementizio. Si ricordano quindi i problemi collegati a carbonatazione, attacco solfatico e reazione alcali aggregati, principali cause di degrado dei ponti in cca.

tion of the deck; finally contributed to the collapse an inadequate attention of designers and of the managing authorities to the connection plates of the lattice structure.

8. Aging issues

It is therefore necessary to mention all those phenomena that occur during the operation of an existing bridge, and that should be described as materials degradation. The deterioration is caused by several factors, with varying degrees of severity for the carrying capacity of the structure and with or without visible signs of its presence, may be indicated by broken parts of the structure which alter their resistance capacity, conspicuous deformation and cracking in hot spot sections.

It is doubtful that corrosion of the reinforcement or alkali-silica reaction of concrete cannot be implemented without obvious external signs that become visible only when they reach an advanced state that may already have undermined the reliability of the structure: this are described as latent defects, according to the description introduced by ABDUNUR C. (2000).

Commonly it is believed that the reinforced concrete is very durable materials: in fact due to its capillary structure, it is subjected to infiltration of gas and water. The penetration of aggressive substances is permitted by the permeability of the concrete due to the cavity of the porous cement paste interconnected. This structure makes the concrete very susceptible to degradation mechanisms that can be both physical (freezing / thawing), physical-chemical (ASR), and chemical processes (carbonation).

When external agents react with the hydrates can form soluble or expansive compounds; concrete can also be subjected to internal swelling due to destructive and incompatible chemicals contained. Areas in which the conglomerate structure is not sufficiently protected may be subjected also to cycles of freezing and thawing that causes a change in the volume of free water contained in the pores, resulting in disintegration.

Necessary conditions for the phenomenon to occur are: the presence of water inside the pores, the permeability of the concrete, the oscillation of the temperature around 0°C. The increase in volume due to freezing of water is estimated at around 10% but this increases further the pressure of the remaining liquid phase, in turn countered by the impermeable layer of ice that proceeds from the outside. They are produced in this way, flaking and swelling affecting the surface layers and that break down the cement film of mortar that is formed in the formwork interface, and this makes the surface rougher and more exposed to a new degradation for a thickness reduction of the concrete cover. If proper precautions are not taken, the shrinkage of the concrete can cause various forms of failure (cracking) in different stage of the construction.

Per quanto attiene l'acciaio, va ricordato che a contatto con l'atmosfera o con agenti chimici esso può reagire ed ossidarsi. Nelle strutture di ingegneria civile questo meccanismo di corrosione avviene principalmente a causa di un processo elettrochimico in soluzione. L'intensità dell'ossidazione dipende dal tipo di acciaio, dalle sue proprietà meccaniche e dai parametri che intervengono nella reazione quali: composizione, trattamento, forma, tensioni agenti, concentrazione dei reagenti, pH, contenuto di ossigeno, temperatura (ABDUNUR C., 2000). L'acciaio esposto all'umidità atmosferica (>50÷70%), alla polvere ed altri depositi, specialmente contenenti solfati, si ossida spontaneamente. Questa corrosione atmosferica accelera in ambienti inquinati. Nel c.a. e c.a.p. la corrosione delle barre d'armatura inizia quando la protezione alcalina è distrutta dalla carbonatazione o dagli ioni-cloruro. Il processo evolve facilmente dove il copriferro manca di spessore e densità; e si intensifica in presenza di ossigeno e di umidità, specialmente quando quest'ultima si alterna a stati secchi. L'ossido risultante dal processo riduce le sezioni effettive dell'acciaio, la loro duttilità e la resistenza a fatica. L'aumento di volume, che può essere fino a sei volte il volume dell'acciaio, può far letteralmente esplodere il calcestruzzo circostante: si assiste in tal caso al cosiddetto fenomeno dello *spalling*. Gli strati d'acciaio più interni, quelli non interessati dal fenomeno, possono risultare integri ma la loro inaccessibilità implica difficoltà d'ispezione e quindi di valutazione incerta. I cavi di precompressione sono particolarmente sensibili allo spessore del copriferro o alla qualità della malta di iniezione delle guaine se del tipo post teso; inoltre possono essere soggetti ad altre forme di corrosione, tipo infragilimento da idrogeno o meccanismi di fatica.

In molti casi, come già detto, la corrosione dell'acciaio nel calcestruzzo avviene senza segni esterni o difetti. Spesso dove l'impermeabilità del conglomerato è venuta meno le infiltrazioni d'acqua possono manifestarsi sottoforma di tracce di ruggine e/o efflorescenze superficiali. I cavi d'acciaio corrodono principalmente in due modi: *pitting*, si verifica principalmente nei punti di ristagno come le zone basse delle sospensioni dei cavi, le selle di deviazione, le zone di ancoraggio e connessioni in genere. *Stress cracking corrosion*, implica una reazione tra gli ossidi della superficie in tensione e l'acciaio che produce idrogeno nascente e implica quindi l'infragilimento del metallo.

Nel caso di grossi cavi di precompressione o di sospensione gli spostamenti relativi tra i fili curvi dei cavi e dei trefoli possono generare forze locali di frizione. Questo meccanismo chiamato *fretting* consuma o addirittura rompe la superficie di contatto. A lungo andare il danneggiamento peggiora con la presenza delle particelle di metallo distaccatesi per il processo. La variazione di tensione dovuta al *fretting* può essere anche causa di rottura per fatica e condurre a collassi inaspettati della struttura. I cavi d'acciaio ad alto contenuto di carbonio con impurità sottoposti ad una tensione eccessiva e concentrata possono essere oggetto di collassi fragili; per contro l'acciaio

The first cracks may occur within a few hours after the jet and are due to settling of concrete in formwork. The cracking increases as the water-cement ratio, but also with the sedimentation process and with the amount of cement; on the other hand decrease with increasing moisture content of the mix and from this observation comes the common practice to wet the surfaces of the jet after taking for a few days. After the formwork removal can follow, because of the natural contraction of the concrete during drying, surface capillaries cracking that become more extensive and deep due to the heat of hydration. In the long term the cracks due by drying deformation are generated by the subsequent loss of free water. These issues facilitate the access of chemical agents by increasing the speed of degradation. The environment in which it is inserted the bridge plays a crucial role in determining the types of chemical attack on concrete: industrial and marine atmospheres are particularly aggressive as well as flowing waters and soils of low resistivity. Moreover, the presence of low temperatures induce the roads managers to the already mentioned use of antifreeze salts that contribute to the concrete damage deterioration. It has to be considered also the problems related to carbonation, sulphate attack and alkali aggregate reaction, the main causes of deterioration of reinforced concrete bridges.

As for the steel, it should be noted that in contact with the atmosphere or chemicals agents it can react and oxidize. In civil engineering structures, the mechanism of corrosion is mainly due to an electrochemical process in solution. The intensity of oxidation depends on the steel type, on its mechanical properties and on the parameters involved in the reaction products as: composition, processing, shape, acting stresses, reagents concentration, pH, oxygen content, temperature (ABDUNUR C., 2000). The steel exposed to atmospheric humidity (> 50 to 70%), dust and other deposits, especially containing sulphates, oxidize spontaneously. This becomes an accelerated atmospheric corrosion in polluted environments. In r.c. and p.c.p. the reinforcement corrosion of bars starts when the protection is destroyed by alkaline carbonation or by chloride ions. The process evolves easily where cover is thick and there is a lower density of the concrete itself; moreover, this is intensified in presence of oxygen and humidity, especially when it alternates with the dry state. The oxide resulting from the process reduces the effective area of resisting steel, its ductility and its fatigue resistance. The increase in volume, which can be up to six times the volume of the original steel, may literally blow up the surrounding concrete (spalling). The inner layers of steel, those not interested in the phenomenon, can result to be also not affected, but their inaccessibility implies difficulty of inspection and evaluation. The pre-stressing tendons are particularly sensitive to the thickness of concrete cover or to the quality of the mortar injection; also may be subjected to other corrosion forms, such as hydrogen embrittlement or fatigue mechanisms. In many cases, as already mentioned, the corrosion of steel in concrete occurs without external signs or defects.

dolce ha un comportamento più duttile e dunque più sicuro. Infine per quanto concerne la muratura, ed in particolare la malta, va detto che la malta utilizzata nelle murature è soggetta ad un invecchiamento naturale che comporta una riduzione della sua capacità legante. Il fenomeno risulta accelerato dalla presenza di forti vibrazioni ambientali. Le malte caratterizzate da ridotte proprietà meccaniche iniziali evidenziano una maggiore velocità di diminuzione delle stesse. Per quanto attiene gli elementi lapidei, il loro degrado è legato principalmente alla presenza di solfati e cloruri (smog, piogge acide). I prodotti delle reazioni, che possono avvenire solo in presenza di umidità, comportano un rigonfiamento del materiale e quindi lo sfaldamento dello stesso. Il degrado di tipo meccanico-strutturale avviene per presenza di vegetazione, l'azione dei cicli di gelo e disgelo, le vibrazioni meccaniche. Le radici delle piante tendono a penetrare nelle murature provocando fessurazioni che facilitano l'infiltrazione di acqua. La rimozione delle radici, ad opera dell'uomo o in seguito alla morte naturale della pianta, può causare pericolosi dissesti nella muratura. Il passaggio dallo stato liquido a quello solido dell'acqua comporta un aumento di quasi un decimo del suo volume. Nel caso dell'acqua presente nelle murature, il fenomeno ha inizio in corrispondenza della superficie dell'elemento e prosegue poi verso l'interno. All'interno dell'elemento si vengono a creare pressioni interstiziali la cui entità risulta inversamente proporzionale alla diametro dei pori del materiale (un diametro inferiore comporta una maggior risalita capillare, una minor "disponibilità" di spazio per la dilatazione dell'acqua e quindi maggiori pressioni). Le vibrazioni ambientali favoriscono il deterioramento della muratura per due motivi: l'elevato numero di cicli che caratterizza questo tipo di sollecitazione (normalmente di ampiezza molto bassa) comporta da un lato il deterioramento ed il distacco della malta della muratura, dall'altro il formarsi di microfessure negli elementi che facilitano la penetrazione dell'acqua ed in generale il degrado dell'elemento. Le vibrazioni ambientali sono causate principalmente dal traffico transiente sulla struttura o in prossimità di essa.

9. Problemi speciali

Vanno poi annoverati i cosiddetti problemi speciali, dovuti a fattori esterni alle strutture da ponte, e principalmente costituiti da: scalzamento di pile in alveo, cedimenti alle imposte, urti di veicoli, deragliamenti. Per quanto attiene il primo problema, in fase di realizzazione della struttura esistono numerose procedure di calcolo e di indagine che consentono di minimizzare la probabilità che si verifichi tale problematica, tra cui citiamo nel caso di ponti di notevole importanza le prove su modelli in scala; per quanto attiene alle strutture da ponte già esistenti, va detto che il problema dello scalzamento (insieme ai cedimenti alle imposte) è uno dei più frequenti (MALERBA 2010): in tal caso, il fenomeno può essere monitorato e controllato per mezzo di sistemi di monitoraggio ad hoc,

Often where the impermeability of the concrete has failed water infiltration may occur in the form of rust and / or surface efflorescence. Steel cables corrode in two main ways: pitting occurs mainly in the stagnation point as the lower areas of the suspension cables, in deviation point, in anchorage areas and in connections in general. Stress corrosion cracking, involves a reaction between oxides of the surface tension and the steel producing hydrogen, and thus implies the weakening of the metal.

In the case of large pre-stressing tendons or suspension, the relative displacements between the curved-wire cables and cords can generate local friction forces. This mechanism known as fretting consumes or even break the contact surface. In the long period, the damage is worsened by the presence of metal particles removed from the structure. The stress variation due to fretting can also cause fatigue failure leading to unexpected collapse of the structure. Steel cables with a high content of carbon with impurities and subjected to excessive and concentrated tension, may be subjected to brittle collapse; against, mild steel behaves in a more flexible and thus a safer behavior. Finally, concerning masonry, and in particular for the mortar, it must be said that the mortar used in masonry is subjected to natural aging resulting in a reduction of its binding capacity. The phenomenon is accelerated by the presence of a severe vibration environment. The mortars characterized by lower mechanical properties generally show a higher decrease of the same. As for the stone elements, their degradation is mainly due to the presence of sulfates and chlorides (smog, acid rain). The products of the reactions, which can occur only when moisture is present, entails the swelling of the material and finally the collapse. The mechanical and structural degradation is linked with the presence of vegetation, the freezing and thawing cycles action, and the mechanical vibrations. Plant roots tend to penetrate the walls causing cracks that facilitate the infiltration of water. The roots removal, artificially made or following the natural death of the plant, can cause dangerous instability in the walls. At the same time, the transition from liquid to solid water leads to an increase of almost a tenth of its volume. In the case of water in the masonry, the phenomenon begins at the external surface and then continues to the inside. Within the pore pressure are created, and its intensity is inversely proportional to the diameter of the pores of the material (an inferior diameter entails a capillary rise, a decreased "availability" of space for the water expansion and therefore more pressures). The environmental vibrations generally favor the wall deterioration for two reasons: the high number of cycles that characterize this type of stress (usually of very low amplitude) leads both to the deterioration and the detachment of the mortar from the wall, and on the other hand the formation of micro-cracks in the elements that facilitate the penetration of water and generally the degradation of the element. Environmental vibrations are mainly caused by adjacent or close to the structure traffic.

costituiti principalmente da altimetri sonar e da un corredo di altri strumenti di monitoraggio che perfezionano le osservazioni; il fenomeno, laddove in atto e insistente su ponti da recuperare, viene risolto con interventi alle fondazioni esistenti, modificando anche la forma del piede della fondazione onde modificare l'interazione pila/fluido e incrementando la capacità portante mediante l'aggiunta di fondazioni profonde ove alterata da fenomeni precedenti o in atto. Quindi i cedimenti delle fondazioni: essi sono tra le maggiori e più diffuse cause di dissesto statico o di perdita di funzionalità di un'opera. Le cause di tali cedimenti sono di varia natura, e principalmente elencati nel seguito (CESTELLI, GUIDI 1975): scarsa o errata conoscenza dei suoli, dimensionamento per difetto delle fondazioni. Per quanto riguarda il fenomeno degli urti di veicoli: esso può in realtà essere scisso in due problematiche principali, ovvero quello degli urti sul piano della linea e quello dell'urto da parte di veicoli fuori linea (natanti o autoveicoli a seconda dell'ostacolo valicato): nel caso di urti da parte del veicolo ferroviario, ovvero dei cosiddetti urti in linea, le Istruzioni Tecniche e la pratica di manutenzione e ispezione continua degli enti gestori delle linee sono alla base della prevenzione, essendo il fenomeno provocato per lo più non da errori del conduttore del veicolo, ma da carenze strutturali della sovra o sotto struttura. Per quanto agli urti da natanti, va diffondendosi la pratica (specie nelle zone interessate da intenso traffico marittimo o fluviale) di realizzare i cosiddetti *dolphins* (LARSEN 1993), costituiti da elementi sacrificali, per lo più pali infissi a distanza ravvicinata delle pile del ponte in alveo, realizzati con la sola finalità di bloccare il natante prima che urti le strutture di fondazione vero e proprie e/o la pila stessa.

10. Modalità della diagnosi dei fenomeni di degrado

La diagnosi del degrado può avvenire innanzitutto attraverso delle considerazioni statiche essenziali: la raccolta dei dati sulla struttura ed il loro esame sistematico consentono di impostare correttamente le valutazioni tecniche per un giudizio sullo stato e sulla sicurezza dell'opera (MALERBA 2001).

Tali valutazioni comportano in ogni caso l'analisi dei carichi, il calcolo del loro accumulo progressivo fino alle fondazioni e la verifica delle principali membrature portanti (RADOĞNA, 2000). Non è infrequente che permangano elementi di incertezza, per esempio, sull'effettiva quantità di armature interne e sul loro stato di conservazione. In questi casi si cercherà di acquisire maggiori informazioni mediante nuove ispezioni locali, oppure, in sede di calcolo, si cercherà di simulare gli effetti conseguenti ad ipotesi peggiorative, riducendo le sezioni resistenti, o migliorative, quando il ricorso a schemi portanti meno semplificati di quelli di progetto consentano di fare affidamento sulla collaborazione strutturale di altre componenti dell'edificio. Sempre nei casi di incertezza conviene saggiare di-

9. Special issues

It has to be accounted also for the so-called special problems, related to external factors to the bridge structures, mainly consisting in: undermining of piles in the river, vertical displacement at the abutments, vehicle collisions, derailments. Concerning the first problem, during the structure erection, there are many computational procedures and investigations that help in minimizing its occurrence, among which we quote tests on scale models; with regard to the existing bridge structures, it must be said that the problem of slipping off (together with the abutments displacement) is one of the most frequent (MALERBA 2010): in this case, the phenomenon can be monitored and controlled by monitoring system, consisting mainly of sonar altimeters and a set of other monitoring tools that helps in a continuous observation; the phenomenon where in place on bridge structure to be recovered, it is solved with reinforcing interventions on the existing foundations, also changing the shape of the foundation foot in order to positively affect the entire pier-fluid interaction and increasing the carrying capacity by the addition of deep foundations where altered by previous or current events. So the foundation displacement: they are among the largest and most common causes of static instability or loss of function of a bridge structure. The causes of such failures are of various kinds, mainly listed in the following (CESTELLI, GUIDI 1975): poor or incorrect knowledge of soils, insufficient or errors in foundations design. Concerning the phenomenon of vehicles impact: it can actually be split into two main issues, as the on line impact and the out of line impact (boats or vehicles, depending on the crossing obstacle): in the impact coming from a rail vehicle, the technical instruction and the current practice of continuous maintenance and inspection are the basis of prevention, since the phenomenon is not caused mainly by errors of the conductor of the vehicle, but are more related to structural weaknesses of structure or sub-structure. The damage from boats, it's arising the practice (especially in areas affected by heavy sea and river traffic) to implement the so-called *dolphins* (LARSEN 1993), consisting of sacrificial structural elements, mostly piles posed at close range from the elevations in the river bed, made with the unique purpose of blocking the vessel before it impacts directly the real foundation structures and / or the elevation itself.

10. Deterioration diagnosis methods

The diagnosis can be performed primarily through the elementary static analysis: the collection of structural data and their systematic examination are used to set the correct technical evaluations for an opinion on the status and safety of the structure itself (MALERBA 2001).

Such assessments will in any case composed by the load analysis, calculating the gradual increment up to the respective foundations and the verification of the main structural members (RADOĞNA, 2000). It is not uncommon

rettamente la risposta della struttura con l'effettuazione di una prova di carico.

Va sottolineato che il buon esito della prova è condizione necessaria ma, di per sé, non sufficiente per garantire la sicurezza della struttura. Tuttavia la sperimentazione diretta, oltre a sollecitare la struttura fino ad indurre le massime sollecitazioni previste per il suo esercizio, fornisce utili indicazioni circa un corretto comportamento elastico, sull'entità di spostamenti e deformazioni, sui loro residui allo scarico e sulla sensibilità alla fessurazione.

L'analisi dovrebbe proseguire per gradi di approfondimento successivo, ovvero in seconda analisi mediante analisi sperimentali e monitoraggio: questa fase dovrebbe in particolare essere applicata soprattutto in presenza di rilevanti fattori di incertezza, allorché pare conveniente monitorare il comportamento di una costruzione per un certo periodo di tempo.

Un importante ausilio a questo tipo di indagine è offerto dai moderni sistemi di monitoraggio che, in forma automatica e secondo cicli programmabili, memorizzano la risposta di trasduttori in grado di rilevare nel tempo spostamenti, deformazioni, variazioni di inclinazione. Si tratta di operazioni relativamente costose ed impegnative, che risultano giustificate per opere di rilevante importanza storica o in presenza di situazioni critiche per la sicurezza collettiva. In particolare va sottolineato che una campagna sperimentale può ritenersi realmente produttiva se fornisce grandezze rappresentative, misurate con precisione e suscettibili di una interpretazione teorica.

E' quasi sempre opportuno, quindi, far precedere ad ogni sperimentazione una simulazione della prova mediante modelli numerici, che portino ad individuare i parametri più significativi ed a prevederne l'ordine di grandezza. Tali informazioni sono essenziali sia per definire le grandezze da misurare, sia per stabilire il tipo, il numero e la precisione degli strumenti in grado di coglierle (MALERBA 2001).

Gli sviluppi dell'analisi strutturale con l'ausilio dell'elettronica consentono di affrontare i problemi più complessi, con vastissime possibilità di indagine ed ampio campo di applicazioni. L'efficacia di tali analisi dipende dalla attendibilità dei dati di partenza, dalla correttezza dell'impostazione del problema studiato, dalla chiarezza delle finalità perseguite. Tra queste: l'analisi dello stato della struttura nella sua configurazione di partenza e la simulazione degli interventi di ripristino al fine di valutarne l'effettiva efficacia; la valutazione probabilistica della sicurezza di strutture in C.A. con legami costitutivi e comportamenti meccanici generalizzati (non lineari) (BIONDINI, 1998); la valutazione della capacità prestazionale residua di strutture ammalorate in c.a. prima e dopo riabilitazione strutturale (BONTEMPI, 1999). In casi di ripetitività di tipologie costruttive nelle reti, è consigliabile sottoporre poi gli elementi costruttivi nella loro interezza a prove a scala reale, onde addivenire a considerazioni

in existing structures that remain uncertainty elements, for example, the actual amount of internal steel reinforcement and their condition. In these cases it has to be gathered more information through new local inspections, or, in the calculation stage, trying to simulate the consequent effects to different worst-cases scenario, reducing the resistant sections, or in better cases, when the use of simplified structural scheme enable to rely on the cooperation of the structural components of the building. Also in cases of uncertainty it should be useful to amplify the structural response with direct load tests.

It should be stressed that the success of the test is necessary but, in itself, not enough to guarantee the safety of the structure. However, direct experimentation, more than soliciting the structure to the maximum stress expected for the exercise, provides moreover useful guidance on the proper elastic behavior, on the real displacement amount and on deformation, on residual deformations at the unloading and on the cracking sensitivity.

The analysis should continue in a continuous increasing step-level detail, and on a second analysis, by the use of experimental analysis and monitoring: this phase should in particular be applied especially in presence of significant uncertainties, should be followed when the behavior of a building for a precise time-period.

An important aid to this type of investigation is offered by the modern monitoring systems, that in automatic and with programmable cycles, store the response of transducers that can detect movement over time, deformation, tilt and trim variations. These operations are relatively expensive and difficult, which is justified by structures of significant historical importance or in the presence of critical situations for the public security. In particular it should be noted that an experimental campaign has to be considered useful if it provides representative quantities, accurately measured and susceptible to theoretical interpretation.

It's a good practice, therefore, to precede each testing by simulations with numerical models, leading to identify the most significant parameters and to predict the order of magnitude to be recorded or investigated. Such information is essential both to define the variables to be measured, and to determine the type, number and accuracy of instruments to be successively used (MALERBA 2001).

The development of structural analysis with the aid of a computer can address more complex problems, with extensive possibilities of investigation and the wide range of applications. The effectiveness of such analysis depends on the reliability of the initial parameters, on the correct setting of the investigated problem, on the clearness of the objectives pursued. Among them: an analysis of the state of the structure in its starting configuration and the simulation of the remedial measures in order to assess the actual effectiveness; the probabilistic safety assessment of r.c. structures with constitutive and generalized mechanical behavior (nonlinear) (BIONDINI, 1998); the assessment of the performance index of damaged r.c. structures be-

molto approfondite sulla reale vulnerabilità ai vari fenomeni di degrado (PIPINATO 2008).

L'interazione tra le informazioni ottenute dal monitoraggio con quelle dedotte dall'analisi numerica e sperimentale consente, inoltre, giudizi strutturali di grande efficacia sia per gli aspetti riguardanti la statica globale della costruzione, sia per ciò che riguarda il comportamento locale delle zone più critiche. Nei casi più severi di danno o meglio ancora nelle strutture da ponte a rete, appare conveniente l'applicazione di modellazioni probabilistiche avanzate applicate in termini di affidabilità strutturali (PIPINATO 2010).

10. Conclusioni

La progettazione dei manufatti da ponte deve essere eseguita in modo da conseguire il migliore risultato globale dal punto di vista tecnico-economico, con particolare riguardo alla durabilità dell'opera stessa. Fin dalla fase di progettazione deve essere posta la massima cura nella concezione generale dell'opera e nella definizione delle geometrie e dei particolari costruttivi in modo da rendere possibile l'accessibilità e l'ispezionabilità, nel rispetto delle norme di sicurezza di tutti gli elementi strutturali. Deve essere garantita la piena ispezionabilità degli apparecchi d'appoggio e degli eventuali organi di ritegno. Deve inoltre essere prevista la possibilità di sostituire questi elementi con la minima interferenza con l'esercizio; a tale scopo i disegni di progetto devono fornire tutte le indicazioni al riguardo (numero, posizione e portata dei martinetti per il sollevamento degli impalcati, procedure da seguire anche per la sostituzione degli stessi apparecchi, ecc.).

Grande attenzione va posta nei confronti degli aspetti riguardante le principali cause di degrado, siano esse ambientali, ricorrenti o eccezionali, in quanto dall'analisi delle stesse sarà possibile addivenire a buoni progetti e costruzioni sempre più durevoli e sicure nel tempo.

fore and after structural rehabilitation (BONTEMPI, 1999).

In cases of repetitive building types in the network, it should be useful to perform full-scale tests in recurrent structural components in order to reach a very deep knowledge on the real vulnerability to the various degradation issues (PIPINATO 2008).

The interaction between the information obtained from monitoring with those deduced from numerical and experimental tests can also lead to higher level structural investigations for both static aspects of the overall structures, both for what concerns the local behavior of the most critical subcomponents. In the more severe cases of damage or better in the network bridge structures, it is convenient the application of advanced applied probabilistic modeling in terms of structural reliability (PIPINATO 2010).

10. Conclusions

The design of bridge structure should be done in order to achieve the best overall result in terms of technical and economic parameters, with a particular attention to the durability of the entire work. Since the design phase, it should be given the maximum care on the general conception of the structure, on the definition of the geometry and on the construction details, in order to make possible accessibility and regular inspections in compliance with the safety of all structural elements. Full inspection of the support equipments and devices must be guaranteed as their replacement with the minimum interference with the operation: for this aim, the project should provide all the information about it (number, location and extent of the jacks to lift the decks or procedures followed for the replacement of the same equipment, etc.).

Great care must be taken in respect of issues concerning the main causes of degradation, whether environmental or exceptional actions, as from their analysis will be possible to come up with good projects and buildings more durable and reliable over time.

BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] AASHTO (2010), LRFD Bridge Design Specifications, Customary U.S. Units, 5th Edition, with 2010 Interim Revisions.
- [2] ABDUNUR C. (2000), "Inspection monitoring and assessment", in Park & Ryall – Design of Bridges.
- [3] E. BRUHWILER, M. SCHLAFLI (1998), "Fatigue of existing reinforced concrete bridge deck slabs, *Engineering Structures*", vol. 20, n. 11, pp. 991-998, novembre 1998.
- [4] F. BIONDINI, F. BONTEMPI, P.G. MALERBA (1998), "Valutazione probabilistica della sicurezza nell'analisi non lineare di strutture in c.a. *Studi e Ricerche*", vol. 19, 1998, Scuola di Specializzazione in Costruzioni in c.a. F.lli PESENTI, Politecnico di Milano.
- [5] F. BONTEMPI, P.G. MALERBA, E.F. RADOGNA (1999), "Ruolo dell'analisi non lineare nella valutazione della capacità prestazionale residua e nella misura della sicurezza di strutture ammalorate in c.a. prima e dopo riabilitazione strutturale", Giornate AICAP'99, 4-6 novembre, Torino.

- [6] G.M. CALVI (2010), "A lezione dai terremoti", prolusione - Pavia, 18 gennaio 2010.
- [7] C. CESTELLI GUIDI (1975), "Geotecnica e Tecnica delle Fondazioni", U. Hoepli Editore.
- [8] H. CROWLEY, R. PINHO, M. FARAVELLI, V. MONTALDO, C. MELETTI, G.M. CALVI, M. STUCCHI (2006), "Gli effetti dell'introduzione di una nuova mappa di pericolosità sulla valutazione del rischio sismico in Italia", Atti del XII Convegno ANIDIS, L'Ingegneria Sismica in Italia, Pisa.
- [9] 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.
- [10] J.W. FISHER, B.T. YEN, D. WANG (1990), "Fatigue Strength of Riveted Bridges Members", Journal of structural Engineering, vol. 116, n. 11, pp. 2986-2981.
- [11] O.D. LARSEN (1993), "Ship collision with bridges", IABSE-Structural engineering documents.
- [12] P.G. MALERBA (2010), "Managing old bridges", IABMAS 2010, Philadelphia, USA.
- [13] P.G. MALERBA (2001), "I segnali del dissesto riconoscimento delle patologie strutturali", in Build-Up.
- [14] Ministero delle Infrastrutture di concerto con Ministero dell'Interno e Protezione Civile (2008), "Norme Tecniche per le Costruzioni", DM 14/01/2008, Roma.
- [15] Ministero delle Infrastrutture di concerto con Ministero dell'Interno e Protezione Civile (2009), "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al DM 14/01/2008", Circolare 617/2009, Roma.
- [16] R. PARK, T. PAULAY (1975), "Reinforced Concrete Structures", J. Wiley & Sons, New York.
- [17] A. PIPINATO (2008), "High-cycle fatigue behavior of historical metal riveted railway bridges", Ph.D Thesis, University of Padova, Italy.
- [18] A. PIPINATO, C. MODENA (2009), "Structural analysis and fatigue reliability assessment of the Paderno bridge", ASCE - Practice Periodical on Structural Design and Construction, Posted ahead of print July 29, 2009. Doi:10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000037.
- [19] A. PIPINATO (2010), "Step level procedure for remaining fatigue life evaluation of one railway bridge", Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, International Research Journal of Vilnius Gediminas Technical University, Riga Technical University, Tallinn University of Technology, Baltic Road Association, n. 1/2010.
- [20] E.F. RADOĞNA (2000), "Riflessioni sui problemi della sicurezza strutturale degli edifici esistenti con riferimento alle finalità del Fascicolo del Fabbriato", Giornale AICAP, n. 4, aprile, Allegato a "L'industria Italiana del Cemento".