



La gestione delle verifiche post-sisma per le infrastrutture ferroviarie

Management of post-earthquake verifications for railway infrastructures

Dott. Ing. Mariano Angelo ZANINI^(*)

Dott. Ing. Flora FALESCHINI^(*)

Prof. Ing. Carlo PELLEGRINO^(*)

Prof. Ing. Claudio MODENA^(*)

Sommario - In caso di terremoto, i ponti sono considerati gli elementi più vulnerabili di una rete ferroviaria, tenendo conto anche del fatto che la maggior parte di essi è stata progettata quando ancora non erano vigenti specifiche normative antisismiche. Il danneggiamento di tali strutture può provocare notevoli disagi alla circolazione ferroviaria, pertanto in questo studio è affrontata la tematica dell'ottimizzazione delle procedure di ispezione post-evento sismico con l'obiettivo di raggiungere una riduzione delle tempistiche necessarie al controllo delle condizioni delle opere d'arte e la conseguente minimizzazione dei disagi derivanti dal fuori servizio delle linee. Nella parte finale del lavoro è illustrato un ipotetico caso studio cui è stata applicata la procedura.

1. Introduzione

In caso di terremoto, i ponti rappresentano gli elementi più critici della rete ferroviaria. Gran parte dei ponti ferroviari, anche se generalmente caratterizzati da elevata robustezza strutturale, non sono stati progettati con norme antisismiche [1] ed è per questo motivo che nell'immediato post-sisma risulta necessario verificare l'efficienza della linea e l'assenza di danneggiamenti strutturali alle opere, in maniera tale da garantire un adeguato livello di sicurezza alla circolazione ferroviaria.

Negli ultimi recenti terremoti italiani (L'Aquila 2009; Emilia-Romagna 2012), il gestore dell'infrastruttura ferroviaria ha provvisoriamente operato la chiusura di alcune tratte di rete ferroviaria all'interno del cratere sismico per consentire ai tecnici di effettuare le ispezioni necessarie al fine di controllare se le opere civili della linea aves-

Summary - In case of an earthquake, bridges are considered the most vulnerable elements of a railway network, taking account of the fact that most of them have been designed when specific earthquake-resistant standards were still not in force. Damage to these structures can cause considerable inconveniences to the railway circulation, hence this study has addressed the issue of optimisation of procedures for post-seismic event inspection with the aim of achieving a reduction of time needed to check the conditions of the artwork and the consequent minimisation of inconveniences resulting from the lines out of service. The final part of the work shows a hypothetical case study where the procedure has been applied.

1. Introduction

In case of earthquake, bridges are the most critical elements of the railway network. Although generally characterised by high structural strength, most railway bridges were not designed with anti-seismic specifications [1] and it is for this reason that in the immediate post-quake it is necessary to verify the efficiency of the line and the absence of structural damage to the works, in such a way as to guarantee an adequate level of train traffic safety.

In the past recent earthquakes in Italy (L'Aquila in 2009; Emilia-Romagna in 2012), the railway infrastructure manager temporarily closed some sections of the railway network within the seismic crater to allow engineers to carry out the necessary inspections to check whether the civil works of the line had suffered significant damage during the seismic event, such as to constitute a potential danger

^(*) Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale.

^(*) University of Padua, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering.

sero subito danni significativi durante l'evento sismico, tali da costituire un potenziale pericolo alla circolazione dei convogli ferroviari. Tale misura preventiva risulta essere d'altro canto molto impattante, comportando notevoli disagi sia per il gestore (perdite economiche dirette) sia per gli stessi utenti del trasporto ferroviario (perdite economiche indirette).

In questo ambito, si è ritenuto significativo pertanto affrontare il tema dell'ottimizzazione delle procedure di ispezione post-evento sismico [2], al fine di raggiungere una riduzione delle tempistiche necessarie al controllo delle condizioni delle opere d'arte e alla messa in sicurezza delle eventuali strutture danneggiate, in maniera da bilanciare al meglio le esigenze relative al mantenimento di livelli di sicurezza strutturale adeguati e al contempo quelle collegate alla minimizzazione delle perdite economiche derivanti dal fuori servizio delle linee sia per i fruitori sia per l'ente gestore. Per raggiungere questo risultato è fondamentale pertanto gestire in maniera ottimale la fase delle ispezioni di controllo post-sisma e individuare con tempestività i punti più critici dove potrebbero verificarsi dei danneggiamenti significativi, tali da costituire un potenziale pericolo alla sicurezza della circolazione.

A tal fine, in questo lavoro si propone un metodo per la gestione del rischio sismico di reti ferroviarie in grado di migliorare significativamente l'attuale stato dell'arte rappresentato dalle procedure vigenti in tale ambito operativo. Nello specifico, RFI ha emanato la *Disposizione 60 del 2 set 2005* [3], che regola le visite linea per la sorveglianza di armamento e sede. In tale specifica, è prevista la visita straordinaria alla linea a seguito di eventi straordinari "...visite straordinarie vengono effettuate per accettare lo stato della linea al verificarsi di eventi straordinari che possono compromettere l'integrità della linea stessa o arrecare comunque turbamento alla circolazione dei treni (gravi perturbazioni, atmosferiche, venti eccezionali, piogge intense e uragani, caduta di valanghe, rapido scioglimento delle nevi, alluvioni, inondazioni, piene di fiumi o di torrenti, mareggiate, terremoti)...". RFI ha inoltre recentemente emanato l'*Istruzione "44C"* [4], che regola le visite di controllo alle opere d'arte, prevede la visita straordinaria alle opere d'arte in caso di eventi eccezionali: "...visite straordinarie a seguito di eventi eccezionali; tali visite dovranno essere eseguite al verificarsi di eventi eccezionali (alluvioni, terremoti, piene eccezionali, ecc.), a parte gli adempimenti di vigilanza al profilarsi e nel corso degli eventi stessi. In tal caso dovrà essere effettuata un'accurata visita ai manufatti, estesa alla zona circostante interessata dall'evento calamitoso, al fine di accertare che gli eventi predetti non abbiano riflessi negativi sui necessari presupposti per la stabilità delle opere stesse e la sicurezza dell'esercizio ferroviario; visite straordinarie specialistiche...".

La procedura proposta in questo articolo ha pertanto l'obiettivo di coordinare e gestire le visite straordinarie a seguito di eventi eccezionali (quali per l'appunto gli eventi sismici) previste dalla *Disposizione 60 del 2 set 2005* e dall'*Istruzione "44C"*. Tali normative ferroviarie, prevalentemente incentrate sulla gestione ordinaria delle operazioni ispettive, non danno specifiche informazioni in me-

to the circulation of trains. This preventive measure is moreover very impacting, resulting in considerable hardship for both the manager (direct economic losses) and for users of rail transport (indirect economic losses).

In this context, it was considered important, therefore, to address the issue of optimisation of post-seismic event inspections procedures [2], in order to achieve a reduction of the time needed for checking the condition of the artwork and the securing of any damaged facilities so as to better balance the requirements relating to the maintenance of adequate levels of structural safety and at the same time those related to the minimisation of economic losses arising from lines out of order for both users and the managing body. To achieve this it is essential therefore to manage the inspection phase of post-earthquake control optimally and promptly identify the critical points where significant damage may be experienced, such as to constitute a potential danger to circulation safety.

To this end, this paper proposes a method for seismic risk management of railway networks that can significantly improve the current state of the art represented by existing procedures in this area. Specifically, RFI issued Regulation 60 of September 2, 2005 [3], which regulates line visits for the supervision of the permanent way and rail bed. In this specification, an extraordinary inspection is scheduled following extraordinary events "... extraordinary inspections are carried out to ascertain the condition of the line at the occurrence of extraordinary events that may compromise the integrity of the line itself or anyway cause disturbance to the train circulation (serious disturbance, weather, exceptional winds, heavy rain and hurricanes, avalanches, fast melting of snow, floods, inundations, overflows of rivers or streams, storm surges, earthquakes)...". RFI has also recently issued Instruction "44C" [4], which regulates the inspection visits to works and includes an extraordinary visit to the works in the event of exceptional events: "... extraordinary visits as a result of exceptional events; such visits must be made upon occurrence of exceptional events (floods, earthquakes, extraordinary overflows, etc.) besides supervisory obligations upon looming and during the same events. In such a case a thorough visit must be made to the artefacts, extended to the surrounding area affected by the calamitous event, in order to ensure that such events do not have negative effects on the necessary pre-conditions for the stability of the works themselves and the safety of railway operations; extraordinary specialist visits...".

In this article the proposed procedure therefore has the aim of coordinating and managing the extraordinary visits as a result of exceptional events (such as seismic events) provided by Regulation 60 of September 2, 2005 and by Instruction "44C". Such railway regulations, mainly focused on day-to-day management of inspection operations, do not give specific information regarding the man-

rito alle modalità di gestione delle attività nelle fasi post-evento calamitoso.

Nello specifico, risulta possibile valutare nell'immediato post-sisma i punti di potenziale criticità, sulla base di competenze afferenti all'area della sismologia [5, 6] e quelle legate agli aspetti più prettamente strutturali [7, 8]: la procedura può difatti essere migliorata in maniera tale da tenere in considerazione anche gli aspetti legati allo stato di conservazione delle opere d'arte e alla presenza di eventuali fenomeni di degrado dei materiali, come illustrato in alcuni studi recentemente condotti a livello internazionale [9, 10, 11] mirati alla valutazione dell'influenza dei fenomeni di deterioramento sulla vulnerabilità sismica di ponti esistenti. L'algoritmo di funzionamento di tale procedura permette la definizione delle tempistiche necessarie per l'esecuzione delle ispezioni di controllo post-evento e l'individuazione delle sequenze di opere da visitare da parte di ciascun tecnico del personale addetto alle operazioni ispettive, con l'obiettivo di minimizzare su basi razionali il tempo totale di fuori servizio della linea ferroviaria. Una stima preliminare del tempo totale di fuori servizio può essere rappresentata dal massimo valore di durata delle ispezioni visive post-evento tra quelli relativi alle varie unità giurisdizionali coinvolte in tali operazioni a seguito di un terremoto. Se da un lato questo valore rappresenta la durata di tempo necessaria per aver accertato completamente lo stato di salute delle opere coinvolte nel cratere sismico, i risultati forniti dalla procedura possono essere anche ulteriormente elaborati calcolando le differenti tempistiche di riapertura delle tratte coinvolte in relazione alla durata delle ispezioni di controllo compiute all'interno di varie unità giurisdizionali coinvolte: in tale modo è possibile aumentare ulteriormente il livello di qualità del risultato fornito dall'algoritmo, riducendo ulteriormente i tempi di fuori servizio delle linee.

Nella parte finale del lavoro viene infine illustrata un'applicazione della procedura proposta ad un ipotetico caso di studio, illustrando i risultati ottenuti e i relativi benefici gestionali.

2. Un programma di calcolo per la stima degli effetti di un evento sismico sulle reti infrastrutturali

Nell'ambito delle attività di ricerca svolte dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale riguardanti le tematiche connesse alla valutazione della vulnerabilità sismica delle reti infrastrutturali, è stato messo a punto un software (*Br.I.N.S.E. v2.0 Bridge Infrastructure Networks' Scenario Earthquakes*) per la stima degli effetti indotti dall'occorrenza di eventi sismici, in termini di danneggiamenti subiti alle strutture e opere minori appartenenti alle reti infrastrutturali.

Nello specifico, il programma permette di definire il campo di scuotimento indotto da un determinato evento sismico caratterizzato da magnitudo M_w e coordinate epicentrali. Le accelerazioni indotte dal terremoto simulato vengono calcolate in corrispondenza delle strutture da

agement mode of activities in calamitous post-event stages.

Specifically in the immediate post-earthquake future, it is possible to assess the potentially critical points, on the basis of competences relating to the area of seismology [5, 6] and those related to the purely structural aspects [7, 8]: the procedure can in fact be improved in such a way as to take into account aspects related to the state of conservation of works of art and the presence of any material degradation phenomena as shown in some studies recently carried out internationally [9, 10, 11] aimed at evaluating the influence of deterioration phenomena on the seismic vulnerability of existing bridges. The operation algorithm of this procedure allows the definition of timing necessary for the performance of post-event control inspections and identification of sequences of works to be visited by each staff technician in charge of inspection operations, with the goal of minimising the total downtime of the railway line on rational bases. A preliminary estimate of the total downtime can be represented by the maximum value of duration of post-event visual inspections between those relating to jurisdictional units involved in such operations as a result of an earthquake. If on the one hand this value represents the length of time needed for having fully ascertained the conditions of works involved in the seismic crater, the results provided by the procedure can also be further processed by calculating the different timing of reopening of the sections involved in relation to the duration of control inspections carried out within the various jurisdiction units involved: in this way it is possible to further increase the level of quality of the result provided by the algorithm, further reducing the downtime.

Lastly, the final part of the work shows an application of the procedure proposed to a hypothetical case study, illustrating the results obtained and its operational benefits.

2. A calculation programme for the estimation of the effects of a seismic event on infrastructure networks

As part of the research activities carried out by the Department of Civil, Building and Environmental Engineering, concerning issues related to the assessment of seismic vulnerability of infrastructure networks, a software was developed (*Br. I.N.S.E. v2.0 Bridge Infrastructure Networks' Scenario Earthquakes*) for the estimate of the effects induced by the occurrence of seismic events, in terms of damage caused to structures and minor works belonging to infrastructure networks.

Specifically, the programme allows defining the shaking field induced by a given seismic event characterised by a M_w magnitude and epicentre coordinates. The simulated earthquake induced accelerations are calculated at the structures

analizzare, derivando in seguito degli indicatori di danneggiamento grazie all'implementazione di una serie di curve di fragilità empiriche [12]. Le curve di fragilità sono attualmente il più efficace sistema di rappresentazione della vulnerabilità sismica di una struttura [13] in relazione a specifici livelli di danneggiamento espressi tramite indicatori di natura cinematica, energetica o misti [14, 15].

Tale metodologia di valutazione della vulnerabilità sismica di ponti e più in generale di strutture ha trovato notevole seguito nella letteratura scientifica degli ultimi 10 anni [16, 17]. Il software Br.I.N.S.E. v2.0 si configura pertanto come un possibile strumento operativo con cui operare la valutazione della vulnerabilità sismica di ponti e manufatti minori appartenenti a reti infrastrutturali [18]. In fig. 1 viene rappresentata una tipica schermata di output del software in relazione alla simulazione di uno

to be analysed, resulting in damage indicators thanks to the implementation of a number of empirical fragility curves [12]. Fragility curves are currently the most effective system of representation of seismic vulnerability of a structure [13] related to specific levels of damage expressed through kinematic, energy or mixed type indicators [14, 15].

This assessment methodology of seismic vulnerability of bridges and structures in general has found significant follow-up in scientific literature of the last 10 years [16, 17]. The Br.I.N.S.E. v2.0 software is configured as a possible tool with which to operate the assessment of seismic vulnerability of bridges and minor artefacts belonging to infrastructural networks [18]. Fig. 1 represents a typical output display of software in relation to a seismic scenario simulation and the evaluation of effects induced on a stock of artworks.

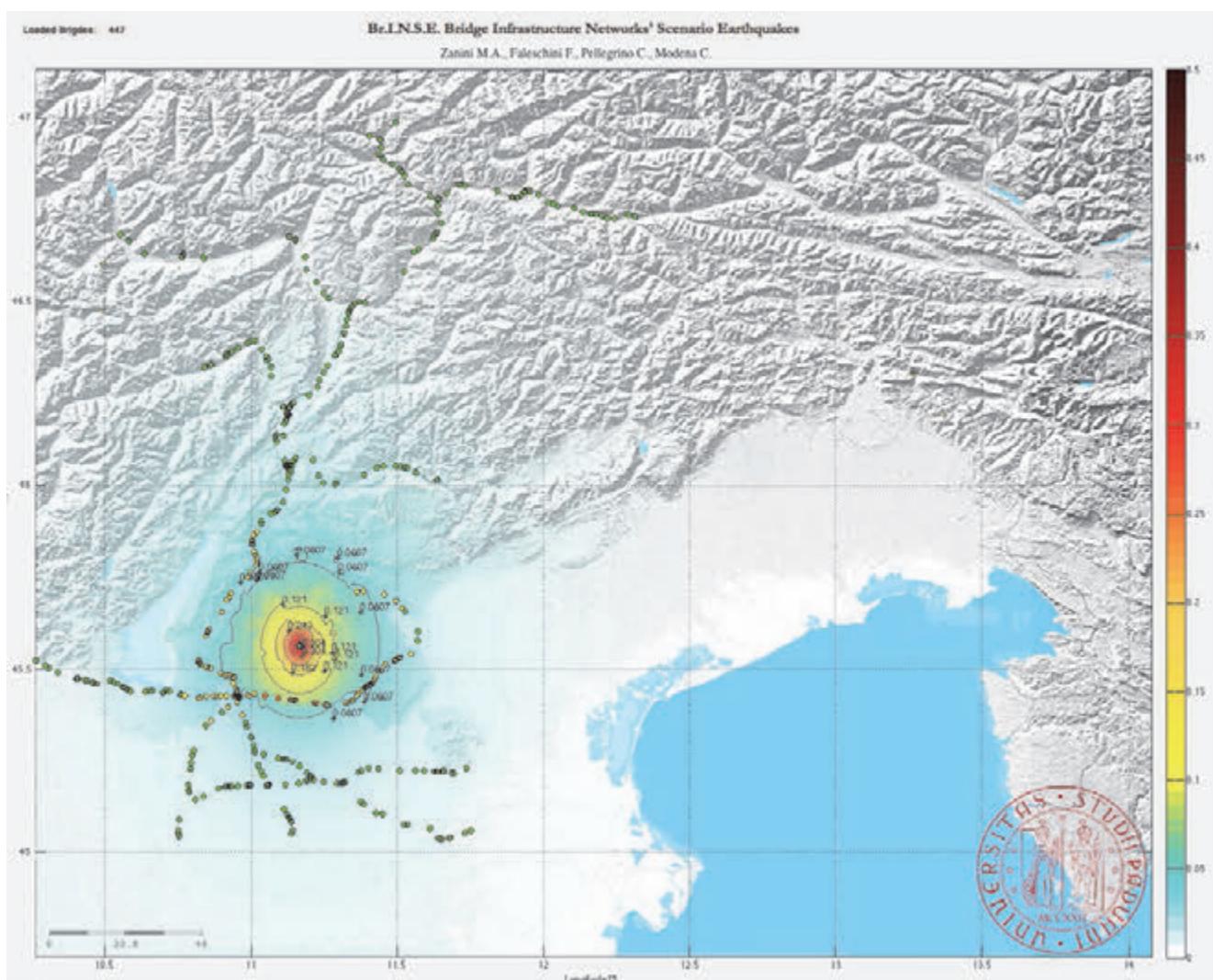


Fig. 1 - Una schermata di output del software Br.I.N.S.E. v2.0, utilizzato per la valutazione degli stati di danneggiamento indotti da eventi sismici su ponti e manufatti minori appartenenti a reti infrastrutturali.

Fig. 1 - An output display of Br.I.N.S.E. v2.0 software, used for the evaluation of damage conditions caused by seismic events on bridges and minor artefacts belonging to infrastructure networks.

scenario sismico e alla valutazione degli effetti indotti su uno stock di opere d'arte.

Br.I.N.S.E. v2.0 permette pertanto di calcolare in pochi istanti il campo di scuotimento indotto da un evento sismico di nota magnitudo e coordinate epicentrali, fornendo al contempo informazioni utili sui possibili danneggiamenti indotti al patrimonio di strutture nel confronto delle quali viene svolta la simulazione. L'affidabilità della distribuzione spaziale delle accelerazioni di picco al suolo previste è stata più volte confrontata con i dati registrati dalle stazioni accelerometriche presenti sul territorio nazionale, in maniera tale da supportare la validità delle successive elaborazioni numeriche. Nello specifico, si riporta a titolo illustrativo, un confronto tra i dati di accelerazione di picco al suolo (Peak Ground Acceleration, nel seguito *PGA*) registrati a seguito del recente evento sismico del 28 Agosto 2014, occorso al confine tra le Province di Brescia e Verona, caratterizzato da una magnitudo M_w 4.0 ed epicentro avente coordinate 45.67° N, 10.7° E.

In fig. 2 vengono riportate la mappa di scuotimento fornita il giorno successivo dall'INGV (fig. 2a) e quella elaborata con *Br.I.N.S.E. v2.0* (fig. 2b). Pur trattandosi di un evento di modesta entità, ma chiaramente percepito dalla popolazione, è stato possibile validare l'affidabilità previsionale del software e la rapidità nell'esecuzione della simulazione, andando a confrontare i valori predetti con quelli registrati dalle stazioni accelerometriche della Rete Accelerometrica Nazionale (RAN) (fig. 2c): dal confronto tra i dati RAN misurati in corrispondenza delle differenti stazioni distribuite in un raggio di 150 km dalla zona epicentrale e i fusi rappresentanti le curve predittive del valore di scuotimento per differenti tipologie di suolo (A, B, C) si può osservare come i dati registrati siano sostanzialmente contenuti all'interno di detti fusi.

L'aderenza tra modello predittivo e dati registrati è significativa in particolare nei primi 60-70 km di distanza dall'epicentro, mentre a distanze maggiori qualche dato registrato risulta leggermente discostato rispetto ai fusi di curve: tali situazioni possono essere dovute a presenza di specifiche condizioni di sito che vanno ad alterare la trasmissione delle onde sismiche provocando locali amplificazioni/smorzamenti che comunque risultano poco significativi dato che a tali distanze i campi di scuotimento indotti dal sisma risultano di valore trascurabile (nel caso in esame, già oltre 50 km di distanza dall'epicentro possiamo rilevare accelerazioni dell'ordine dello 0,1%g).

La valutazione dell'affidabilità previsionale del campo di accelerazioni è stata inoltre verificata andando a riprodurre numericamente l'evento sismico avvenuto il 20 Maggio 2012, di magnitudo M_w 5.9 localizzato nel Comune di Mirandola con epicentro di coordinate 44.876° N, 11.282° E.

Anche in questo caso, tramite il confronto tra i fusi rappresentanti le curve predittive del valore di scuotimento per differenti tipologie di suolo valori adottati in *Br.I.N.S.E. v2.0* e i valori di accelerazione registrati dalle stazioni accelerometriche della Rete Accelerometrica Nazionale (RAN) misurati in corrispondenza delle differenti

Br.I.N.S.E. v2.0 therefore allows to instantly calculate the shaking caused by a seismic event of known magnitude and epicentre coordinates, while providing useful information on any damage caused to the structure holdings in regard of which the simulation is performed.

The reliability of the spatial distribution of peak ground accelerations planned has been repeatedly compared to the data registered by the accelerometer stations present on the national territory, in such a way as to support the validity of subsequent numerical processing. Specifically, by way of illustration, a comparison of the data of peak ground acceleration (hereinafter PGA) is reported, registered following the recent earthquake of August 28, 2014, occurred on the border between the provinces of Brescia and Verona, characterised by a magnitude 4.0 M_w and epicentre with coordinates 45.67° N, 10.7° E.

*Fig. 2 shows the shaking map provided by INGV the day after (fig. 2a) and that processed with *Br.I.N.S.E. v2.0* (fig. 2b). Although it is a small event, but clearly perceived by the population, it was possible to validate the forecasting reliability of the software and the speed in the execution of the simulation, comparing these values with those recorded by the accelerometer stations of the National Accelerometer Network (NAN) (fig. 2c): a comparison of NAN data measured at different stations distributed within a radius of 150 km from the epicentre area and the zones representing the predictive curves of the shaking value for different types of soil (A, B, C) we can observe how the recorded data are essentially contained within these zones.*

The coherence between predictive model and data recorded is particularly significant in the first 60-70 km away from the epicentre, while at greater distances some data recorded is slightly deviated compared to curve zones: such situations may be due to the presence of specific site conditions that alter the transmission of seismic waves causing local amplifications/damping that are however not very significant given that shaking fields induced by earthquake at these distances are of negligible value (in this case, accelerations of the order of 0.1% g can be detected already over 50 km away from the epicentre).

The evaluation of the predictive reliability of the acceleration field was also verified by numerically reproducing the seismic event that took place on 20 May 2012, of magnitude 5.9 M_w located in the town of Mirandola with 44.876° N, 11.282° E coordinates epicentre.

*In this case too, through the comparison of zones represented by the predictive curves of the shaking value for different types of soil values adopted in *Br.I.N.S.E. v2.0* and acceleration values recorded by the accelerometer stations of the National Accelerometer Network (NAN) measured at the different stations distributed over a radius of 150 km from the epicentre area (fig. 3), the good predictability of the software proposed stood out also for seismic events of considerable impact.*

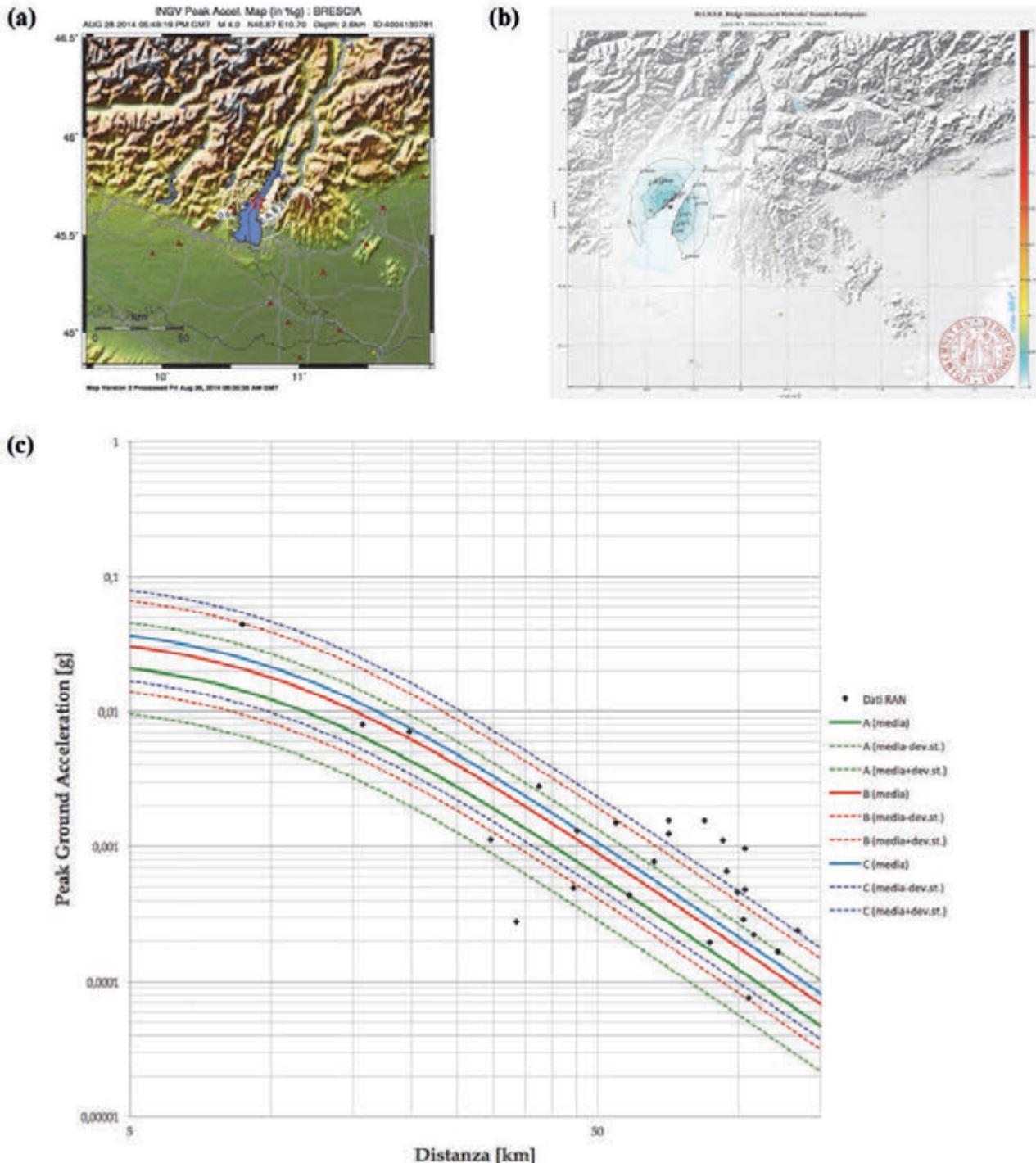


Fig. 2 - Il terremoto del 28 agosto 2014, Lago di Garda: campo di scuotimento fornito da INGV: (a) campo di scuotimento previsto con *Br.I.N.S.E. v2.0*; (b) confronto tra valori di PGA registrati dalle stazioni accelerometriche RAN e fusi di curve previsionali (valor medio, valor medio + deviazione standard, valor medio – deviazione standard) implementate nel software; (c) in relazione alla classificazione del suolo proposta nell'Eurocodice 8 ($A v_{s,30} > 800$; $B 360 < v_{s,30} < 800$; $C 180 < v_{s,30} < 360$).

Fig. 2 - The earthquake of August 28, 2014, Lake Garda: shaking field provided by INGV: (a) shaking field expected with Br. I.N.S.E. v2.0; (b) comparison between PGA values recorded at the NAN accelerometer stations and forecasting curve zones (mean value, mean value + standard deviation, mean value – standard deviation) implemented in the software; (c) in relation to soil classification proposed in Eurocode 8 ($A v_{s,30} > 800$; $B 360 < v_{s,30} < 800$; $C 180 < v_{s,30} < 360$).

stazioni distribuite in un raggio di 150 km dalla zona epicentrale (fig. 3), ne è emersa la buona capacità previsionale del software proposto anche per eventi sismici di rilevante impatto.

Sulla base dei dati relativi al campo di scuotimento, Br.I.N.S.E. v2.0 permette di valutare la probabilità di superamento di determinati livelli di danneggiamento per le varie opere appartenenti ad un asset strutturale oggetto di analisi. Nello specifico, i valori di PGA calcolati in corrispondenza di ogni struttura vengono usati come dato di input e conducono alla definizione dei valori di probabilità di superamento attraverso l'utilizzo delle curve di fra-

On the basis of data relating to the shaking field, Br.I.N.S.E. v2.0 allows assessing the probability of passing certain levels of damage to the various works belonging to a structural asset subject to analysis. Specifically, the PGA values computed for each structure are used as input data and lead to the definition of probability values of exceeding through the use of fragility curves. Fragility curves implemented within Br.I.N.S.E. v2.0 are those provided by the European project Risk-EU 2004 [12, 19], based on statistical data processing of damage to bridges and minor works detected in recent decades as a result of

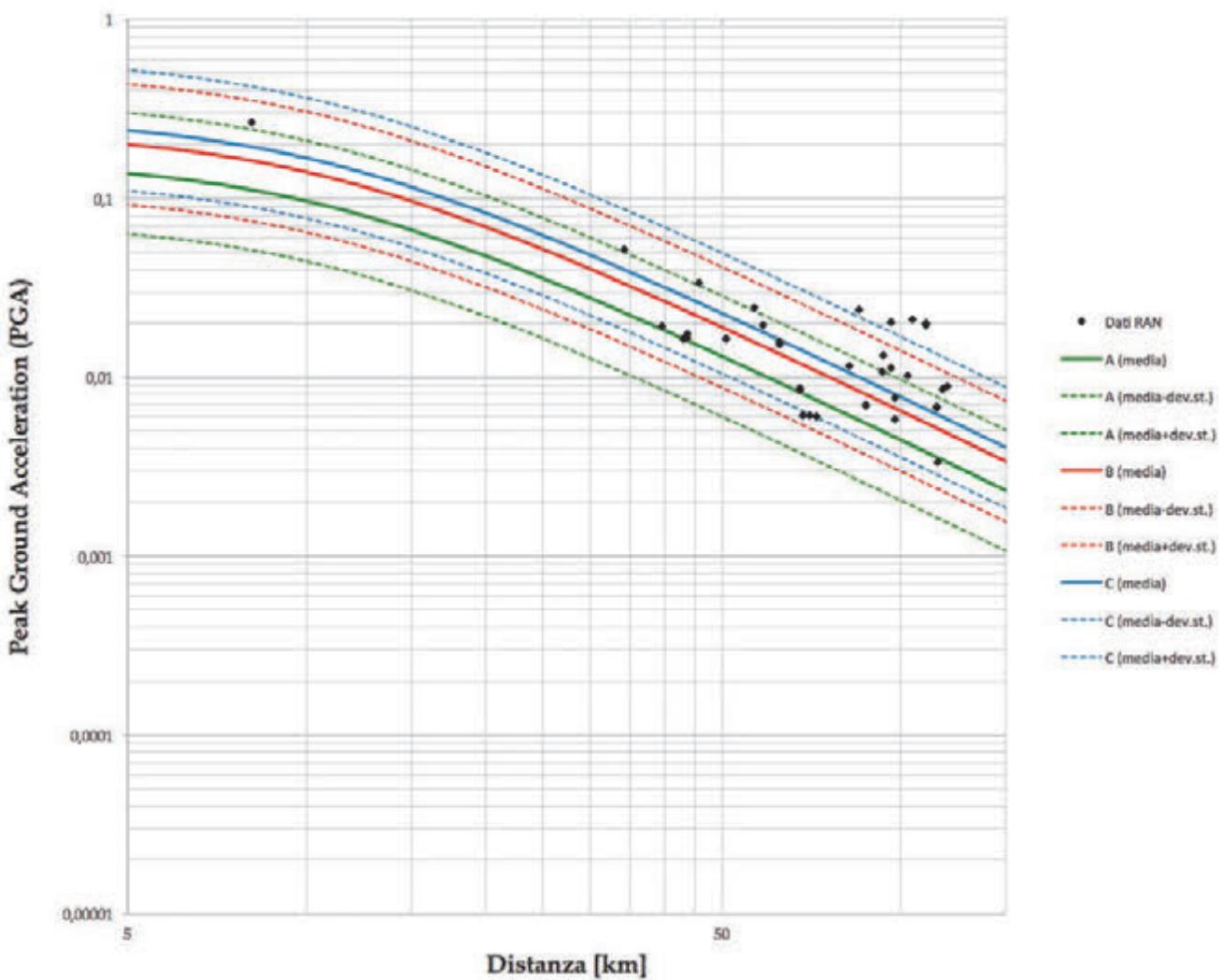


Fig. 3 - Il terremoto del 29 maggio 2012, Mirandola: confronto tra i valori di PGA registrati dalle stazioni accelerometriche RAN e fusi di curve previsionali (valor medio, valor medio + deviazione standard, valor medio - deviazione standard) implementate nel software (c) in relazione alla classificazione del suolo proposta nell'Eurocodice 8 (A $v_{s,30} > 800$; B $360 < v_{s,30} < 800$; C $180 < v_{s,30} < 360$).

Fig. 3 - Earthquake of May 29, 2012, Mirandola: comparison between PGA values recorded at the NAN accelerometer stations and forecasting curve zones (mean value, mean value + standard deviation, mean value - standard deviation) implemented in the software (c) in relation to soil classification proposed in Eurocode 8 (A $v_{s,30} > 800$; B $360 < v_{s,30} < 800$; C $180 < v_{s,30} < 360$).

gilità. Le curve di fragilità implementate all'interno di Br.I.N.S.E. v2.0 sono quelle fornite dal progetto europeo Risk-UE 2004 [12, 19], basate sull'elaborazione statistica di dati di danneggiamento a ponti e opere minori rilevati negli scorsi decenni a seguito di eventi sismici che hanno colpito diversi stati della Comunità Europea.

In tal modo è possibile definire un elenco di opere che necessitano prioritariamente un'ispezione visiva di controllo post-evento sismico, non più sulla base dei possibili valori del campo di scuotimento indotto da uno specifico evento sismico, bensì sulla base dei probabili danneggiamenti strutturali indotti dallo stesso. L'aspetto di novità rispetto alle procedure proposte in passato risulta essere quello di considerare nell'analisi oltre all'entità dello scuotimento al suolo e la sua attenuazione al crescere della distanza dalla zona epicentrale, anche il tipo di struttura che viene investita da un determinato valore di PGA. In tal modo il numero di manufatti da ispezionare viene significativamente ridotto in alcuni casi. Infatti, nel caso di valori di PGA intermedi, mentre in precedenza l'ispezione veniva comunque effettuata indipendentemente dalla vulnerabilità sismica delle strutture presenti, la nuova metodologia proposta permette, a parità di valore di PGA, di tener conto del fatto che manufatti minori (ponticelli, tombini) avranno una probabilità significativamente minore di manifestare stati di danneggiamento strutturale rispetto ai valori caratterizzanti ponti e opere di una certa rilevanza.

3. Predisposizione di un algoritmo di ottimizzazione per la gestione delle ispezioni di controllo post-sisma

Alla luce di tali considerazioni, sulla base dei risultati di output forniti dal software Br.I.N.S.E. v2.0, ovvero l'elenco delle opere necessitanti di ispezione di controllo a seguito dell'occorrenza di uno specifico evento sismico in relazione ai rispettivi valori di probabilità di danneggiamento strutturale, è stato sviluppato un algoritmo per la valutazione del tempo totale di durata delle ispezioni di controllo post-evento, del numero di ispettori necessari e del programma di ispezioni da porre in essere per garantire il ripristino della funzionalità della linea ferroviaria nel minor tempo possibile.

Nello specifico, l'algoritmo utilizza come dati di input i risultati forniti dal software Br.I.N.S.E. v2.0 e il numero di addetti disponibili per ciascun Tronco Lavori da movimentare per lo svolgimento delle operazioni ispettive in caso di occorrenza di un evento sismico.

La logica gestionale di fondo prevede infatti che in seguito a un terremoto, identificati i ponti da visitare, gli addetti di ciascun Tronco Lavori procedano all'ispezione dei ponti appartenenti alla parte di linea ferroviaria di propria competenza, partendo da ciascuna Sede Tronco Lavori e dirigendosi attraverso la rete di collegamento stradale in corrispondenza delle opere d'arte individuate. Operativamente viene quindi costruito un grafo di trasporto da cui si valutano i cammini minimi per raggiun-

seismic events that affected several Member States of the European Community.

In this way, a list of works can be defined that need a priority post-seismic event control visual inspection, no longer on the basis of the possible values of the shaking field induced by a specific seismic event, but on the basis of likely structural damage caused by the same. The new aspect in relation to the procedures proposed in the past is to also consider in the analysis the ground shaking extent and its attenuation as the distance from the epicentre area increases, as well as the kind of structure that is hit by a particular PGA value. In this way the number of artefacts to be inspected is significantly reduced in some cases. In fact, in the case of intermediate PGA values, while previously the inspection was carried out anyway, regardless of the seismic vulnerability of these structures, the new proposed methodology allows, with the same PGA value, to take account of the fact that minor artefacts (bridges, drains) will have a significantly lower probability of showing conditions of structural damage compared with values characterising bridges and works of some importance.

3. Preparation of an optimisation algorithm for managing post-earthquake control inspections

In the light of those considerations, on the basis of the output results provided by the Br.I.N.S.E. v2.0 software, that is, the list of works requiring control inspection following the occurrence of a specific seismic event in relation to the respective values of probability of structural damage, an algorithm was developed for the evaluation of the total duration time of post-event control inspections, the number of inspectors and inspections programme required to be put in place to ensure the restoration of operation of the railway line in the shortest possible time.

Specifically, the algorithm uses the results given by the Br.I.N.S.E. v 2.0 software as input data and the number of employees available for each Work Section to handle for the conduct of inspection operations in case of occurrence of a seismic event.

The underlying business logic requires that after an earthquake, having identified the bridges to visit, the workers of each Work Section proceed to the inspection of bridges belonging to the part of railway line of competence starting from each Work Section Centre and going through the road link network at the works identified. Operationally a transportation graph is then built by which the minimal paths to reach various destinations are evaluated and the completion of inspection operations on works requiring inspection is then performed through iterations.

In first approximation, it is assumed that the functionality of the road network is guaranteed, because of greater redundancy in the link potential between origin and desti-

gere le varie destinazioni e successivamente tramite iterazioni si procede al completamento delle operazioni ispettive sulle opere necessitanti visita ispettiva.

In prima approssimazione, si ipotizza che la funzionalità della rete stradale sia garantita, a motivo della specifica maggior ridondanza nelle capacità di collegamento tra nodi di origine e destinazione, se confrontata con quella che caratterizza le reti ferroviarie.

Tale ipotesi semplificativa dovrebbe essere aggiornata avendo a disposizione anche i dati in tempo reale dei potenziali danneggiamenti a ponti stradali appartenenti alle reti situate nel cratere sismico, per meglio calibrare la costruzione dei grafici di trasporto. Ipotizzando quindi un tempo di durata complessiva del singolo atto ispettivo (t_{isp}), l'algoritmo permette di valutare, a seguito di uno specifico evento sismico, il cronoprogramma ispettivo di ciascun addetto di tutti i Tronchi Lavori interessati da potenziali danneggiamenti, derivando il numero e quali opere assegnare a ciascuno di essi e stimando il tempo totale di chiusura complessiva delle operazioni ispettive necessarie per la ripresa della circolazione dei convogli in sicurezza.

Tale aspetto risulta fondamentale in ambito ferroviario, in quanto anche danni di apparente modesta entità (quantificabili in termini di probabilità di occorrenza calcolate attraverso l'utilizzo delle relative curve di fragilità rappresentative dello stato di danneggiamento lieve) potrebbero comportare l'indisponibilità dell'infrastruttura, con evidenti conseguenze in termini di possibilità di transito dei convogli. A titolo di esempio, nel caso di ponti a travata in calcestruzzo armato precompresso, nel caso di occorrenza di fenomeni di danneggiamento lieve alle componenti strutturali principali del ponte, come per esempio nella casistica di spostamenti differenziali residui tra campate contigue, tali situazioni potrebbero comportare sghembi sul binario vincolato ai medesimi impalcati, avendo conseguenze ancor più serie nel caso di transito di convogli. In tal senso un danno strutturale lieve agli elementi principali di un ponte potrebbe comunque avere riflessi significativamente gravi alla sicurezza dei convogli viaggianti.

A valle dell'elaborazione numerica l'algoritmo restituisce una serie di output grafici in cui visivamente è possibile avere un quadro complessivo della situazione gestionale in termini di cronoprogrammi per singolo addetto, per Tronco Lavori e tempistiche di durata delle operazioni ispettive.

In parallelo a quanto esposto sinora a riguardo dell'organizzazione delle visite straordinarie ai ponti a seguito di evento sismico, si potrebbe inoltre pensare di individuare per ciascuna Sede Tronco Lavori coinvolta da un evento sismico un congruo numero di risorse di personale esperte nell'armamento delle linee per l'esecuzione di una ricognizione all'armamento con appositi carrelli ($10 < v < 80 \text{ km/h}$) in maniera tale da completare in maniera esauriente il quadro cognitivo anche nei tratti non direttamente sviluppantesi su ponte/viadotto. Il numero di addetti all'armamento dovrebbe essere definito in relazione alla specifica estensione lineare e topologia delle linee

nation nodes, if compared with the one that characterises railway networks.

This simplifying assumption should be updated with the data of potential damage to road bridges belonging to networks located in the seismic crater available in real-time, to better calibrate the construction of transport graphs. Assuming an overall duration of a single inspection (t_{isp}), the algorithm allows evaluating the inspection time schedule of each employee, following a seismic event, of all Work Sections concerned by potential damage, deriving the number and what works to assign to each of them and estimating the overall closure time of inspection operations necessary for the safe resumption of circulation of convoys.

This aspect is fundamental in the field of railways, as even apparently minor damage (quantified in terms of probability of occurrence, calculated through the use of its fragility curves representing the status of slight damage) may result in the unavailability of the infrastructure, with obvious consequences in terms of possibility of transit of convoys. By way of example, in the case of girder bridges in pre-stressed concrete, in case of occurrence of slight damage to the main structural components of the bridge, as for example in the case of residual differential movements between adjacent spans, such situations may result in twist on the track bound to the same decks, with even greater consequences in case of transit of convoys. In this sense minor structural damage to the main elements of a bridge might have a significantly serious impact to the safety of travelling convoys.

Downstream of the numerical processing the algorithm returns a series of graphical outputs whereby it is possible to have an overall visual picture of the management situation in terms of time schedules for each employee, by Work Section and timing of duration of inspection operations.

Concurrently with the above concerning the organisation of extraordinary visits to bridges following a seismic event, we might also think of identifying a sufficient number of staff resources skilled in the permanent way of lines, for each Work Section Centre involved by a seismic event, to perform a reconnoitring of the permanent way with special bogies ($10 < v < 80 \text{ km/h}$) in order to complete a comprehensive reconnoitring framework even in stretches not directly developing on a bridge/viaduct. The number of permanent way employees should be defined in relation to the specific linear extension and line topology of lines of competence of each Work Section Centre in such a way as to ensure full reconnoitring within a reasonable time and at the most equal to that required for the reconnoitring of works of art.

A series of practical examples will be discussed in the following paragraphs with the goal of comprehensively clarifying the operation and the potential of the proposed procedure.

di competenza di ciascuna Sede Tronco Lavori in maniera tale da garantire la completa ricognizione in tempi ragionevoli ed al massimo pari a quelli necessari per la ricognizione alle opere d'arte.

Nei seguenti paragrafi verranno illustrati una serie di esempi pratici aventi l'obiettivo di chiarire esaustivamente il funzionamento e le potenzialità della procedura proposta.

4. Applicazione della nuova procedura al caso studio di uno stock di opere in gestione ad un'ipotetica Direzione Territoriale Produzione

Nel seguente paragrafo viene illustrato un esempio pratico di applicazione della procedura proposta: viene considerato come caso studio uno stock di ponti rappresentativo delle opere in gestione ad una ipotetica Direzione Territoriale Produzione. Non avendo a disposizione dati di provenienza diretta relativi ai manufatti principali e a quelli minori, si è deciso di creare uno specifico database in cui fossero contenute le informazioni principali relative alla collocazione delle opere e alle principali caratteristiche strutturali richieste per la definizione della vulnerabilità sismica delle strutture su basi empiriche.

La costruzione di database di opere in gestione risulta il primo fondamentale passaggio da intraprendere nell'ambito di analisi di rischio a scala territoriale: i dati raccolti, infatti, previa opportuna integrazione, possono essere riutilizzati per svolgere ulteriori simulazioni volte alla definizione degli effetti indotti da altre tipologie di rischio ambientale (geologico, idraulico, ecc..).

Il lavoro preliminare è pertanto consistito nella creazione di un database dei manufatti principali e minori presenti lungo le linee della ipotizzata DTP, andando successivamente a geolocalizzarli su supporto GIS.

In relazione alla collocazione sulla linea ferroviaria, le opere sono state raggruppate per insiemi corrispondenti alla giurisdizione di 9 ipotetici Tronchi o Lavori, in maniera tale da permettere le successive elaborazioni numeriche.

Non avendo a disposizione dati recenti di terremoti significativi avvenuti nell'area territoriale in cui è situata la rete gestita dalla ipotetica DTP, è stata eseguita una ricerca bibliografica [20, 21] sui terremoti storici avvenuti nella suddetta zona: in tabella 1 sono riportati i principali eventi sismici del passato.

Sulla base di tale ricerca storica si è deciso di procedere alla simulazione di quali potrebbero essere attualmente gli effetti della ricorrenza di un evento sismico di caratteristiche analoghe a quelle del sisma del Basso Bresciano avvenuto il 25 dicembre 1222 e caratterizzato da magnitudo M_w pari a 5.84.

Per questo evento sismico è stata svolta una simulazione con il software *Br.I.N.S.E. v2.0* valutando gli effetti in

4. Implementation of the new procedure to the case study of a stock of works under the management of a hypothetical Territorial Production Directorate

The following paragraph shows a practical example of application of the proposed procedure: a stock of bridges representative of works under the management of a hypothetical Territorial Production Directorate is considered as case study. Lacking the availability of directly sourced data related to the main and minor artefacts, it was decided to create a specific database containing basic information about the location of the works and the main structural characteristics required for the definition of the seismic vulnerability of the structures on empirical bases.

The construction of works databases under management is the first fundamental step to be taken in the context of risk analysis on a territorial scale: data collection, in fact, after appropriate integration, can be reused for further simulations aimed at defining the effects induced by other types of environmental risk (geological, water, etc.).

The preliminary work therefore consisted in creating a database of major and minor artefacts present along the lines of the proposed TPD, later geolocalizing them on GIS support.

In relation to the placement on the railway line, the works have been grouped by sets corresponding to the jurisdiction of 9 hypothetical Sections or Works in such a way as to allow subsequent numeric processing.

Due to the lack of available recent data on significant earthquakes occurred in the territorial area in which the network managed by the hypothetical TPD is located, a bibliographical research [20, 21] was carried out on historic earthquakes in this area: table 1 shows the major seismic events of the past.

Based on that historical research it was decided to proceed with simulations of what might be the effects of the recurrence of a seismic event with similar characteristics to those of the earthquake of the Lower Brescian area on December 25, 1222 and featuring a M_w magnitude of 5.84.

TABELLA 1 – TABLE 1

Terremoti storici avvenuti nell'area oggetto di studio
Historical earthquakes occurred in the study area

Evento Event	Data Date	M_w	σ	Latitudine Latitude	Longitudine Longitude
Media Valle Adige	09/11/1046	6	0.5	45.833	11.067
Veronese	03/01/1117	6.69	0.2	45.309	11.023
Basso Bresciano	25/12/1222	5.84	0.56	45.535	10.621
Monte Baldo	18/09/1882	4.99	0.72	45.71	10.77
Valle d'Illasi	07/06/1891	5.86	0.06	45.564	11.165
Salò	30/10/1901	5.7	0.1	45.582	10.493
Monte Baldo	19/02/1932	5.08	0.44	45.632	10.729

termini di valori di accelerazione di picco al suolo (PGA) in corrispondenza dei ponti e manufatti minori appartenenti allo stock di opere analizzato. L'analisi è stata inizialmente svolta volutamente tenendo conto solo dell'entità dell'azione sismica agente: sono state quindi così individuate le strutture aventi necessità di ispezione molto urgente ($PGA > 0,2g$), urgente ($0,1g < PGA < 0,2g$), intermedia ($0,05g < PGA < 0,1g$) e non necessitanti di ispezione ($PGA < 0,05g$). Questa suddivisione è di natura qualitativa, ma necessaria per stabilire un differente livello di priorità, visto che in questa specifica prima fase si fa riferimento esclusivamente allo scuotimento indotto dall'evento sismico. In fig. 4 viene illustrato l'output fornito dal software *Br.I.N.S.E. v2.0*, in questo caso in termini di valori di accelerazione di picco al suolo (PGA).

Per lo scenario sismico analizzato, basandosi esclusivamente sui valori PGA simulati e sulle fasce d'urgenza

A simulation was carried out with Br.I.N.S.E. v2.0 software for this seismic event assessing the effects in terms of peak ground acceleration (PGA) at bridges and minor artefacts belonging to the stock of works analysed. The analysis was initially undertaken intentionally taking account only of the magnitude of the seismic action: structures needing very urgent inspection were thus identified ($\text{PGA} > 0.2 \text{ g}$), urgent ($0.1 \text{ g} < \text{PGA} < 0.2 \text{ g}$), intermediate ($0.05 \text{ g} < \text{PGA} < 0.1 \text{ g}$) and not requiring inspection ($\text{PGA} < 0.05 \text{ g}$). This distinction is qualitative, but necessary to establish a different priority level, since reference is made exclusively to the earthquake-induced shaking in this specific first phase. Fig. 4 shows the output provided by the Br.I.N.S.E. software v 2.0, in this case in terms of peak ground acceleration values (PGA).

For the analysed seismic scenario, relying exclusively on

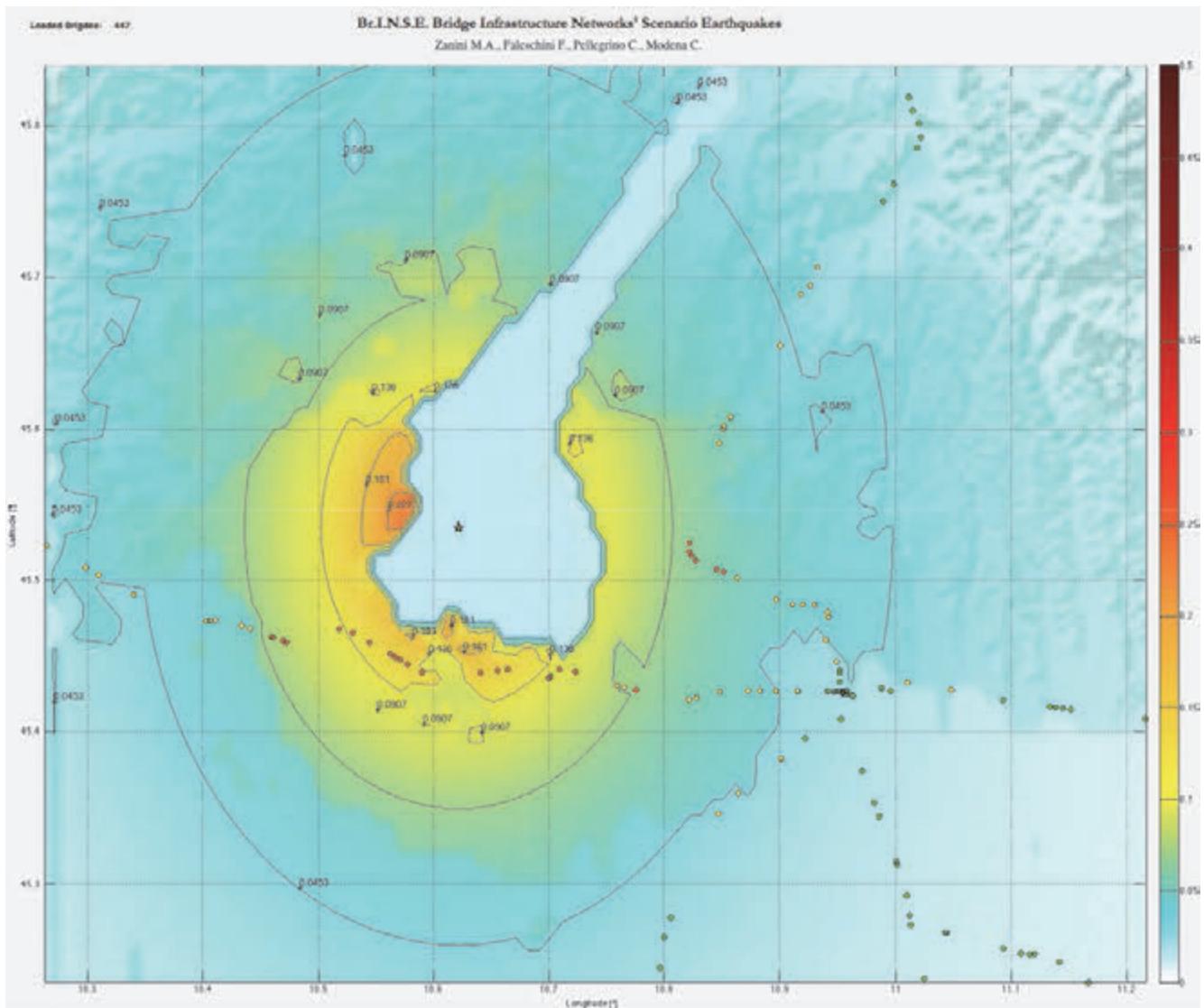


Fig. 4 - Rappresentazione dei valori di PGA indotti da un terremoto analogo a quello del Basso Bresciano 1222 di M_w 5.84.
 Fig. 4 - Representation of the PGA values induced by an earthquake similar to that of the Lower Brescian Area of 1222 of M_w 5.84.

d'ispezione definite in precedenza, si può osservare come a seguito dello specifico evento simulato ci sia la necessità di ispezionare 59 opere (24 urgenti, 33 intermedie) su 300 opere presenti nel database costruito. Nello specifico:

- 18 opere situate sulle tratte gestite dal Tronco Lavori #1;
- 33 opere situate sulle tratte gestite dal Tronco Lavori #2;
- 4 opere situate sulle tratte gestite dal Tronco Lavori #3;
- 2 opere situate sulle tratte gestite dal Tronco Lavori #4;
- 1 opera situata sulle tratte gestite dal Tronco Lavori #5;
- 1 opera situata sulle tratte gestite dal Tronco Lavori #7;

Avendo individuato quindi le opere da ispezionare e le relative Sedi Tronchi Lavori coinvolte, il passaggio successivo consiste nel definire il numero di addetti coinvolti nelle operazioni ispettive per ciascuna Sede Tronco Lavori.

Successivamente, tramite l'applicazione dell'algoritmo di ottimizzazione, considerando un valore di durata dell'ispezione di controllo pari a $t_{isp} = 30\text{min}$, si procede al calcolo dei tempi totali di ispezione per ciascun Tronco Lavori e alla definizione dei rispettivi percorsi addetti.

Nel lavoro descritto si assume implicitamente che la viabilità stradale non abbia risentito del sisma e pertanto sia percorribile in ogni suo arco. Per ciascun utente viene valutato il tempo di percorrenza su rete stradale per il raggiungimento dell'opera più vicina necessitante ispezione (tempo di percorrenza, t_{per}). Una volta completata l'operazione ispettiva (di durata pari a t_{isp}) si procede alla valutazione del successivo t_{per} per la seguente opera da analizzare, fino a esaurimento del processo. È stato infine considerato un intervallo temporale iniziale t_{sq} stimato pari a 20min per tener conto delle tempistiche tecniche per la formazione della squadra di addetti che partirà da ogni sede dei Tronchi Lavori coinvolta.

Il tempo totale di durata delle operazioni di un singolo addetto sarà pertanto dato dalla somma di t_{sq} e dei t_{per} e t_{isp} relativi a tutte le opere che verranno assegnate all'addetto dalla procedura di ottimizzazione proposta, in relazione alla loro collocazione geografica e al numero di addetti coinvolti per ciascun Tronco Lavori. Da evidenziare come in questa simulazione sia stato considerato un valore di t_{isp} costante per tutte le opere: questa assunzione semplificativa potrà essere ulteriormente raffinata definendo degli specifici valori di t_{isp} per ciascuna delle opere oggetto di ispezione, per esempio in relazione al numero di campate di ciascuna di esse. Si riportano nel seguito i risultati ottenuti per lo specifico scenario sismico simulato:

- Tronco Lavori #1: nell'ipotesi di 3 addetti, il tempo totale di ispezione è di 250min, ovvero 4h10min;
- Tronco Lavori #2: nell'ipotesi di 5 addetti, il tempo totale di ispezione è di 330min, ovvero 5h30min;
- Tronco Lavori #3: nell'ipotesi di 2 addetti, il tempo totale di ispezione è di 101min, ovvero 1h41min;
- Tronco Lavori #4: nell'ipotesi di 2 addetti, il tempo totale di ispezione è di 92min, ovvero 1h32min;

the simulated PGA values and emergency inspection groups defined above, we can see how there is a need to inspect 59 works (24 urgent, 33 intermediate) out of 300 works in the built database, following the specific simulated event. Specifically:

- 18 works on routes managed by Work Section #1;
- 33 works on routes managed by Work Section #2;
- 4 works on routes managed by Work Section #3;
- 2 works on routes managed by Work Section #4;
- 1 work on routes managed by Work Section #5;
- 1 work on routes managed by Work Section #7;

Having identified therefore the works to be inspected and the Work Sections Centres involved, the next step is to define the number of employees involved in inspection operations for each Work Section Centre.

Subsequently, through the application of the optimisation algorithm, considering a value of duration of control inspection of $t_{isp} = 30 \text{ min}$, we calculate the total inspection time for each Work Section and define the respective routes involved.

In the work described it is implicitly assumed that the road conditions have not been affected by the earthquake and is therefore accessible throughout the way. The travelling time on the road network to reach the nearest work in need of inspection (travel time, t_{per}) is evaluated for each user. Once the inspection is completed (with a duration of t_{isp}) the assessment of the following t_{per} for the next work to analyse is carried out, until the process is finished. An initial time interval t_{sq} of 20 minutes was finally estimated to take into account technical timing for the formation of the employee team that will depart from each Works Sections centre involved.

The total duration time of a single employee operation will hence be given by the sum of t_{sq} and t_{per} and t_{isp} related to all the works which will be assigned to the worker by the proposed optimisation procedure, in relation to their geographical position and the number of employees involved for each Work Section. It should be noted how a constant t_{isp} value has been considered in this simulation for all works: this simplifying assumption can be refined further by defining specific t_{isp} values for each of the works subjected to inspection, for example in relation to the number of spans of each of them. Below are the results for the specific simulated seismic scenario:

- *Work Section #1: assuming 3 employees, the total inspection time is 250 min., or 4 hrs 10 min.;*
- *Work Section #2: assuming 5 employees, the total inspection time is 330 min., or 5 hrs 30 min.;*
- *Work Section #3: assuming 2 employees, the total inspection time is 101 min., or 1 hr 41 min.;*

SCIENZA E TECNICA

- Tronco Lavori #5: nell'ipotesi di 2 addetti, il tempo totale di ispezione è di 86min, ovvero 1h26min;
- Tronco Lavori #7: nell'ipotesi di 2 addetti, il tempo totale di ispezione è di 77min, ovvero 1h17min.

Nelle figg. 5, 6, 7, 8 e 9 vengono illustrati il cronoprogramma e i percorsi addetti per ciascun Tronco Lavori coinvolto nello scenario sismico simulato. In particolare, in fig. 5 vengono rappresentati i tempi per lo svolgimento delle operazioni ispettive di ciascun addetto, dati dalla somma dei tempi tecnici di esecuzione dell'atto ispettivo ($t_{isp} = 30$ min, rappresentati in grigio, costante per ciascuna delle opere da ispezionare), dei tempi di spostamento lungo la viabilità stradale per raggiungere le varie opere (t_{per} , campiti con colorazioni differenti in relazione all'appartenenza dei vari addetti ai rispettivi Tronchi Lavori coinvolti) e delle tempistiche tecniche per la formazione delle squadre di addetti ($t_{sq} = 20$ min, in nero).

Nelle figg. 6-9 vengono invece rappresentati in maniera schematica, per i vari Tronchi Lavori, con differenti colorazioni per ciascuno degli addetti, gli itinerari ispettivi per il raggiungimento delle varie opere rappresentate su un piano cartesiano. In viola viene schematicamente rappresentata la sede del Tronco Lavori dalla quale partono gli addetti alle ispezioni, dirigendosi verso le opere da ispezionare dando precedenza a quelle caratterizzate da un maggiore grado di urgenza, in base alle classi di urgenza precedentemente definite sulla base del valore di PGA agente. L'itinerario ispettivo seguito da ognuno degli addetti partecipanti alle operazioni ispettive è rappresentato da una linea di colore differente per ciascuno di essi.

- Work Section #4: assuming 2 employees, the total inspection time is 92 min., or 1 hr 32 min.;
- Work Section #5: assuming 2 employees, the total inspection time is 86 min., or 1 hr 26 min.;
- Work Section #7: assuming 2 employees, the total inspection time is 77 min., or 1 hr 17 min..

Figures 5, 6, 7, 8 and 9 show the time schedule and the routes involved for each Work Section in the simulated earthquake scenario. In particular, fig. 5 shows the times for the conduct of inspection operations of each employee, given by the sum of the inspection technical times ($t_{isp} = 30$ min, represented in grey, constant for each of the works to be inspected), the transfer times along the road to reach the various works (t_{per} , shaded with different colours in relation to the belonging of various employees to their respective Work Sections involved) and technical timing for the formation of worker teams ($= t_{sq} 20$ min., in black).

Figures 6-9 schematically represent the inspection routes to reach the various works represented on a Cartesian plane, for different Works Sections, with different colours for each of the workers. Purple schematically represents the Works Section centre from which the inspectors leave, heading towards the works to be inspected giving priority to those with a greater degree of urgency, according to the emergency classes previously defined on the basis of the value of the PGA. The inspection route followed by each of the workers involved in inspection operations is represented by a different colour for each.

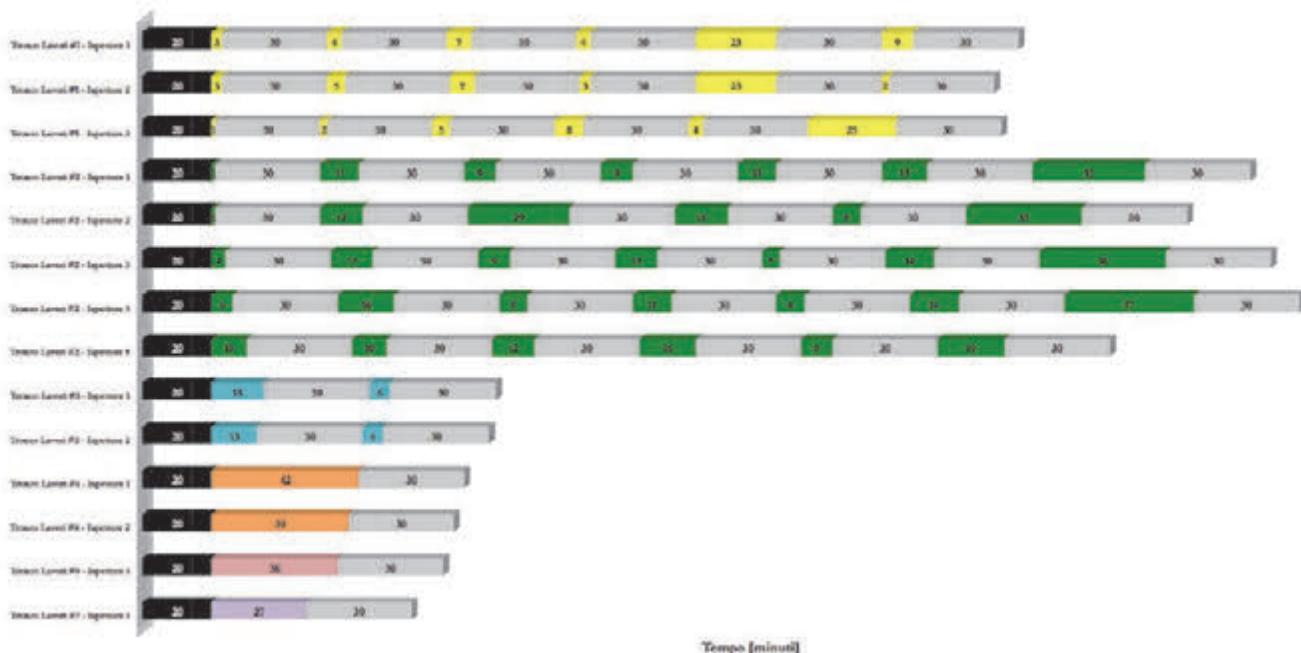


Fig. 5 - Cronoprogramma delle operazioni ispettive per i 14 addetti appartenenti ai Tronchi Lavori coinvolti a seguito dello scenario sismico simulato.

Fig. 5 - Time schedule of inspection operations for 14 employees belonging to the Works Sections involved following the simulated earthquake scenario.

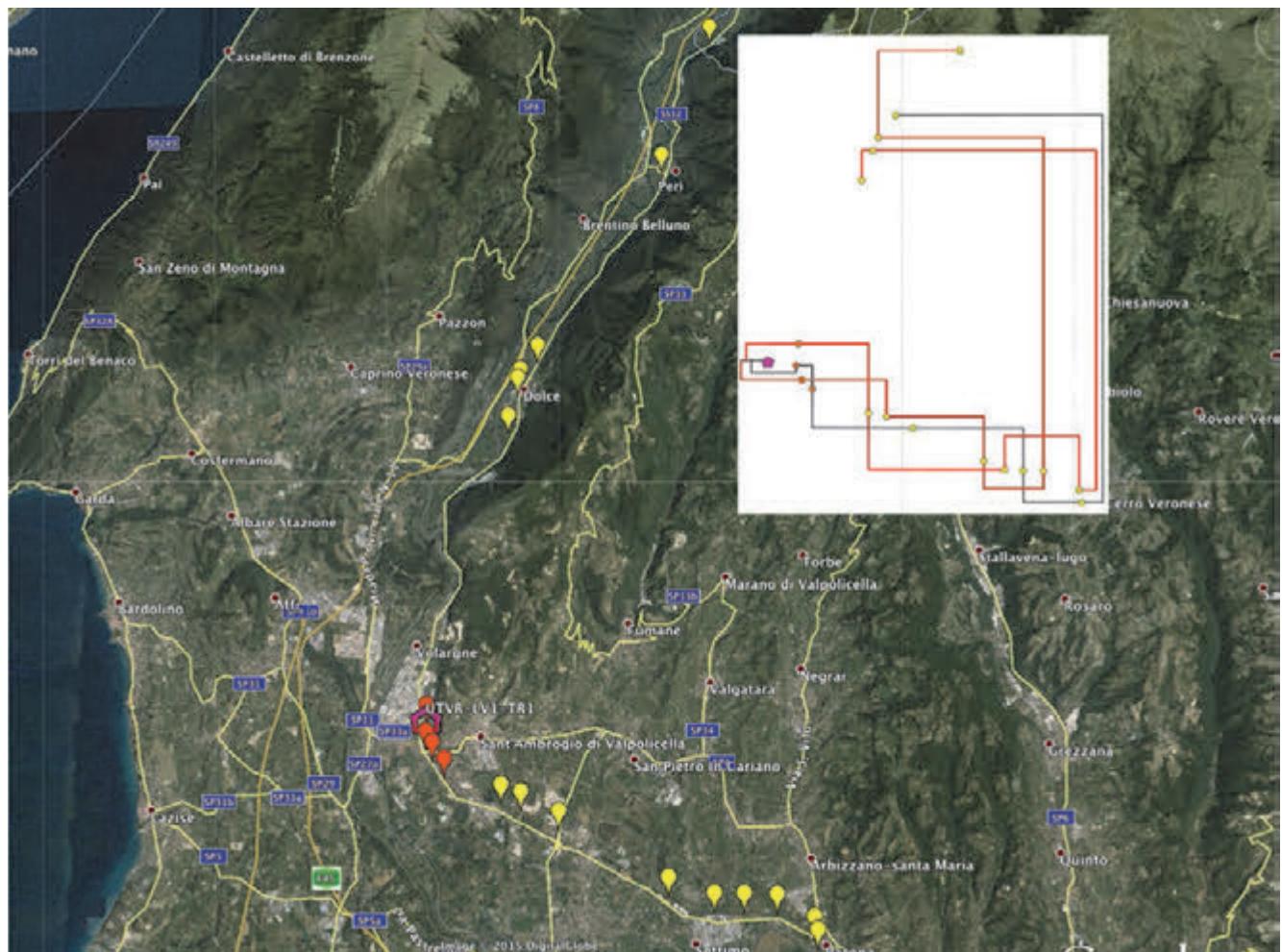


Fig. 6 - Percorso addetti Tronco Lavori #1 per lo scenario sismico simulato.

Fig. 6 - Work Section #1 workers route for the simulated earthquake scenario.

Ogni addetto, terminata l'ispezione a una generica i -esima opera si dirige verso la successiva j -esima struttura che è rappresentata dal manufatto che si trova alla minima distanza di percorrenza dalla i -esima opera.

Nelle figg. 6-9 le rappresentazioni degli itinerari sono chiaramente schematizzate, per permettere al lettore di comprendere la sequenza ispettiva che ogni addetto dovrà percorrere.

Il tempo complessivo per l'esecuzione di tutte le ispezioni risulta quindi uguale al valore massimo tra i valori relativi ai Tronchi Lavori coinvolti, ovvero pari a 5h30min: complessivamente dopo tale intervallo di tempo, stimato mediante l'utilizzo dell'algoritmo proposto, il gestore della linea ferroviaria può considerare completamente conclusa la fase di controllo straordinario post-evento alle opere, e dopo aver completato l'ispezione all'armamento, permettere la completa ripresa della circolazione dei convogli ferroviari lungo tutte le tratte coinvolte dall'evento sismico. Nell'ottica di ottimizzare ulteriormente la gestione della riapertura delle linee coinvol-

Each worker, after inspection of an i -eth generic work heads towards the j -eth next structure which is the artefact that is located at the shortest travel distance from the i -eth work.

Figures 6-9 clearly outline the representations of the routes, to allow the reader to understand the inspection sequence that each worker should run.

The total time to perform all inspections is therefore equal to the maximum value between the values related to the Work Sections involved, which is equal to 5 hrs 30 min.: altogether after this time interval, estimated using the proposed algorithm, the manager of the railway line can consider the extraordinary post-event works control phase fully completed, and after completing the inspection of the permanent way, allow the complete resumption of circulation of trains along all the routes involved by the seismic event. In order to further optimise the management of the reopening of lines involved, the timing of each jurisdictional unit inspection may be measured in respect of the routes

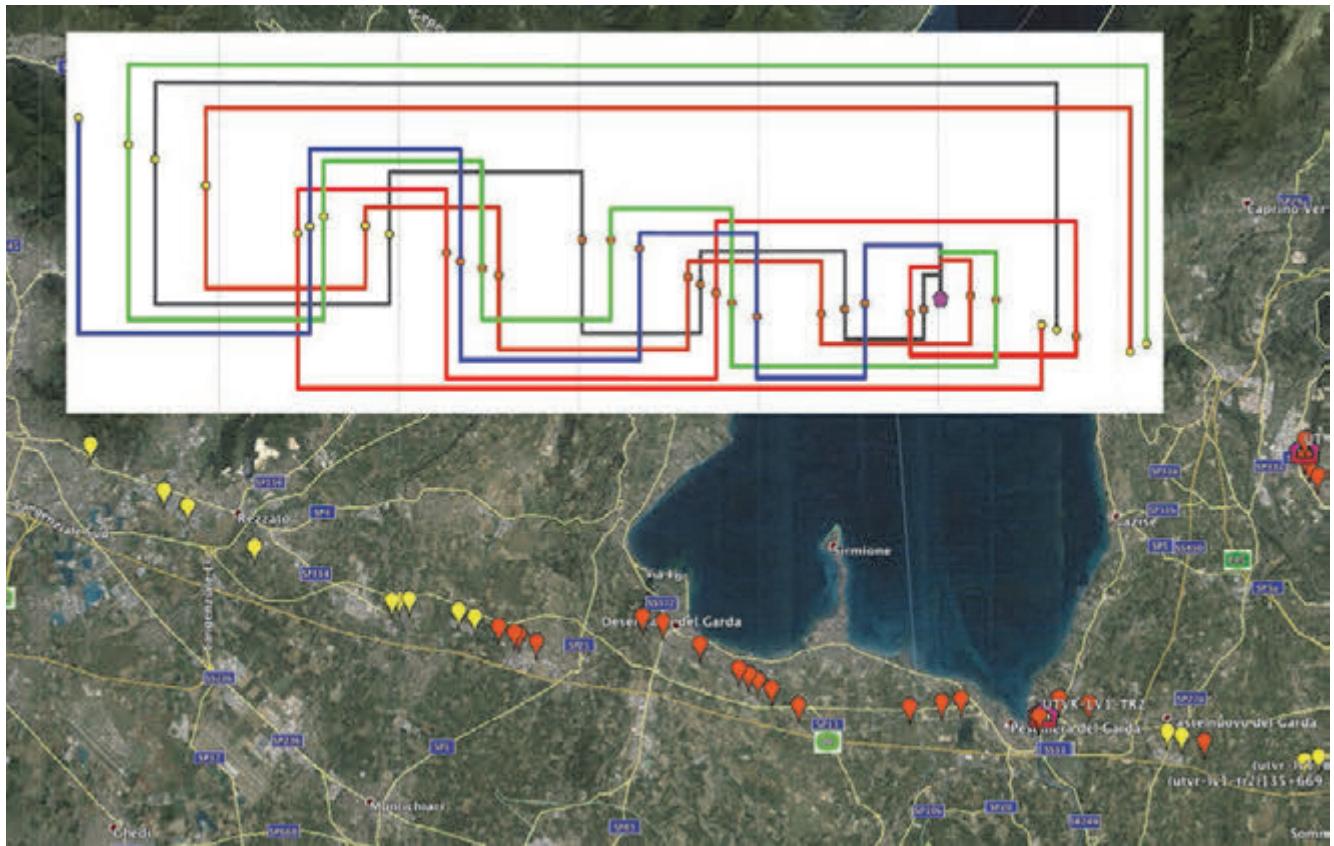


Fig. 7 - Percorso addetti Tronco Lavori #2 per lo scenario sismico simulato.
Fig. 7 - Work Section #2 workers route for the simulated earthquake scenario.

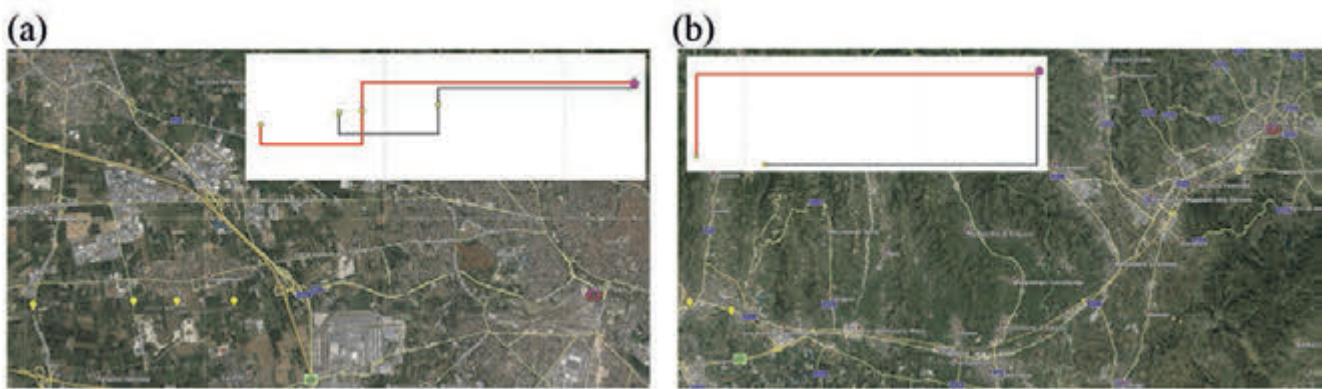


Fig. 8 - Percorso addetti Tronco Lavori #3 (a) e Tronco Lavori #4 (b) per lo scenario sismico simulato.
Fig. 8 - Work Section #3 (a) and Work Section #4 (b) workers route for the simulated earthquake scenario.

te, possono essere valutate le tempistiche ispettive di ciascuna unità giurisdizionale nei confronti delle relative tratte di competenza, in maniera tale da permettere una riapertura graduale dei vari tratti.

Nel caso specifico dello scenario sismico simulato, la sequenza della riapertura dei tronchi di linea coinvolti nell'evento sismico simulato è la seguente: dopo 77min la riapertura della tratta di competenza del Tronco Lavori

of competence, in such a way as to allow a gradual reopening of the various stretches.

In the specific case of the simulated earthquake scenario, the sequence of the reopening of the line sections involved in the simulated seismic event is as follows: after 77 min the reopening of the stretch of competence of Work Section #7, followed by WS #5 (86 min) and WS #4 (92 min). Then, at 101 min Works Section # 3 would open, at

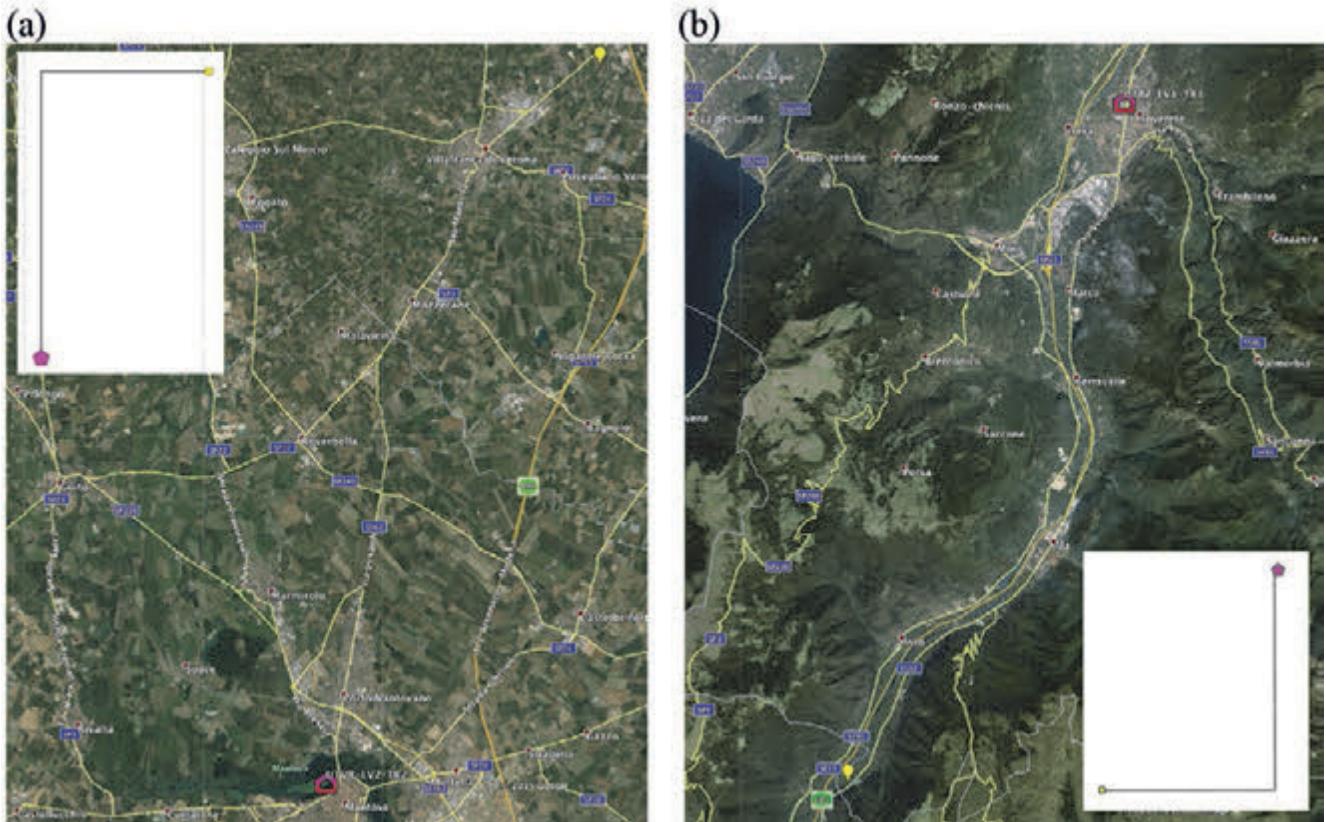


Fig. 9 - Percorso addetti Tronco Lavori #5 (a) e Tronco Lavori #7 (b) per lo scenario sismico simulato.

Fig. 9 - Work Section #5 (a) and Work Section #7 (b) workers route for the simulated earthquake scenario.

#7, seguita dai TL #5 (86 min) e dal TL #4 (92 min). Nel seguito, a 101 min riaprirebbe la tratta di pertinenza del Tronco Lavori #3, a 250min le linee gestite dal TL #1 ed infine a 330min dalla rilevazione dell'evento sismico potrebbero essere completamente riaperte le tratte gestite dal Tronco Lavori #2.

In fig. 10 viene riportata una rappresentazione schematica delle differenti durate delle ispezioni straordinarie alle opere per i vari Tronchi Lavori coinvolti.

L'analisi svolta in precedenza non tiene però conto del fatto che, basandosi esclusivamente su valori relativi all'accelerazione di picco al suolo in corrispondenza delle varie strutture e trascurando gli aspetti prettamente strutturali relativi alla definizione della vulnerabilità sismica di ciascuna di esse, si corre il rischio di non ottimizzare realmente l'utilizzo del personale addetto alle ispezioni di controllo. Tale assunto può essere banalmente supportato da un semplice esempio: nell'ipotesi di avere un'opera minore situata in prossimità della zona epicentrale, essa sarà soggetta a valori di scuotimento elevati, pertanto ragionando esclusivamente in termini di PGA (come fatto sino ora), tale struttura dovrà essere ispezionata nel post-evento.

Essendo però una struttura minore, caratterizzata da livelli di vulnerabilità sismica molto bassi, sebbene l'azione sismica a cui è soggetta sia significativa, avremo un'alta probabilità di non rilevare alcun danneggiamento a se-

250 min the lines handled by WS #1 and finally at 330 min from the detection of the seismic event the stretches managed by Work Sections #2 could be completely re-opened.

Fig. 10 shows a schematic representation of the different durations of extraordinary inspections to works for the various Work Sections involved.

The analysis carried out above does not however take into account the fact that, relying exclusively on the peak ground acceleration values at various facilities and disregarding purely structural aspects on the definition of the seismic vulnerability of each of them, we run the risk of not really optimising the use of inspection staff. This assumption can be trivially supported by a simple example: if we assume having a minor work located near the epicentre area, it will be subjected to high shaking values, hence thinking solely in terms of PGA (as done so far), this structure must be inspected in the post-event.

But being it a smaller structure, characterised by very low seismic vulnerability levels, although the seismic action which it is subject to is significant, we will have a high probability of not detecting any damage as a result of the inspection: hence that inspection could have been avoided by taking into account the seismic vulnerability of the same

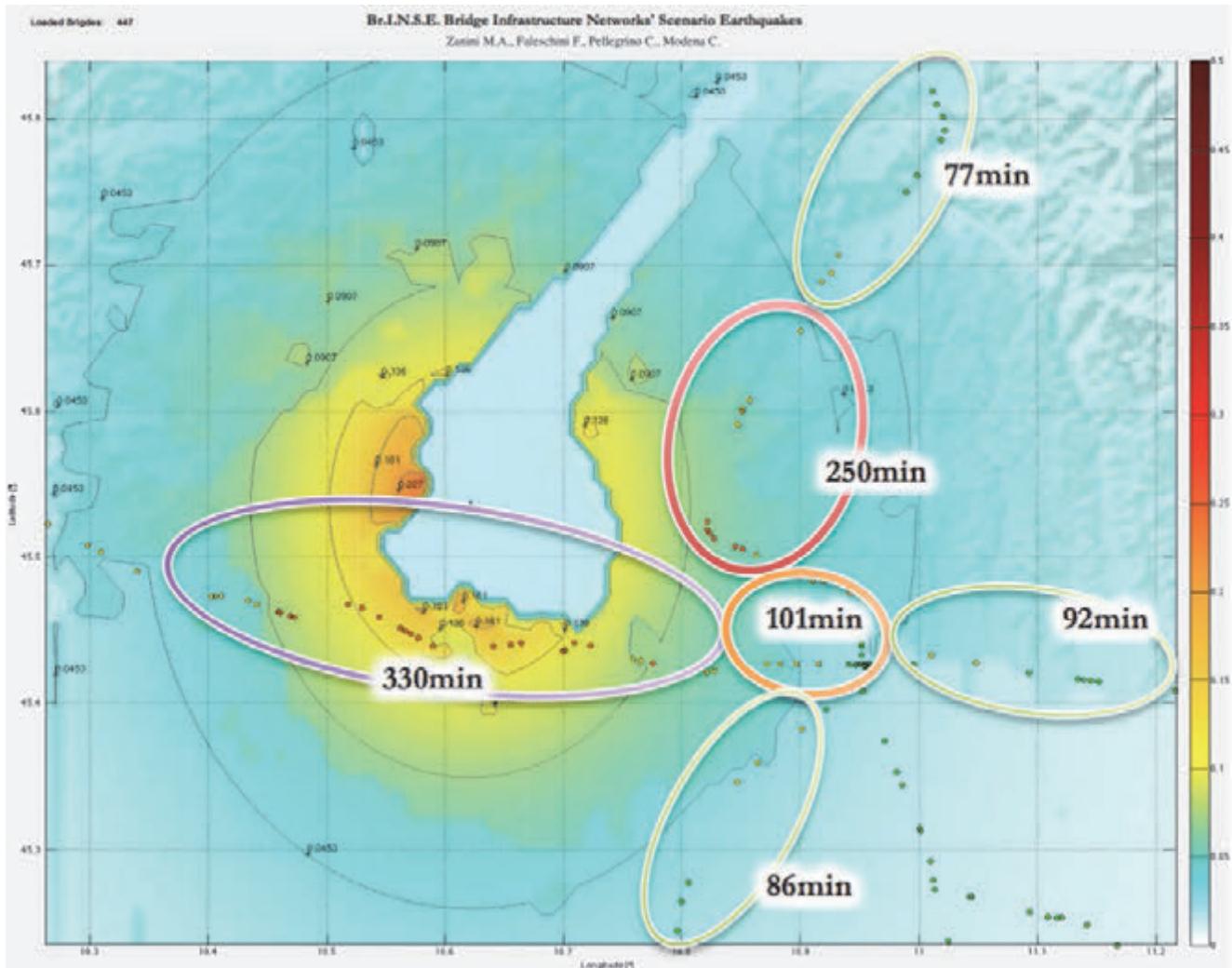


Fig. 10 - Durata delle operazioni ispettive per i vari Tronchi Lavori coinvolti nello scenario sismico simulato.
Fig. 10 - Duration of inspection operations for the different Work Sections involved in the simulated seismic scenario.

guito dell'ispezione di controllo: pertanto tale visita ispettiva si sarebbe potuta evitare tenendo in conto fin dall'inizio anche della vulnerabilità sismica della stessa struttura, e non solo basandosi sui valori di PGA.

Nel successivo esempio, si vuole evidenziare proprio tale questione: la procedura proposta viene riapplicata al medesimo scenario sismico (terremoto del Basso Bresciano, $M_w = 5.84$), osservando come, tenendo conto non tanto dei valori di PGA, ma quanto delle probabilità di manifestazione di uno specifico stato di danneggiamento

In fig. 11 viene riportato l'output fornito dal software Br.I.N.S.E. v2.0, in cui sono evidenziati i ponti necessitanti di ispezione di controllo post-evento, sulla base dei valori di output espressi in termini di probabilità di superamento di uno stato di danneggiamento lieve. La probabilità di osservare un livello di danneggiamento almeno pari a quello lieve si può stimare attraverso l'uso delle curve di fragilità, in particolar modo riferendosi alla curva di fragi-

structure from the very beginning, and not just relying on the PGA values.

In the following example, we want to highlight exactly that question: the proposed procedure is reapplied to the same seismic scenario (earthquake in the Lower Brescian area, $M_w = 5.84$), observing how, taking account not only the PGA values, but the likelihood of manifestation of a specific condition of damage.

Fig. 11 shows the output provided by the Br.I.N.S.E. v2.0 software, in which the bridges requiring post-event inspection are highlighted, based on the output values expressed in terms of probability of exceeding minor damage condition. The probability of observing a damage level at least equal to the minor one can be estimated through the use of fragility curves, especially referring to the fragility curve representing the minor damage condition. Fragility curves represent the most commonly diffused method to es-

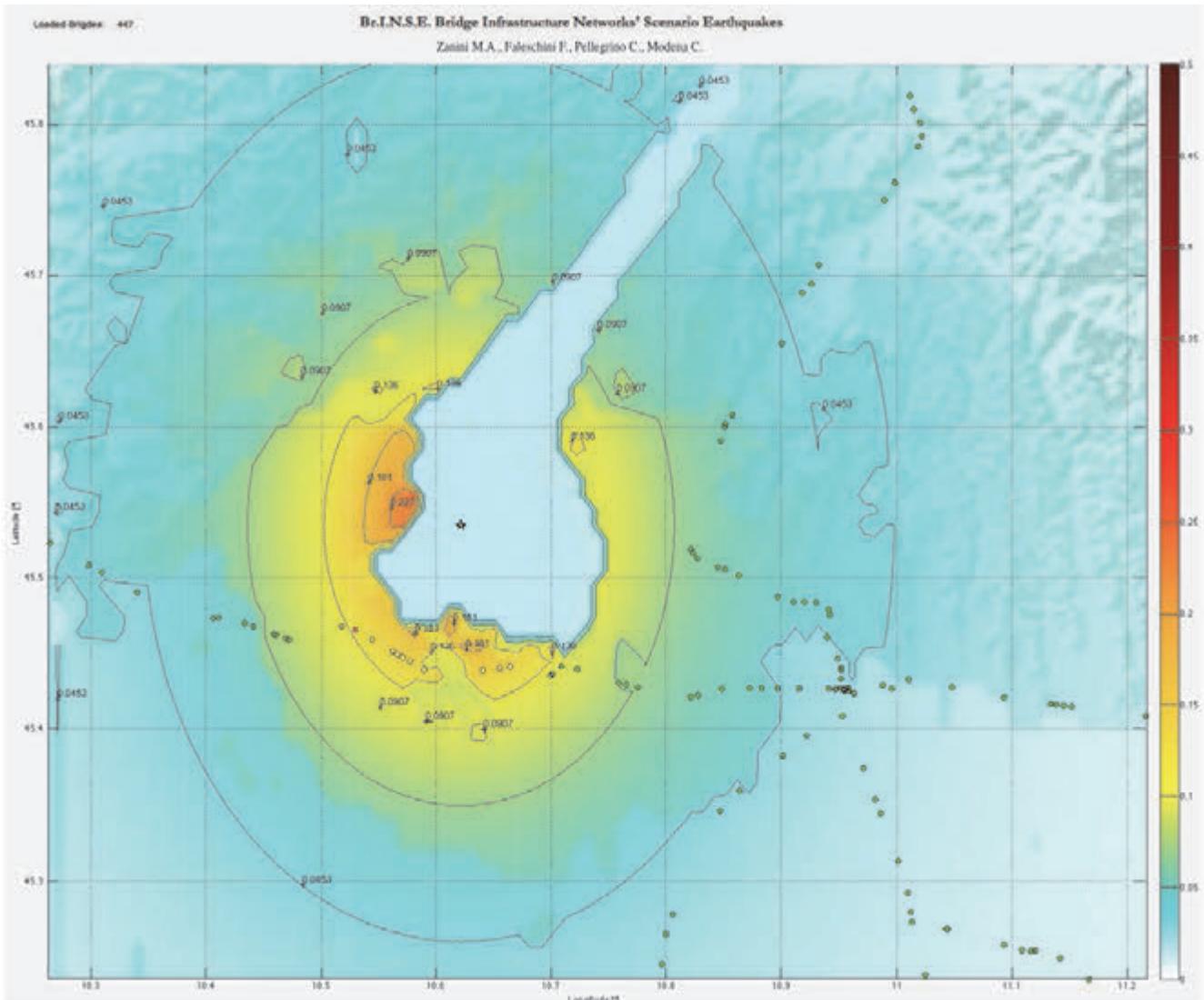


Fig. 11 - Rappresentazione dei valori probabilità di danneggiamento lieve indotti alle opere analizzate da un terremoto analogo a quello del Basso Bresciano 1222 di M_w 5.84.

Fig. 11 - Representation of minor damage probability values to works analysed caused by an earthquake similar to that of the Lower Brescian Area in 1222 of M_w 5.84.

lità rappresentativa dello stato di danno lieve. Le curve di fragilità rappresentano la modalità più comunemente diffusa per stimare la vulnerabilità sismica di una struttura. Tali set di curve rappresentano la relazione tra la probabilità (compreso tra 0% e 100%) di osservare una tipologia di danneggiamento (lieve – moderato – esteso – collasso, in accordo a quanto definito in [12]) in funzione del valore di PGA registrato nel sito in cui è ubicata una struttura. Nello specifico, per i ponti, il livello di danneggiamento lieve si identifica con la manifestazione di fessurazioni di modesta entità, fenomeni di spalling nelle zone degli elementi strutturali soggetti a sollecitazioni taglienti, spostamenti residui tra campate contigue, e tra campate-spalle.

Per il calcolo delle curve di fragilità sono necessari i valori di media di deviazione standard direttamente forniti in

timate the seismic vulnerability of a structure. These sets of curves represent the relationship between the probability (ranging between 0% and 100%) of observing a type of damage (mild - moderate - extended – collapse, as defined in [12]) depending on the value of the PGA recorded at the site where a structure is located. Specifically, for bridges, the minor damage level is identified with the manifestation of small cracks, spalling phenomena in the areas of structural elements subjected to cutting stresses, residual displacements between contiguous spans, and between spans-abutments.

For the calculation of fragility curves the average standard deviation values provided directly in [12] are necessary with respect to the specific structural analysis type be-

[12] in relazione alla specifica tipologia strutturale oggetto di analisi: tali parametri sono stati elaborati e proposti in letteratura [19] tramite l'osservazione e l'elaborazione statistica dei danneggiamenti osservati a ponti e opere minori nel corso dei passati eventi sismici occorsi in Europa.

In tal senso le curve di fragilità rappresentano la distribuzione lognormale cumulata del valor medio di probabilità di osservare una specifica tipologia di danneggiamento strutturale al variare della PGA (fig. 12): tale previsione è caratterizzata per l'appunto da una variabilità che può essere direttamente espressa dal parametro deviazione standard fornito in [12].

Basandosi quindi sui valori medi di probabilità di riscontrare o superare uno stato di danno lieve, si può osservare la necessità di ispezionare 11 opere (a fronte delle precedenti 59), di cui 1 urgente e 10 intermedie. Nello specifico, tutte le opere coinvolte sono situate sulla tratta in gestione al Tronco Lavori #2.

Per permettere il confronto con i risultati ottenuti in precedenza considerando esclusivamente i valori di PGA, il tempo di ispezione t_{isp} è stato considerato ancora pari a 30min per ciascun manufatto. Analogamente, per quanto riguarda la definizione del numero di addetti alle operazioni ispettive, sono state considerate le stesse unità di personale, e successivamente mediante l'applicazione dell'algoritmo di calcolo sono stati calcolati i tempi di durata complessivi delle operazioni. Nello specifico, per il Tronco Lavori #2, nell'ipotesi di 5 addetti, il tempo totale di ispezione è di 112min, ovvero 1h52min.

Nelle figg. 13 e 14 vengono riportati il cronoprogramma e i percorsi addetti alle ispezioni. Come nella precedente fig. 5, in grigio vengono rappresentati i tempi di durata

ing studied: these parameters were developed and proposed in literature [19] through the observation and statistical processing of observed damage to bridges and minor works in the course of past seismic events occurring in Europe.

In this sense the fragility curves represent the cumulative lognormal distribution of the average value of probability of observing a specific type of structural damage as the PGA varies (fig. 12): this forecast is characterised precisely by a variability that can be directly expressed by the standard deviation parameter provided in [12].

Based on the mean values of probability of encountering or overcoming a minor damage condition, we can observe the need to inspect 11 works (in the face of the previous 59), of which 1 urgent and 10 intermediate. Specifically, all the works involved are located on the rail-section managed under Works Section #2.

To allow comparison with results obtained previously considering only PGA values, the t_{isp} inspection time was considered equal to 30 min for each artefact. Similarly, as regards the definition of the number of employees in inspection operations, the same staff units were considered, and subsequently the overall duration times of operations were calculated through the implementation of the calculation algorithm. Specifically, for Work Section #2, assuming 5 employees, the total inspection time is 112 min., or 1 hr: 52 min.

Figures 13 and 14 show the time schedule and the routes involved in inspections. As in figure 5 above, the run times of inspections are represented in grey (t_{isp}), training times of the teams are in black (t_{sq}) while travel times are green (t_{per}).

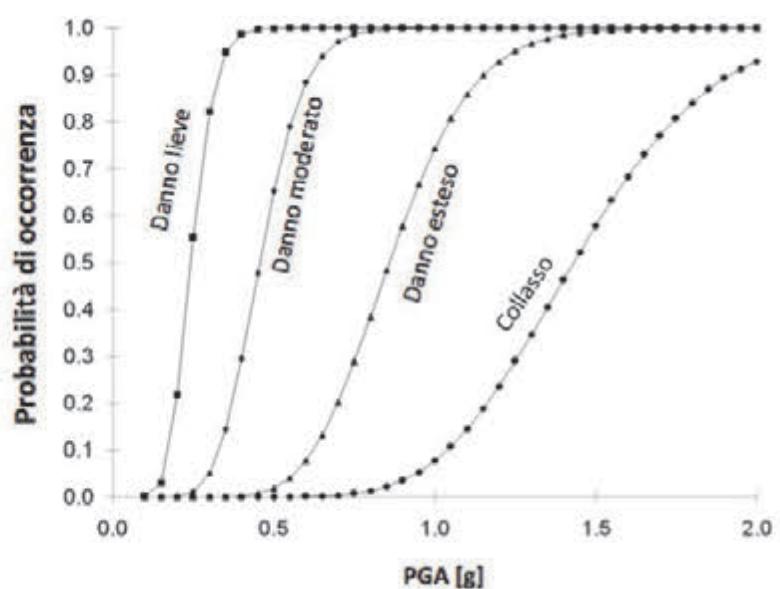
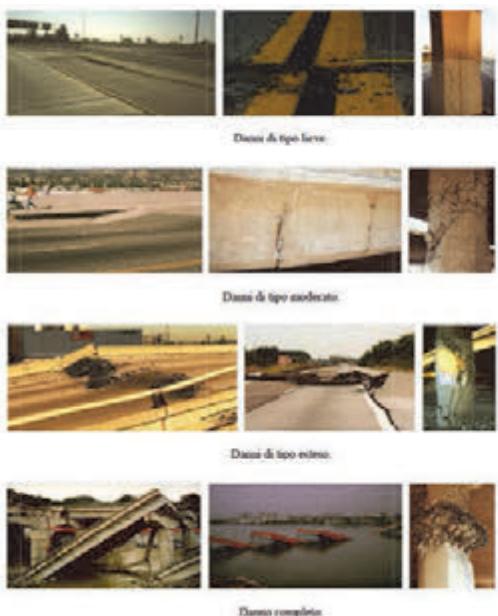


Fig. 12 - Rappresentazione di curve di fragilità per la valutazione della vulnerabilità sismica di ponti e opere d'arte.

Fig. 12 - Representation of fragility curves for seismic vulnerability assessment of bridges and works of art.

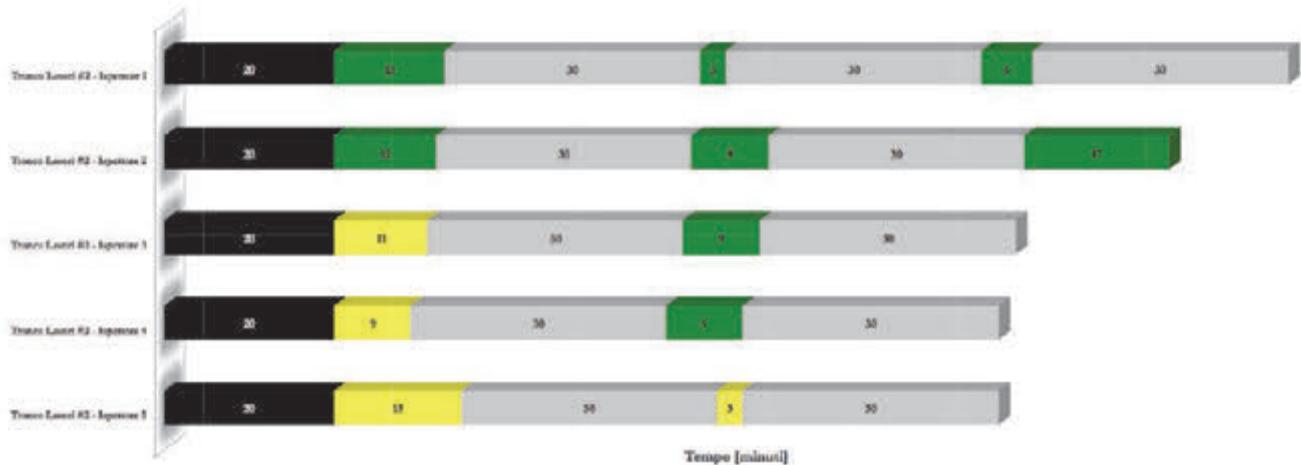


Fig. 13 - Cronoprogramma delle operazioni ispettive per i 5 addetti appartenenti al Tronco Lavori #2, coinvolto nello scenario sismico simulato.

Fig. 13 - Time schedule of inspection operations for 5 employees belonging to Works Section #2 involved in the simulated earthquake scenario.

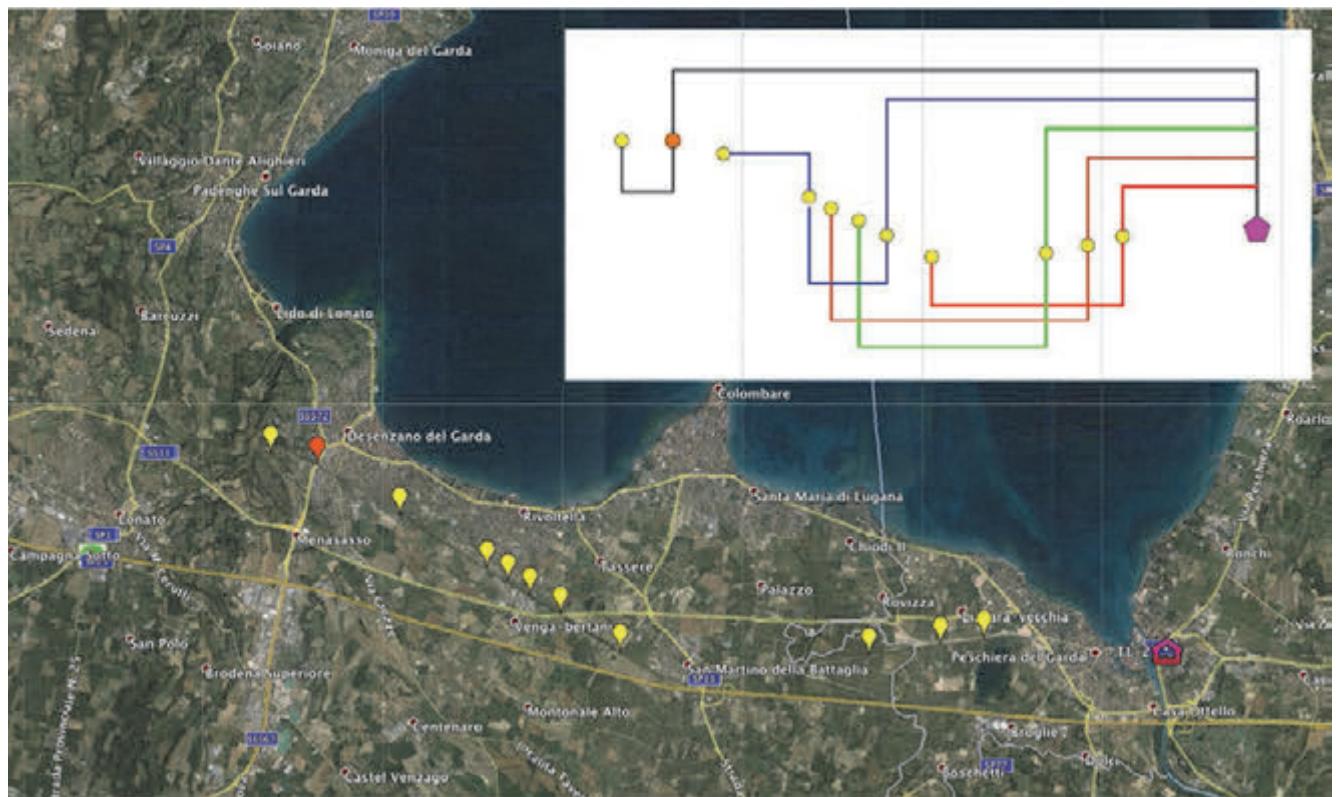


Fig. 14 - Percorso addetti Tronco Lavori #2 per lo scenario sismico simulato.

Fig. 14 - Work Section #2 workers route for the simulated earthquake scenario.

degli atti ispettivi (t_{isp}), in nero i tempi di formazione delle squadre (t_{sq}) mentre in verde i tempi di percorrenza (t_{per}).

Dal confronto dei risultati ottenuti con i precedenti, possiamo osservare come a parità di numero di addetti per ciascuna Sede Tronco Lavori, si raggiunga un eviden-

The comparison of the results obtained with the previous ones, shows how an obvious improvement of the planning of inspection operations is achieved (figures 10 and 15) with the same number of workers for each Works Section Centre, reducing the total time duration of the same

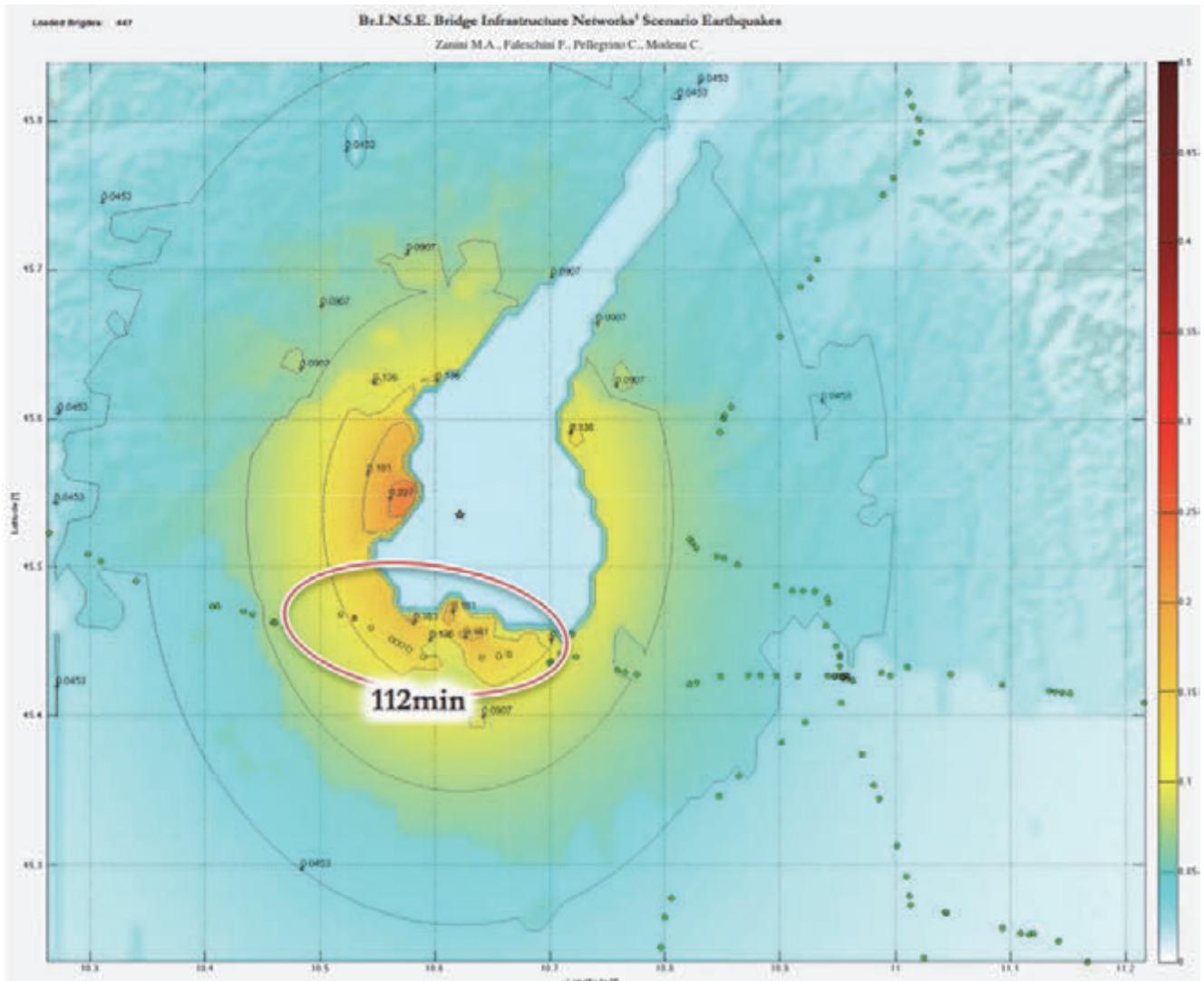


Fig. 15 - Durata delle operazioni ispettive per il Tronco Lavori #2 coinvolto nello scenario sismico simulato.
Fig. 15 - Duration of inspection operations for Works Section #2 involved in the simulated seismic scenario.

te miglioramento della pianificazione delle operazioni ispettive (figg. 10 e 15), riducendo il tempo complessivo di durata delle stesse di ben 218min, da 330min a 112min, ovvero in termini percentuali del 66%.

Come illustrato in fig. 15, dopo 112 min può essere ri-stabilita la circolazione ferroviaria sulla tratta di pertinenza del Tronco Lavori #2.

5. Conclusioni

Dall'analisi critica dei risultati ottenuti possiamo evidenziare come la nuova procedura proposta dagli autori consenta un'ottimizzazione degli aspetti gestionali e di controllo delle opere d'arte nella fase immediatamente successiva all'occorrenza di un evento sismico di entità rilevante. La procedura permette di ridurre i tempi di chiusura delle linee ricadenti nel cratere sismico e razionalizzar-

by a good 218 min, from 330 min to 112 min, or in percentage terms by 66%.

Fig. 15 shows how after 112 min. the train circulation on the route of competence of Works Section #2 can be restored.

5. Conclusions

From the critical review of the results obtained we can highlight how the new procedure proposed by the authors allows an optimisation of the managerial and control aspects of works of art in the phase immediately following the occurrence of a seismic event of significant extent. The procedure allows reducing the closing time of lines falling in the seismic crater and rationalising resources in terms of personnel and means used in the inspection operations.

zare le risorse in termini di personale e mezzi impiegati nelle operazioni ispettive. Questi risultati possono essere raggiunti intrecciando i dati di output ottenuti da mappe di scuotimento del suolo con la vulnerabilità intrinseca delle opere coinvolte nell'evento sismico (*Br.I.N.S.E. v2.0*).

In questo lavoro si propone, un caso studio di gestione dell'emergenza sismica, in una ipotetica Direzione Territoriale Produzione. Operativamente si è provveduto alla preliminare validazione delle stime di scuotimento fornite dal software *Br.I.N.S.E. v2.0* con i dati sperimentali misurati dalle stazioni accelerometriche RAN per alcuni eventi sismici recenti. Nel seguito è stato identificato uno scenario sismico di intensità e localizzazione analoga ad uno dei maggiori eventi sismici storici avvenuti in passato nel territorio oggetto di studio.

Inizialmente è stata applicata la nuova procedura proposta, basata su un algoritmo specifico di calcolo, tenendo conto però esclusivamente dell'attenuazione dei valori di accelerazione al suolo di picco (PGA) previsti in corrispondenza dei ponti: in questo caso la nuova procedura fornisce una stima della durata complessiva di tutte le operazioni ispettive ben precisa, pari a 5h30min, in relazione al numero di addetti disponibili nelle Sedi Tronchi Lavori coinvolte dall'evento sismico, definendo per ciascuno di essi l'itinerario ottimale da seguire per portare a compimento nel minor tempo possibile la totalità delle visite ispettive previste.

Successivamente, la nuova procedura è stata riapplicata in questo caso tenendo conto, come correttamente si dovrebbe fare, non solo dei valori di scuotimento del suolo, ma anche delle caratteristiche di ciascuna struttura in termini di propensione al danneggiamento strutturale a seguito di un evento sismico: in questo caso la nuova procedura permette di ottimizzare ulteriormente la pianificazione delle visite ispettive, evitando ispezioni inutili e mirando a minimizzare i tempi di chiusura della linea e le relative perdite economiche prodotte.

La durata complessiva di tutte le operazioni ispettive si riduce quindi ulteriormente a 1h52min, a parità di addetti disponibili tra le varie Sedi Tronchi Lavori coinvolte, che in quest'ultimo caso risulta essere soltanto 1, a fronte delle precedenti 6.

Un ulteriore affinamento dell'algoritmo di ottimizzazione potrebbe tener conto sia dell'importanza della linea sia della distribuzione degli interventi per il ripristino di una tratta funzionale per la circolazione treni.

L'applicazione dalla nuova procedura proposta dagli autori tramite il software *Br.I.N.S.E. v2.0*, non più in termini di pericolosità sismica, ma di valori di probabilità di superamento di uno stato di danneggiamento delle strutture (vulnerabilità), rappresenta quindi una metodologia razionale di gestione del processo di ispezione e di controllo delle opere d'arte ferroviarie a seguito di un evento sismico; tale applicazione può ulteriormente essere implementata con una priorità di interventi in relazione all'importanza delle linee coinvolte e di tratte funzionali alla ripresa della circolazione treni.

These results can be achieved by combining output data obtained from ground shaking maps with the inherent vulnerability of the works involved in the seismic event (Br.I.N.S.E. v2.0).

This work proposes a case study of seismic emergency management, in a hypothetical Territorial Production Directorate. Operationally, a preliminary validation of shaking estimations provided by the Br.I.N.S.E. v2.0 software was performed with the experimental data measured by the NAN accelerometer stations for some recent seismic events. Subsequently a seismic scenario was identified characterized by intensity and localisation similar to one of the largest historical seismic events occurred in the past in the area under study.

The new proposed procedure was initially applied, based on a specific calculation algorithm, however taking into account, only the attenuation of peak ground acceleration values (PGA) provided at bridges: in this case the new procedure provides a very precise estimate of the total duration of all inspection operations, equal to 5 hrs 30 min., depending on the number of workers available in the Works Sections Centres impacted by the seismic event, defining for each of them the optimal route to follow to carry out the totality of planned inspections in the shortest possible time.

Later, the new procedure was reapplied in this case taking into account, as should be done properly, not only the ground shaking values, but also the characteristics of each structure in terms of structural damage tolerance following a seismic event: in this case the new procedure allows to further optimise the planning of inspections, avoiding unnecessary inspections and aiming at minimising the closing times of the line and related financial losses produced.

The total duration of all inspection operations is therefore reduced to 1 hr 52 min., with the same employees available among the various Works Sections Centres involved, which in the latter case is only 1, compared with the previous 6.

A further refinement of the optimisation algorithm could take into account both the importance of the line and the distribution of operations for the restoration of a functional stretch for train circulation.

The application of the new procedure proposed by the authors using the Br.I.N.S.E. v 2.0 software, no longer in terms of seismic hazard, but of probability values of exceeding the damage status of facilities (vulnerability) represents a rational methodology for managing the inspection and control process of railway works following a seismic event; this application can be further implemented with priority in operations in relation to the importance of the lines involved and of the sections functional to the restoration of train circulation.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] PELLEGRINO C., ZANINI M.A., ZAMPIERI P., MODENA C. (2014), "Contribution of in-situ investigations for assessing seismic vulnerability of existing bridges", *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(9): 1147-1162.
- [2] Morbin R., Zanini M.A., Pellegrino C., Zhang H., Modena C. (2015), "A probabilistic strategy for seismic assessment and FRP retrofitting of existing bridges", *Bulletin of Earthquake Engineering*, DOI 10.1007/s10518-015-9725-2.
- [3] Disposizione 60 del 2 set 2005, Servizi di vigilanza linea armamento e sede, codifica RFI: RFI TCAR ST AR 01 002 A.
- [4] Istruzione "44C": RFI DTC SICS PO IFS 001 A, Visite di controllo ai ponti, alle gallerie e alle altre opere d'arte dell'infrastruttura ferroviaria.
- [5] CORNELL C.A. (1968), "Engineering seismic risk analysis", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58, 1583-1606.
- [6] WGCEP (Working Group on California Earthquake Probabilities) (1995), "Seismic hazards in southern California: probable earthquakes, 1994 to 2024", *Bullettin of the Seismological Society of America*, 85, 379-439.
- [7] CHOI E. (2002), "Seismic analysis and retrofit of mid-America bridges", Georgia Institute of Technology.
- [8] NIELSON B.G., DES ROCHES R. (2007), "Seismic fragility methodology for highway bridges using a component level approach", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36(6):823-839.
- [9] ALIPOUR A., SHAFEI B., SHINOZUKA M. (2011), "Performance evaluation of deteriorating highway bridges located in high seismic areas", *Journal of Bridge Engineering*, 16:597-611.
- [10] ZANINI M.A., PELLEGRINO C., MORBIN R., MODENA C. (2013), "Seismic vulnerability of bridges in transport networks subjected to environmental deterioration", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(2):561-579.
- [11] GUO A., YUAN W., LAN C., GUAN X., LI H. (2015), "Time-dependent seismic demand and fragility of deteriorating bridges for their residual service life", *Bulletin of Earthquake Engineering*, DOI: 10.1007/s10518-014-9722-x.
- [12] Risk-UE (2004), "An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European Town", Risk-UE 2004, EVK4, CT 2000-00014.
- [13] DUTTA A., MANDER J.B. (1998), "Seismic fragility analysis of highway bridges", INCEDE-MCEER Center-to-Center Workshop on Earthquake Engineering Frontiers in Transportation Systems, Tokyo, Japan, June.
- [14] COSENZA E., MANFREDI G. (2000a), "Damage indices and damage measures", *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2, 1. 50-59.
- [15] COSENZA E., MANFREDI G. (2000b), "Indici e misure di danno nella progettazione sismica".
- [16] SHINOZUKA M., FENG M.Q., KIM H.K., KIM S.H. (2000), "Non linear static procedure for fragility curves development", *Journal of Engineering Mechanics-Asce*; 126, 12. 1287-1295.
- [17] CHOI E.S., DESROCHES R., NIELSON B. (2004), "Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones", *Engineering Structures*; 26, 2. 187-199.
- [18] ZANINI M.A., FALESCHINI F., PELLEGRINO C., MODENA C. (2014), "Br.I.N.S.E.: la valutazione della vulnerabilità sismica dei ponti", *Strade & Autotrade* Vol. 107, pp. 72-75.
- [19] MOIROUX P., LE BRUN B. (2006), "RISK-UE project: an advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different european towns", *Assessing and Managing Earthquake Risk*, 2006.
- [20] VIGANÒ A., BRESSAN G., RANALLI G., MARTIN S. (2008), "Focal mechanism inversion in the Giudicarie-Lessini seismotectonic region (Southern Alps, Italy): insights on tectonic stress and strain", *Tectonophysics*, 460: 106-115.
- [21] LIVIO F.A., BERLUSCONI A., MICHETTI A.M., SILEO G., ZERBONI A., TROMBINO L., CREMASCHI M., MUELLER K., VITTORI E., CARCANO C., ROGLEDI S. (2009), "Active fault-folding in the epicentral area of the December 25, 1222 (Io = IX MCS) Brescia earthquake (Northern Italy): seismotectonic implications", *Tectonophysics*, 476: 320-335.

Sommaire

LA GESTION DES VÉRIFICATIONS POST SÉISME POUR LES INFRASTRUCTURES FERROVIAIRES

En cas de séisme, les ponts sont considérés comme étant les éléments les plus vulnérables d'un réseau ferroviaire, aussi en considération que la plupart d'entre eux ont été conçus alors que les normes courantes anti sismiques n'étaient pas encore en vigueur. L'endommagement de telles structures peut provoquer des remarquables problèmes de circulation ferroviaire, et pour cela cet étude affronte la thématique de l'optimisation des procédures d'inspection après l'événement séismique, afin d'atteindre une réduction des temps nécessaires au contrôle des conditions des œuvres d'art et la conséquente minimisation des désagrément dérivant de l'état de hors service des lignes. Dans sa partie finale l'étude décrit un cas hypothétique où une telle procédure a été appliquée.

Zusammenfassung

DIE NACHPRÜFUNGSFÜHRUNG DER EISENBAHN INFRASTRUKTUREN NACH ERDBEBEN

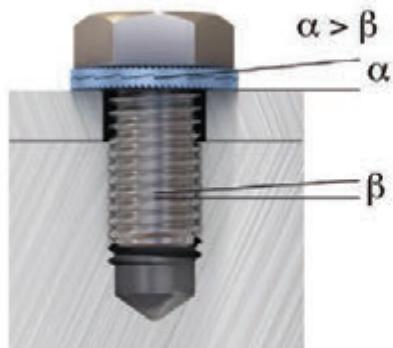
Im Erdbebenfall sind die Brücke die verwundbarste Teile einer Eisenbahnnetz. Man muß nämlich in Kauf nehmen daß deren Mehrheit geplant wurde als zweckmäßigen Vorschriften noch nicht in Kraft waren. Die Beschädigung solcher Infrastrukturen kann bemerkenswerten Störungen am Eisenbahnbetriebsablauf erzeugen.

Hier wird das Thema der Optimisierung der Nachprüfung verfahren in Angriff genommen, mit dem Ziel der Zeitvermindehung der Kontrollverfahren und der Minimierung der Linienbetriebsstörungen. Am Ende wird ein hypothetisches Beispiel des Vorgeschlagen Verfahren behandelt.

NORD-LOCK®

Bolt securing systems

- Previene lo svitamento causato da vibrazioni e carichi dinamici
- La funzione bloccante non è influenzata dalla lubrificazione
- Non necessita di utensili speciali
- Riutilizzabile



Dato che l'angolo delle camme 'α' è maggiore rispetto all'angolo del passo del filetto 'β', la coppia di rondelle, espandendosi di più rispetto al passo del filetto, aumenta la tensione prevenendo lo svitamento.



Nord-Lock S.r.l.

Tel: +39 011 34 99 668 • Fax: +39 011 34 99 543
Email: info@nord-lock.it • Web: www.nord-lock.it