

Borsa di studio attivata ai sensi di quanto disposto dal D.M. n. 1061 del 10/08/2021

Titolo del progetto: Monitoraggio e sviluppo del trasporto su rotaia

La borsa sarà attivata sul seguente corso di dottorato accreditato per il XXXVII ciclo:
INGEGNERIA STRUTTURALE E GEOTECNICA

Responsabile scientifico: Dr. Egidio Lofrano

Area per la quale si presenta la richiesta: GREEN

Numero di mensilità da svolgere in azienda: 8

Azienda: Breng Srl, Via Raffaele Cadorna, 29 – 00187 Roma

Il Dipartimento è disponibile a cofinanziare per un importo pari a euro: 7000,00

Dipartimento finanziatore: DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE E GEOTECNICA con delibera del 20/09/2021

Progetto di ricerca:

1. Motivazioni della ricerca e suoi risvolti “green”

I trasporti rappresentano il cuore della vita economica e sociale di un paese. Tuttavia, quali responsabili della gran parte delle emissioni di gas serra, costituiscono una delle principali fonti di inquinamento ambientale. Tra le diverse modalità di trasporto, quella ferroviaria sembra destinata a rivestire un ruolo sempre più strategico. Negli ultimi anni, infatti, diversi studi hanno difatti dimostrato come il passaggio dal trasporto su strada a quello ferroviario comporti un minor livello di emissioni e una maggiore efficienza energetica. Secondo una ricerca del 2018 dell’Agenzia Europea dell’Ambiente (EEA) il 25% delle emissioni di gas serra in Europa è da ricondurre al settore dei trasporti, ed è dovuto : per il 72% al trasporto su strada, per il 14% al trasporto marittimo, per il 13 % a quello aereo, e solo per lo 0.4% a quello su rotaia.

Risulta evidente, quindi, l’importanza che assume il trasporto su rotaia, in grado di coniugare una carbon footprint ridotta e la necessità di ridurre i tempi di spostamento di persone e merci nelle medie e lunghe distanze. Il risultato è principalmente imputabile alla costruzione nell’ultimo ventennio di treni molto efficienti e in grado di raggiungere velocità sempre più elevate, con il risvolto immediato dell’incentivare uno sviluppo sostenibile. Su questo aspetto è certamente possibile intervenire ulteriormente attraverso l’utilizzo di fonti energetiche rinnovabili, in quanto le emissioni del trasporto su rotaia sono principalmente correlate all’uso del carbonio come fonte di energia primaria per generare l’elettricità necessaria per l’alimentazione della linea.

2. Inquadramento della ricerca

Per favorire ulteriormente la modalità di trasporto su rotaia risulta indispensabile sviluppare e aumentare la capacità delle infrastrutture ferroviarie, agevolando un più ampio utilizzo di tale trasporto sia per passeggeri che per merci. A tale scopo, l’aumento della velocità di progetto delle reti, con conseguente riduzione dei tempi di percorrenza, è indubbiamente una delle leve più significative. Se i gestori delle reti e delle compagnie di trasporto ferroviari sono da una parte molto interessati a tale possibilità di sviluppo, dall’altra chiedono al mondo dell’Ingegneria Civile di assicurare che tali incrementi di velocità non alterino la funzionalità, l’efficienza e la sicurezza della circolazione e dell’intero sistema. Allo scopo si perviene tramite un’attenta attività di diagnostica e monitoraggio delle prestazioni e dell’integrità strutturale delle opere esistenti, che consenta sia di realizzare modelli predittivi ben calibrati sul comportamento reale e capaci di un accertamento precoce delle vulnerabilità, sia di prevenire l’insorgenza di danneggiamenti strutturali.

In generale, una metodologia di diagnostica e monitoraggio si basa sull’installazione di sensori sulle strutture, i cui dati

vengono acquisiti ed elaborati attraverso opportuni protocolli implementati in software dedicati. Le acquisizioni sperimentali possono essere occasionali e di breve durata o accompagnare l'intera vita utile di una struttura. I sistemi di monitoraggio, siano essi a breve o a lungo termine, permettono di ottenere informazioni relative allo stato dell'opera e alla sua durabilità e affidabilità, favorendo altresì una pianificazione ottimale della manutenzione durante l'esercizio. Nell'ultimo decennio vari sistemi di monitoraggio sono stati implementati sulle opere di tutto il mondo per migliorarne le specifiche di funzionamento. In particolare, tali sistemi si sono dimostrati efficaci nel rilevare tempestivamente anomalie nella risposta strutturale, fornire informazioni per la pianificazione delle attività di ispezione, manutenzione e riparazione, convalidare ipotesi e criteri di progettazione, e verificare l'efficacia degli interventi di manutenzione (Ko e Ni, 2005).

3. Stato dell'arte

Un primo approccio al monitoraggio strutturale è rappresentato dalle ispezioni visive, eseguite a intervalli regolari e spesso accompagnate da indagini distruttive e non (prove ultrasoniche o endoscopiche, prelievo di campioni per prove meccaniche e chimico-fisiche, etc.). Queste presentano però dei limiti (sono costose, richiedono che il sito sia accessibile e spesso implicano l'interruzione del servizio di trasporto), che vengono superati attraverso l'analisi delle risposte statiche e dinamiche alle condizioni ambientali e ai carichi da traffico (per evidenti ragioni economiche, sono invece più rari i sistemi artificiali di eccitazione). In seguito, le tecniche di monitoraggio strutturale prevedono la realizzazione di un modello numerico e il suo aggiornamento, in modo da conformarlo ai dati delle registrazioni sperimentali per dedurre informazioni sui danni che non possono essere misurati direttamente in sito. Le analisi sono condotte con riferimento alle caratteristiche statiche e/o dinamiche dell'opera, spesso ricercando i modi di vibrare, in quanto essi sono direttamente correlati alla massa e, soprattutto, alla rigidità della struttura, che è la grandezza variabile in presenza di un danno. L'identificazione del danno basata sulla valutazione delle caratteristiche dinamiche della struttura rappresenta un argomento di ricerca molto attuale. In alcuni casi, anziché tali approcci, detti "model-based" (perché basati su un modello numerico), se ne adoperano altri, denominati "data-driven", che si basano direttamente sull'analisi del segnale.

Con specifico riferimento al caso ferroviario, l'elemento più vulnerabile della rete è indubbiamente l'insieme di ponti e viadotti che la costituiscono; è a questo sottoinsieme dell'infrastruttura che la ricerca si riferisce. L'approccio proposto da Zhan et al. (2011), ad esempio, fa ricorso alle risposte indotte dai treni e alle matrici di sensibilità. L'idea di base è quella di definire il danno direttamente dalle risposte dinamiche nel dominio del tempo, partendo dalle acquisizioni sui ponti soggetti ai carichi da traffico, e tramite una procedura iterativa che utilizza l'errore tra la risposta misurata e quella calcolata. Di recente Meixedo et al. (2021) hanno invece proposto una nuova metodologia per il rilevamento dei danni a partire dalle risposte indotte dal traffico, analizzando le storie temporali in accelerazione e utilizzando tecniche statistiche multivariate.

4. Scopi della ricerca

Oltre alla valutazione del danno, un modello accurato dell'opera esaminata, calibrato sui dati sperimentali, consente di valutare gli effetti del transito dei treni, soprattutto nel caso delle linee ferroviarie ad alta velocità. Il passaggio ripetuto dei treni può determinare, infatti, un'oscillazione eccessiva dell'impalcato tale da compromettere il comfort dei passeggeri o, peggio, la sicurezza del sistema veicolo-struttura. Da un lato, il treno che viaggia ad alta velocità ha un impatto dinamico sugli impalcati da ponte, in quanto ne induce l'oscillazione, dall'altro, l'oscillazione del ponte influisce a sua volta sulla stabilità di marcia e sulla sicurezza del treno. A differenza dei carichi da traffico stradali, inoltre, quelli indotti dai treni in movimento sono regolari e spaziatosi a intervalli costanti, in quanto tutti i vagoni hanno caratteristiche analoghe. Questi aspetti, insieme alle velocità elevate, possono indurre, qualora le frequenze della forzante coincidano con quelle naturali dell'impalcato, il cosiddetto fenomeno di risonanza, con conseguente incremento del rischio di collasso della struttura. Pertanto, lo studio delle proprietà dinamiche di un ponte risulta fondamentale per assicurare la sicurezza della circolazione.

In questo ambito, la ricerca si propone di sviluppare modelli dedicati all'interazione binario-struttura, calibrati sulle risposte al vero acquisite tramite sistemi di monitoraggio, e destinati a favorirne l'incremento in sicurezza della velocità di progetto. Ricollegandosi al paragrafo iniziale, questo aumento della velocità, cui consegue una riduzione dei tempi di percorrenza, renderebbe ancor più appetibile il trasporto su rotaia. Sul tema, il "Dipartimento di Ingegneria

Strutturale e Geotecnica” della Sapienza ha di recente anche avviato una convenzione con Italferr SpA, dal titolo “Attività di consolidamento dei dati di base relativi alle opere d’arte maggiori presenti tra le p.k. 193.00 e 241.00, per la progettazione degli interventi di velocizzazione della Linea ferroviaria direttissima Roma-Firenze, con particolare riferimento ai viadotti Riofi, Borratino, Arno 1, Burchio e Salceto”, convenzione guidata dal Direttore del Dipartimento (Prof. A. Paolone) cui il Responsabile Scientifico del presente progetto partecipa attivamente da oltre un anno.

Il partner industriale individuato è la società Breng Srl, con sede in Via Raffaele Cadorna, 29, 00187 Roma. Si tratta di una società nata nel 2012, e che si è nel tempo affermata, sia in Italia, sia all’estero, nel campo della progettazione e del monitoraggio di opere di ingegneria civile, con particolare riferimento a ponti, viadotti e gallerie. Il tema proposto per il progetto di ricerca è certamente di interesse per la società, come anche mostrato nella lettera di intenti siglata tra il CEO di Breng, Ing. Eugenio Ricci, e il Responsabile Scientifico del presente progetto. Vale la pena sottolineare che tra i due soggetti sono già in corso eccellenti relazioni di cooperazione.

5. Bibliografia

Ko, J.M. and Ni, Y.Q. (2005). Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. *Engineering Structures* 27(12), 1715-1725.

Meixedo, A., Santos, J., Ribeiro, D., Calçada, R. and Todd M. (2021). Damage detection in railway bridges using traffic-induced dynamic responses. *Engineering Structures* 238, 112189.

Zhan, J.W., Xia, H., Chen, S.Y. and De Roeck, G. (2011). Structural damage identification for railway bridges based on train-induced bridge responses and sensitivity analysis. *Journal of Sound and Vibration* 330(4) 757-770.

Titolo del progetto (inglese): Monitoring and Development of Rail Transport

Progetto di ricerca (inglese):

1. Motivations for the research and its “green” implications

Transportation is the heart of a country's economic and social life. However, as responsible for most of the greenhouse gas emissions, they are one of the main sources of environmental pollution. Among the various ways of transport, the railway one seems destined to play an increasingly strategic role. In fact, in recent years, several studies have shown how the transition from road to rail transport involves a lower level of emissions and a greater energy efficiency. According to a 2018 research by the European Environment Agency (EEA), the 25% of greenhouse gas emissions in Europe is attributable to the transport sector, and is due: for 72% to road transport, for 14% to maritime transport, 13% to air transport, and only 0.4% to rail transport.

It is therefore clear the relevance of rail transport, able to combine a low carbon footprint with the need to reduce the travel times of people and goods over medium and long distances. The result is mainly related to the construction in the last twenty years of high efficiency trains, able to reach ever higher speeds, with the immediate implication of encouraging a sustainable development. Since the emissions of rail transport are mainly due to the use of carbon (the primary energy source to generate the electricity needed to power the line), it is certainly possible to work further on this aspect, through the use of renewable energy sources.

2. Research framework

To further promote rail transport, it is crucial to develop and increase the capacity of railway infrastructures, facilitating a wider use of this transport for both passengers and goods. For this purpose, the increase of the design speed of the rail networks, with the consequent reduction of travel times, is undoubtedly one of the most significant stimulus. If the operators of the networks and the railway transport companies are on the one hand very interested in this possibility of development, on the other hand they ask the world of Civil Engineering to ensure that such speed increases do not alter the functionality, efficiency and safety of circulation and of the entire network. This target can be achieved through careful diagnostics and monitoring activities of the performance and structural integrity of the existing networks, activities which allow both to create predictive models well calibrated on the real behaviour (and so capable of an early assessment of vulnerabilities), and to prevent onset of structural damages.

Generally speaking, a diagnostic and monitoring methodology is based on the installation of sensors on the structures, the data of which are acquired and processed through appropriate protocols implemented in dedicated

software. Experimental acquisitions can be casual and of short duration or follow the entire service life of a structure. The monitoring systems, whether short or long-term, allow to obtain information on the state of a structure and its durability and reliability, also supporting optimal maintenance planning during operation. In the last decade, various monitoring systems have been implemented on various structures around the world to improve their operating conditions. In particular, these systems have proved effective in detecting anomalies in the structural response in a timely manner, providing information for planning inspections, as well as maintenance and repair activities, validating hypotheses and design criteria, and verifying the effectiveness of maintenance interventions (Ko and Ni, 2005).

3. State of the art

A first approach to structural monitoring is represented by visual inspections, performed at regular intervals and often combined with destructive and non-destructive investigations (ultrasonic or endoscopic tests, sampling for mechanical and chemical-physical tests, etc.). However, these activities have some limitations (are expensive, require the site to be accessible and often involve the interruption of the transport line), which are overcome by analysing the static and dynamic responses to environmental vibrations and traffic loads (for obvious economic reasons, artificial excitation systems are quite infrequent). Subsequently, the structural monitoring techniques call for the realization of a numerical model and its updating, in order to calibrate the model to the data of the experimental signals, and to deduce information on the damages that cannot be measured directly on site. The analyses are conducted with reference to the static and/or dynamic properties of the structure, often obtaining the mode shapes, as they are directly related to the mass and, above all, to the stiffness of the structure, which is the property affected by the presence of a damage. The identification of the damage based on the evaluation of the dynamic characteristics of a structure represents a very topical research branch. In some cases, instead of these approaches, called "model-based" (because they are basically based on a numerical model), others are used, called "data-driven", which are based directly on signal analysis.

With specific reference to the railway case, the most vulnerable element of the network is certainly the subset of bridges and viaducts; it is to this group of structure that the research refers. The approach proposed by Zhan et al. (2011), for example, uses train-induced responses and sensitivity matrices. The basic idea is to define the damage directly from the dynamic responses through time domain analyses, starting from the acquisitions on bridges subject to traffic loads, and running an iterative procedure that uses the error between the measured response and the calculated one. Instead, Meixedo et al. (2021) recently proposed a new methodology for detecting damage starting from traffic-induced responses, analysing accelerating time-histories and using multivariate statistical techniques.

4. Purposes of the research

In addition to the damage assessment, an accurate model of the examined structure, properly calibrated on the experimental data, allows to evaluate the effects of the transit of trains, particularly in the case of high-speed railway lines. The repeated passage of trains can, in fact, induce severe vibrations of the deck such as to compromise the comfort of passengers or, worse, the safety of the vehicle-structure system. On the one hand, a train traveling at high speed has a dynamic impact on the bridge decks, as it induces its vibration, on the other hand, the oscillation of the bridge in turn affects the stability and safety of the train. Moreover, unlike road traffic loadings, those induced by moving trains are regular and spaced at constant wheelbases, as all wagons have similar characteristics. These aspects, together with high speeds, can induce, if the force frequencies coincide with the natural ones of the deck, the so-called resonance phenomenon, with a consequent increase in the risk of collapse of the structure. Therefore, the study of the dynamic properties of a bridge is crucial to ensure structural safety.

In this framework, the proposed research project aims to develop structural models dedicated to the rail-structure interaction, calibrated on the real response acquired through monitoring systems, and intended to promote a safe increase of the traveling speeds. Referring back to the initial paragraph, this increase in speed, which results in a reduction in travel times, would make transport by rail even more attractive. On this subject, the "Department of Structural and Geotechnical Engineering" of Sapienza has also recently launched an agreement with the company Italferr SpA, entitled "Consolidation of the basic data related to greatest structures present among the kilometers 193.00 and 241.00, for the design of the speeding up of the Rome-Florence direct railway line, with particular reference to the Riofi, Borratino, Arno 1, Burchio and Salceto viaducts", an agreement led by the Chair of the

Department (Prof. A. Paolone) and which the Scientific Responsible of this project has been actively participating for over one year.

The industrial partner selected for the PhD research project is the company Breng Srl, with headquarters in Via Raffaele Cadorna, 29, 00187 Rome (Italy). It is a company founded in 2012, and which has established itself over time, both in Italy and abroad, in the field of design and monitoring of civil engineering structures, with particular reference to bridges, viaducts and tunnels. The topic proposed for the research project is certainly of interest for the company, as also shown by the letter of intent signed between the CEO of Breng, P.E. Eugenio Ricci, and the Scientific Responsible of this project. It is worth underlining that excellent cooperations are already underway among the two parties.

5. References

Ko, J.M. and Ni, Y.Q. (2005). Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. *Engineering Structures* 27(12), 1715-1725.

Meixedo, A., Santos, J., Ribeiro, D., Calçada, R. and Todd M. (2021). Damage detection in railway bridges using traffic-induced dynamic responses. *Engineering Structures* 238, 112189.

Zhan, J.W., Xia, H., Chen, S.Y. and De Roeck, G. (2011). Structural damage identification for railway bridges based on train-induced bridge responses and sensitivity analysis. *Journal of Sound and Vibration* 330(4) 757-770.