



La manutenzione predittiva dei ponti ferroviari attraverso un *framework* basato sull'*Internet of Things*. Una proposta di implementazione

The predictive maintenance of railway bridges through an Internet of Things framework. An implementation proposal

Antonio LUGARÀ^(*)
Diego BRUCIAFREDDO^(**)

Sommario - Nell'ambito delle opere civili, la stragrande maggioranza delle opere d'arte costruite a partire dalla metà del secolo scorso, sono soggette ad un globale decadimento delle proprietà meccaniche dovuto alle variate condizioni di carico ed esercizio rispetto a quelle di progetto, all'aggressione degli agenti atmosferici (es. cicli di gelo-disgelo), e, talvolta, a causa di azioni manutentive sottodimensionate. La disponibilità di nuove tecnologie di campionamento, estrazione, e analisi dei dati rappresentano alcuni dei fattori chiave in grado di automatizzare ed efficientare le strategie manutentive. Nell'era dell'*Industrial Internet of Things* (IIoT) è in atto una mutua contaminazione tra l'ingegneria ferroviaria e l'*Information Technology*, richiedendo sempre più spesso l'utilizzo di conoscenze verticalmente integrate tendenti a superare i paradigmi dell'ingegneria classica.

In questo lavoro si intendono porre all'attenzione del lettore spunti teorici dell'ingegneria strutturale, di quella ferroviaria, ma anche dell'*Industrial Internet of Things*, integrandoli vicendevolmente al fine di ottenere una visione unitaria che permetta di riconoscerne la complementarità nei casi di specie analizzati, consentendo di sfruttare le nuove tecnologie IoT per automatizzare e semplificare attività manutentive e relative verifiche strutturali complesse e *time-consuming*.

1. Un'introduzione alla manutenzione predittiva

Al giorno d'oggi, con maggior frequenza rispetto al passato, le organizzazioni dedicano sempre più attenzione ai propri processi operativi e a come ridurne i costi. Attualmente, infatti, esse operano in un contesto di sup-

Summary - In the field of civil infrastructures, the vast majority of those, built since the middle of the last century, are subject to a global deterioration of mechanical properties due to varied loads and operating conditions compared to the design, to the aggression of atmospheric agents (e.g. freeze-thaw cycles), and sometimes, due to undersized maintenance actions. The availability of new technologies of sampling, extraction, and data analysis are some of the key factors that can automate and streamline maintenance strategies.

Within the era of the *Industrial Internet of Things* (IIoT) there is a cross fertilization between railway engineering and *Information Technology*, which requires the utilization of vertically integrated knowledge overtaking the paradigms of the classical engineering.

This work is intended to bring to the attention of the reader several theoretical hints of structural and railway engineering, but also of the *Industrial Internet of Things*, integrating them in order to obtain a unified vision that allows to recognize their complementarity in the specific cases analyzed, allowing to exploit the new IoT technologies to automate and simplify maintenance activities and related complex and time-consuming structural verifications.

1. An introduction to the predictive maintenance

Nowadays, more frequently than ever, organizations are looking at their operations and how to reduce costs. They are experiencing global supply chains, aging assets, raw material price volatility, increased compliance, aging workforce and additional bureaucratic constraints. [1]

^(*) Big Data. Analytics & IoT Transportation Pre-Sales Engineer, Hitachi Vantara.

^(**) Ingegnere Civile Strutturista, libero professionista.

^(*) Big Data. Analytics & IoT Transportation Pre-Sales Engineer, Hitachi Vantara.

^(**) MSc Structural Engineering Specializing Master Seismic Design Peng (Italy).

ply chain globali, invecchiamento degli apparati e della forza lavoro, variabilità dei prezzi delle materie prime ed ulteriori vincoli burocratici [1].

Nell'ambito delle opere civili, la stragrande maggioranza delle opere d'arte costruite a partire dalla metà del secolo scorso, sono soggette ad un globale decadimento delle proprietà meccaniche dovuto alle variate condizioni di carico ed esercizio rispetto a quelle di progetto, all'aggressione degli agenti atmosferici (es. cicli di gelo-disgelo, ecc.), e, talvolta, a causa di azioni manutentive sottodimensionate.

Una grande opportunità per garantire la sicurezza dei manufatti pur ottimizzando efficienza ed efficacia delle strategie manutentive, è costituita dallo sviluppo e dall'applicazione di un sistema di Manutenzione Predittiva (MP) [1]. La riduzione dei costi dell'informatica inerenti alla capacità di calcolo, alle reti e alla memorizzazione dei dati, sta spingendo un nuovo paradigma manutentivo agevolato dalla grande quantità di dati generati dal proliferare di sensori intelligenti ed interconnessi. La necessità di operare con budget sempre più ristretti e la continua ricerca dell'estensione della vita utile degli asset spingono le organizzazioni a costruire soluzioni innovative dove l'*Information Technology* (IT) diventa l'abilitatore della risoluzione di problematiche operative mediante la raccolta, la memorizzazione e l'analisi di basi dati eterogenee costruite a partire da sorgenti endogene ed esogene rispetto ai sistemi oggetto di analisi.

La MP, intersecando *Information Technology* e *Operational Technology*, può infatti fornire alle istituzioni preposte dettagli essenziali sulle risposte delle opere d'arte, nel caso specifico ponti e viadotti, rispetto alle varie sollecitazioni, statiche e dinamiche, fornendo anche informazioni sulla qualità dei materiali, consentendo, così, ottimizzazioni di attività manutentive, processi e risorse umane. La MP, quindi, potrebbe rappresentare l'applicazione risolutiva per essere all'avanguardia all'interno di un mercato globale e competitivo, contribuendo a garantire non solo l'utilizzo in sicurezza degli impalcati, ma anche agevolando il raggiungimento di benefici sia operativi che relativi a strumenti e metodi.

Tra quelli operativi si citano:

- ottimizzazione degli intervalli di manutenzione;
- riduzione sostanziale dei periodi di interdizione al traffico non pianificati e relativa mobilità alternativa;
- ottimizzazione delle tempistiche e delle modalità di esecuzione delle attività manutentive, evitando interventi in regime di urgenza ed in deroga alle normative sugli appalti.

Mentre rispetto a metodi e strumenti si segnalano:

- identificazione delle cause degli ammaloramenti attraverso analisi *ad hoc*;
- perfezionamento degli strumenti e dei processi per la diagnosi;
- determinazione di procedure manutentive ottimali.

In the field of civil infrastructures, the vast majority of those, built since the middle of the last century, are subject to a global deterioration of mechanical properties due to varied loads and operating conditions compared to the design, to the aggression of atmospheric agents (e.g. freeze-thaw cycles), and sometimes, due to undersized maintenance actions.

A big opportunity to achieve these results is constituted by the development and application of a predictive maintenance (PM) framework [1]. The reduction of IT costs related to computing capacity, networks and data storage is pushing a new maintenance paradigm facilitated by the large amount of data generated by the proliferation of intelligent and interconnected sensors. The need to operate with ever smaller budgets and the continuous search for the extension of the useful life of the assets push organizations to build innovative solutions where Information Technology (IT) becomes the enabler of the resolution of operational problems through the collection, storage and analysis of heterogeneous data bases built starting from endogenous and exogenous sources with respect to the systems being analyzed.

The PM, intersecting IT and OT, helps to provide organizations with key insights regarding the responses of civil infrastructures, in this specific case railway bridges, with respect to static and dynamic stresses, providing also information about quality of materials and enabling organizations to optimize maintenance activities, processes, and workforce schedules. PM could represent the killer application to compete within a globalized and under pressure market place, contributing not just to guarantee the safe utilization of bridges, but also to reach benefits related to operative results and methodologies. Among the operative improvements there are:

- *optimization of maintenance intervals;*
- *substantial reduction of unplanned traffic ban periods and related alternative mobility;*
- *optimization of the timing and methods of execution of maintenance activities, avoiding urgent intervention derogating from procurement regulations.*

While with respect to methodologies and tools, it is possible to achieve the following results:

- *identification of the causes of deterioration through ad hoc analyzes;*
- *improvement of tools and processes for diagnosis;*
- *determination of optimal maintenance procedures.*

2. Railway bridges and the maintenance problem: a physical-mathematical framework

Whether it is, a viaduct or an overpass, a bridge is a civil engineering work that quantitatively meets the need of terrestrial communication to overcome obstacles; that need is indissolubly connected with the economic and social de-

2. I ponti ferroviari e il problema manutentivo: un inquadramento fisico-matematico

Nella sua essenza, il ponte, che sia un viadotto o un cavalcavia, è un'opera di ingegneria civile che risponde in maniera quantitativa al bisogno delle vie di comunicazione terrestri di superare degli ostacoli; bisogno indissolubilmente connesso con lo sviluppo economico e sociale di una civiltà.

Millenni di studi e realizzazioni di ponti hanno definito diverse declinazioni strutturali, tuttavia, ognuna di esse è inquadrabile secondo il seguente paradigma:

- posizione del binario (ponte a via inferiore e ponte a via superiore);
- schema strutturale (ponte ad arco, ponte a travata, ponte strallato e ponte sospeso);
- schema statico (ponte isostatico e ponte iperstatico);
- materiale utilizzato (muratura, acciaio, calcestruzzo armato e calcestruzzo armato precompresso).

Naturalmente, un ponte, come organismo strutturale, deve rispondere a requisiti prestazionali ben definiti affinché possa ottemperare in maniera soddisfacente ai requisiti dei mezzi su esso marcianti; inoltre, rimane inteso che esso, in quanto opera strutturale, manifesti una risposta che è funzione generica del tempo in quanto intimamente collegata sia con la reologia dei materiali che lo costituiscono, sia con le variabili legate al carico di progetto che sono scaturite dal sistema socio-economico e dai modelli predittivi della domanda di trasporto adottati in fase di progettazione.

Per esempio, basti pensare ai fenomeni viscosi che caratterizzano il calcestruzzo o ai fenomeni di rilassamento dell'acciaio oppure all'aumento dei mezzi in transito dal dopoguerra alla data odierna. L'ultima affermazione palese che un'accettabile replicabilità della risposta nel tempo non possa essere ottenuta se non con un puntuale piano di interventi che permetta il ripristino, o il potenziamento, di una caratteristica una volta che questa manifesti necessità di essere ripristinata o potenziata. Tralasciando almeno in parte le attività connesse ad un potenziamento del sistema, la conservazione delle caratteristiche necessarie al ponte per assolvere la funzione per cui è stato progettato passa attraverso le operazioni di manutenzione. Nella pianificazione delle operazioni di manutenzione su una rete ferroviaria bisogna tenere in conto che la stessa è formata da una moltitudine di ponti che intervallano la via di comunicazione secondo necessità e per di più, come detto, esistono diverse declinazioni strutturali per la realizzazione di un ponte, le quali, a seconda delle condizioni al contorno locali, possono trovarsi in maniera equiprobabile. In maniera quantitativa basti pensare che, come si evince dal sito di Rete Ferroviaria Italiana (RFI) [2], in Italia su complessivi circa 16.000 km di linee vengono attraversati circa 26.000 tra ponti e viadotti per un totale di circa 800 km [3].

development of a civilization. Studies and realization of bridges for millennia have defined different structural declensions; however, each of them can be classified into the following paradigm:

- *position of the roadway (deck bridge or through bridge);*
- *construction scheme (arch bridge, girder bridge, cable-stayed bridge and suspended bridge);*
- *static scheme (isostatic bridge and hyperstatic bridge);*
- *material of construction (masonry, steel, reinforced concrete and pre-stressed concrete).*

Clearly, the structure of a bridge must meet all well-defined performance requirements in order to satisfactorily comply with the specifications of the vehicles. Furthermore, it is understood that, as a civil engineering work, it exhibits a response that is a generic function of time as it is intimately connected with both the rheology of the constituent materials and the variables linked to the project load that have been raised from the socioeconomic system, as well as the predictive models of transport demand adopted in the design phase.

For instance, it is possible to think about the viscous phenomena that characterize the concrete, the relaxation phenomena of the steel or the number of vehicles that is dramatically increased from the post-war period to nowadays. The last statement expresses that an acceptable repeatability of the response over time cannot be achieved without a precise plan of interventions that allows the restoration or strengthening of a specific characteristic once the need for that is proved. Neglecting, at least partially, the activities connected to the system development, the preservation of the features necessary for the bridge to serve the purpose it was designed for, passes through the maintenance operations. When planning maintenance operations on a railway network it has to be taken into account that the communication route is interspersed with multitude of bridges. Moreover, as mentioned above, there are several structural declinations for the construction of a bridge depending on local boundary conditions and those can be found in an equiprobable manner. In order to clarify aforementioned information and to depict the importance of the bridge maintenance problem with respect to the guaranty of the functionality of the railway network, it is possible to check, for example, the data that can be found on the Italian railway network (RFI) website [2] where it is stated that among over 16,000 km of railway lines there are almost 26,000 bridges and viaducts for a total extent of about 800 km [3].

The simplest method for routine maintenance is based on the concept of cyclical maintenance, i.e. the interval between two successive maintenance operations is determined a-priori by physical-mathematical models that determine after how long it is necessary to carry out interventions to maintain the effectiveness of the infrastructure. The method itself has a low initial cost but shows low effectiveness due to the intrinsic limitation of the models used, which are not able to grasp and predict the large

Il metodo più semplice per la manutenzione, ordinaria, è basato sul concetto della manutenzione ciclica, ossia l'intervallo tra due manutenzioni successive è determinato a priori mediante modelli fisico-matematici che determinano dopo quanto tempo sia necessario effettuare degli interventi per mantenere l'efficacia dell'infrastruttura. Il metodo ha di per sé un basso costo iniziale ma manifesta una scarsa efficacia dovuta alla limitazione intrinseca dei modelli utilizzati che non sono in grado di cogliere e prevedere il gran numero di variabili reali che influenzano lo stato di salute di una struttura. Attività basate sulla manutenzione ciclica, non possono ad esempio cogliere fenomeni quali la modifica della risposta a seguito di un cedimento delle fondazioni dell'infrastruttura o a causa di violenti eventi naturali.

Un metodo che permette una maggiore efficacia, ma dall'elevato costo, è la manutenzione a evento. In maniera sintetica, la manutenzione a evento si basa sul passaggio sulla rete di treni speciali, facenti parte della flotta di treni misure che, ad intervalli di tempo stabiliti a seconda della classe dell'infrastruttura, opportunamente attrezzati, eseguono delle misurazioni di parametri caratteristici. Questa tecnica permette l'esecuzione di un intervento solo quando questo si renda effettivamente necessario (Fig. 1).

Seppur esistano diverse metodologie di applicazione (ad esempio si veda [4] per quanto riguarda RFI), considerando la metodologia della manutenzione a eventi nella sua essenza, questa evidenzia dei limiti da ricercarsi quantomeno nell'elevato costo legato alla necessità di avere dei treni all'uopo dedicati che si spostino sulla rete

number of real variables that influence the safety of the structure. For instance, activities based on cyclical maintenance are not able to detect phenomena, such as changing the response following a failure of the infrastructure foundations or due to violent natural phenomena.

A method that provides greater effectiveness but with a higher cost is known as condition-based maintenance. In summary, the maintenance on condition is based on the passage on the network of special trains that, properly equipped, perform measurements of a set of characteristic parameters related to the proper functioning of the network. The passage of the train, as well as its characteristic, are related to the importance of the line. This technique allows the execution of an intervention only when this is really necessary, but those measurements are discontinuous during the time and exerted with specific time windows (Fig.1).

Although different methods of application are feasible (for example, see [4] as regards RFI), the employment of condition-based maintenance is limited by the high cost due to the necessity of having a dedicated fleet of trains that are moving on the network without transporting freights or passengers. Furthermore, it is not easy to plan properly the activity of maintenance as the actions will be executed only when the registered parameters show some critical values. Additionally, like the cyclic-maintenance, the method of the maintenance on condition is not able to perform a continuous monitoring of the network and, as a result it is not possible to recognize some problems on the network due to occasional events.

1° Class (2 weeks)	2° Class (2 months)	3°- 4° Class (4-6 months)	US (6-12-24 months)	SCMT (6-12-24 months)
Track, Catenary, Signalling, Telecommunications				
				
Diamante, Aiace (Y)	Archimede	Talete + 15 PV7/EM80	Galileo	Caronte
				

Fig. 1 – Flotta di treni misure e intervalli di misurazione RFI [4].
Fig. 1 – Fleet of RFI diagnostic trains and measurement intervals [4].

ma non trasportino merci e/o persone e che non sia possibile effettuare una pianificazione in quanto la manutenzione viene effettuata "ad evento" ossia quando i parametri misurati manifestino valori critici. Inoltre, in similitudine con la manutenzione ciclica, il metodo non è in grado di cogliere *sic et simpliciter*, tra un passaggio e il successivo del treno diagnostico, intervallo di tempo in cui la rete può essere attraversata anche da migliaia di treni, eventuali difformità dell'infrastruttura dovute a eventi improvvisi.

Analizzando qualitativamente quanto descritto, dal punto di vista del mantenimento del funzionamento della rete, i metodi finora esposti sono caratterizzati da bassi costi e bassa efficacia nel caso della manutenzione ciclica, da alti costi e medio-alta efficacia nel caso della manutenzione a evento. Rimane inteso che, data la nevralgica importanza del sistema di trasporti e i rischi, anche gravi, connessi a un suo non funzionamento, l'utilizzo di un sistema ad alta efficacia non può che essere necessario e l'*optimum* si raggiunge quando a parità di efficacia i costi diventano finanziariamente sostenibili.

Un aspetto che pesa consistentemente sulla voce di costo nella manutenzione a eventi, nella sua essenza e a livello astratto, è l'utilizzo "monouso" del dato registrato che, esaurita la sua funzione di segnalatore dell'evento diagnostico, potrebbe anche non essere oggetto di memorizzazione e indicizzazione.

Un'evoluzione della manutenzione basata su condizioni, che mira contemporaneamente all'aumento dell'efficacia e al contenimento dei costi, è la manutenzione predittiva (si veda ad esempio H. HASHEMIAN *et al.* [5]), la quale mediante la raccolta costante di dati, a fronte della costruzione di un database statisticamente rappresentativo, agevola la costruzione di modelli matematici che, analizzando le diverse correlazioni tra segnali misurati ed eventi, permettono di determinare, o meglio di prevedere, l'anomalia incipiente, prima ancora che questa si verifichi. È chiaro che l'applicazione del metodo non possa prescindere da un'estesa campagna di misurazioni per la quale le condizioni ideali si raggiungerebbero con misurazioni effettuate a ogni passaggio sulla linea, situazione che permetterebbe un monitoraggio continuo delle condizioni del sistema e la creazione di una robusta base di dati che cementifichi la validità delle deduzioni statistiche e fisico-matematiche.

Allo scopo di meglio illustrare i concetti generali, si propone un semplice esempio in grado di mettere in luce il fatto che la creazione di una base di dati alimentata da registrazioni il più possibile continue possa permettere un monitoraggio continuo della struttura, ovvero di una sua caratteristica saliente, dei ponti ferroviari presenti sulla rete. Un approccio simile è stato utilizzato in diversi studi e pubblicazioni, si veda ad esempio NATONI [22].

Si consideri il più semplice modello concettuale di treno attraversante un ponte che consiste in una trave con massa e rigidità distribuita su cui è in movimento

Analysing qualitatively what described, from the point of view of maintaining the proper network functioning, the methods explained so far are characterized the first one, the cyclical, by low costs and low effectiveness, on the other hand, the second one, based on condition, by high costs and medium-high effectiveness. It is agreed that due to the crucial importance of the transport system and the related risks that could be potentially serious, the necessity to use a highly effective system might be considered and the optimum is reached when with equal effectiveness the costs become financially sustainable.

Considering its essence, one aspect of maintenance on condition that intrinsically costs, is the "single use" application of the recorded data that may not even be stored and indexed once its diagnostic function has been completed.

*Predictive maintenance is an evolution of condition-based maintenance, which aims simultaneously to increase effectiveness and cost containment (see for example HASHEMIAN *et al.* [5]). This type of maintenance, through the constant collection of data, enables the generation of a statistically representative database and facilitates, consequently, the construction of mathematical models which, analyzing the different correlations between measured signals and events, allow to determine, or better predict, the incipient anomalies even before those occur. It is clear that the application of this method cannot be considered apart from an extended campaign of measurements for which the ideal conditions would be reached when the measurements would be taken at each passage on the line, a situation that would allow continuous monitoring of the conditions of the system. This will also enable the generation of a robust database consolidating the validity of statistical and physical-mathematical deductions.*

In order to better illustrate the general concepts, a simple example will be proposed in the following paragraph highlighting the fact that the generation of a database fed by longitudinal data in close sequence can allow a continuous monitoring of the structure (or the monitoring of some of its features) of the railway bridges present on the network. A similar approach has been already applied in many researches (e.g. NATONI [22]).

It is possible to consider the simplest conceptual model of a train crossing a bridge consisting of a beam with distributed both mass and stiffness on which a travelling force P with constant speed c is moving (see Fig. 2). This representation is equivalent to the fact that the inertial effects related to the train mass can be neglected and the spatial extension of the bridge is predominant compared with that of the train (FRYBA [6] and [7]).

The following hypotheses are also considered:

1. *the behaviour of the beam is described by the differential equation of Euler-Bernoulli inferred on the assumption of small deformations. Hook's law, the Navier hypotheses and the De Saint Venant principle are also all valid for this model. The beam has a cross section area and a constant mass per unit of length;*

una forza viaggiante P con velocità costante c (Fig. 2). Questa rappresentazione equivale a dire che gli effetti inerziali legati alla massa del treno possono essere trascurati e l'estensione spaziale del ponte è preponderante rispetto a quella del treno (FRYBA [6] e [7]).

Tutto ciò posto, si ritengano valide le seguenti ipotesi:

1. il comportamento della trave sia descritto dall'equazione differenziale di Eulero-Bernoulli dedotta sulla validità dell'assunzione di piccole deformazioni, validità della legge di Hook, validità delle ipotesi di Navier e del principio del De Saint Venant. La trave ha sezione e massa costante per unità di lunghezza;
2. la massa in moto è relativamente piccola se comparata a quella della trave sicché è possibile trascurarne gli effetti inerziali;
3. il carico, nel caso di specie, si muove con velocità costante da sinistra a destra;
4. assenza di smorzamento;
5. si consideri trave a riposo e indeformata prima dell'applicazione del carico.

L'equazione del moto per il caso sopra descritto prende la semplice forma di seguito riportata:

$$\mu \ddot{v}(x, t) + EI v^{IV}(x, t) = \delta(x - ct)P \quad (1)$$

Si assumano i seguenti significati per i termini aggiuntivi introdotti:

- μ massa per unità di lunghezza della trave;
- EI termini legati alla rigidezza elastica flessionale della trave;
- $v(x, t)$ funzione che descrive l'abbassamento della trave;
- $\delta(x - ct)$ funzione delta di Dirac caratterizzata per il punto di ascissa $x_0 = ct$, la quale permette di trattare un carico concentrato alla stregua di un carico distribuito (R.F. HOSKINS [8]).

L'equazione è valida nell'intervallo $0 \leq t \leq t_D$ essendo $t_D = L/c$ il tempo di permanenza del carico P sulla trave.

La soluzione dell'equazione sopra riportata è possibile in forma chiusa. Utilizzando un'espansione modale per la variabile spostamento del tipo

$$v(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x) q_n(t) \quad (2)$$

Dove il singolo contributo modale della variabile spostamento è espresso come prodotto di due funzioni monoparametriche ossia la $\phi_n(x)$ forma modale dipendente solo dalla variabile geometrica e dalle condizioni al contorno, rappresentando di fatto lo spazio delle configurazioni, e la $q_n(t)$ che definisce l'ampiezza istante per istante della ennesima forma modale e che quindi assume il significato di parametro Lagrangiano.

Nel caso di una trave appoggiata-appoggiata sono valide le seguenti espressioni (CHOPRA [9])

2. the mass in motion is relatively small in comparison to that of the beam so it is possible to neglect the inertial effects;
3. the speed of moving load is constant and the direction is from left to right;
4. damping can be neglected;
5. the beam is considered at rest and undeformed before the load application.

The equation of motion for the described case holds

$$\mu \ddot{v}(x, t) + EI v^{IV}(x, t) = \delta(x - ct)P \quad (1)$$

Where:

- μ is the mass per unit of length of the beam;
- E is the elastic flexural stiffness of the beam;
- $v(x, t)$ is the function that describes the vertical displacement of the beam;
- $\delta(x - ct)$ is the Dirac delta function characterized by the point of horizontal axis $x_0 = ct$, which allows the treatment of a concentrate load in the guise of a distributed one (HOSKINS [8]);

The equation holds true for $0 \leq t \leq t_D$ where $t_D = L/c$ is the time of stay of the load P applied on the beam.

The solution of the above equation is possible in a closed form using a modal expansion for the displacement variable of the type

$$v(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x) q_n(t) \quad (2)$$

Where the single modal contribution of the displacement variable is written as the product of two single-parameter functions, namely the function $\phi_n(x)$, which is dependent only on the geometric variable and the boundary conditions, effectively representing the space of the configurations, and the function $q_n(t)$ that defines for each instant the amplitude of the n^{th} modal form and therefore assumes the meaning of Lagrangian parameter.

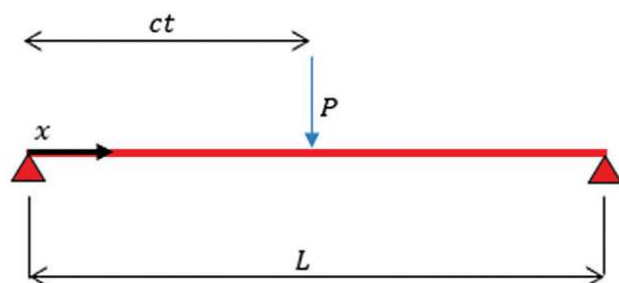


Fig. 2 – Schema di riferimento per modellizzare il ponte attraversato da una forza viaggiante.

Fig. 2 – Reference scheme to model the bridge crossed by a traveling force.

$$\phi_n(x) = \sin\left(n\pi\frac{x}{L}\right) \quad e \quad \omega_n = \frac{n^2 L^2}{\pi^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (3a), (3b)$$

Risulta quindi possibile identificare le seguenti variabili:

- Massa generalizzata dell'n-esimo modo:

$$M_n = \int_0^L \mu \phi_n(x)^2 dx = \mu \frac{L}{2} \quad (4)$$

- Rigidezza generalizzata dell'n-esimo modo:

$$K_n = M_n \omega_n^2 = \mu \frac{L}{2} \frac{n^4 \pi^4 EI}{L^4} = \frac{n^4 \pi^4 EI}{2L^3} \quad (5)$$

- Forza generalizzata n-esimo modo:

$$P_n(t) = P \int_0^L \delta(x-ct) \phi_n(t) dt = P \phi(ct) = P \sin\left(\frac{n\pi ct}{L}\right) = P \sin\left(n\pi \frac{t}{t_d}\right) \quad (6)$$

Per il calcolo della forza generalizzata si è fatto uso delle proprietà della funzione di Dirac (si veda, ad esempio, quanto riportato in [5]). Si può quindi notare come la forza generalizzata sia un'armonica di frequenza angolare $\omega_{Dn} = \frac{n\pi}{t_d}$.

Il problema è adesso ricondotto, per ogni singolo modo, al calcolo della risposta di un oscillatore semplice soggetto a una forzante armonica di frequenza del tipo riportato nella scrittura (6):

$$M_n \ddot{q}_n(t) + K_n q_n(t) = P \sin(\omega_{Dn} t) \quad (7)$$

Come noto (A.K. CHOPRA [9]) l'equazione (7) ha soluzione del tipo:

$$q_n(t) = \frac{P}{K_n} \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_{Dn}}{\omega_n}\right)^2} \left(\sin(\omega_{Dn} t) - \frac{\omega_{Dn}}{\omega_n} \sin(\omega_n t) \right) \quad (8)$$

Che esplicitando le variabili diviene:

$$q_n(t) = \frac{2P}{\mu L \omega_n^2} \frac{1}{1 - \left(\frac{n\pi c}{L \omega_n}\right)^2} \left(\sin\left(n\pi \frac{t}{t_d}\right) - \frac{n\pi c}{L \omega_n} \sin(\omega_n t) \right) \quad (9)$$

Le equazioni sopra riportate, una per ogni modo e in numero infinito in accordo alla espansione modale (2), legano le variabili relative al sistema in movimento (magnitudo della forza e velocità) con quelle relative alla trave (massa, rigidezza flessionale, lunghezza) e ne determinano la risposta mediante la ricomposizione modale:

$$v(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(n\pi \frac{x}{L}\right) q_n(t) \quad (10)$$

Se si specializza l'equazione modale per $x = \frac{L}{2}$ si ottiene che:

$$\phi_n\left(\frac{L}{2}\right) = \sin\left(n\frac{\pi}{2}\right) = \begin{cases} 0 & \text{per } n = 2i \\ +1 & \text{per } n = 1 + 4i \\ -1 & \text{per } n = 3 + 4i \end{cases} \quad (11)$$

In the case of a simply-supported beam the followings are valid (CHOPRA [9]):

$$\phi_n(x) = \sin\left(n\pi\frac{x}{L}\right) \quad e \quad \omega_n = \frac{n^2 L^2}{\pi^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (3a), (3b)$$

Therefore, it is possible to identify the following variables:

- Total mass of the n^{th} mode:

$$M_n = \int_0^L \mu \phi_n(x)^2 dx = \mu \frac{L}{2} \quad (4)$$

- Equivalent stiffness of the n^{th} mode:

$$K_n = M_n \omega_n^2 = \mu \frac{L}{2} \frac{n^4 \pi^4 EI}{L^4} = \frac{n^4 \pi^4 EI}{2L^3} \quad (5)$$

- Equivalent force of the n^{th} mode:

$$P_n(t) = P \int_0^L \delta(x-ct) \phi_n(t) dt = P \phi(ct) = P \sin\left(\frac{n\pi ct}{L}\right) = P \sin\left(n\pi \frac{t}{t_d}\right) \quad (6)$$

For the calculation of the equivalent force the properties of the Dirac function were used (see, for instance what is reported in [5]). It can therefore be seen that the equivalent force is a harmonic with angular frequency $\omega_{Dn} = \frac{n\pi}{t_d}$.

At this point in time, the problem, for each single mode, leads to the calculation of the response of a simple oscillator stressed by a harmonic forcing with frequency reported in the statement (6). The result is the following:

$$M_n \ddot{q}_n(t) + K_n q_n(t) = P \sin(\omega_{Dn} t) \quad (7)$$

The solution of the equation (7) can be obtained as following (CHOPRA [9]):

$$q_n(t) = \frac{P}{K_n} \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_{Dn}}{\omega_n}\right)^2} \left(\sin(\omega_{Dn} t) - \frac{\omega_{Dn}}{\omega_n} \sin(\omega_n t) \right) \quad (8)$$

That making explicit the variables becomes:

$$q_n(t) = \frac{2P}{\mu L \omega_n^2} \frac{1}{1 - \left(\frac{n\pi c}{L \omega_n}\right)^2} \left(\sin\left(n\pi \frac{t}{t_d}\right) - \frac{n\pi c}{L \omega_n} \sin(\omega_n t) \right) \quad (9)$$

The above equations, one for each mode and for infinite numbers according to the equation (2), link the variables related to the moving system (magnitude of force and speed) with those relevant to the beam (mass, flexural stiffness, length) and determine its response by the following modal re-composition:

$$v(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(n\pi \frac{x}{L}\right) q_n(t) \quad (10)$$

If the modal equation is applied for $x = L/2$, it is possible to obtain:

$$\phi_n\left(\frac{L}{2}\right) = \sin\left(n\frac{\pi}{2}\right) = \begin{cases} 0 & \text{per } n = 2i \\ +1 & \text{per } n = 1 + 4i \\ -1 & \text{per } n = 3 + 4i \end{cases} \quad (11)$$

where "i" is a positive integer.

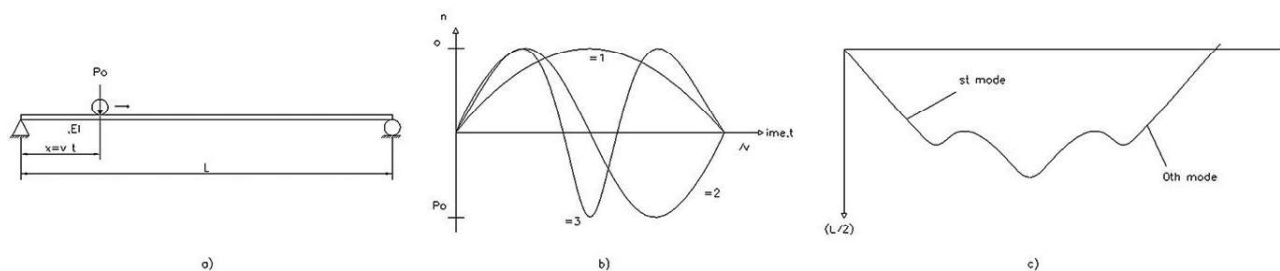


Fig. 3 – (a) Schema di riferimento di forza viaggiante su trave elastica; (b) Si mostra la decomposizione modale della forza viaggiante, per l' n -esimo modo consiste in n mezzi cicli di forzante sinusoidale; (c) Viene mostrato come la risposta calcolata considerando il solo modo fondamentale o i primi 10 modi sia praticamente coincidente.

Fig. 3 – (a) Scheme of traveling force on the elastic beam; (b) The modal decomposition of the traveling force is shown, for the n^{th} mode it consists of n half cycles of sinusoidal forcing; (c) It is shown how the final results obtained considering the fundamental mode only and the one utilizing the first 10 modes, respectively, are almost coinciding.

dove “ i ” è un numero intero positivo.

Si noti che tutti i contributi dei modi pari sono ininfluenti sulla risposta in mezzzeria mentre, potendosi trascurare i contributi dei modi superiori, si ottiene una ottima approssimazione utilizzando solo il primo modo di vibrazione. Difatti, come mostrato schematicamente in Fig. 3 (si veda anche A.K. CHOPRA [9]), l'aumento del numero di modi non conduce a sensibili variazioni della risposta rispetto a quella calcolata per il solo primo modo.

È possibile per il primo modo dare un'interpretazione fisica immediata per il parametro Lagrangiano q assumendo il significato dello spostamento in mezzzeria in quanto:

$$v\left(\frac{L}{2}, t\right) = \sin\left(\frac{\pi \frac{L}{2} 1}{L}\right) q(t) = q(t) \quad (12)$$

$$v\left(\frac{L}{2}, t\right) = \frac{2P}{\mu L \omega_n^2} \frac{1}{1 - \left(\frac{\pi c}{L \omega_n}\right)^2} \left(\sin\left(\frac{\pi c}{L} t\right) - \frac{\pi c}{L \omega_n} \sin(\omega_n t) \right) \quad (13)$$

In riferimento a quanto già esplicitato in precedenza, la forza viaggiante rappresenta un treno in moto e la trave rappresenta il ponte. Avendo a disposizione un accelerometro in un riferimento solidale al treno sarebbe possibile registrare istante per istante le accelerazioni verticali definite $a_v(t)$. La misura dell'accelerazione all'istante t corrisponde all'accelerazione sperimentata dal ponte all'ascissa $x = ct$ e quindi:

$$\ddot{v}(ct, t) = a_v(t) = \sin\left(\pi \frac{ct}{L}\right) \ddot{v}\left(\frac{L}{2}, t\right) \quad (14)$$

Ossia, esplicitando in termini di accelerazione in mezzzeria del ponte si ottiene:

$$\ddot{v}\left(\frac{L}{2}, t\right) = \frac{a_v(t)}{\sin\left(\frac{\pi ct}{L}\right)} \quad (15)$$

Facendo uso della espressione ricavata per gli spostamenti si ottiene:

It is worth noting that all the contributions of even modes are irrelevant to the response at the centerline, while, since the contributions of the higher modes can be neglected an excellent approximation is obtained by using the first vibration mode only. In fact, as schematically shown in Fig. 3 (see also CHOPRA [9]), the increasing related to the number of modes does not lead to significant variations in the response compared to that calculated for just the first mode.

It is possible for the first mode to put an immediate physical interpretation on the Lagrangian parameter by assuming the meaning of the displacement in the centerline:

$$v\left(\frac{L}{2}, t\right) = \sin\left(\frac{\pi \frac{L}{2} 1}{L}\right) q(t) = q(t) \quad (12)$$

$$v\left(\frac{L}{2}, t\right) = \frac{2P}{\mu L \omega_n^2} \frac{1}{1 - \left(\frac{\pi c}{L \omega_n}\right)^2} \left(\sin\left(\frac{\pi c}{L} t\right) - \frac{\pi c}{L \omega_n} \sin(\omega_n t) \right) \quad (13)$$

According to what has been already explained, the traveling force and the beam represent a moving train and the bridge respectively. Having an accelerometer in a reference system integral to the train, it would be possible to record moment by moment the vertical accelerations defined as $a_v(t)$. The acceleration at time t corresponds to the acceleration experienced by the bridge on point $x = ct$ and therefore:

$$\ddot{v}(ct, t) = a_v(t) = \sin\left(\pi \frac{ct}{L}\right) \ddot{v}\left(\frac{L}{2}, t\right) \quad (14)$$

or rather by applying acceleration at the midpoint of the bridge it is possible to obtain:

$$\ddot{v}\left(\frac{L}{2}, t\right) = \frac{a_v(t)}{\sin\left(\frac{\pi ct}{L}\right)} \quad (15)$$

Utilizing the expression obtained for the displacements it is possible to achieve:

$$\frac{a_v(t)}{\sin\left(\frac{\pi ct}{L}\right)} = -\frac{\pi c}{L} \frac{2P}{\mu L \omega_n^2} \frac{1}{1 - \left(\frac{\pi c}{L \omega_n}\right)^2} \left(\frac{\pi c}{L} \sin\left(\frac{\pi c}{L} t\right) - \omega_n \sin(\omega_n t) \right) \quad (16)$$

$$\frac{a_v(t)}{\sin\left(\frac{\pi ct}{L}\right)} = -\frac{\pi c}{L} \frac{2P}{\mu L \omega_n^2} \frac{1}{1 - \left(\frac{\pi c}{L \omega_n}\right)^2} \left(\frac{\pi c}{L} \sin\left(\frac{\pi c}{L} t\right) - \omega_n \sin(\omega_n t) \right) \quad (16)$$

Ovvero

$$a_v(t) = -\frac{\pi c}{L} \frac{2P}{\mu L \omega_n^2} \frac{1}{1 - \left(\frac{\pi c}{L \omega_n}\right)^2} \left(\frac{\pi c}{L} \sin^2\left(\frac{\pi c}{L} t\right) - \omega_n \sin(\omega_n t) \sin\left(\frac{\pi ct}{L}\right) \right) \quad (17)$$

L'equazione (17) è valida istante per istante durante il passaggio del treno sul ponte. Si supponga adesso di avere a disposizione i dati di massa e velocità di transito del treno nonché sia noto o si possa ricavare mediante l'analisi delle vibrazioni del sistema la lunghezza del ponte (sicché sia anche identificato l'intervallo di validità della equazione (17)); le uniche due incognite sarebbero quindi la frequenza e la massa del ponte. Si immagini di ricavare queste grandezze mediante le registrazioni $\alpha_v(t)$ effettuate dal passaggio del treno. Questo vorrebbe dire che ad ogni passaggio di un generico treno su un ponte si potrebbero determinare i relativi parametri fondamentali della risposta e tenerli monitorati.

In linea teorica quanto sopra effettuato permette di avere un monitoraggio continuo della risposta di un ponte determinandone i suoi parametri di rigidità salienti nonché la storia temporale della sua risposta. Come intuitibile e ampiamente descritto in letteratura (vedasi, ad esempio, G. BUDA *et al.* [10]) la presenza di un danno in una trave rettilinea può essere interpretato come una diminuzione delle caratteristiche fisiche e geometriche della sezione trasversale in un tratto di trave di ampiezza finita. Per rimanere in ambito di applicazione all'ingegneria ferroviaria sono già noti metodi per la correlazione tra danno dell'infrastruttura e risposta. Si veda ad esempio BRUNER *et al.* [21], in cui gli autori propongono un modello teorico di armamento ferroviario e ricavano un indice di affaticamento sulla base di considerazioni analitiche energetiche e su evidenze sperimentali dello stato della via.

Il monitoraggio continuo della caratteristica di rigidità del ponte e della sua massa potrebbe permettere l'osservazione della sua evoluzione temporale e prevedere quando questa cominci a manifestare dei pericolosi segnali di deriva o, semplicemente, rilevare quando la funzionalità del sistema diminuisce e programmare un *check up* approfondito.

L'equazione (17) rimane comunque valida quando ad essere registrate siano le accelerazioni verticali nella mezzera del ponte al passaggio di un treno di caratteristiche note. Tuttavia, in questo caso, bisogna fare un ragionamento di convenienza. Poiché i ponti da monitorare sono migliaia, in teoria si avrebbe bisogno di migliaia di strumenti di misura dislocati sui vari ponti includendo tutto quello che deriverebbe dal punto di vista dell'impegno organizzativo. Nel caso invece del treno in moto, un solo sistema di strumenti installato sul treno stesso potrebbe permettere il monitoraggio di una moltitudine di strutture, ossia tutte quelle attraversate.

with simple calculation it is possible to get

$$a_v(t) = -\frac{\pi c}{L} \frac{2P}{\mu L \omega_n^2} \frac{1}{1 - \left(\frac{\pi c}{L \omega_n}\right)^2} \left(\frac{\pi c}{L} \sin^2\left(\frac{\pi c}{L} t\right) - \omega_n \sin(\omega_n t) \sin\left(\frac{\pi ct}{L}\right) \right) \quad (17)$$

The equation (17) is valid moment by moment while the train is passing on the bridge. Now, supposing that the speed and mass of the train are known and the length of the bridge is also given or can be obtained by analyzing the vibrations of the system (identifying in this way the validity interval of the equation (17)); the only two unknowns variables would therefore be the frequency and the mass of the bridge. Assuming to obtain these quantities using the $\alpha_v(t)$ measurements recorded at each passage of the train. This would mean that with each passage of a train on a bridge the relative fundamental parameters of the response could be determined, monitored, and stored.

In theory, the aforementioned procedure allows the possibility to have a continuous monitoring of the response of a bridge determining its salient stiffness parameters and the temporal history of its response. As it is possible to imagine and as widely described in the literature (see, for example, BUDA *et al.* [10]) the presence of a damage in a straight beam can be interpreted as a decrease of the physical and geometric characteristics of the cross section in a portion of finite length of the beam. As a more pertinent example, referring to the railway engineering, many methods are already known where a correlation between the status of the tracks and the measured parameters of the motion is quantified. For example, BRUNER *et al.* [21], propose a mathematical model of the railway infrastructure on which they defined a damage index based both on energetic consideration and measured parameters of the tracks.

The continuous monitoring of the stiffness features of the bridge and its mass could allow the observation of its temporal evolution and predict when it will start showing dangerous drift signals or simply to detect when the functionality of the system decreases and, if necessary, to perform a rigorous revision.

The equation (17) is valid when a train with known parameters passes over the bridge and the vertical accelerations in the centerline of the bridge are recorded. However, in this case an argument of convenience must be offered. Since the bridges that have to be monitored are thousands, theoretically it would be required thousands of measuring instruments located on the various bridges, considering also all the efforts that would derive from an organizational perspective. In the case of a train moving in line, with just one system of instruments installed onboard, it would be possible to monitor a multitude of structures that are crossed by the train during its route.

The example given above allows understanding how it is possible, based on theories of physics, to correlate the recordings performed on board with precise structural parameters related to the infrastructure crossed. In fact, it legitimizes the rather intuitive consideration that, from the sole analysis of the behaviour of the vehicle, a hypothetical

L'esempio appena esposto permette di comprendere come si possa, principi fisici alla mano, correlare delle registrazioni effettuate a bordo veicolo con dei parametri strutturali precisi legati all'infrastruttura attraversata. Di fatto, legittima la alquanto intuitiva considerazione che, dalla sola analisi del comportamento del veicolo, un ipotetico macchinista possa dare un giudizio immediato sullo stato di salute della via attraversata.

È tuttavia intuitivo che, volendo applicare la metodologia non solo ad un esercizio teorico, ma anche alla realtà dei treni circolanti sulle infrastrutture, il modello matematico dovrà essere necessariamente più complesso e le variabili misurate dovranno essere scelte in maniera mirata per cogliere il più possibile gli aspetti salienti che determinino o forniscano informazioni sullo stato di salute dell'infrastruttura.

Allo scopo di meglio illustrare l'onere di un'analisi del sistema reale, ossia un sistema interattivo treno-binario-ponte, volendone comprendere anche i limiti, è necessario individuare in maniera più rigorosa quali siano le variabili in gioco nel problema fisico-matematico del calcolo della risposta di un treno in movimento su un ponte. Volendo inquadrare il problema nella sua interezza, si faccia riferimento alla Fig. 4 [5]:

driver can give an immediate judgment on the state of health of the bridge crossed.

It is however intuitive that, wanting to apply the methodology not just to a theoretical exercise, but to real trains circulating on the infrastructures, the mathematical model necessarily has to be more complex and the measured variables must be chosen in a targeted manner to capture the aspects that, in the most effective way, provide information about the health status of the infrastructure.

With the aim of better illustrate the difficulties and the limits concerning the analysis applied to a real interactive system train-bridge-railway structure, it is necessary to identify in a more rigorous way the variables involved in the physical-mathematical problem of the calculation of the response of a train moving on a bridge. To consider the problem in its entirety, it possible to refer to Fig. 4 [5].

Having fixed x so that the origin coincides with the starting point of the bridge, the mathematical model able to reproduce the railway bridge is a system of elastic beams with distributed mass $\mu_i(x)$, stiffness $EI_i(x)$, and with damping proportional to the speed of vibration (ω_{bi}) in which the subscript i represents the span whose total number is I . The vertical deflection functions $v_i(x,t)$ is unknown.

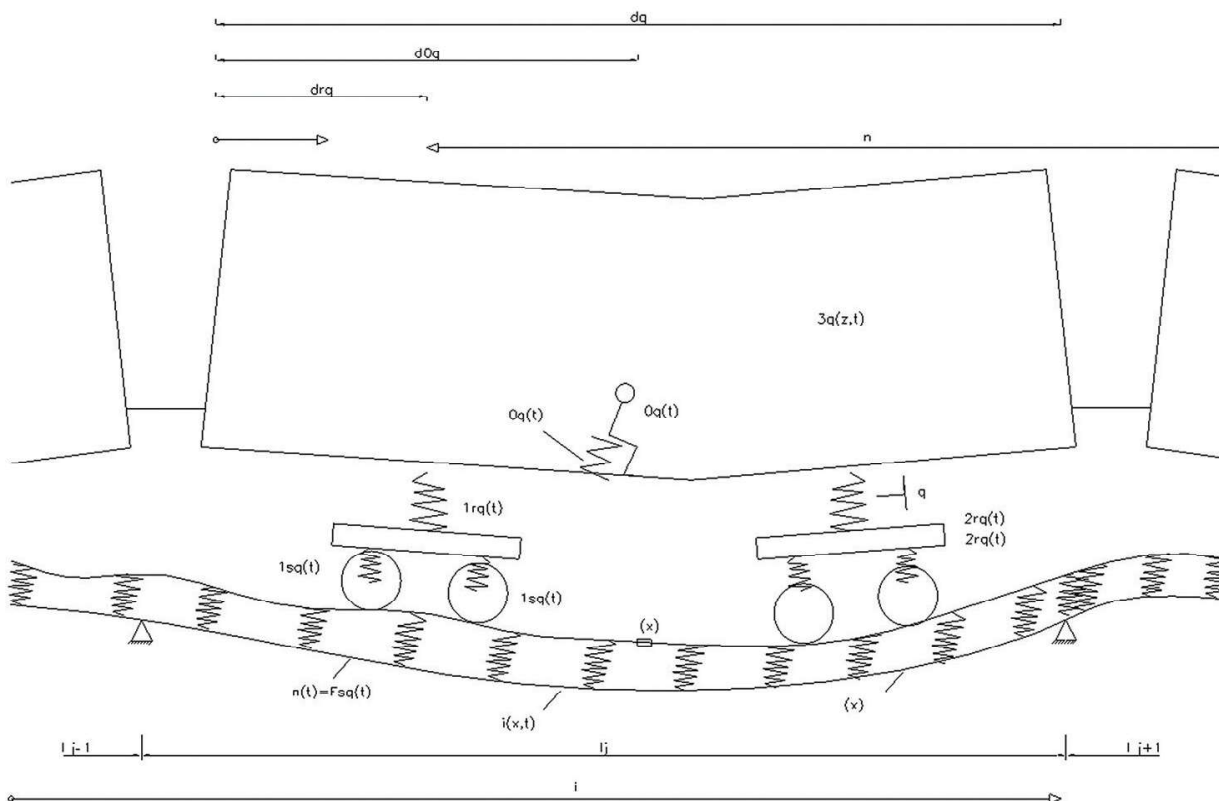


Fig. 4 – Rappresentazione del modello matematico di un treno in moto su un ponte ferroviario.

Fig. 4 – Representation of the mathematical model of a moving train on a railway bridge.

Fissata un'ascissa x con origine il punto di inizio di attraversamento del ponte, l'equivalente matematico del ponte ferroviario è un sistema di travi elastiche a massa $\mu_i(x)$ e rigidezza $EI_i(x)$ distribuita con smorzamento proporzionale alla velocità di vibrazione (ω_{bi}), in cui il pedice rappresenta la campata il cui numero totale è I . Le funzioni deflessione verticale $v_i(x,t)$ rappresentano l'incognita.

L'impalcato che sostiene l'armamento ferroviario è modellato con una distribuzione variabile di molle elastiche che simulano la variabilità di rigidezza offerta al convoglio a seconda della distanza dal traverso (Fig. 5) e dalla posizione in cui esso si muove. Una tipica equazione (FRYBA [6]) per la distribuzione di molle è la seguente:

$$k(\xi) = k_1 + k_2 \cos\left(2\pi \frac{\xi}{l_0}\right) \text{ con } 0 \leq \xi \leq l_0 \quad (18)$$

Rifacendosi al modello di riferimento sia quindi $k_i(x)$ la distribuzione di molle che rappresenta l'impalcato per la singola campata e $r_i(x)$ funzione che descrive le irregolarità del tracciato. Nella modellazione dell'impalcato si dovrebbe tenere in conto anche dell'effetto del ballast. Anche se non conduce a una soluzione rigorosa, il ballast potrebbe essere modellato come un ulteriore layer elastico di rigidezza costante ($k_2 = 0$) nell'equazione (18) che va opportunamente a sommarsi alla rigidezza offerta dall'impalcato (per modellazioni alternative si veda ad esempio DESAI et al. [11] oppure BRUNER et al. [21]).

La modellazione del veicolo ferroviario viene effettuata per singolo vagone mediante l'introduzione di tre sistemi dinamici interagenti tra di essi, la cassa, i carrelli e gli assili della sala montata, cui può essere aggiunto un ulteriore elemento vibrante all'interno della cassa che può essere, ad esempio, un passeggero (Fig. 4).

La cassa del q^{mo} vagone ferroviario, di lunghezza d_q , è modellata, in un sistema di riferimento locale z con origine l'inizio sinistro del vagone, come una trave a massa ed elasticità distribuita che, assunte costanti di densità rispettivamente μ_{3q} e $E_{3q} I_{3q}$, poggia sui due carrelli mediante molle elasto-plastiche di costante K_{2rq} . Incognita è la funzione $v_{3q}(z,t)$. I carrelli, ciascuno posto all'ascissa d_{rq} , sono modellati come masse rigide m_{2rq} con momento di inerzia I_{2rq} con il pedice r di valore 1 o 2, con due gradi di libertà incogniti, il movimento verticale medio $v_{2rq}(t)$ e la rotazione $\eta_{2rq}(t)$. Essi sono connessi alla cassa superiore mediante il sistema di molle già menzionato e inferiormente agli assili rappresentati come masse m_{1rsq} (con s riferito all'asse) a loro volta connesse all'impalcato con un sistema di molle di rigidezza K_{1sq} .

Il passeggero, posto all'ascissa d_{0q} , descritto come una massa m_{0q} con grado di libertà verticale $v_{0q}(t)$, viene sorretto da un sistema elasto-plastico K_{0q} .

Per fissare globalmente la posizione del treno si utilizza la coordinata del primo asse dalla sinistra del treno $u(t)$ (risultando $u(t) = c t$ per velocità costante pari a c) e la distanza d_n che identifica la distanza dell' n -esimo asse

The bridge supporting the railway structure is modeled with a variable distribution of elastic springs that simulate the variability of rigidity offered to the train depending on the distance from the crosspiece (Fig. 5) and the transversal position in which it moves. A typical equation (FRYBA [6]) for the distribution of springs can be obtained as following:

$$k(\xi) = k_1 + k_2 \cos\left(2\pi \frac{\xi}{l_0}\right) \text{ con } 0 \leq \xi \leq l_0 \quad (18)$$

Referring to the model above, let $k_i(x)$ be the distribution of springs that represents the bridge for the single span, while $r_i(x)$ is the function that describes the irregularities of the layout. In the modeling of the bridge the effect of the ballast should also be taken into account. Even if it does not lead to an exact solution, the ballast could be modeled as an additional elastic layer of constant stiffness ($k_2 = 0$) in the equation (18) that appropriately adds to the stiffness offered by the bridge (for alternative modeling see for example DESAI et al. [11] or BRUNER et al. [21]).

The railway vehicle is modeled by a single wagon by introducing three dynamic systems interacting together, the frame of the wagon, the bogies, and the axles of the wheelsets. An additional vibrating element can also be added inside the frame (e.g. a passenger) (Fig. 4).

The frame of railway q^{mo} wagon, of length d_q , is modeled as a simply supported beam with distributed mass and elasticity. The densities of mass and elasticity are constant and respectively μ_{3q} and $E_{3q} I_{3q}$. The beam rests on the two supports by means of elasto-plastic springs of constant K_{2rq} in a local reference system z with the origin of the coordinates located on the starting point of the wagon from the left. The function $v_{3q}(z,t)$ is unknown. The bogies, each placed at the abscissa d_{rq} are modeled as rigid masses m_{2rq} with moment of inertia I_{2rq} (the subscript r can be 1 or 2), two unknown degrees of freedom, the average vertical displacement $v_{2rq}(t)$ and the rotation $\eta_{2rq}(t)$. They are connect-

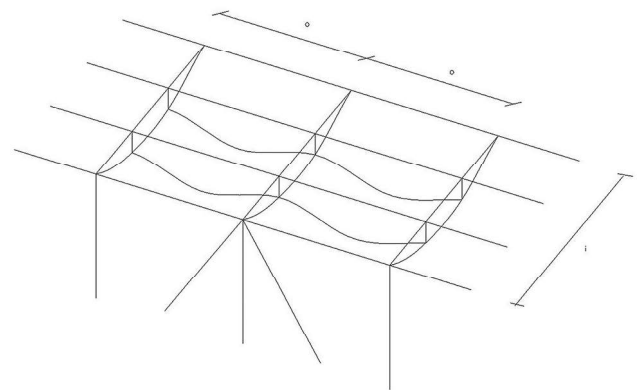


Fig. 5 - Deformabilità locale dell'impalcato determinata dalla distanza dai traversi.

Fig. 5 - Local deformability of the bridge determined by the distance from the beams.

dal primo a sinistra per cui la relativa ascissa può esprimersi come $x_n = u(t) - d_n$.

Le funzioni incognite sono quindi le traslazioni (considerate positive verso il basso): $v_i(x, t)$, $v_{3q}(z, t)$, $v_{2rq}(t)$, $\eta_{2rq}(t)$, $v_{1sq}(t)$, $v_{0q}(t)$.

Per ogni funzione incognita è possibile scrivere la relativa equazione differenziale adottando il principio di D'Alembert dell'equilibrio dinamico:

$$-m_{0q} \ddot{v}_{0q}(t) - K_{0q}(t) = 0 \quad (19)$$

Il termine $K_{0q}(t) = k_{0q} [v_{0q}(t) - v_{3q}(d_{0q}, t)] + B_{0q}$ è una notazione compatta per la forza elastoplastica che si origina dall'interazione del moto del passeggero e del moto della carrozza ferroviaria.

Il vagone ferroviario, identificato da una trave alla Eulero-Bernoulli, ha equazione:

$$E_{3q} I_{3q} v_{3q}^{IV}(z, t) + \mu_{3q} \ddot{v}_{3q}(z, t) + 2 \mu_{3q} \omega_{b3q} \dot{v}_{3q}(z, t) = \delta(z - d_{0q}) K_{0q}(t) - \sum_{r=1}^2 \delta(z - d_{rq}) K_{2rq}(t), q = 1, 2, \dots, Q \quad (20)$$

Con $\delta(x)$ funzione di Dirac, e $K_{2rq}(t)$ la forza visco-elastica tra vagone ferroviario e carrello espressa, in analogia a quanto fatto precedentemente, come:

$$K_{2rq}(t) = k_{2q} [v_{3q}(d_{rq}, t) - v_{2rq}(t)] + B_q \quad (21)$$

Per i carrelli ferroviari si ottengono due equazioni per lo spostamento verticale e per la rotazione:

$$-m_{2rq} \ddot{v}_{2rq}(t) + K_{2rq}(t) - \sum_{s=1}^S K_{1sq}(t) = 0 \quad (22)$$

$$-I_{rq} \ddot{\eta}_{rq}(t) + b_q \sum_{s=1}^S (-1)^s K_{1sq}(t) = 0 \quad (23)$$

$$\text{dove } r = \begin{cases} 1 \\ 2 \end{cases} \text{ per } s = \begin{cases} 1, 2 \\ 3, 4 \end{cases} \text{ e } q = 1, 2, \dots, Q$$

La forza visco elastica tra gli assili e i carrelli è descritta come segue:

$$K_{1sq}(t) = k_{1q} [v_{2rq}(t) - (-1)^s b_q \eta_{rq}(t) - v_{1sq}(t)] \quad (24)$$

Il moto del singolo assile è pari a:

$$-m_{1sq} \ddot{v}_{1sq}(t) + K_{1sq}(t) - F_{sq}(t) = 0, s = 1, 2, 3, 4; q = 1, 2, \dots, Q \quad (25)$$

Dove la forza ricevuta dall'assile mediante l'impalcato è:

$$F_{sq}(t) = F_n(t) = k(x_n) [v_{1sq}(t) - v_i(x_n, t) - r(x_n)] + B \quad (26)$$

L'ultima equazione manifesta l'interazione tra il veicolo e il ponte ferroviario connessi tra di essi mediante un layer elastico e irregolarità, incorporando una componente viscosa B.

Infine, il ponte ferroviario è caratterizzato dall'equazione differenziale della trave alla Eulero-Bernoulli:

ed to the upper wagon through the aforementioned springs system and below to the axles that are represented as masses m_{1rsq} (with s referring to the axis), which are in turn connected to the bridge with a system of springs characterized by rigidity K_{1sq} .

The passenger located at the d_{0q} described as a mass m_{0q} with vertical degree of freedom $v_{0q}(t)$ is supported by an elastoplastic system K_{0q} .

To fix the train position globally we use the coordinate of the first axis from the left of the train $u(t)$ (being $u(t) = ct$ for constant speed equals to c) and the distance d_n that identifies the gap of the n^{th} axis from the first to the left for which the relative position can be expressed as $x_n = u(t) - d_n$.

The unknown functions are therefore (considered positive downwards): $v_i(x, t)$, $v_{3q}(z, t)$, $v_{2rq}(t)$, $\eta_{2rq}(t)$, $v_{1sq}(t)$, $v_{0q}(t)$.

For each unknown function it is possible to write the relative differential equation by adopting the D'Alembert principle of dynamic equilibrium:

$$-m_{0q} \ddot{v}_{0q}(t) - K_{0q}(t) = 0 \quad (19)$$

The term $K_{0q}(t) = k_{0q} [v_{0q}(t) - v_{3q}(d_{0q}, t)] + B_{0q}$ is a compact notation for the elastoplastic force originating from the interaction of the motion of the passenger and the motion of the railway carriage.

The railway wagon identified by an Euler-Bernoulli beam has the following equation:

$$E_{3q} I_{3q} v_{3q}^{IV}(z, t) + \mu_{3q} \ddot{v}_{3q}(z, t) + 2 \mu_{3q} \omega_{b3q} \dot{v}_{3q}(z, t) = \delta(z - d_{0q}) K_{0q}(t) - \sum_{r=1}^2 \delta(z - d_{rq}) K_{2rq}(t), q = 1, 2, \dots, Q \quad (20)$$

Considering $\delta(x)$ as a Dirac function, and $K_{2rq}(t)$ which is the visco-elastic force between railway wagon and bogies expressed in analogy to what previously mentioned:

$$K_{2rq}(t) = k_{2q} [v_{3q}(d_{rq}, t) - v_{2rq}(t)] + B_q \quad (21)$$

For the bogies, two equations for vertical and rotation displacement are obtained as following:

$$-m_{2rq} \ddot{v}_{2rq}(t) + K_{2rq}(t) - \sum_{s=1}^S K_{1sq}(t) = 0 \quad (22)$$

$$-I_{rq} \ddot{\eta}_{rq}(t) + b_q \sum_{s=1}^S (-1)^s K_{1sq}(t) = 0 \quad (23)$$

$$\text{where } r = \begin{cases} 1 \\ 2 \end{cases} \text{ per } s = \begin{cases} 1, 2 \\ 3, 4 \end{cases} \text{ e } q = 1, 2, \dots, Q$$

The viscoelastic force between the axles and the bogies is described as following

$$K_{1sq}(t) = k_{1q} [v_{2rq}(t) - (-1)^s b_q \eta_{rq}(t) - v_{1sq}(t)] \quad (24)$$

The motion of the single axle is equal to:

$$-m_{1sq} \ddot{v}_{1sq}(t) + K_{1sq}(t) - F_{sq}(t) = 0, s = 1, 2, 3, 4; q = 1, 2, \dots, Q \quad (25)$$

$$E_i \frac{\partial^2}{\partial x^2} [I_i(x) v_i''(x, t)] + \mu_i(x) \ddot{v}_i(x, t) + 2 \mu_i(x) \omega_{bi} \dot{v}_i(x, t) = \sum_{n=1}^N \varepsilon_{in} \delta(x - x_n) [F_q + F_n(t)], i = 1, 2, \dots, I \quad (27)$$

dove F_q è la forza statica per asse applicata dal veicolo.

Ogni funzione $v_i(x, t)$ ha dominio di validità $L_{i-1} \leq x \leq L_i$ in cui ε_{in} ha valore unitario se $L_{i-1} \leq x_n \leq L_i$. L'equazione sopra vale solo se $F_q + F_n(t) \geq 0$, ossia se il veicolo mantiene il contatto con il terreno viceversa deve essere sostituita con 0.

Le condizioni al contorno note sono:

- ponte:

$$v_i(x, 0) = v_{i0}(x); \dot{v}_i(x, 0) = \dot{v}_{i0}(x) \quad (28)$$

- vagone:

$$v_{3q}''(0, t) = v_{3q}''(d_q, t) = v_{3q}'''(0, t) = v_{3q}'''(d_q, t) = 0$$

$$v_{3q}(z, 0) = v_{3q0}(z) \text{ e } \dot{v}_{3q0}(z, 0) = \dot{v}_{3q0}(z) \quad (29)$$

- Carrello, assili, passeggero (si assume che il moto vibratorio dei vari componenti del treno prima dell'ingresso sul ponte sia noto):

$$\begin{aligned} v_{0q}(0) &= v_{0q0} \text{ and } \dot{v}_{0q}(0) = \dot{v}_{0q0} \\ v_{1sq}(0) &= v_{1sq0} \text{ and } \dot{v}_{1sq}(0) = \dot{v}_{1sq0} \\ v_{2rq}(0) &= v_{2rq0} \text{ and } \dot{v}_{2rq}(0) = \dot{v}_{2rq0} \\ \eta_{0q}(0) &= \eta_{0q0} \text{ and } \dot{\eta}_{0q}(0) = \dot{\eta}_{0q0} \end{aligned} \quad (30)$$

Il sistema di equazioni differenziali descritto può essere risolto mediante un qualsiasi metodo dell'analisi numerica, tuttavia l'onere pratico-computazionale associato assume rilevanza tale da rendersi effettivamente applicabile solo per alcuni casi. Difatti, il numero totale di equazioni è pari a $I + 6Q + N$, per cui considerando un treno di 15 vagoni ($Q=15$) a 4 assi ($N=60$) che attraversano un ponte di 4 campate ($I=4$) si ottiene un sistema di 154 equazioni differenziali accoppiate che ben rappresentano l'implicito onere computazionale. La risoluzione, inoltre, è inficiata dalla complessità concernente l'identificazione dei parametri meccanici relativi alle condizioni al contorno quali ad esempio la rigidità da assegnare all'impalcato, oppure la conoscenza e la disponibilità di dati relativi a ogni ponte costruito, allo stato di salute dei carrelli e relativa qualità costruttiva, ecc.

Ai fini della definizione delle difficoltà aggiuntive, si ritiene necessario, tra l'altro, porre l'accento sul fatto che il modello sopra proposto, pur essendo concettualmente valido, contiene esso stesso delle importanti semplificazioni connaturate con il sistema analizzato che in taluni casi rivestono importanza preponderante nella definizione della risposta strutturale quali ad esempio la circolazione in curva, la dinamica riguardante la discontinuità spalla/impalcato/pila ecc. Inoltre, il set di equazioni proposto è atto a descrivere la dinamica del sistema ma, nell'ottica della predizione del danno a partire dalle misurazioni, è doveroso ricordare che tutta una serie di collas-

Where the force applied by the axle through the bridge is:

$$F_{sq}(t) = F_n(t) = k(x_n) [v_{1sq}(t) - v_i(x_n, t) - r(x_n)] + B \quad (26)$$

The last equation demonstrates the interaction between the vehicle and the railway bridge connected by means of an elastic layer and irregularity incorporating a viscous component B .

Finally, the railway bridge is characterized by the differential equation of the Euler-Bernoulli beam:

$$E_i \frac{\partial^2}{\partial x^2} [I_i(x) v_i''(x, t)] + \mu_i(x) \ddot{v}_i(x, t) + 2 \mu_i(x) \omega_{bi} \dot{v}_i(x, t) = \sum_{n=1}^N \varepsilon_{in} \delta(x - x_n) [F_q + F_n(t)], i = 1, 2, \dots, I \quad (27)$$

where F_q is the static force applied by the vehicle.

Each function $v_i(x, t)$ holds true for $L_{i-1} \leq x \leq L_i$ where ε_{in} has a unit value if $L_{i-1} \leq x_n \leq L_i$. The above equation holds true only if $F_q + F_n(t) \geq 0$, (i.e. if the vehicle maintains contact with the ground or vice versa it must be replaced with 0).

The known boundary conditions are:

- bridge:

$$v_i(x, 0) = v_{i0}(x); \dot{v}_i(x, 0) = \dot{v}_{i0}(x) \quad (28)$$

- wagon:

$$v_{3q}''(0, t) = v_{3q}''(d_q, t) = v_{3q}'''(0, t) = v_{3q}'''(d_q, t) = 0$$

$$v_{3q}(z, 0) = v_{3q0}(z) \text{ e } \dot{v}_{3q0}(z, 0) = \dot{v}_{3q0}(z) \quad (29)$$

- bogies, axles and passenger (it is assumed that the vibrational motion of the different components of the train before entering the bridge is known):

$$\begin{aligned} v_{0q}(0) &= v_{0q0} \text{ and } \dot{v}_{0q}(0) = \dot{v}_{0q0} \\ v_{1sq}(0) &= v_{1sq0} \text{ and } \dot{v}_{1sq}(0) = \dot{v}_{1sq0} \\ v_{2rq}(0) &= v_{2rq0} \text{ and } \dot{v}_{2rq}(0) = \dot{v}_{2rq0} \\ \eta_{0q}(0) &= \eta_{0q0} \text{ and } \dot{\eta}_{0q}(0) = \dot{\eta}_{0q0} \end{aligned} \quad (30)$$

The described system of differential equations can be solved by any method of numerical analysis, however, the associated practical and computational burden assumes a relevance that makes it applicable only for some cases. In fact, the total number of equations is $I + 6Q + N$, so considering a train of 15 wagons ($Q = 15$) with 4 axles ($N = 60$) crossing a 4-span bridge ($I = 4$) it will be obtained a system of 154 coupled differential equations that well represent the implicit computational burden. Furthermore, the resolution is invalidated by the complexity related to the identification of the mechanical parameters related to the boundary conditions such as the stiffness that should be assigned to the bridge, or the knowledge and availability of data relating to each bridge built, and also to the health status of bogies and relative construction quality, etc.

For the purposes of defining the additional difficulties, it is necessary to mention that the model exposed so far, even if conceptually valid, doesn't account important phe-

si, i cosiddetti collassi di tipo fragile, sopraggiungono senza che vi sia necessariamente alcuna significativa alterazione della risposta dinamica.

Ad ogni modo, il set di equazioni introdotto mette in luce la complessità intrinseca di ottenere delle soluzioni in forma chiusa, seppur sia nota la struttura dei dati di input e la struttura dei dati di output, e suggerisce che il monitoraggio dell'infrastruttura ai fini della manutenzione predittiva necessita di strategie di analisi dei dati che non possono essere solo inquadrare nella ricerca di soluzioni del set di equazioni proposto.

3. Il monitoraggio continuo dell'infrastruttura come base della manutenzione predittiva

A valle di quanto finora esposto, è necessario comprendere come sarebbe possibile procedere a livello pratico per perseguire l'obiettivo di ottenere un efficace sistema di supporto alle decisioni costruibile con una complessità e un impiego di risorse ragionevoli. Per illustrare con semplicità una strategia di applicazione reale, si ipotizzi che il monitoraggio del ponte inizi ad un tempo, trascurando il pregresso. Così facendo si procederà alla costruzione di un *data-set* statisticamente rappresentativo costituito da migliaia di campionamenti effettuati quotidianamente. Un possibile approccio consiste nell'analizzare il *data-set* mediante metodi detti "supervisionati" in cui essendo nota la struttura dei dati di *input* e di quella di *output*, mostrate dal modello sopra esposto, vengono evidenziate correlazioni e dipendenze tra le varie variabili oggetto di misura. In tal guisa, è possibile monitorare costantemente l'evoluzione delle variabili oggetto di analisi al trascorrere del tempo e dell'esercizio. L'assioma che un sistema ben conservato e integro debba mostrare una risposta stabile e perfettamente inquadrabile nel set di equazioni differenziali che governano il problema, può essere utilizzato per capire quale struttura ponte richieda di essere attenzionata grazie all'identificazione di potenziali derive dei parametri monitorati. Le variabili da monitorare per l'interpretazione del comportamento del ponte ferroviario sono tutte quelle espresse nelle equazioni sopra riportate oppure parte di esse. Chiaramente, si potrebbe pensare anche, per casi particolari, di monitorare contemporaneamente le misurazioni a bordo treno e sul ponte per l'analisi di sistemi più complessi bypassando la difficoltà di modellazione di fenomeni che intervengono nel computo come ad esempio l'effetto del *ballast*.

A latere di quanto finora esposto, esiste un'ulteriore approccio, basato sulla mera analisi dei dati che consiste nell'analizzare asetticamente, ossia senza applicazione diretta delle teorie fisico-ingegneristiche, la mole di dati registrati e procedere all'identificazione di schemi ricorrenti mediante l'utilizzo di tecniche di *Data Discovery* basate su "metodi non supervisionati" ossia metodi utilizzati per identificare relazioni e schemi ricorrenti su basi di dati multidimensionali nelle condizioni in cui non si conoscano a priori la struttura dei dati in *input* e quella attesa in *output*.

nomina like the circulation in curves, the dynamics concerning the bridge abutment/bridge/pier discontinuity, etc. Furthermore, the proposed set of equations is able to predict the dynamic of the system but, as the paper is looking to a method to predict the damage from measurements, it is necessary to mention that there are many cases of collapse, properly named brittle fracture that could happen without any appreciable variation of the dynamic response.

However, the set of equations introduced highlights the intrinsic complexity of obtaining solutions in a closed form, although the structure of the input data and the structure of the output data is known, and suggests that the monitoring of the infrastructure for the purpose of predictive maintenance requires data analysis strategies that can not only be framed in the search for solutions to the proposed set of equations.

3. Continuous monitoring of the infrastructure as a basis for predictive maintenance

According to what exposed so far, it is necessary to understand how it would be possible to proceed at a practical level to pursue the objective of obtaining an effective decision support system that can be built with a reasonable use of resources and an affordable complexity. To simply illustrate a strategy of real application, it is possible to assume that the monitoring of the bridge starts at the time, neglecting any previous information. This will lead to the construction of a statistically representative data-set consisting of thousands of samples taken daily. A possible approach is to analyze the data-set using methods called "supervised" in which the structure of the input and output data is known (see the model described above), and also correlation and dependencies are highlighted between the various variables object of measurement. In this way, it is possible to constantly monitor the evolution of the variables being analyzed as time passes and along the utilization of the infrastructure. The axiom that a well preserved and intact system must show a stable and perfectly framed response in the set of differential equations that govern the problem, can be used to understand which bridge requires attention thanks to the identification of potential drifts of the monitored parameters. The variables to be monitored for the interpretation of the behaviour of the railway bridge are all those expressed in the equations shown above or part of them. Clearly, it could be thinkable, for particular cases, to simultaneously analyze measurements both on board the train and on the bridge to handle use cases related to more complex scenarios, bypassing the difficulty of modeling phenomena involved in the calculation, such as the effect of the ballast.

In addition to what described so far, there is a further approach based on the mere analysis of the data that consists in analyzing, without the direct application of physical-engineering theories, the amount of recorded data and proceeding to the identification of recurring patterns using data discovery techniques based on "unsupervised meth-

Entrambi gli approcci concettuali esposti conducono alla massimizzazione dei risultati ottenibili dalle risorse impiegate per la misurazione dei dati, e permettono la costruzione di metodi e modelli che consentano un monitoraggio della rete continuo e probabilmente in grado di anticipare potenziali inneschi di condizioni di insuccesso del sistema.

A causa della complessità di calcolo richiesto e delle necessarie azioni di estrazione e orchestrazione delle relative condizioni al contorno provenienti da più domini eterogenei, risulta improbabile l'analisi in tempo quasi reale della risposta attesa e di quella misurata affidando il tutto alla gestione del personale tecnico preposto. La mole di dati da gestire, la complessità dei processi di estrazione e calcolo dei dati, l'intervallo temporale ristretto in cui agire, richiedono l'implementazione di una soluzione automatizzata in grado di gestire i processi in parallelo bilanciando l'ingente carico di lavoro su un *framework* IoT appositamente progettato, ed in grado di azionare un *workflow* a fronte del raggiungimento di determinati valori soglia o all'identificazione di specifici schemi ricorrenti nelle variabili di stato oggetto di analisi.

Ad ogni modo, si ritiene doveroso specificare che, seppur i *modus operandi* menzionati rappresentino una significativa evoluzione, non si può non sottolineare che, almeno rifacendosi alle conoscenze attuali, rimane comunque la necessità di affiancare a sistemi di monitoraggio della risposta dinamica anche ispezioni visive e indagini di altra natura che consentano di rilevare difettosità che possono rivelarsi drammaticamente catastrofiche senza produrre fino a poco prima del collasso alcuna significativa alterazione della risposta dinamica.

4. L'internet of things e la manutenzione predittiva dei ponti ferroviari: dall'integrazione tra sorgenti di dati eterogenee all'estrazione dell'informazione. Rappresentazione logico-funzionale

L'approccio teorico discusso nel precedente paragrafo risulta di fondamentale importanza per progettare l'architettura IoT necessaria a costruire e utilizzare un *data model* in grado di ampliare la conoscenza rispetto al fenomeno della stabilità dei treni e dei ponti e delle loro mutue interazioni nelle diverse condizioni di esercizio. Infatti, una volta individuati i sistemi di equazioni differenziali in grado di modellare la risposta del ponte, sarà necessario raccogliere ulteriori dati (es: irregolarità del profilo delle rotaie, incidenza dei cicli di isteresi dei diversi materiali durante eventi sismici pregressi, ecc.) necessari al calcolo della risposta attesa e che potrebbero essere particolarmente destabilizzanti per la marcia del treno (es: variazioni impulsive delle forze verticali sono particolarmente dannose al moto di puro rotolamento e potrebbero ridurre la stabilità del treno).

È noto che al passaggio del veicolo il ponte venga eccitato generando quindi delle vibrazioni che si ripercuote-

ods". For instance, methods used to identify recurrent relationships and patterns on multidimensional databases in conditions where the structure of the input data and the expected output are not known in advance.

Both the outlined conceptual approaches lead to the maximization of the results obtainable from the resources used for data measurement and allow the construction of methods and models that facilitate a continuous network monitoring able to anticipate potential triggers that represent the symptoms of system failures.

Because of the complexity of the calculation required and the necessary actions of extraction and orchestration of the relative boundary conditions coming from several heterogeneous domains, it is unlikely to perform in near-real time the analysis of the expected response compared to the measured one by entrusting the whole procedure to the "manual actions" of the technical personnel in charge. The amount of data to be managed, the complexity of data extraction and calculation processes and the limited time interval in which to act, require the implementation of an automated solution, which is capable to manage processes in parallel by balancing the enormous workload on a specially designed IoT framework, that will be able to operate a workflow in the face of the detection of certain threshold values or the identification of specific recurring patterns in the state variables being analyzed.

However, it is necessary to specify that, even if the mentioned modus operandi represents a significant evolution, it is important to underline that, at least referring to current knowledge, it is still necessary to add to the monitoring systems of dynamic response also other tests (i.e. visual inspections and specific investigations) that allow detecting defects that can be dramatically catastrophic even without producing any significant alteration of the dynamic response until just before the collapse.

4. The internet of things and the predictive maintenance of railway bridges: from the integration of heterogeneous data sources to the extraction of information. Logical-functional representation

The theoretical approach discussed in the previous paragraph is of fundamental importance for designing the IoT architecture necessary to build and use a data model able to broaden the knowledge with respect to the phenomenon of the stability of trains and bridges and of their mutual interactions in different conditions of exertion. In fact, once the differential equations systems able to model the bridge's response have been identified, it will be necessary to collect further data (e.g.: irregularities in the rail profile, incidence of hysteresis cycles of different materials during previous seismic events, etc.) needed to the calculation of the expected response of the bridge and that could be particularly destabilizing for the train running (e.g.: impulsive variations of the vertical forces are particularly damaging to the pure rolling motion and could reduce the stability of the train).

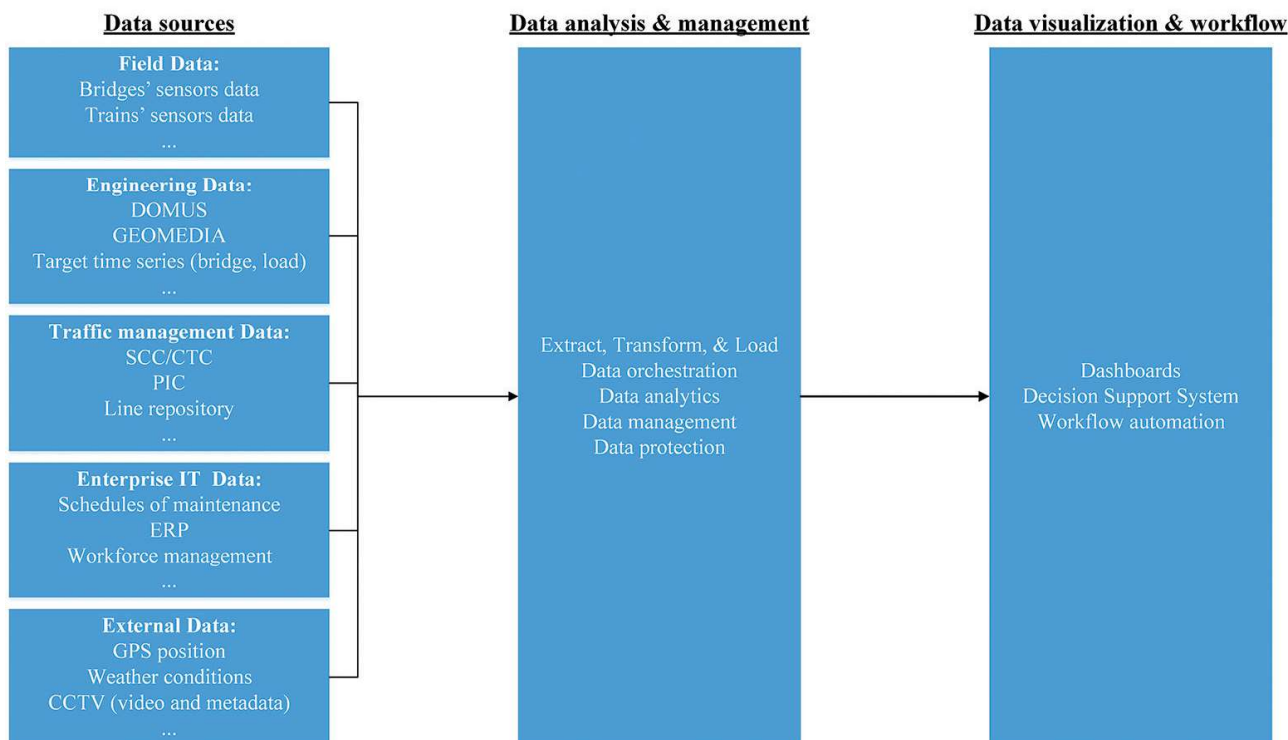
ranno in maniera continuativa sul veicolo. Da qui la necessità di integrare informazioni provenienti da bordo treno e dal ponte, utilizzando un approccio sotto-strutturale che modella questo comportamento di interazione di elevata complessità. In sostanza, come visto al paragrafo precedente, si intendono ricavare le equazioni del moto separatamente per il sottosistema ponte e per quello veicolo, e successivamente le stesse saranno oggetto di associazione e risoluzione mediante calcolo integrale [12].

Tali dati sono spesso provenienti da domini differenti ed in formati eterogenei, richiedendo quindi importanti azioni di estrazione, trasformazione e caricamento dei dati medesimi (ETL, *Extract Transform & Load*). Nel caso di specie, vi saranno almeno cinque distinti domini di dati da integrare: i dati raccolti sul campo e provenienti dai sensori del ponte e a bordo treno, i dati “ingegneristici” relativi alla progettazione del ponte e al calcolo dei parametri meccanici della risposta, i dati estratti dai sistemi di telecomando/comando remoto della circolazione, i dati provenienti da piattaforme IT tradizionali (gestione turni, storico manutenzioni, ecc.), eventuali ulteriori dati esogeni quali bollettini meteo e coordinate GPS. Lo schema logico funzionale della soluzione IoT ipotizzata è riportato in Fig. 6.

L'efficacia del paradigma proposto è funzione della capacità di integrazione delle diverse sorgenti di dati,

It is known that the train passage excites the bridge generating thus vibrations that will continuously affect the vehicle. Hence, the need to integrate information both from onboard the train and the bridge, using a sub-structural approach that models this highly complex interaction behaviour. In essence, as seen in the previous paragraph, it is possible to derive the equations of motion separately for the bridge and vehicle subsystems, and then the same will be the object of association and resolution through integral calculation [12].

Such data are often coming from different domains and in heterogeneous formats, thus requiring important extraction, transformation and loading operations of the same data (ETL, Extract Transform & Load). In this case, there will be at least five distinct data domains to be integrated: data collected in the field from the bridge and train sensors, the “engineering” data related to the bridge design and the calculation of the mechanical parameters of the response, the data extracts from remote control / remote management circulation systems, data coming from traditional IT platforms (workforce schedule management, previous maintenance data, etc.), any further exogenous data such as weather reports and GPS coordinates. The functional logic diagram of the hypothesized IoT solution is shown in Fig. 6.



(Fonte: elaborazione degli autori - Source: authors)

Fig. 6 – Schema logico-funzionale della soluzione IoT.
Fig. 6 – Logical-functional schema of the IoT solution.

spesso afferenti a domini operativi differenti, al fine di costruire un *data model* olistico in grado mettere a fattor comune basi di dati che, integrandosi, forniscano informazioni non ottenibili analizzando singolarmente i diversi silos di dati. Di seguito si riportano alcune considerazioni circa le fasi di acquisizione dei dati dalle diverse sorgenti:

a) *Dati di campo:*

In questo dominio rientrano i dati raccogliibili dai due elementi principali costituenti il sistema materiale treno-armamento-ponte e specificatamente dal Train Control & Management System (TCMS) per i rotabili, e dal *gateway* che funge da collettore dei sensori installati sul ponte. Nel primo caso, ipotizzando l'inserimento di appositi accelerometri sui carrelli e sulle casse, si potrebbero identificare gli spettri delle vibrazioni che si ripercuotono sul treno durante la risposta del ponte alla sollecitazione dinamica dovuta al proprio passaggio. Per raggiungere tale scopo, si dovrà utilizzare un'architettura costituita dai sensori a bordo treno ed un *server edge* collegato con i bus MVB ed Ethernet. Tutti i treni di ultima generazione, infatti, sono dotati di un elaboratore *ad hoc* che, da un lato si interfaccia con il TCMS per raccogliere i dati su un database locale ed analizzarli, dall'altro cura il trasferimento di segnali, contatori, ed eventi verso il sistema di terra. Un ruolo fondamentale è ricoperto dalla logica di veicolo che rappresenta la modellizzazione del rotabile in termini di sottosistemi, LRU, *failure modes*, eventi, segnali, contatori, ecc. e relative relazioni. Il sottosistema di bordo, in funzione delle regole diagnostiche implementate e della configurazione della logica di veicolo, invierà dati diagnostici verso terra attraverso due distinti canali di comunicazione:

- i. comunicazione in *near real time* (quasi in tempo reale): variabili inerenti al funzionamento di specifici apparati vengono costantemente inviati a terra attraverso protocolli *ad hoc* (per esempio XMPP (*Extensible Messaging and Presence Protocol*) o più moderni broker MQTT (*Message Queue Telemetry Transport*)), consentendo di monitorare le flotte in esercizio;
- ii. comunicazione *batch*: tutti i segnali raccolti in funzione dei vari eventi, vengono conservati e spediti ad intervalli regolari utilizzando appositi protocolli per il trasferimento di file di grosse dimensioni (per esempio FTP, *file transfer protocol*, o, anche in questo caso, più moderni broker MQTT).

Entrambi i canali sfruttano una rete VPN (*Virtual Private Network*, rete privata virtuale) adottando protocolli che provvedano a cifrare il traffico transitante sulla rete virtuale preservando l'integrità dei dati trasmessi. Tali dati verranno inviati al sottosistema di terra che è costituito da una soluzione IT convergente (cioè integrante uno strato computazionale, un database relazionale per la memorizzazione dei dati, spazio disco, e connettività), ridondata, ed utilizzabile anche in *cloud*. Tale soluzione, comunicando con il sottosi-

The effectiveness of the proposed paradigm is a function of the integration capacity of the various data sources, often belonging to different operational domains, in order to construct a holistic data model able to harmonize databases which, by integrating each other, provide information that cannot be obtained analyzing individually the different data silos. The following are some considerations about the phases of data acquisition from the different sources:

a) *Field data:*

This domain includes the data collectible from the two main elements constituting the "train-permanent way equipment-bridge" material system and specifically from the Train Control & Management System (TCMS) for rolling stock, and from the gateway that serves as the sensors collector installed on the bridge. In the first case, assuming the insertion of special accelerometers on the wagon and the bogies, the spectra of the vibrations that affect the train could be identified during the response of the bridge to the dynamic stress generated by the train passage. To achieve this, an architecture consisting of sensors on board the train and an edge server connected through MVB and Ethernet buses must be used. All the new generation trains are equipped with an ad hoc server that, on one side interfaces with the Train Control & Management System (TCMS) to collect data on a local database and analyze them, on the other hand, it takes care of the transfer of signals, counters, and events towards the on-ground subsystem. A fundamental role is played by the vehicle logic that represents the modeling of the rolling stock in terms of subsystems, LRUs, failure modes, events, signals, counters, etc. and related interrelations. The on-board subsystem, according to the diagnostic rules implemented and the configuration of the vehicle logic, will send diagnostic data to the ground through two different communication channels:

- i. *communication in near real time: variables related to the operation of specific equipment are constantly sent to the ground through ad hoc protocols (for example XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol) or more modern MQTT brokers (Message Queue Telemetry Transport)), allowing monitoring of the fleets in operation;*
- ii. *"batch" communication: all the signals collected according to the various events are stored and sent at regular time intervals using special protocols for the transfer of large files (for example FTP, file transfer protocol, or, also in this case, more modern MQTT brokers).*

Both channels exploit a VPN (Virtual Private Network) using protocols that encrypt the traffic passing through the virtual network while preserving the integrity of the transmitted data. Those data will be transmitted to the on-ground subsystem that consists of a convergent IT solution (i.e. integrating a computational layer, a relational database for data storage, disk space, and connectivity), redundant, and usable even in the cloud. This solution, communicating with the on-board subsystem, receives and stores the data coming from

stema di bordo, riceve i dati provenienti dai rotabili in linea, li rende fruibili a piattaforme IoT per l'analisi *batch*, la calibrazione e validazione di algoritmi diagnostici [1]. Il sistema di monitoraggio IoT del ponte, invece, consta di tre elementi distinti (sensori, *gateway* e piattaforma di *data analytics*) e si estende su altrettanti domini (Fig. 7): il *Machine-to-Machine domain* (M2M), il *network domain*, e l'*application domain*. Di seguito si analizzano gli elementi cardine del sistema:

- i. Sensori IoT: sono strumenti in grado di effettuare misurazioni con frequenza di campionamento definita a priori o attivabile mediante *trigger*, che saranno contestualmente inviate verso il *gateway* attraverso la M2M *area network*. Si ipotizzano, a titolo meramente esemplificativo e non esaustivo, due distinte tipologie di sensori applicate al ponte: un sensore per l'analisi vibrazionale basato su standard IEEE802.15.4, ed un sensore per la misura della temperatura basato su standard IEEE802.11b/g/n (comunemente conosciuto come Wi-Fi). Nel primo caso si avrà un accelerometro MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*) in grado di calcolare la forza per unità di massa che sarà connesso ad un microcontrollore avente il compito anche di gestire il *transceiver* di comunicazione 802.15.4. Da un punto di vista applicativo, invece, il microcontrollore acquisisce i valori dall'accelerometro, può fare operazioni banali in loco (es.: *peak-to-peak* o un *overall* su uno o più assi). Nel secondo caso, invece, avremo un sensore termico connesso a microcontrollore che gestirà, a sua volta, un *transceiver* di comunicazione Wi-Fi. A livello applicativo, invece, il microcontrollore acquisisce da sensore e può fare un processing a bordo (es.: media aritmetica, ponderata) e *detection* di eventi (es.: temperatura sopra una certa soglia).

In aggiunta ai sensori *stand-alone* discussi in precedenza, vi sono diverse altre soluzioni per il monitoraggio continuo delle opere civili. Tra le tecnologie emergenti in ambito *Structural Health Monitoring* (SHM), i sistemi di telerilevamento rappresentano uno stato dell'arte [14]. Tra le tecniche di telerilevamento più efficaci per lo SHM si cita l'Interferometria Radar Terrestre. Tale tecnica è rapidamente implementabile *in situ*, garantendo una elevata risoluzione spaziale e temporale di campionamento, misurando le frequenze proprie di vibrazione, le ampiezze di oscillazione, le forme modali, i fattori di smorzamento, ecc. Si noti quindi come tale tecnica si presti alla misurazione delle variabili di stato di ponti e viadotti, fornendo risultati del tutto paragonabili a quelli che si otterrebbero con altre tecniche "da con-

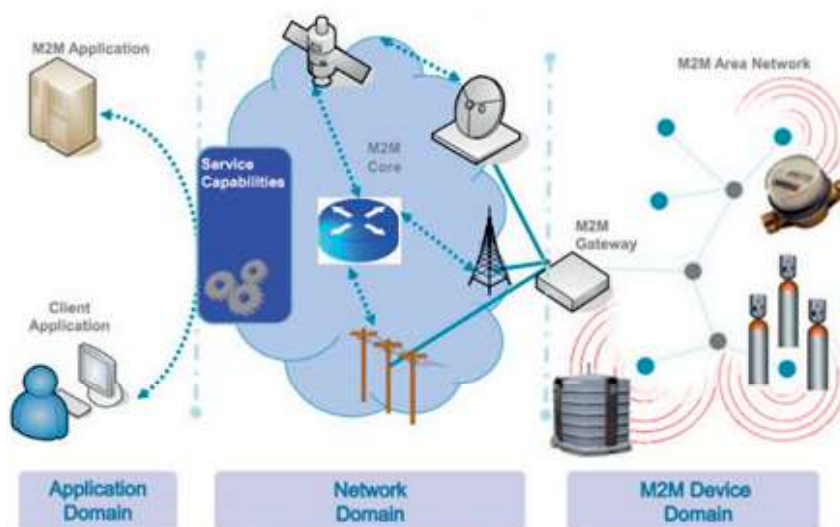


Fig. 7 – I domini caratterizzanti un sistema di monitoraggio IoT [13].

Fig. 7 – The domains characterizing an IoT monitoring system [13].

the rolling stock within the line, allows access to the various stakeholders through secure web interfaces, sends maintenance warnings and enables all phases of analysis and processing of the signals in order to identify incipient failures, also allowing the calibration and validation of diagnostic algorithms [1]. The IoT monitoring system of the bridge, on the other hand, consists of three distinct elements (sensors, gateways, and data analytics platforms) and extends over just as many domains (Fig. 7): the *Machine-to-Machine domain* (M2M), the *network domain*, and the *application domain*. The following are the key elements of the system:

- i. IoT sensors: these are instruments able to perform measurements with a sampling frequency either defined in advance or triggered, which will be sent to the gateway via the M2M *area network*. For the sake of an illustrative and not comprehensive example, two distinct types of sensors can be hypothetically applied to the bridge: a sensor for vibration analysis based on IEEE802.15.4 standard, and a sensor for temperature measurement based on IEEE802.11b/g/n standards (commonly known as Wi-Fi). In the first case, there will be a MEMS accelerometer (*Micro Electro-Mechanical Systems*) able to calculate the force per unit of mass that will be connected to a microcontroller having the task also to manage the communication *transceiver* 802.15.4. From an application point of view, however, the microcontroller acquires the values from the accelerometer, and can perform trivial operations on site (*peak-to-peak* or an *overall* on one or more axes). In the second case, instead, it will be considered a thermal sensor connected to a microcontroller that will manage, in turn, a Wi-Fi communication *transceiver*. At the application level, on the other hand, the microcontroller acquires from the sensor and can perform on-board processing (e.g.: arithmetic, weighted average)

tatto” come gli accelerometri descritti in precedenza. Nel caso di specie, la misurazione avviene sfruttando la naturale riflettività alle microonde degli elementi presenti nello scenario irradiato. In particolare, il sensore utilizzato è costituito da un radar interferometrico ad apertura reale “coerente” (in grado quindi di emettere impulsi radar a lunghezza d’onda nota), dotato di una o più antenne emittenti e riceventi. Le misurazioni avvengono lungo la linea di vista strumento-scenario mediante le analisi differenziali delle informazioni di fase dell’onda elettromagnetica emessa e riflessa nei diversi intervalli temporali. I potenziali spostamenti sono quindi identificati simultaneamente su svariati punti della struttura, come riportato in Fig. 8.

Il principio interferometrico per il calcolo degli spostamenti è modellizzato dalla seguente espressione:

$$s = \frac{\lambda}{4\pi} (\varphi_2 - \varphi_1) \quad (31)$$

dove:

- s è lo spostamento misurato;
- λ è la lunghezza d’onda emessa;
- φ_i rappresenta la misura della fase grezza relativa ad ogni campionamento (2, 1).

Fin qui sono stati descritti metodi applicabili ad opere già realizzate ed aperte all’esercizio. Ma volendo dotare nuove infrastrutture in corso di costruzione di sensoristica endogena in grado di effettuare misurazioni efficaci e a basso costo, i sensori a fibra ottica rappresentano una valida soluzione per monitorare spostamenti e deformazioni di membrature portanti, ma anche per eseguire un controllo sullo stato di deterioramento dei materiali avendo contezza degli sviluppi fisico-chimici. Tali soluzioni si prestano all’applicazione nei ponti ferroviari non solo per l’ampia gamma di parametri misurabili, ma anche per l’insensibilità ai campi elettromagnetici (treni, temporali, linee ad alta tensione) e alla corrosione. Nelle nuove costruzioni in calcestruzzo armato è possibile fissare i sensori alle barre delle armature e, una volta in esercizio, saranno in grado di identificare l’innescio di crisi statiche, la comparsa del fenomeno corrosivo, eventuali deformazioni nella geometria del costruito, ecc.

- ii. *Gateway*: si tratta di dispositivi multi-interfaccia radio che possono acquisire dati da sensori eterogenei garantendo scalabilità e modularità (vedasi ad esempio GIOIA *et al.* [23]). Per i collegamenti *short range* (es: M2M area network) utilizzano protocolli *Constrained Application Protocol* su standard trasmissivo IEEE802.15.4 integrandosi perfettamente con http, tcp/ip, e protocollo *RESTful*. Lo standard 802.15.4 può essere considerato uno strumento di comunicazione *short range* con bassi consumi ed una velocità di trasferimento fino a 250 kbps. Un’altra tecnologia per collegare a breve raggio

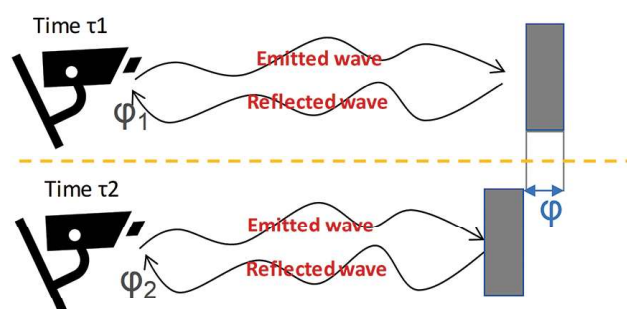


Fig. 8 – Principio interferometrico per il calcolo degli spostamenti.

Fig. 8 – Interferometric principle for the calculation of displacements.

and event detection (e.g.: temperature above a certain threshold).

In addition to the stand-alone sensors discussed above, there are several other solutions for the continuous monitoring of civil infrastructures. Among the emerging technologies in Structural Health Monitoring (SHM), remote sensing systems represent a state of the art [14]. Among the most effective remote sensing techniques for the SHM there is the Terrestrial Radar Interferometry. This technique can be quickly implemented on site, guaranteeing a high spatial and temporal sampling resolution, measuring the vibration frequencies, the oscillation amplitudes, the modal forms, the damping factors, etc. It is therefore noted that this technique is suitable for measuring the state variables of bridges and viaducts, providing results that are completely comparable to those that would be obtained with other “contact” techniques such as the accelerometers described above. In this case, the measurement takes place by exploiting the natural microwave reflectivity of the elements present in the irradiated scenario. In particular, the sensor used consists of a “coherent” real-opening interferometric radar (able to emit radar pulses with a known wavelength), equipped with one or more emitting and receiving antennas. The measurements take place along the instrument-scenario line of sight through the differential analyzes of the phase information of the electromagnetic waves emitted and reflected in the different time intervals. The potential displacements are then identified simultaneously on several points of the structure, as shown in Fig. 8.

The interferometric principle for the displacements calculation is modeled by the following expression:

$$s = \frac{\lambda}{4\pi} (\varphi_2 - \varphi_1) \quad (31)$$

Considering:

- s is the measured displacement;
- λ is the emitted wavelength;
- φ_i represents the measurements of the raw phase relative to each sampling (2, 1).

gli *smart meter* a internet è il *Bluetooth Low Energy*, che raggiunge velocità fino a 1 Mbps. Per il collegamento da *gateway* verso server remoto si possono usare tecnologie e standard trasmissivi Wi-Fi/Wi-MAX o 4G/5G.

iii. Piattaforme IoT/Data Analytics: rappresentano l'ecosistema di applicativi dove i dati provenienti dal campo vengono raccolti, normalizzati, ed elaborati al fine di costruire basi di dati statisticamente rappresentative per calibrare modelli predittivi che garantiranno l'identificazione di future problematiche già dalla loro fase incipiente. Maggiori dettagli su tali piattaforme saranno forniti nel corso del paragrafo.

Nella Tabella 1 si riportano il modello della pila OSI, il modello TCP/IP ed i relativi protocolli IoT usati in ognuna delle fasi di trasferimento dei dati. È possibile quindi ricostruire, da un punto di vista logico, il ciclo di vita del dato da quando questo viene campionato dal sensore, fino alla sua fruizione lato applicativo. Infatti, leggendo la tabella dal basso verso l'alto, l'ultimo step, l'*application layer*, rappresenta il punto di accesso del dato nell'ecosistema di *analytics*; consumando la misurazione tramite un gestore di code MQTT, ad esempio, il dato verrà inserito in un *database/data lake* diventando oggetto delle analisi necessarie.

b) Dati ingegneristici:

In questo dominio si trovano i dati relativi ai dettagli progettuali, costruttivi, e idrogeologici dei ponti oggetto di analisi, e lo storico dei difetti registrati per mezzo di visite ispettive generali nel corso degli anni. In Italia, ad esempio, ai sensi dell'Istruzione 44C [15], si richiede "il controllo sistematico delle condizioni statiche dei vari manufatti per i riflessi che le stesse hanno sulla sicurezza e regolarità dell'esercizio. Il controllo dovrà fornire probanti elementi di giudizio sulle condizioni di stabilità e di conservazione delle opere... integrando, all'occorrenza, con opportune verifiche e misure strumentali...". La definizione e registrazione di eventuali difetti riscontrati durante le visite tecniche *in situ* avviene attraverso un codice che ne individua la tipologia, alcuni ulteriori coefficienti che esprimono l'importanza del difetto ed il relativo livello di intensità. Tali dati confluiscono in una base di dati *ad hoc* considerata come un supporto per l'espres-

Tabella 1 – Table 1

Pila ISO/OSI e TCP con relativi protocolli IoT
ISO/OSI and TCP stack with related IoT protocols

Livelli del modello OSI OSI Model layers	Strati del modello Internet (TCP/IP) Internet (TCP/IP) Model layers	Protocolli IoT IoT Protocols
Livello d'applicazione: formato del messaggio, Interfaccia Uomo-Macchina <i>Application Layer: message format, Human-Machine Interface</i>	Livello dell'applicazione <i>Application Layer</i>	HTTPS, XMPP, CoAP, MQTT, AMQP
Livello di presentazione: codifica, crittografia, compressione <i>Presentation Layer: coding, encryption, compression</i>		
Livello di sessione: autenticazione, permesso, controllo di sessione <i>Session Layer: authentication, permissions, session control</i>		
Livello di trasporto: indirizzamento, instradamento, cambio/commutazione <i>Transport Layer: addressing, routing, switching</i>	Livello di trasporto <i>Transport Layer</i>	UDP, TCP
Livello di rete: indirizzamento, instradamento, cambio/commutazione <i>Network Layer: addressing, routing, switching</i>	Livello di rete <i>Network Layer</i>	IPv6, 6LoWPAN, RPL
Livello di collegamento dati: rilevazione dell'errore, controllo del flusso, collegamento fisico, accesso <i>Data Link Layer: error detection, flow control, physical link, access</i>	Livello di collegamento <i>Link Layer</i>	IEEE 802.15.4, Wi-Fi (802.11 a/b/g/n/ac), Ethernet (802.3), GSM, 3G, 4G, 5G
Livello fisico: flusso dati, formato di comunicazione, topologia <i>Physical Layer: bit stream, communication format, topology</i>		

Up to this point, methods have been described that apply to infrastructure already completed and operative. But wanting to equip new infrastructures in the construction phase with endogenous sensors that can perform effective and low-cost measurements, fiber-optic sensors are a valid solution for monitoring displacements and deformations of load-bearing frameworks, but also for checking the state of deterioration of materials having knowledge of their physical-chemical developments. These solutions are suitable for application in railway bridges not only for the wide range of measurable parameters, but also for the insensitivity to electromagnetic fields (trains, storms, high voltage lines) and corrosion. In new reinforced concrete constructions, it is possible to fix the sensors to the reinforcement bars so that, once in operation, these will be able to identify the trigger of static crises, the appearance of the corrosive phenomenon, possible deformations in the geometry of the frame, etc.

ii. Gateways: these are multi-interface radio devices that

sione del giudizio finale come richiesto dalle normative vigenti. In Italia si utilizza il sistema DOMUS di Rete Ferroviaria Italiana (RFI) per la raccolta e catalogazione dei risultati delle visite ispettive, generando così una sorgente di dati strutturati (il DOMUS, mediante il proprio algoritmo, fornirà l'indice di difettosità dell'opera) fruibili per analisi e approfondimenti (Fig. 9).

Ulteriori dati ingegneristici necessitano di essere integrati e correlati al fine di identificare rischi collaterali, per esempio legati al dissesto idrogeologico o alle conseguenze relative ad azioni sismiche. Nel primo caso, in Italia si utilizza il portale GEOMEDIA di RFI, dal quale è possibile verificare la presenza di punti di dissesto idrogeologico; in aggiunta, all'occorrenza, potrebbero essere considerate anche altre fonti di dati esogene, quali, ad esempio, le mappe dell'autorità di bacino. Nel secondo caso, invece, potrebbe essere utile integrare le basi di dati presenti nell'*Italian Accelerometric Archive* (ITACA) [16].

c) Dati provenienti dai sistemi di (tele)/controllo del traffico:

Collegarsi in sola lettura ai database dei sistemi di controllo e regolazione del traffico, previa "apertura" degli stessi da parte dei produttori, è di fondamentale importanza per raccogliere quelle informazioni che rappresentano alcune tra le condizioni al contorno da applicare ai sistemi di equazioni differenziali ottenuti dalle analisi descritte nel precedente paragrafo. Infatti, una volta modellizzato il comportamento delle strutture, i campi di spostamento attesi saranno ovviamente funzione anche del carico dinamico che andrà a sollecitare il ponte, e quindi informazioni quali la massa, la massa frenata, l'accelerazione, la velocità sono di fondamentale importanza per poter calcolare in *near real time* la risposta attesa (in termini di spostamenti, velocità e/o accelerazioni) e confrontarla, conseguentemente, con quella reale ricostruita mediante i sensori del ponte e/o quelli a bordo treno. Un ulteriore dato fondamentale è il numero dei veicoli (e quindi di assi), con relative grandezze dinamiche, che formano il convoglio in transito. Infatti, amplificazioni rilevanti pos-

can acquire data from heterogeneous sensors, guaranteeing scalability and modularity (see GIOIA et al. [23]). For short range connections (e.g.: M2M area network) they use Constrained Application Protocol on IEEE802.15.4 transmission standard integrating perfectly with http, tcp/ip, and RESTful protocol. The 802.15.4 standard can be considered a short range communication tool with low power consumption and a transfer rate up to 250 kbps. Another technology to connect smart meters to the Internet is the Bluetooth Low Energy, which reaches data transfer speeds of up to 1 Mbps. To connect from a gateway to a remote server it is possible to use technologies and transmission standards such as Wi-Fi/WiMAX or 4G/5G.

iii. *IoT/Data Analytics platforms*: represent the ecosystem of applications where data from the field are collected, standardized, and processed in order to construct statistically representative databases to calibrate predictive models that will guarantee the identification of future problems already from their incipient phase. More details on these platforms will be provided during the paragraph.

Table 1 shows the OSI stack model, the TCP / IP model and the related IoT protocols used in each of the data transfer phases. It is therefore possible to reconstruct, from a logical point of view, the life cycle of the data from when it is sampled by the sensor, up to its use on the application side. In fact, reading the table from the bottom up, the last step, the application layer, represents the access point of the data in the analytics ecosystem; by consuming the measurement through a MQTT queue manager, for example, the data will be inserted into a database/datalake becoming the object of the required analyses.

b) Engineering data:

This domain contains data relating to the design, construction, and hydrogeological details of the bridges being analyzed, and the history of defects recorded through general inspections over the years. In Italy, for example, according to Instruction 44C [15], it is required "to systematically check the static conditions of the various structures for the repercussions they have on the safety and regularity of the service. The control will have to provide probative elements of judgment on the conditions of stability and conservation of the infrastructure... integrating, if necessary, with appropriate checks and instrumental measures ...". The definition and registration of any defects found during technical visits on site are done through a code that identifies the type, some additional coefficients that express the importance of the defect and the relative lev-

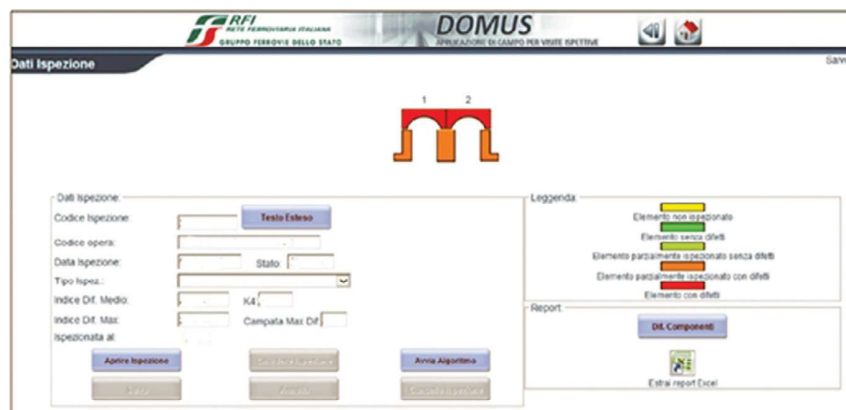


Fig. 9 – Interfaccia utente del sistema DOMUS di RFI.
Fig. 9 – User interface of DOMUS, RFI tool.

sono verificarsi per carichi ripetuti disposti con periodicità spaziale dato che ognuno di essi, al suo ingresso ed alla sua uscita dal ponte, genera un treno d'onde che si somma a quello indotto dai carichi già transitati. S'intuisce che se ogni carrozza ferroviaria produce vibrazioni che hanno tutte la stessa fase, circostanza che si verifica per frequenze di oscillazione pari ad un multiplo della frequenza di transito, la vibrazione si rinforza nel tempo anche se i carichi che l'hanno generata sono già transitati, permanendo a lungo l'oscillazione libera in virtù del modesto smorzamento strutturale [17]. Le informazioni richieste possono essere reperite interfacciando, in funzione della linea, alternativamente o il Sistema di Comando e Controllo (SCC), o il Controllo Centralizzato del Traffico (CTC), o il Controllo Centralizzato Linee (CCL). SCC e CTC consentono il controllo e la gestione, anche remota via telecomando, della circolazione in linea e nelle stazioni. Il SCC ha la capacità di gestire non solo la circolazione, ma anche la diagnostica, la manutenzione, le informazioni al pubblico e la videosorveglianza. SCC (di cui esiste una variante dedicata alle linee ad alta velocità definita SCC-AV) è in grado di interfacciarsi sia con apparati periferici impresenziati (stazioni, posti di movimento, posti di comunicazione, ecc.) sia con apparati elettromeccanici lungo linea (scambi, segnalamento, ecc.). CCL, invece, pur non consentendo il telecomando della circolazione, garantisce funzioni di supervisione e gestione. Nel caso di specie, dal SCC saranno integrabili diversi valori, dei quali si riporta un estratto in Tabella 2.

Un'ulteriore sorgente di dati afferenti alla circolazione è rappresentata dal fascicolo di linea, il quale una volta digitalizzato in un *database* relazionale, potrà essere interrogato automaticamente per fornire dati utili quali chilometraggio, velocità massima in un tratto di linea definito (funzione della tipologia del veicolo in transito e delle caratteristiche della linea), posizione esatta del ponte, presenza di segnali virtuali o reali, ecc. Al fine di fornire informazioni puntuali ed accurate per il *data model* che si intende progettare, si potrebbe valutare anche l'opportunità, in taluni frangenti, di inserire nuovi punti informativi o tecnologici a ridosso degli impalcati che saranno oggetto di monitoraggio diretto (quindi con sensoristica sul ponte) e non solo indiretto, mediante le misurazioni effettuate dal treno.

d) Dati IT enterprise:

Al fine di attivare *workflow* e azioni correttive, ma anche per garantire il ribaltamento dei costi, risulta necessario riuscire ad integrare informazioni inerenti alle turnazioni delle squadre di lavoro, agli interventi manutentivi sia passati che programmati nel futuro, e, in generale,

el of intensity. These data flow into an ad hoc database considered as a support for the expression of the final judgment as required by the regulations in force. In Italy the DOMUS system of the Italian Railway Network (RFI) is used for the collection and cataloging of the results of the inspections, thus generating a source of structured data (the DOMUS, through its algorithm, will provide the fault index of the infrastructure) usable for technical insights and in-depth analysis (Fig. 9).

Further engineering data need to be integrated and correlated in order to identify collateral risks, for example linked to hydrogeological instability or to the consequences related to seismic actions. In the first case, in Italy, the GEOMEDIA portal of RFI is used, from which it is possible to verify the presence of hydrogeological instability points; in addition, if necessary, other sources of exogenous data could also be considered, such as, for example, maps of the basin authority. In the second case, instead, it could be useful to integrate the databases present in the Italian Accelerometric Archive (ITACA) [16].

c) Data coming from remote traffic control systems:

Read-only connection to the databases of traffic control and regulation systems, after their "opening" operated by the producers, it is of fundamental importance to collect the information that represents some among the boundary conditions to be applied to the systems of differential equations obtained from the analyzes described in the previous paragraph. In fact, once the behavior of the structures has been modeled, the expected displacement ranges of the bridge will obviously also be a function of the dynamic load that will stress the bridge, and therefore information such as mass, brake mass, acceleration, speed are of fundamental importance to calculate in near-real-time the expected response (in terms of displacements, speeds and/or ac-

Tabella 2 – Table 2

Estratto di alcuni dati integrabili dal Sistema di Comando e Controllo
Extract of some data that can be integrated by the Command and Control System

Orario Teorico <i>Theoretic timetable</i>	Composizione <i>Composition</i>	Andamento <i>Ongoing info</i>	Selezione Itinerari <i>Itinerary selection</i>
Località <i>Location</i>	Staz. in comp. <i>Depart. station</i>	Stazione <i>Railway station</i>	Itinerario 1 <i>Itinerary 1</i>
Orari partenza/arrivo <i>Depart. / arrival times</i>	Numero veicoli <i>Number of vehicles</i>	Orari previsti <i>Scheduled times</i>	Itinerario 2 <i>Itinerary 2</i>
Categoria treno <i>Train category</i>	Lunghezza <i>Length</i>	Minuti ritardo <i>Minutes of delay</i>	Itinerario n <i>Itinerary n</i>
Periodicità <i>Periodicity</i>	Massa <i>Mass</i>	Orari reali <i>Real time</i>	...
...	% Massa frenata <i>% Brake mass</i>	Binario ricevimento <i>Incoming track</i>	...
...	Velocità massima <i>Full speed</i>	...	...
...	Locomotore <i>Locomotor</i>	...	...

interfacciarsi con sistemi ERP (*Enterprise Resource Planning*) che contengano informazioni circa ordini di lavoro, magazzino, costi di produzione, ecc. La possibilità di integrare anche variabili economiche consentirà la costruzione di un *framework* di supporto alle decisioni (DSS) in grado di indirizzare le scelte in funzione di indicatori sia di efficienza che di efficacia.

e) Dati esogeni:

Nell'ambito di un approccio olistico multi-sorgente, al fine di rendere i modelli predittivi quanto più affidabili ed esaustivi, potrebbe essere necessario aggiungere alle condizioni al contorno anche variabili esterne quali dati meteo (temperatura, intensità e direzione del vento, umidità, ecc.), posizioni GPS in cui si manifestino eventi puntuali in linea (es: irregolarità del profilo delle rotaie), piuttosto che la correlazione di dati strutturati (es: misurazione delle vibrazioni fatte da un accelerometro al passaggio del treno) con dati non strutturati (es: filmato video registrato da telecamera in linea) mediante la costruzione di metadati intelligenti e *time-stamp*; infatti attraverso moderne soluzioni di *video analytics* è possibile mettere in correlazione una misurazione numerica puntuale con un video registrato nell'intorno temporale in cui è stata effettuata la misurazione, consentendo quindi di dirimere situazioni di falsi positivi o fornendo dettagli visivi relativi alla misurazione effettuata, il tutto automatizzando la creazione e archiviazione del video con relativa chiave di ricerca che lo metta in correlazione con la misurazione avvenuta.

Una volta definite le sorgenti di dati necessarie a impostare il problema analitico, espletate le azioni necessarie alla loro fruizione dal *layer* di analisi dei dati (per esempio mediante la costruzione di specifici connettori e l'utilizzo di API, *Application Programming Interface*), risulta di fondamentale importanza configurare una piattaforma di *data analytics* che sia in grado di ricevere i dati in formati diversi e da sorgenti eterogenee, e che agevoli il lavoro dei *data scientist/analyst* nella "pulizia" degli stessi. Infatti, una volta stabilito un canale di *data ingestion*, sia esso *batch* e/o in *real-time*, risulta di fondamentale importanza riuscire ad orchestrare i vari flussi di dati che dovranno essere oggetto di svariate trasformazioni (es: rimozione *outlier*, applicazioni di funzioni matematiche, ecc.) prima di costituire un insieme statisticamente rappresentativo. Ultimata la fase di preparazione del campione, la piattaforma dovrà garantire l'integrazione con diverse librerie di algoritmi di *Machine Learning* (ML) e *Artificial Intelligence* (AI), così da rappresentare un incubatore per la calibrazione di modelli predittivi, consentendo anche la validazione degli stessi ed eventuali attività di *fine tuning*. La piattaforma in questione dovrà consentire anche l'orchestrazione dei modelli predittivi

celerations) and compare it to the real harmonics reconstructed using the bridge sensors and/or those on board the train. A further fundamental data is the number of vehicles (and therefore of axles), with relative dynamic quantities, which form the convoy in transit.

In fact, relevant amplifications can occur for repeated loads arranged with spatial periodicity given that each of those, at its entrance and its exit from the bridge, generates a train of waves that is added to the one induced by the already transited loads. It is clear that if each railway carriage produces vibrations having all the same phase, a circumstance that occurs for oscillation frequencies equal to a multiple of the transit frequency, the vibration is reinforced over time even if the loads that generated it are already transited, obtaining, in this way, long lasting free oscillation due to the modest structural damping [17]. The required information can be retrieved by interfacing, in function of the line, alternatively, either the Command and Control System (SCC), or the Centralized Traffic Control (CTC), or the Centralized Lines Control (CCL). SCC and CTC allow the control and management, even remotely, of circulation within the lines and into the stations. The SCC has the ability to manage not only traffic, but also diagnostics, maintenance, public information, and video surveillance. SCC (of which there is a variant dedicated to high-speed lines called SCC-AV) is able to interface both with unmanned peripheral items (stations, movement points, communication points, etc.) and with electromechanical devices along the line (switches, signaling, etc.). CCL, on the other hand, while not allowing remote control of the circulation, guarantees supervision and management functions. In the specific case discussed in the paper, from the SCC various values can be integrated, as reported into the extract shown in Table 2.

A further source of data relating to the circulation is represented by the line repository, which, once digitalized in a relational database, can be queried automatically to provide useful data such as mileage, maximum speed in a defined section of the line (function of the vehicle type in transit and characteristics of the line), exact position of the bridge, presence of virtual or real signals, etc. In order to provide accurate and detailed information for the data model to be designed, it could also be considered the opportunity, in some situations, to install new informative or technological points close to the bridges that will be subject to direct monitoring (therefore with sensors on the bridge) and not only indirect, using the measurements sampled by the train.

d) Enterprise IT data:

In order to activate workflows and corrective actions, but also to ensure cost chargeback, it is necessary to integrate information related to the workforce schedule, past and future maintenance interventions, and, in general, interface with ERP systems (*Enterprise Resource Planning*)

calibrati, al fine di effettuare analisi in *real time*, accerando *early warnings* utili a identificare problematiche incipienti. Nella definizione di regole e modelli predittivi, si possono utilizzare due approcci [1]:

- 1) *Knowledge-based*: si basa sia sulle conoscenze acquisite da progettisti e manutentori nell'esercizio delle loro rispettive funzioni, sia sull'utilizzo di analisi FMECA (*Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis* - analisi dei modi, degli effetti e della criticità dei guasti) e RAM (*Reliability, Availability, Maintainability*) - analisi di affidabilità, disponibilità, manutenibilità. Grazie a tali studi e alle esperienze pregresse acquisite, è possibile identificare a priori i comportamenti anomali a fronte di problematiche incipienti. Effettuando i campionamenti dei valori con frequenze opportune, note a priori le soglie di malfunzionamento, vengono inviati degli allarmi quando i valori soglia sono superati. In questo caso si tratta di un approccio supervisionato.
- 2) *Data-driven*: grazie alla diffusione della digitalizzazione degli apparati, l'ingegneria di manutenzione dispone di una mole crescente di dati eterogenei e multisorgente. Sempre più spesso, tali dati risiedono su database distinti, creando dei veri e propri "silos" che li rendono poco fruibili ai fini delle analisi comparative. Per superare tale problematica, sempre più spesso si ricorre all'utilizzo di *file system* distribuiti e piattaforme di *data analytics*, creando così *data lake* eterogenei e statisticamente rappresentativi contenenti dati strutturati, semi-strutturati e non strutturati, analizzabili nella loro interezza attraverso un approccio olistico, mediante tecniche di intelligenza artificiale, *machine learning*, e metodi predittivi. Si sono create dunque le condizioni per identificare delle relazioni tra dati apparentemente indipendenti e disgiunti, estraendo modelli causali e schemi ricorrenti precedentemente sconosciuti, e utilizzabili adesso per predire problematiche e comportamenti anomali. In questo caso si tratterà di metodi non supervisionati.

La piattaforma di *data analytics* deve essere in grado di interfacciarsi per il *destaging* dei dati con database relazionali (RDBMS o SQL) e non relazionali (NoSQL). Infatti, la scelta del database è di fondamentale importanza ai fini della riuscita del progetto IoT, e va fatta tenendo conto delle differenze tra le due macro-categorie e delle diverse peculiarità dei DB NoSQL. I DB SQL utilizzano tabelle dove memorizzano i file su righe e colonne, mentre i DB non relazionali possono utilizzare archivi costituiti da diversi formati (es: documenti, grafi, archivi valore-chiave, ecc.). I DB relazionali hanno bisogno della costruzione di schemi *ad hoc* per accogliere i dati in ingresso, invece i DB NoSQL, ad eccezione di Cassandra DB, hanno un approccio *schemaless*, eliminando quindi la necessità di uno schema dati in partenza consentendo agli stessi di cambiare struttura al trascorrere del tempo. Ulteriore differenza, forse la più importante, i DB NoSQL possono ripartire il carico su un *cluster* distribuito, mantenendo quindi prestazioni notevoli garantendo la scala-

that contain information about work orders, inventory, production costs, etc. The possibility of integrating also economic variables will allow the construction of decision support systems (DSS) able to direct choices according to both efficiency and effectiveness indicators.

e) Exogenous data:

In the context of a holistic multi-source approach, in order to make predictive models as reliable and comprehensive as possible, it may be necessary to add external variables such as weather data (temperature, wind intensity and direction, humidity, etc.), GPS positions where singular in-line events occur (e.g.: irregularities in the rails profile), but also the correlation of structured data (e.g.: measurement of vibrations collected by an accelerometer while the train is running over) with unstructured data (e.g.: video recorded by IP cameras along the line) through the construction of intelligent metadata and timestamps; in fact, through modern video analytics solutions it is possible to correlate a specific numeric measurement with a video recorded in the time frame in which the measurement was performed, thus allowing to settle false positive situations or providing visual details related to the measurement carried out, everything achievable through the automated creation and archiving of the videos and their associated metadata that, automatically, correlate these with the respective sampled measurements.

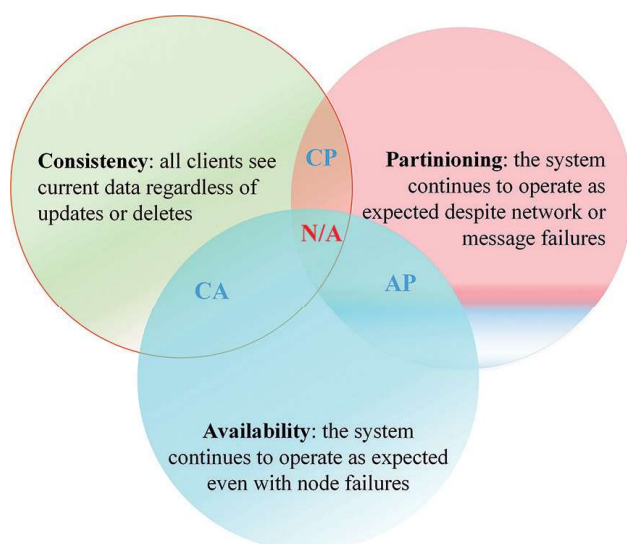
Once the data sources necessary to set up the analytical problem have been defined, and once the actions necessary for their use from the data analysis layer have been completed (for example, through the construction of specific connectors and the use of APIs, Application Programming Interface), it is of fundamental importance to configure a data analytics platform that is able to receive data in different formats and from heterogeneous sources, and that facilitates the work of data scientists/analysts in "cleaning" them. In fact, once a data ingestion channel has been established, be it batch and/or in real-time, it is necessary to orchestrate the various data streams that must be subject to various transformations (e.g.: outlier removal, applications of mathematical functions, etc.) before forming a statistically representative dataset. Once the sample preparation phase has been completed, the platform must guarantee the integration with different libraries of Machine Learning (ML) and Artificial Intelligence (AI) algorithms, therefore to act as an incubator for the calibration of predictive models, also allowing the validation and potential fine-tuning activities. The platform described will have also to allow the orchestration of calibrated predictive models, in order to perform real-time analysis, ascertaining early warnings useful to identify incipient problems. The definition of predictive rules and models can be deployed following two approaches [1]:

bilità orizzontale (quindi su più server) che i DB SQL non possono raggiungere. I DB non relazionali si stanno diffondendo rapidamente essendo in grado di superare il tradizionale approccio relazionale, supportando applicazioni con necessità di memorizzazione di ingenti quantitativi di dati in poco tempo. I database NoSQL sono quindi più flessibili, utilizzano modelli di dati meno complessi, garantendo migliori prestazioni nella gestione e interrogazione dei dati. Secondo il teorema di Brewer [18] (o teorema CAP - *Consistency, Availability, Partition Tolerance*) un sistema distribuito è in grado di soddisfare contemporaneamente solo due di queste tre proprietà:

1. coerenza: tutti i nodi della rete riescono a vedere gli stessi dati allo stesso tempo;
2. disponibilità: garantire che ad ogni richiesta di scrittura/lettura corrisponda un feedback sull'avvenuto compimento dell'azione;
3. tolleranza di partizione: il sistema, nella sua interezza, deve riuscire a funzionare nonostante arbitrarie perdite di messaggi.

Si hanno quindi le seguenti combinazioni riportate in Fig. 10:

- CP: coerenza e tolleranza di partizione, adottato in database quali Redis, MongoDB, Hypertable, HBase, BigTable.
- AP: disponibilità e tolleranza di partizione vengono garantiti in Dynamo, Voldemort, CouchDB, Riak, Cassandra.
- CA: coerenza e disponibilità, sono invece caratteristiche dei RDBMS in cui il sistema non è distribuito.



(Fonte: elaborazione degli autori - Source: authors)

Fig. 10 – Rappresentazione grafica del Teorema di Brewer o Teorema CAP.

Fig. 10 – Graphic representation of Brewer's Theorem or CAP Theorem.

1) Knowledge-based: *it considers competencies and know-how acquired by designers and maintainers, and it utilizes also Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA) and analysis of Reliability, Availability, Maintainability (RAM). Thanks to those analyses and to the previous experiences acquired, it is possible to identify a priori the bridge's abnormal behaviors described by known thresholds of its relevant variables. Those data are sampled per specific frequencies and compared with the thresholds; once the detected values overcome the expected ones, alarms and triggers are sent to the appropriate stakeholders. This approach deals with supervised models.*

2) Data-driven: *thanks to the diffusion of assets' digitalization, the maintenance engineering has an increasing volume of multi-source and heterogeneous data. Often, however, those data are collected in different DBs, creating silos that does not allow easy comparative analyses. To solve this problem, it is possible to utilize distributed file systems and big data platforms that allow the creation of heterogeneous and statistically representative data lakes containing structured, semi structured, and unstructured data, analyzable in their entirety through a holistic approach, applying artificial intelligence techniques, machine learning, and predictive analytics. Suitable conditions have been created to identify the relationships between apparently independent data, extracting insights, devices' behavioural patterns and dependencies previously unknown and now usable to predict abnormal behaviours. This approach utilizes unsupervised models.*

The data analysis platform must be able to interface for data destaging with relational databases (RDBMS or SQL) and non-relational databases (NoSQL). In fact, the choice of databases is of fundamental importance for the success of the IoT project, and must be performed taking into account the differences between the two macro-categories and the different peculiarities of the NoSQL DBs. SQL DBs use tables where they store values on rows and columns, while non-relational DBs can use archives made up of different formats (e.g.: documents, graphs, key-value archives, etc.). The relational DBs require the construction of ad hoc schemes to accommodate the input data, instead the NoSQL DBs, with the exception of Cassandra DB, have a schemaless approach, thus eliminating the need for an initial data schema and allowing data to change their structure over time. Another difference, perhaps the most important, is that the NoSQL DBs can split the workload on a distributed cluster, thus maintaining remarkable performance ensuring the horizontal scalability (therefore on multiple servers) that SQL DBs cannot support. Non-relational DBs are spreading rapidly, being able to overcome the traditional relational approach, supporting applications requiring the storage of large quantities of data in a short time. The NoSQL databases are therefore more flexible, they use less complex data models, guaranteeing better performance in the management and querying of data. According to Brewer's theorem [18] (or CAP theorem - Consistency, Availability,

Una volta definito anche il DB su cui verranno memorizzati i dati in ingresso e le relative trasformazioni, la piattaforma di *data analytics* dovrà abilitare la creazione di opportune *dashboard* e l'attivazione ed orchestrazione di specifici *workflow* in funzione degli *output* dei modelli predittivi, trasformando l'intero *framework* IoT in un grande e distribuito sistema di supporto alle decisioni. Infatti, al verificarsi di determinati allarmi scaturiti dalle analisi descritte in precedenza, il DSS dovrà in autonomia mettere in atto tutte le azioni previste, che possono spaziare dall'invio di email o messaggi in tempo reale al Dirigente Movimento affinché valuti se interrompere/ralentare la circolazione, fino alla schedulazione automatica di ordini di lavoro per l'invio di squadre di manutentori in loco affinché verifichino *de visu*, nella prima data utile, la veridicità dell'allarme scaturito. Mediante l'utilizzo di una tale architettura le ispezioni alle opere d'arte potrebbero essere schedate con un approccio *data-driven* aggiornato in tempo quasi reale.

5. Il framework IoT Lumada come tecnologia abilitante alla manutenzione predittiva dei ponti

Per far fronte a tutte le necessità hardware e software descritte in precedenza, Hitachi ha sviluppato una architettura IoT componibile e verticalmente integrata, Lumada, in grado di consolidare tutti i componenti attraverso un unico *stack*. Il *framework* Lumada (Fig. 11), infatti, è stato progettato per gestire il completo ciclo di vita di dispositivi e apparati di varia natura, misurandone le performance in tempo reale, creando insieme di dati storici statisticamente rappresentativi utili ad effettuare previsioni e ottimizzazioni di natura tecnica e finanziaria.

La sua architettura, flessibile e modulare, grazie al rilascio di interfacce di programmazione pubbliche (API), consente di implementare soluzioni di terze parti (proprietarie ed *open source*) anche già presenti presso il cliente, proteggendo quindi gli investimenti pregressi. Lumada si connette sia in *real time* che *batch* con dispositivi singoli, con flotte di apparati, strumenti di misurazione, anche se geograficamente distribuiti o in movimento. Grazie ai suoi *tool* di *data ingestion* è in grado di visualizzare i dati provenienti dagli apparati, memorizzarli su piattaforme *big data*, analizzarli con strumenti di intelligenza artificiale e *machine learning*, ed eseguire opportuni *work flow* a seguito degli *output* ottenuti, anche integrandosi con i sistemi informativi aziendali.

L'approccio modulare non riguarda soltanto le funzionalità integrabili nell'ecosistema, ma anche la scalabilità in termini di tipologia e numero di apparati monitorabili, permettendo di aggiungere/rimuovere dispositivi senza incidere sull'operatività complessiva della soluzione.

Nel caso di specie, per soddisfare i requisiti funzionali affrontati nel precedente paragrafo, si propone l'utilizzo di Pentaho, piattaforma di *data analytics* parte integrante del *framework* Lumada. Pentaho è una piattaforma in

ty, Partition Tolerance) a distributed system is able to satisfy only two of these three properties at the same time:

1. *consistency*: all the nodes of the network can see the same data at the same time;
2. *availability*: it ensures that for every request for writing/reading corresponds the feedback on the successful completion of the action;
3. *partition tolerance*: the system, in its entirety, must be able to function despite an arbitrary loss of messages.

Therefore, it is possible to derive the following combinations shown in Fig. 10:

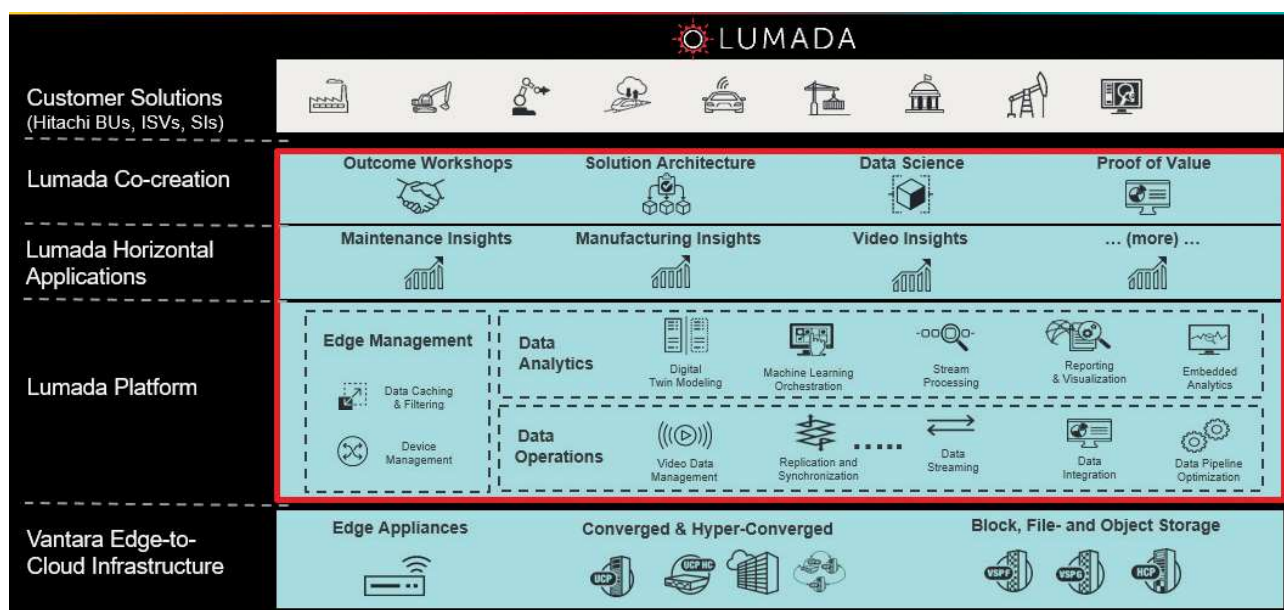
- *CP*: consistency and partition tolerance, adopted in databases such as Redis, MongoDB, Hypertable, HBase, BigTable.
- *AP*: availability and partition tolerance are guaranteed in Dynamo, Voldemort, CouchDB, Riak, Cassandra.
- *CA*: consistency and availability, are instead characteristics of the RDBMS in which the system is not distributed.

Once defined the DB on which the input data will be stored and once the related data transformations have also been defined, the data analytics platform will have to enable the creation of appropriate dashboards and the activation and orchestration of specific workflows based on the outputs of the predictive models, transforming the whole IoT framework in a large and distributed decision support system. In fact, upon the occurrence of certain alarms arising from the analyzes described above, the DSS will have to independently implement all the planned actions, which can range from sending emails or messages in real time to the Movement Manager (DCO) in order to evaluate whether to interrupt/slow down circulation, up to the automatic scheduling of work orders for the intervention of maintenance teams on site to verify the truthfulness of the alarm received. Using such an architecture, inspections of infrastructure could be scheduled with a data-driven approach updated in near-real-time.

5. The IoT Lumada framework as enabling technology for the predictive maintenance of bridges

To satisfy both the hardware and software exigencies described above, Hitachi developed a vertically integrated composable IoT framework, Lumada, able to consolidate all the required components within a unique stack. The Lumada framework (Fig. 11), in fact, is designed to manage the entire life-cycle of different types of assets and devices, measuring real-time performances, building statistically representative data sets along the useful life of the asset, performing technical and financial forecasts and optimizations.

Its modular and flexible architecture, thanks to public application programming interfaces (API), allow the implementation of third-party solutions (both proprietary and open source) even if already installed within the customer's framework, allowing the preservation of previous invest-



(Fonte - Source: Hitachi Vantara)

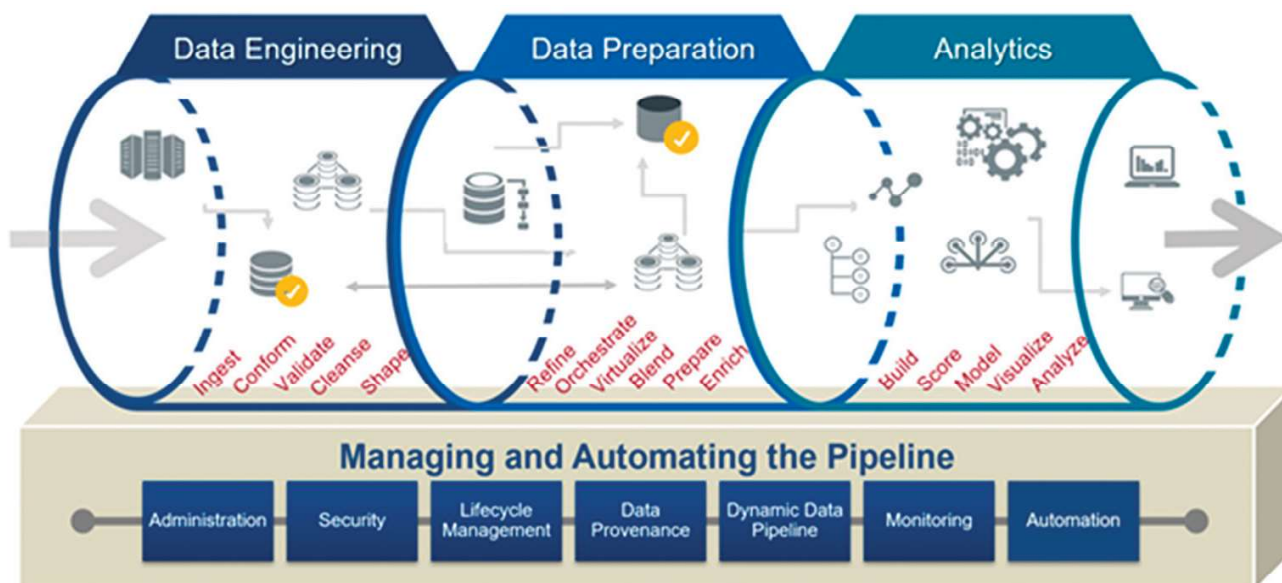
Fig. 11 – L'architettura concettuale del framework Lumada.
 Fig. 11 – The conceptual architecture of the Lumada framework.

grado di gestire il ciclo del dato *end-to-end* (Fig. 12), dalla raccolta dello stesso da sorgenti eterogenee e multiformato, passando per la trasformazione, l'orchestrazione e l'analisi, fino alla visualizzazione dei risultati ottenuti mediante la costruzione di *dashboard*, report ed info-grafiche accessibili anche in *cloud* ed in mobilità.

Pentaho consta di due moduli distinti, Data Integration (PDI) e Business Analytics (PBA). PDI consente di gestire, attraverso un'interfaccia grafica *drag&drop*, tutti i processi ed i flussi relativi alla costruzione del campione statisticamente rappresentativo ed alla calibrazione e validazione dei modelli predittivi, utilizzando sia statistica inferenziale che intelligenza artificiale (AI), *machine learning* (ML) e *deep learning* (DL). Infatti, grazie all'integrazione con i più diffusi motori di analisi di dati (es: Spark e MapReduce (MR)), PDI semplifica e accelera il processo di integrazione delle basi di dati esistenti con ulteriori fonti esogene, utilizzando una ricca libreria di componenti predefinite utili all'interfacciamento con sorgenti SQL, NoSQL, *file system* distribuiti, applicativi aziendali e molto altro. Grazie a potenti strumenti di orchestrazione dei dati oggetto di analisi, PDI consente di visualizzare risultati in tempo reale durante le fasi di estrazione e pulizia del campione, aumentando l'efficacia dei processi di calibrazione e validazione dei modelli, visualizzando risultati intermedi in corso d'opera, anche costruendo *workflow* che automatizzino la raccolta e l'analisi dei dati garantendo la messa in esercizio automatizzata dell'intera *data pipeline*. PDI oltre a costruire l'ambiente ideale per trasformare, analizzare ed orchestrare fonti di dati eterogenee, consente di ridurre drasticamente la complessità e la durata delle attività *time consuming* quali

Lumada can establish both real time and batch connections with single devices, with fleet of assets, and measuring devices, even if geographically spread or in movement. Thanks to its data ingestion tools it is able to visualize data coming from assets, store those on big data platforms, and analyze the entire data lake through AI and machine learning tools, acting specific workflow as response of achieved results, also integrating with corporate IT systems. The modular approach does not deal just with functions that are able to be integrated within the ecosystem, but also the scalability in terms of types and amount of monitored devices, allowing to add/remove assets without affecting the global availability of the solution.

In this case, to meet the functional requirements addressed in the previous paragraph, the use of a data analytics platform, Pentaho, is proposed. Pentaho, integral part of the Lumada framework, is a platform able to manage the end-to-end data cycle (Fig. 12), from the collection of variables from heterogeneous and multi-format sources, passing through the transformation, the orchestration and the analysis, up to the visualization of the results obtained through the construction of dashboards, reports and info-graphics also accessible through the cloud and on the move. Pentaho consists of two complementary modules, Data Integration (PDI) and Business Analytics (PBA). PDI allows to manage, through a graphical drag & drop interface, all the processes and flows related to the construction of statistically representative data sets, and to the calibration and validation of predictive models, using inferential statistics, artificial intelligence (AI), machine learning (ML) and deep learning (DL).



(Fonte - Source: Hitachi Vantara)

Fig. 12 – Processi e flussi *end-to-end* gestibili mediante la piattaforma Pentaho.

Fig. 12 – End-to-end processes and flows that can be managed using the Pentaho platform.

programmazione a mano di trasformazioni e analisi sui dati, costruzione di basi di dati normalizzate, costruzione di *template* riutilizzabili per analisi successive, riutilizzo di algoritmi già scritti in R o in Python o provenienti da librerie come Spark MLlib e Weka.

Grazie alla funzionalità *adaptive big data layer*, Pentaho è in grado di interfacciarsi con i più diffusi *repository Big Data* presenti sul mercato, sia in lettura che in scrittura, estraendo i dati richiesti, lavorandoli *in-memory* sulla memoria ad accesso casuale (RAM) consumandoli sul motore di analisi interno di PDI oppure su motori terze parti come Spark e MR, senza la necessità di modificare alcuna riga di codice, in quanto il cambio di motore (e relative istruzioni) risulterà trasparente per il *data scientist* poiché sarà convertito automaticamente da Pentaho. Da qui il concetto di *layer* adattivo, che consente di costruire un *workflow* di trasformazioni e analisi dei dati agnostico rispetto ai motori che poi si deciderà di utilizzare per la messa in esercizio. Infatti, utilizzando l'interfaccia grafica (Fig. 13) è possibile costruire il flusso di trasformazioni e analisi ritenuto più idoneo, per poi testare diversi motori di analisi e valutare, *score* alla mano, quale sia il migliore in termini di efficacia delle predizioni ed esigenze computazionali e temporali richieste. Tutto ciò consente di astrarre gli algoritmi predittivi, le basi di dati e le analisi necessarie per la calibrazione e la validazione degli stessi, sia dal livello hardware che dal motore di analisi, dando la possibilità, al trascorrere del tempo, di utilizzare nuove e più performanti tecnologie, sia *on-premises* che in *cloud*, senza la necessità di scrivere neanche una nuova riga di codice per adattare i vari *data model* creati.

In fact, thanks to the integration with the most widespread data analysis engines (e.g. Spark and MapReduce (MR)), PDI simplifies and accelerates the integration process of existing databases with additional exogenous sources, using a rich library of predefined components useful for interfacing with SQL and NoSQL sources, distributed file systems, business applications and much more. Thanks to powerful orchestration tools for the data to be analyzed, PDI allows to view results in real time during the extraction and cleaning of the sample, increasing the effectiveness of processes of calibration and model validation, displaying intermediate results during the operations, also building workflows that automate data collection and analysis ensuring the automated execution of the entire data pipeline (Fig. 12). PDI as well as building the ideal environment to transform, analyze and orchestrate heterogeneous data sources, it allows to drastically reduce the complexity and duration of time-consuming activities such as manual programming of transformations and data analysis, construction of normalized databases, construction of reusable templates for subsequent analysis, reuse of algorithms already written in R or in Python or from libraries such as Spark MLlib and Weka.

Thanks to the adaptive big data layer functionality, Pentaho is able to interface with the most common Big Data repositories on the market, both in reading and writing, extracting the required data, processing them in-memory on the random access memory (RAM). It can also consume them on the internal analysis engine of PDI or on third-party engines such as Spark and MR, without the need to modify any code line, as the change of engine (and related instructions) will be transparent for the data scientist since Pentaho will automatically convert it. Hence, the concept

PDI può accedere, sia in lettura che in scrittura, ad un'ampia gamma di *data repository*. A titolo esemplificativo, ma non esaustivo si citano:

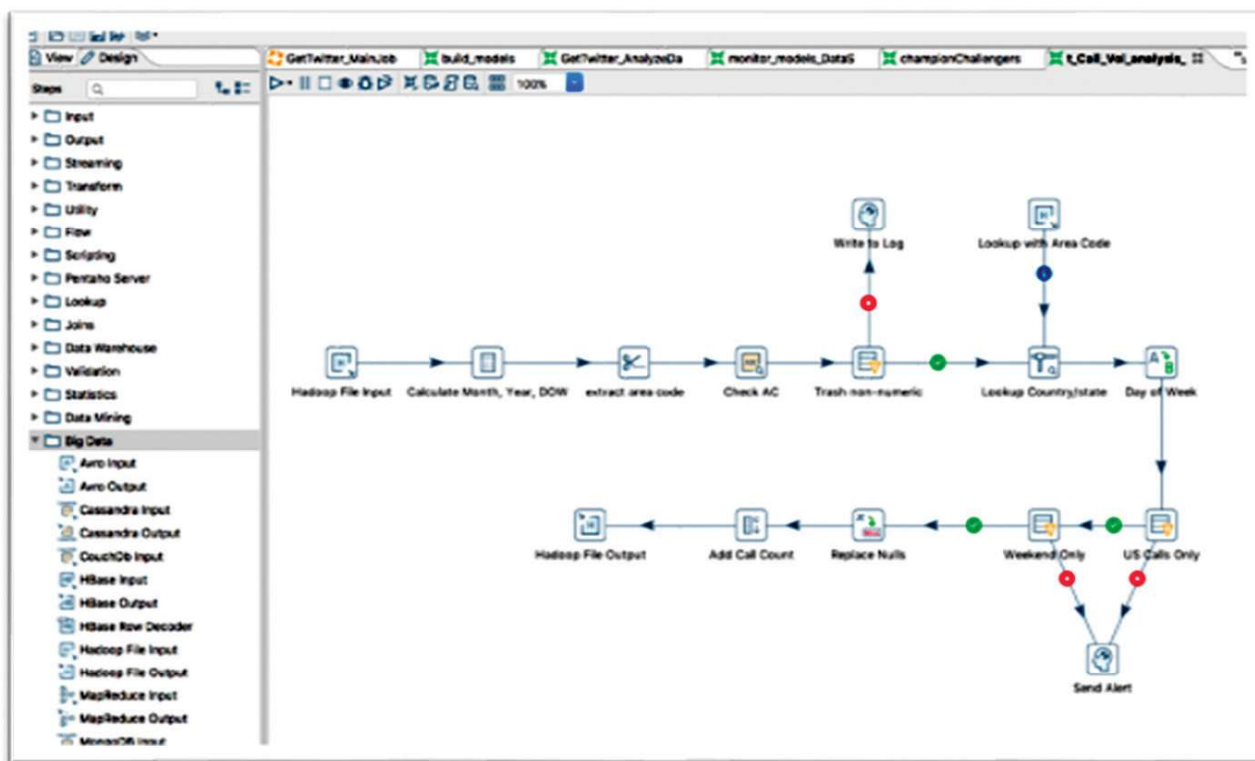
- *Relational database management system (RDBMS)*: Oracle, IBM® DB2®, MySQL, Microsoft SQL Server.
- *Spark e Hadoop*: Cloudera, Hortonworks, Amazon EMR, MapR, Microsoft Azure HDInsights.
- *NoSQL databases e object storage*: MongoDB, Cassandra, HBase, Hitachi Content Platform.
- *Analytic databases*: Vertica, Greenplum, Teradata, SAP HANA, Amazon Redshift, Google Big Query, Microsoft Azure SQL Data Warehouse (DW).
- Applicazioni di Business: Salesforce, Google Analytics.
- File: XML, JSON, Microsoft Excel, CSV, txt, Avro, Parquet, ORC, file non strutturati con relativi metadati, inclusi audio, video e visual files.
- Integrazione di dati in tempo reale: consente lo streaming di dati da Apache Kafka utilizzando Spark streaming ed i protocolli IoT più diffusi, senza necessità di alcuna scrittura di codice aggiuntivo.

I risultati ottenuti dalle analisi e dall'orchestrazione effettuata mediante PDI dovranno poi essere memorizza-

of the adaptive layer, which allows building a workflow of transformations and analysis of data that will be agnostic with respect to the engines that will then be utilized for implementation. In fact, using the graphical interface (Fig. 13) it is possible to construct the flow of transformations and analysis considered most suitable, to then test different analysis engines and evaluate, score at hand, which is the best in terms of the effectiveness of predictions and computational and temporal resources required. All this makes possible to abstract the databases, the predictive algorithms, and the analyses necessary for their calibration and validation, both from the hardware layer and from the analysis engine. It gives the possibility, over time, to use new and more performing technologies, both on-premises and in cloud, without the need to write even a new line of code to adapt the various data models created.

PDI can access, both in reading and in writing, to a wide range of data repositories. By way of non-exhaustive example, it will be cited:

- *Relational database management system (RDBMS)*: Oracle, IBM® DB2®, MySQL, Microsoft SQL Server.
- *Spark and Hadoop*: Cloudera, Hortonworks, Amazon EMR, MapR, Microsoft Azure HDInsights.



(Fonte - Source: Hitachi Vantara)

Fig. 13 – Trasformazione di dati mediante l'utilizzo dell'interfaccia grafica ed intuitiva di PDI.
Fig. 13 – Transformation of data through the use of the graphic and intuitive interface of PDI.

ti su apposite basi di dati (*data warehouse*) e visualizzati attraverso *dashboard*, *scorecard*, mappe intelligenti, ecc. La *suite* Pentaho contiene al proprio interno la componente di *Business Analytics* atta alla costruzione degli strumenti necessari alla fruizione dei dati oggetto di analisi. PBA infatti consente di realizzare *dashboard* aggiornate in tempo reale e accedibili anche in mobilità tramite *cloud* oppure integrabili all'interno di pagine web o applicativi già esistenti. PBA dispone di una libreria di grafici, mappe e info-grafiche precompilati mediante la quale l'utilizzatore della soluzione, in autonomia e senza dover scrivere alcuna riga di codice, potrà costruire il cruscotto più idoneo a visualizzare i risultati delle analisi predittive (Fig. 14).

Nello schema logico funzionale riportato in Fig. 6 nel paragrafo 4, si sono identificati una serie di requisiti operativi ed ingegneristici e relative funzionalità di *data analytics* necessarie a soddisfarli. Volendo contestualizzare esigenze operative e funzionalità IoT in una architettura basata su Pentaho, si otterrebbe lo schema riportato in Fig. 15.

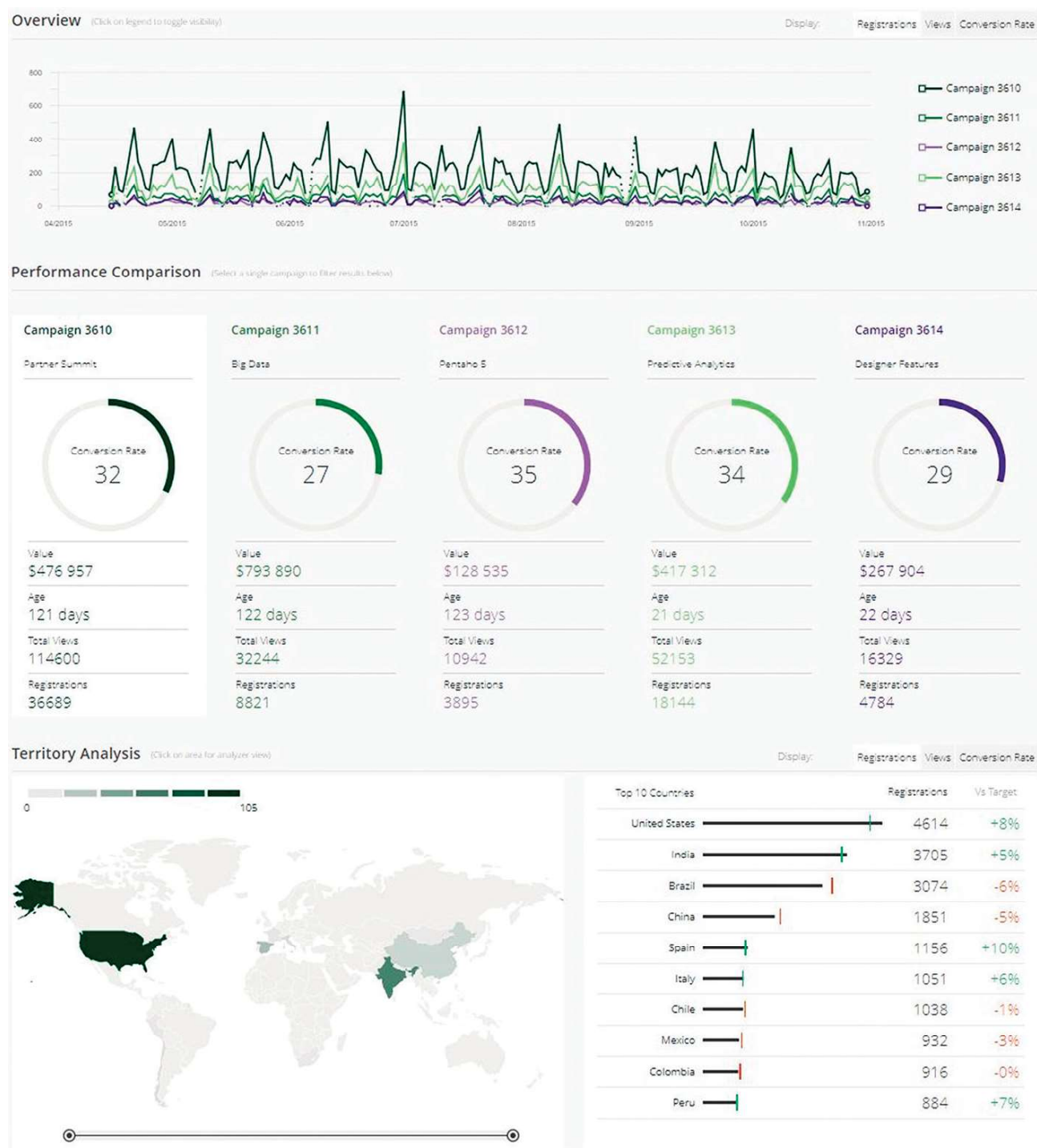
Le cinque macro-categorie di dati (*data sources*) potrebbero essere interfacciate con PDI sfruttando l'ampia gamma di interfacce di cui Pentaho dispone nativamente, oppure costruendo opportuni connettori tramite le API pubbliche, rendendo il flusso di dati in entrata totalmente automatizzato. I dati di campo, ad esempio, potrebbero essere gestiti ed inviati in streaming da broker MQTT che, collegati con *edge server* e TCMS per il treno, e con il *gateway* per il ponte, garantiscono che il flusso di dati campionati raggiunga la piattaforma di *data analytics* per le analisi *near-real time* e per quelle più approfondite inerenti alla calibrazione dei modelli. I dati ingegneristici invece possono essere raccolti mediante l'integrazione nativa che PDI offre verso i RDBMS più diffusi, oppure, a seconda dei casi, anche mediante un broker MQTT. DOMUS e GEOMEDIA potrebbero essere interfacciati, ad esempio, attraverso query dirette ai loro rispettivi database grazie a driver JDBC. Le informazioni relative alla circolazione, dovendosi preservare l'immutabilità delle fonti, dovrebbero essere accedute in sola lettura su un DB estratto, previa opportuna apertura delle base di dati da parte dei fornitori degli apparati; in tal guisa si potrebbero leggere tutte le informazioni necessarie al calcolo della risposta strutturale, senza dover modificare e nuovamente certificare gli apparati (es: SCC, CTC, ecc.). Il fascicolo di linea, invece, essendo una base di dati per lo più statica, potrebbe essere digitalizzata su un DB relazionale ed acceduta su richiesta da Pentaho in forma del tutto automatica senza ulteriori connettori. I dati di produzione, invece, essendo contenuti su sistemi gestionali quali ad esempio ERP o *asset management*, necessitano di appositi connettori per essere acceduti, quando non è possibile interrogare direttamente le basi di dati su cui si appoggiano. Nel computo, infine, prenderanno parte anche dati esogeni quali bollettini meteo o dati non

- *NoSQL databases and object storage*: MongoDB, Cassandra, HBase, Hitachi Content Platform.
- *Analytic databases*: Vertica, Greenplum, Teradata, SAP HANA, Amazon Redshift, Google Big Query, Microsoft Azure SQL Data Warehouse (DW).
- *Business applications*: Salesforce, Google Analytics.
- *Files*: XML, JSON, Microsoft Excel, CSV, txt, Avro, Parquet, ORC, unstructured files with related metadata, including audio, video and visual files.
- *Real-time data integration*: allows data streaming from Apache Kafka using Spark streaming and the most common IoT protocols, without the need for any additional code writing.

The results obtained from the analysis and from the orchestration performed utilizing PDI must then be memorized on specific databases (Data Warehouse) and displayed through dashboards, scorecards, smart maps, etc. The Pentaho suite contains the Business Analytics component suitable for the construction of the tools necessary for the utilization of the data being analyzed. In fact, PBA allows creating dashboards updated in real time and also accessible on the move via the cloud and/or integrated within existing web pages or applications. PBA has a library of graphs, maps and pre-filled info-graphics by which the user, autonomously and without having to write any line of code, will be able to build the most suitable dashboard to visualize the results of the predictive analysis (Fig. 14).

In the functional logic diagram shown in Fig. 6 in paragraph 4, have been identified a series of operational and engineering requirements, and the related data analytics functionalities necessary to satisfy them. Wanting to contextualize operational needs and IoT functionalities within a Pentaho-based architecture, it could be obtained the scheme shown in Fig. 15.

The five macro-categories of data (data sources) could be interfaced with PDI by exploiting the wide range of interfaces that Pentaho natively disposes of, or by building appropriate connectors via the public APIs, making the incoming data flow totally automated. Field data, for example, could be managed and streamed by MQTT brokers that, connected with edge servers and TCMS for the train, and with the gateway for the bridge, ensure that the sampled data flow reaches the data analytics platform where will be performed both near-real-time analysis and more in-depth analysis related to models' calibration. The engineering data can instead be collected through the native integration that PDI offers to the most common RDBMS, or, depending on the case, also through an MQTT broker. DOMUS and GEOMEDIA could be interfaced, for example, through direct queries to their respective databases thanks to JDBC drivers. The information concerning the circulation, having to preserve the immutability of the sources, should be accessed in read-only mode on an extracted DB, after appropriate opening of the database by the equipment suppliers; in this way it would be possible to read all the information



(Fonte - Source: Hitachi Vantara)

Fig. 14 – Es. di cruscotto informativo di Pentaho costituito da indicatori eterogenei aggiornati in tempo reale.
 Fig. 14 – E.g. of Pentaho information dashboard consisting of heterogeneous indicators updated in real time.

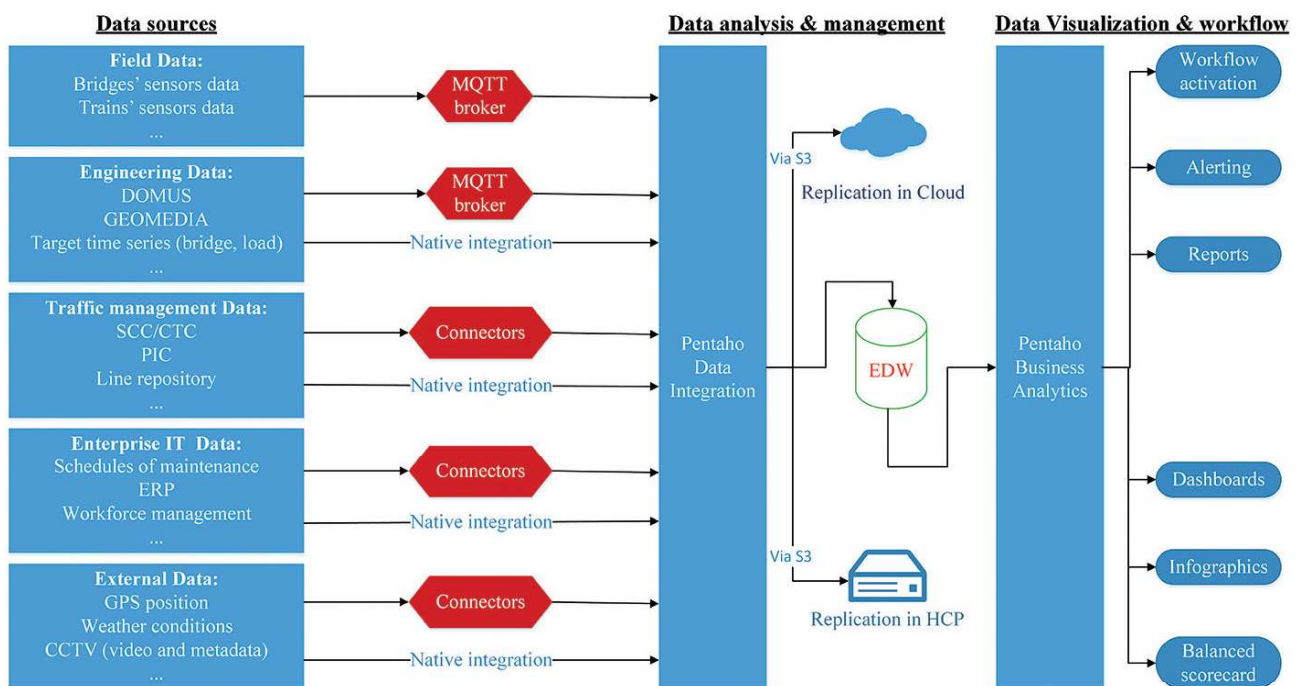
strutturati: i primi possono essere integrati nativamente sfruttando gli *streaming* (es: Kafka), per i secondi esistono funzionalità *ad hoc* in PDI che ne garantiscono l'interfacciamento ai fini di analisi. Tutto ciò posto, poco prima del passaggio di un rotabile sull'impalcato, la soluzione IoT sarebbe in grado, in autonomia, di compiere le seguenti azioni:

- a. acquisizione dei dati (statici e dinamici) inerenti al rotabile che sta per attraversare il ponte (*traffic management data*);
- b. raccolta dei dati ingegneristici (*engineering data*) relativi a:
 - i. ponte:
 - numero di campate e relativa lunghezza;
 - tipologia costruttiva e relativi dati tecnici;
 - ii. treno:
 - numero di vagoni e relativa geometria e rodiggio;
 - numero di assi per vagone;
 - carico statico per asse;
 - massa frenata;
 - velocità;

necessary for the calculation of the structural reaction, without having to modify and certify the equipments again (e.g. : SCC, CTC, etc.).

The line repository, on the other hand, being a mostly static database, could be digitized on a relational DB accessed on demand by Pentaho in a completely automatic form without additional connectors. The production data, on the other hand, being contained on supervision systems such as ERP or asset management, require specific connectors to be accessed, when it is not possible to directly query the databases on which they are stored. Finally, the computation will also include exogenous data such as weather forecasts or unstructured data: the first ones can be natively integrated using streaming (e.g.: Kafka), for the seconds there are ad hoc features in PDI that guarantee interfacing for the purposes of analysis. All this placed, just before the passage of a vehicle on the bridge, the IoT solution would be able, autonomously, to perform the following actions:

- a. acquisition of static and dynamic data related to the rolling stock that is about to cross the bridge (*traffic management data*);
- b. collection of engineering data relating to:
 - i. bridge:
 - number of spans and relative length;
 - construction type and related technical data;



(Fonte: elaborazione degli autori - Source: authors)

Fig. 15 – Architettura IoT logico-funzionale basata sulla piattaforma Pentaho per la manutenzione predittiva dei ponti ferroviari.

Fig. 15 – Logic-functional IoT architecture for predictive maintenance of railway bridges based on the Pentaho platform.

- c. integrazione di eventuali dati esogeni (*external data*);
- d. acquisizione della risposta strutturale attesa per quello specifico impalcato sollecitato da quel determinato carico dinamico (funzione dei dati acquisiti nei tre passaggi precedenti).

A fronte del passaggio del convoglio, invece, verranno realizzate ulteriori azioni:

- e. raccolta dei parametri della risposta strutturale campionati sia dai sensori a bordo treno che da quelli eventualmente installati sull'impalcato (*field data*);
- f. analisi comparativa tra quanto individuato al punto (d) e quanto ottenuto al punto (e). Tali analisi possono avvenire utilizzando metodi *dynamic time warping* (DTW), che permettono di misurare la distanza $\Delta(t)$ tra le sequenze allineate ricevute in input dal sistema (treno + ponte) rispetto alla serie target (calcolata al punto (d) in un approccio *knowledge-based*, oppure derivate da misurazioni in cui l'ampiezza del campione tenda a valori ampi). Posto che il valore previsto assunto dalla funzione $\Psi_e(t)$ possa essere maggiore o minore rispetto a quello realmente misurato sul campo $\Psi_r(t)$, definito a priori il valore soglia $\varphi(t)$ al superamento del quale il comportamento dell'impalcato monitorato possa essere considerato anomalo, per ogni *timestamp* di campionamento, affinché il ponte operi in condizioni di esercizio ottimali, dovrà essere verificata la seguente disequazione [1]:

$$\Delta(t) = |\Psi_e(t) - \Psi_r(t)| < \varphi(t) \quad (32)$$

I metodi DTW vengono utilizzati per la fase finale della comparazione, ma risulta necessario approfondire come si possa giungere al valore della risposta strutturale target, nei due casi di specie analizzati nel precedente paragrafo, quello *knowledge-based* e quello *data-driven*.

- i. *Knowledge-based*: trattandosi di contesti in cui si abbiano a disposizione analisi FMECA e RAM, e quindi in ambiti puntuali in cui si abbia un'ampia conoscenza delle condizioni al contorno e delle loro evoluzioni al trascorrere del tempo e dell'esercizio (ci si riferisce principalmente a ponti di recente installazione), ci si troverà di fronte a problemi supervisionati, in cui sono note le strutture delle variabili di input (perlopiù dati *time series*) e quelle di output. A questo punto diventa necessario identificare il sottoinsieme dei parametri della (27) in grado di generare una deriva dei parametri del moto misurati rispetto ai valori di target attesi. Al fine di predire un allarme preventivo (*early warning*), diventa fondamentale identificare quali siano, tra le n condizioni al contorno dell'equazione (27), quelle maggiormente in grado di generare una deriva. Tutto ciò posto, si intendono porre all'attenzione tre diversi modelli: Long Short-Term Memory (LSTM),

ii. *train*:

- number of wagons and related geometry, and wheel arrangement;
- number of axles per wagon;
- static load per axle;
- braked mass;
- speed;

- c. *integration of any exogenous data (external data)*;
- d. *acquisition of the expected response for that specific bridge stressed by that determined dynamic load (function of the data acquired in the three previous steps).*

Once the convoy is approaching the bridge, however, further actions will be carried out:

- e. *collection of the harmonic functions sampled both from the sensors on board the train and from those possibly installed on the bridge (field data)*;
- f. *comparative analysis between the values identified at point (d) and the values obtained at point (e). These analyses can take place applying dynamic time warping (DTW) methods that allow to measure the distance $\Delta(t)$ between the aligned sequences received as input by the system (train + bridge) with respect to the target time series (calculated at point d when utilizing a knowledge-based approach, or derived from measurements in which the sample size tends to wide values). Let $\Psi_e(t)$ the expected value extracted by the target series, it can be higher or lower with respect to the value really measured on field in real time $\Psi_r(t)$; let $\varphi(t)$ the threshold, known a priori, that once overtaken certifies that the behaviour of the bridge can be considered as anomalous. Per each sampling time stamp, for the monitored subsystem to run with optimal operating conditions, the following inequation needs to be satisfied[1]:*

$$\Delta(t) = |\Psi_e(t) - \Psi_r(t)| < \varphi(t) \quad (32)$$

The DTW methods are used for the final phase of the comparison, but it is necessary to deepen how to reach the value of the structural reaction, in the two cases of species analyzed in the previous paragraph, the *knowledge-based* and the *data-driven*.

- i. *Knowledge-based: dealing with circumstances in which FMECA and RAM analyzes are available, and therefore in specific cases in which there is a broad knowledge of the boundary conditions and their evolutions during the time and the operations (thus it is referred mainly to bridges recently installed), it will be in front of supervised problems, in which both the structures of the input variables (mostly time series data) and those of output are known. At this point it becomes necessary to identify the subset of the parameters of (27) able to generate a drift of the motion parameters measured with respect to the expected target value. In order to predict an early warning, it becomes*

Auto-Regressive Integrated Moving Average (ARIMA), e Random Forest Regressor.

1. *LSTM*: per una corretta contestualizzazione di tali modelli, è necessario riferirsi alle reti neurali ricorrenti (RNN), ovvero una particolare tipologia di reti neurali artificiali in grado di tener traccia delle dipendenze tra nodi. È quindi possibile preservare le informazioni sequenziali in uno strato interiore della rete, consentendo di utilizzare la conoscenza acquisita nei successivi passaggi temporali. LSTM sono quindi una speciale tipologia delle RNN, introdotte per affrontare la carenza di memoria a lungo termine delle *vanilla RNNs*. In linea di principio una LSTM è composta da una cella (*cell*), un *input gate*, un *output gate*, ed un *forget gate* (Fig. 16). È particolarmente di interesse il ruolo del *forget gate*, che permette al modello di eliminare gli input passati che non sono più di interesse per prevedere il futuro. Il maggiore vantaggio di questa metodologia rispetto ad un modello di tipo *time series* classico (es.: ARMA, ARIMA) è l'adattabilità del *forget gate*: un modello ARIMA computa a priori il numero di *lags* che il modello prenderà come input, e tale numero sarà prefissato nella specificazione del modello, mentre il *forget gate* permette al modello di variare la dipendenza dai *lags* temporalmente precedenti. La cella memorizza i valori inerenti a intervalli di tempo arbitrari, mentre i tre *gate* agiscono da "regolatori" dei flussi di informazioni che entrano ed escono dalla cella al trascorrere delle iterazioni. Le reti LSTM sono adatte quindi per classificare, elaborare, e fare previsioni basate su dati *time series* ove, sovente, possono esserci dei *lag* temporali di durata sconosciuta tra eventi significativi di una serie storica. LSTM non subiscono distorsioni nelle computazioni dovute alla presenza dei *lag* temporali che si susseguono tra gli eventi della *time series*, rendendo tali reti nettamente più efficaci delle RNN tradizionali, dei modelli *hidden Markov*, ecc.

Di seguito si riportano le forme compatte delle equazioni per il *forward pass* di una unità LSTM con *forget gate*:

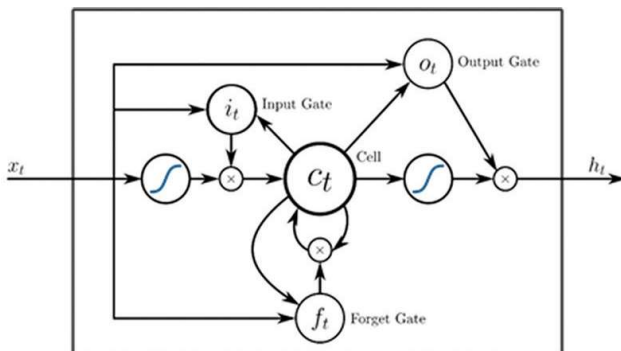


Fig. 16 – Rappresentazione grafica di una LSTM.
Fig. 16 – Graphic representation of an LSTM.

essential to identify which are, among the n boundary conditions of the equation (27), those most prone to generate a drift. This being the case, it is intended to focus on three different models: Long Short-Term Memory (LSTM), Auto-Regressive Integrated Moving Average (ARIMA), and Random Forest Regressor.

1. *LSTM*: for a correct contextualization of such models, it is necessary to refer to recurrent neural networks (RNN), i.e. a particular type of artificial neural networks able to keep track of dependencies between nodes. It is, therefore, possible to preserve the sequential information in an inner layer of the network, making it possible to use the knowledge previously acquired in the subsequent temporal passages. LSTM are, therefore, a special type of RNN introduced to address the long-term memory shortage of vanilla RNNs. In principle, the LSTM consists of a cell, an input gate, an output gate, and a forget gate (Fig. 16). The role of the forget gate is particularly interesting because it allows the model to eliminate past inputs that are no longer of interest to predict the future. The major advantage of this method compared to a classic time series model (e.g. ARMA, ARIMA) is the adaptability of the forget gate: an ARIMA model a priori calculates the number of lags that the model will take as input, and such number will be prefixed in the model specification. The forget gate within the LSTM, on the other hand, allows the model to vary the dependence on the temporally earlier lags.

The cell stores the values inherent at arbitrary time intervals, while the three gates act as "regulators" of the information flows that enter and leave the cell when the iterations progress. The LSTM networks are therefore suitable for classifying, processing, and making predictions based on time series data where, often, could be time lags of unknown duration between significant events of a historical series. LSTM are not subjected to distortions in computations generated by the presence of time lags occurring between time series events, making these networks clearly more effective than traditional RNNs, hidden Markov models, etc.

Following are the compact forms of the equations for the forward pass of a LSTM unit with forget gate:

$$f_t = \sigma_g(W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f) \quad (33)$$

$$i_t = \sigma_g(W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i) \quad (34)$$

$$o_t = \sigma_g(W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o) \quad (35)$$

$$c_t = f_t \circ c_{t-1} + i_t \circ \sigma_c(W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c) \quad (36)$$

$$h_t = o_t \circ \sigma_h(c_t) \quad (37)$$

where:

– $x_t \in \mathbb{R}^d$ represents the input vector to the LSTM;

– $f_t \in \mathbb{R}^h$ is the activation vector of the forget gate;

– $i_t \in \mathbb{R}^h$ is the activation vector of the input gate;

$$f_t = \sigma_g (W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f) \quad (33)$$

$$i_t = \sigma_g (W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i) \quad (34)$$

$$o_t = \sigma_g (W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o) \quad (35)$$

$$c_t = f_t \circ c_{t-1} + i_t \circ \sigma_c (W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c) \quad (36)$$

$$h_t = o_t \circ \sigma_h(c_t) \quad (37)$$

dove:

- $x_t \in \mathbb{R}^d$ rappresenta il vettore in *input* alla LSTM;
- $f_t \in \mathbb{R}^h$ è il vettore di attivazione del *forget gate*;
- $i_t \in \mathbb{R}^h$ è il vettore di attivazione dell'*input gate*;
- $o_t \in \mathbb{R}^h$ rappresenta il vettore di attivazione dell'*output gate*;
- $h_t \in \mathbb{R}^h$ è il vettore di *output* della LSTM;
- $c_t \in \mathbb{R}^h$ rappresenta il vettore di stato della cella;
- $W \in \mathbb{R}^{h \times d}$, $U \in \mathbb{R}^{h \times h}$, $b \in \mathbb{R}^h$ rappresentano le matrici dei pesi ed i parametri che saranno computati durante la fase di calibrazione del modello.

Si noti che al tempo t_0 , $c_0 = 0$ e $h_0 = 0$, mentre l'operatore $\circ$ rappresenta il prodotto di Hadamard. Il pedice t , indicizza le iterazioni di calcolo, mentre gli indici d ed h rappresentano rispettivamente il numero delle condizioni al contorno fornite in *input* ed il numero delle unità latenti (*hidden units*).

2. **ARIMA**: tali modelli, facenti parte della famiglia dei processi lineari non stazionari, vengono utilizzati per analizzare *time series* tenendo traccia anche della stagionalità dei dati. In quest'ultimo caso si parlerà di modello ARIMA (p, d, q) in grado di memorizzare differenti serie di ordine d , dove il parametro p rappresenta l'ordine del modello auto regressivo e quindi il numero dei *lag* temporali, e q è l'ordine del modello a media mobile. Il funzionamento di ARIMA si basa sulla definizione di x_t come combinazione lineare dei valori precedenti $x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-p}$ e di un "rumore di sottofondo" $\epsilon_t \in \epsilon_{t-1}, \dots, \epsilon_{t-q}$. Il modello ARIMA (p, d, q) è esprimibile mediante la seguente formulazione, ed è stimabile mediante l'approccio Box-Jenkins [19]:

$$(1 - \sum_{i=1}^p \alpha_i L^i) (1 - L)^d X_t = (1 + \sum_{j=1}^q \beta_j L^j) \epsilon_t \quad (38)$$

Inoltre, i modelli di tipo *Autoregressive-Moving Average* hanno anche la peculiarità di riuscire ad incorporare, nella previsione dell'*output* futuro, gli shock pregressi: questo deriva dalla componente *moving-average* nel modello, che altro non è che l'effetto della parte randomica ϵ_t , ossia l'effetto degli *error terms* non osservati. Uno scostamento dalla normalità dei termini di errore, quale uno shock (es.: un evento atmosferico particolarmente violento ed imprevisto), porterà ad un effetto di riverbero sui valori futuri della previsione.

- $o_t \in \mathbb{R}^h$ rappresenta il vettore di attivazione del *forget gate*;
- $h_t \in \mathbb{R}^h$ rappresenta il vettore di *output* della LSTM;
- $c_t \in \mathbb{R}^h$ rappresenta il vettore di stato della cella;
- $W \in \mathbb{R}^{h \times d}$, $U \in \mathbb{R}^{h \times h}$, $b \in \mathbb{R}^h$ rappresentano le matrici dei pesi, e i parametri che saranno computati durante la fase di calibrazione del modello.

Note that at time t_0 , $c_0 = 0$ and $h_0 = 0$, while the operator $\circ$ represents the product of Hadamard. The subscript t , indexes the calculation iterations, while the indexes d and h represent respectively the number of boundary conditions provided in *input*, and the number of latent units (*hidden units*).

2. **ARIMA**: these models, which are part of the family of non-stationary linear processes, are used to analyze time series, also keeping track of the seasonality of the data. In the latter case it will be referred about the ARIMA model (p, d, q) capable of storing different series of order d , where the parameter p represents the order of the auto regressive model and therefore the number of time lags, while q is the order of the moving average model. The operation of ARIMA is based on the definition of x_t as a linear combination of the previous values $x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-p}$ and a "background noise" $\epsilon_t \in \epsilon_{t-1}, \dots, \epsilon_{t-q}$. The ARIMA model (p, d, q) can be expressed using the following formulation, and can be estimated using the Box-Jenkins approach [19]:

$$(1 - \sum_{i=1}^p \alpha_i L^i) (1 - L)^d X_t = (1 + \sum_{j=1}^q \beta_j L^j) \epsilon_t \quad (38)$$

Furthermore, the Autoregressive-Moving Average models also have the peculiarity of being able to incorporate previous shocks into the forecast of future output: this derives from the moving-average component in the model, which is nothing more than the effect of the random part ϵ_t , i.e. the effect of unobserved error terms. A deviation from the normality of the error terms, such as a shock (e.g.: a particularly violent and unexpected weather event), will lead to a reverberation effect on the future values of the forecast.

3. **Random Decision Forest (RDF)**: this model, which is part of the so-called ensemble methods (i.e., use multiple learning models to maximize effectiveness), is a classifier composed of several decision trees and capable of providing as output the class corresponding to the exit of tree classes individually considered [20]. In essence, RDF uses a "dividi et impera" approach in which n disjointed models (weak learners) are coupled to act in unison, becoming, according to a holistic approach, a single "strong learner". The theory behind RDF consists of the creation of a whole "forest" of random and unrelated decision trees, in order to elaborate the most effective prediction possible. A decision tree consists of a root node capable of creating a binary division until a given initial criterion

3. *Random Decision Forest* (RDF): tale modello, facente parte dei metodi così detti *ensemble* (cioè che utilizzano modelli di apprendimento multipli per massimizzare l'efficacia), è un classificatore d'insieme composto da svariati alberi di decisione e in grado di fornire come *output* la classe che corrisponde all'uscita delle classi degli alberi presi individualmente [20]. In sostanza, RDF utilizza un approccio "*dividi et impera*" in cui n modelli disgiunti (*weak learners*) vengono accoppiati per agire all'unisono divenendo, secondo un approccio olistico, un unico "*strong learner*". La teoria alla base del RDF consta nella creazione di una intera "foresta" di alberi decisionali casuali e non correlati, al fine di elaborare la predizione più efficace possibile. Un albero decisionale è costituito da un nodo radice capace di creare una divisione binaria fino al soddisfacimento di un determinato criterio iniziale. Tale divisione binaria (Fig. 17) fornisce un valore predittivo basato sui nodi "interiori" e che conduce, al trascorrere delle iterazioni, ai nodi terminanti (*final class*).

Va osservato che, nel caso di specie trattato da questa memoria, data la complessità delle variabili in gioco, al fine di rendere l'applicazione del RDF efficacemente implementabile, risulta fondamentale effettuare una selezione delle variabili più significative, riducendone il numero e la complessità. Per questo, prima dell'utilizzazione del modello RDF, andrebbero utilizzati opportuni strumenti di riduzione tra cui, a titolo esemplificativo ma non esaustivo, si citano: *Least Absolute Shrinkage and Selection Operator* (LASSO) e l'Analisi delle Componenti Principali (PCA).

LASSO è un metodo di analisi di regressione in grado di selezionare e normalizzare variabili così da aumentare l'accuratezza e l'interpretabilità dei modelli statistici. PCA, invece, è una tecnica per la semplificazione dei dati derivante dal dominio della statistica multivariata. PCA può applicarsi sia mediante una risoluzione lineare che matriciale. L'applicazione di un metodo di riduzione risulta quindi condizione necessaria ma non sufficiente alla predizione delle condizioni di instabilità del ponte ferroviario oggetto di analisi mediante RDF.

ii. *Data-driven*: quando non si hanno sufficienti informazioni sulle condizioni al contorno del ponte e sulla storia delle stesse al trascorrere del tempo e degli eventi (per esempio sismi pregressi, cedimenti vincolari, cicli di gelo e disgelo, ecc.) risulta molto più complesso giungere analiticamente al calcolo della risposta dell'impalcato, proprio perché non è possibile computare correttamente tutte le variabili in gioco. In questi casi, quindi, l'insieme di spostamenti, velocità o accelerazioni target che saranno analizzati con il metodo DTW al passaggio di ogni treno, dovranno essere derivati indirettamente. Tale stima sarà tanto più accurata, quanto maggiore sarà il numero dei campionamenti. I modelli utiliz-

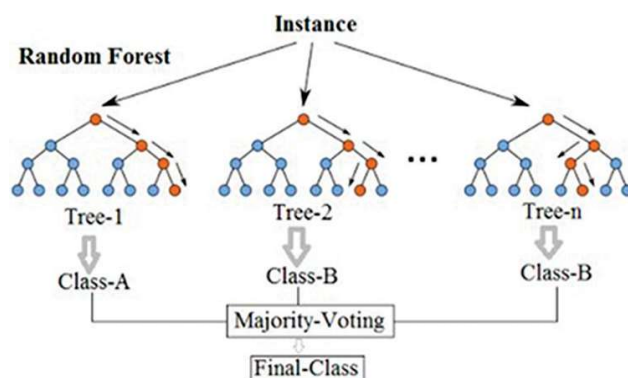


Fig. 17 – Rappresentazione semplificata di un modello Random Forest.

Fig. 17 – Simplified representation of a Random Forest model.

is satisfied. This binary division (Fig. 17) provides a predictive value based on the "inner" nodes and which leads, when the iterations progress, to the terminating nodes (*final class*).

It should be noted that, in the specific case treated by this paper, considering the complexity of the variables involved, in order to make the application of RDF effectively implementable, it is essential to make a selection of the most significant variables, reducing their number and complexity. For this reason, before using the RDF model, appropriate reduction tools should be used, including, by way of example but not limited to, the following: *Least Absolute Shrinkage and Selection Operator* (LASSO) and *Principal Component Analysis* (PCA).

LASSO is a regression analysis method able to select and normalize variables to increase the accuracy and interpretability of statistical models. PCA, on the other hand, is a technique for simplifying data deriving from the domain of multivariate statistics. PCA can be applied both through a linear and matrix resolution. The application of a reduction method is, therefore, a necessary but not sufficient condition for the prediction of the instability conditions of the railway bridges being analyzed by RDF.

ii. *Data-driven*: when there is not enough information on the boundary conditions of the bridge and on their history over time and events (for example previous earthquakes, displacements at support, frost and thaw cycles, etc.) it is much more complex to calculate analytically the expected response provided from the bridge, precisely because it is not possible to correctly compute all the variables involved. In these cases, therefore, the set of displacements, speeds, or accelerations target that will be analyzed with the DTW method at the passage of each train, will have to be derived indirectly. This estimate will be more accurate, the greater the number of samplings. The models that can be used in such cases are the same

zabili in questo frangente sono i medesimi descritti per l'approccio *knowledge-based*, con la differenza che, non potendo in questo caso computare analiticamente la risposta strutturale target, si dovrà procedere con una sua misurazione indiretta. Ricordando il teorema del limite centrale affermando che la somma (o la media) di un grande numero di variabili aleatorie indipendenti e dotate della stessa distribuzione è approssimativamente normale e indipendentemente dalla distribuzione soggiacente, si può ipotizzare che al crescere dell'ampiezza del campione analizzato, allora la distribuzione campionaria tenderà alla distribuzione della popolazione. Quindi ipotizzando di effettuare diverse migliaia di misurazioni al passaggio dei vari convogli sull'*i*-esimo ponte, si potrà tendere all'approssimazione della risposta strutturale target funzione delle condizioni al contorno note (massa del veicolo, velocità di marcia, numero di assili, lunghezza dell'impalcato, geometria costruttiva, ecc.), derivando, con un approccio di ingegneria inversa, gli eventuali effetti, nel loro complesso, di condizioni al contorno non note a priori (cedimenti vincolari, degradazione delle proprietà meccaniche dei materiali, ecc.) e ovviamente non identificabili singolarmente.

Tutto ciò posto, qualora la disequazione (32) fosse soddisfatta, la soluzione IoT si limiterebbe a salvare ed indicizzare le grandezze campionate e tutte le variabili al contorno, registrando il soddisfacimento delle condizioni di sicurezza. In caso contrario, invece, potrebbe inviare un *alert* al Dirigente Centrale Operativo (DCO), permettendo di visualizzare tutte le grandezze necessarie su un cruscotto aggiornato in tempo pressoché reale. In aggiunta, il sistema potrebbe inviare in una mail tutti gli allegati documentali (dati ingegneristici, variabili campionate, deformate, velocità di vibrazione, dati di linea, eventuali immagini video se disponibili da telecamere nei paraggi, ecc.) al fine di agevolare rapide ed efficaci contromisure atte a minimizzare il rischio per i convogli successivi, dirimendo anche eventuali falsi positivi. In entrambi i casi, gli output delle analisi effettuate da PDI al trascorrere del tempo, verrebbero salvati su un apposito *data warehouse* (EDW) che fornirà gli *input* necessari a PBA per alimentare in tempo pressoché reale le *dashboard*, i cruscotti informativi e le azioni che, in automatico, verrebbero realizzate a fronte del superamento di determinati valori soglia.

Al netto delle azioni atte alla costruzione di un *framework* di manutenzione predittiva degli impalcati, l'architettura proposta in Fig. 15, contempla anche una componente avanzata di protezione dei dati raccolti e analizzati. Infatti, PDI mediante l'integrazione nativa con *file system* esterni, consente l'archiviazione dei dati conservati sul database principale, spostandoli, a fronte di soglie preimpostate, o su un *object storage* esterno (es: Hitachi Content Platform, HCP) che garantisca la *compliance* e l'immutabilità dei dati, preservandone anche il valore legale ai fini di eventuali controversie giudiziarie, oppure

*as those described for the knowledge-based approach, with the difference that, since it is not possible in this case to analytically compute the target structural response, it will be required to proceed with its indirect measurement. Recalling the central limit theorem stating that the sum (or average) of a large number of independent random variables and having the same distribution is approximately normal and independent of the underlying distribution, it is possible to hypothesize that as the width of the analyzed sample increases, then the sampling distribution will tend to the distribution of the population. Therefore, assuming to carry out several thousand measurements at the passage of the various trains on the *i*-th bridge, it will be possible to tend to the approximation of the structural reaction function according to the known boundary conditions (vehicle mass, travel speed, number of axles, length of the bridge, constructive geometry, etc.), deriving, with an inverse engineering approach, the possible effects, as a whole, of boundary conditions not known a priori (displacements at support, degradation of the mechanical properties of materials, etc.) and obviously not individually identifiable.*

All this given, if the inequation (32) will be satisfied, the IoT solution would act just saving and indexing the sampled quantities and all the boundary variables, recording the satisfaction of the safety conditions. Otherwise, it could send an alert to the Central Operations Manager (DCO), allowing inspecting all the necessary information on a dashboard updated in near real time. In addition, the system could send all the documental attachments in an email (engineering data, sampled variables, deformations, vibrations speed, line data, and videos/images if available from cameras nearby, etc.) in order to facilitate rapid and effective countermeasures aimed at minimizing the risk for subsequent convoys, also resolving potential false positives. In both cases, the outputs of the analyses carried out by PDI over time would be saved on a specific data warehouse (EDW), which will provide the necessary inputs to PBA to feed dashboards, infographics, and also deploying actions that, through PDI, automatically and in near-real-time, would be implemented when certain threshold values are exceeded.

In addition to the actions required for the construction of a predictive maintenance framework for railway bridges, the architecture proposed in Fig. 15, also contemplates an advanced component of protection of the data collected and analyzed. In fact, PDI through native integration with external file systems, allows the archiving of data stored on the main database, moving them, against preset thresholds, on an external object storage (e.g.: Hitachi Content Platform, HCP) that guarantees the compliance and immutability of data, also preserving the legal value for the purposes of any legal disputes. But, in addition, PDI can also move the data directly to the cloud (public or private) so to make the main database lean and

direttamente verso il *cloud* (pubblico o privato) così da rendere il database principale snello e funzionale, pur conservando tutti i dati raccolti dalla messa in esercizio in avanti. Tale procedura di *offloading* dei dati, non garantisce soltanto un miglioramento delle prestazioni dell'intera architettura, ma consente anche di ottimizzare i costi: infatti il costo al gigabyte su un DB prestazionale (inclusendo hardware e software) è molto superiore a quello di un *object storage* dove il dato deve essere solo conservato e acceduto soltanto a fronte di eventi rari. Si noti, infine, che HCP potrebbe rappresentare un primo strato di archiviazione che, al raggiungimento di specifiche soglie, andrebbe in automatico ad effettuare esso stesso *offloading* in *cloud*, anche senza l'intervento di Pentaho, sfruttando l'intelligenza di cui dispone a bordo.

Grazie ad un modulo di *cyber security* ingegnerizzato *ad hoc*, tutte le comunicazioni tra i vari layer del framework, tra questi e gli apparati distribuiti da monitorare, così come tutte le connessioni con gli utenti finali sono protette da avanzati strumenti di crittografia. Il framework Lumada fornisce tutto il necessario per costruire una piattaforma IoT disegnata su misura per indirizzare tutte le necessità del cliente, utilizzando tecnologie sia proprietarie Hitachi che di terze parti, al fine di costruire una soluzione verticalmente integrata e allineata alle esigenze di progetto.

Hitachi fornisce, quindi, anche le conoscenze di dominio per guidare gli *stakeholder* nella definizione delle specifiche tecniche, nell'ottimizzazione dei processi industriali e nel ciclo *end-to-end* della creazione del valore.

La customizzazione di Lumada consente la realizzazione un framework di manutenzione predittiva degli impalcati ferroviari che integri le competenze di dominio con le tecnologie abilitanti i *predictive analytics* ed i sistemi automatizzati di supporto alle decisioni. Tale framework consente di interfacciarsi in tempo pressoché reale con i vari ponti aperti all'esercizio e con i treni in transito, memorizzando eventi, segnali diagnostici e contatori. In questo modo sarà possibile costruire un *data set* multi-sorgente che sia statisticamente rappresentativo e abiliti l'estrazione di modelli predittivi al fine di effettuare le operazioni manutentive in logica *just-in-time/in-case*, aumentando sensibilmente la sicurezza dei treni in linea ed eliminando eventuali "sacche" di inefficienza.

6. Conclusioni

Nell'ambito delle opere civili, la stragrande maggioranza delle opere d'arte costruite a partire dalla metà del secolo scorso, sono soggette ad un globale decadimento delle proprietà meccaniche dovuto alle variate condizioni di carico ed esercizio rispetto a quelle di progetto, all'aggressione degli agenti atmosferici (es. cicli di gelo-disgelo), e, talvolta, a causa di azioni manutentive sottodimensionate. A causa di budget sempre più ristretti e del numero di opere d'arte da mantenere, risulta di fondamentale importanza riuscire a conciliare sostenibilità econo-

functional, while retaining all the data collected from commissioning forward. This data offloading procedure not only guarantees an improvement in the performance of the entire architecture, but also allows to optimize costs: in fact, the cost per gigabyte on a performance DB (including hardware and software) is much higher than that of an object storage where the data must only be stored and accessed solely in the face of rare events. Finally, it should be noted that HCP could represent a first archiving layer that, upon reaching specific thresholds, would automatically and autonomously proceed to offload parts of the DB in the cloud, even without the intervention of Pentaho, exploiting the intelligence on board.

Using a cyber-security module designed ad hoc, all the communications among the different framework's layers, among those and the distributed assets to be monitored, and also all the connections with the end users are protected by advanced encryption tools. The Lumada framework provides everything needed to build a tailor-made IoT platform to address all customer needs, using both proprietary Hitachi and third-party technologies, to build a vertically integrated solution that aligns with project needs. Hitachi provides not only the technology, but also the domain knowledge to advise the involved stakeholders in defining technical specs, in industrial processes optimization, and within the end-to-end cycle of value creation.

Lumada customization enables the creation of a predictive maintenance framework for railway bridges that integrates domain competencies with technologies enabling both predictive analytics and computerized decision support systems. This framework allows to interface in almost real time with the various bridges open to the traffic and with the trains in transit, memorizing events, diagnostic signals and counters. In this way it will be possible to construct a multi-source data set that is statistically representative and enables the extraction of predictive models in order to carry out maintenance operations in just-in-time/in-case logic, significantly increasing the safety of trains in line and eliminating any potential maintenance inefficiency.

6. Conclusions

In the field of civil infrastructures, the vast majority of civil infrastructure built since the middle of the last century, are subject to a global deterioration of mechanical properties due to varied loads and operating conditions compared to the design, to the aggression of atmospheric agents (e.g. freeze-thaw cycles), and sometimes, due to undersized maintenance actions. Due to increasingly tight budgets and the number of infrastructure to be maintained, it is of fundamental importance to be able to reconcile economic sustainability with maintenance effectiveness. Thanks to a deep engineering knowledge, using new IoT technologies for sampling, collecting, transmitting and analyzing data, it is possible to create data-dri-

mica con efficacia manutentiva. Grazie ad una profonda conoscenza ingegneristica, utilizzando nuove tecnologie IoT per il campionamento, la raccolta, la trasmissione e l'analisi dei dati, è possibile creare *framework* manutentivi *data-driven* in cui le variabili di stato dei ponti vengono monitorate in tempo quasi reale sia mediante sensori installati sugli impalcati, sia grazie al passaggio di treni commerciali in grado di agire come sensori in movimento. La possibilità di individuare risposte strutturali critiche e/o di identificare loro derive al trascorrere del tempo e dell'esercizio, rappresenta il driver di scelta per indirizzare le ispezioni sul campo con un approccio *just-in-case*, estendendo la vita utile delle opere d'arte, effettuando interventi manutentivi "su misura" e solo quando strettamente necessari. Per raggiungere tale scopo risulta fondamentale la collaborazione tra i vari soggetti portatori di interesse, quali la società di gestione dell'infrastruttura ferroviaria, le aziende eroganti l'esercizio, i fornitori degli apparati di segnalamento e gestione del traffico, le aziende produttrici dei rotabili, e i fornitori di tecnologie di *big data* e *analytics* che dovranno agire a fianco di un *system integrator* mettendo a fattor comune tutti i contributi dei vari *stakeholders*. Tale collaborazione potrebbe portare ad un investimento economico iniziale di modeste entità ripartito tra i vari componenti sopra citati, al fine di equipaggiare un numero ristretto di rotabili commerciali con accelerometri sui carrelli, scegliere alcuni tra i ponti più adatti a tali analisi equipaggiandoli con sensoristica *ad hoc*, costruendo quindi uno scenario di test. Così facendo la piattaforma IoT sarebbe in grado di ricevere i dati provenienti sia dai sensori a bordo treno che da quelli presenti sugli impalcati, calcolando a fronte dei modelli fisico-matematici forniti in *input*, i parametri del moto del ponte, funzione delle relative condizioni al contorno. Tale ambiente di test sarebbe quindi in grado, in forma automatizzata, di leggere le condizioni al contorno del carico dinamico, integrarle con quelle del ponte oggetto di attraversamento, calcolare le funzioni modali attese, identificare eventuali anomalie tra le stesse e quelle misurate in tempo reale dalla strumentazione sia a bordo treno che sul ponte. Il *know-how* derivabile da un ambiente di test di tale caratura sarebbe di fondamentale importanza per la calibrazione e validazione dei modelli matematici, ma anche per la certificazione dell'architettura IoT *end-to-end* necessaria per scalare dall'ambiente di test ad uno più esteso di produzione.

La costruzione di uno strumento di supporto alle decisioni automatizzato e *data-driven* potrebbe rappresentare, nel dominio delle manutenzioni, quella funzione obiettivo in grado di garantire il miglioramento degli indicatori sia di efficienza che di efficacia, minimizzando, al contempo, i rischi per la circolazione ferroviaria. Nell'era dell'Industrial Internet of Things sta prendendo piede una *cross fertilization* tra l'ingegneria ferroviaria e l'Information Technology, richiedendo l'utilizzo di conoscenze verticalmente integrate che tendono a completare, estendere e superare i limiti dell'ingegneria ferroviaria classica.

ven maintenance frameworks in which the state variables of the bridges are monitored in near real time by sensors installed both on the bridge and on commercial trains that, suitably equipped, can act as moving sensors during their transits. The possibility of identifying critical structural responses and/or identifying their drifts along the time and the operations represents the driver of choice for directing field inspections with a just-in-case approach, extending the useful life of the infrastructure, carrying out custom-made maintenance operations only when strictly necessary. To achieve this goal, is fundamental the collaboration between the various stakeholders, such as the railway infrastructure management company, the companies managing the train services, the suppliers of signaling and traffic management equipment, the rolling stock manufacturers, and the suppliers of big data and analytics technologies that, working closely with a system integrator adding consulting skills, will have to blend all the contributions of the various stakeholders. This collaboration could lead to a modest initial economic investment divided between the various components mentioned above, in order to equip a limited number of commercial vehicles with accelerometers on bogies, to choose some of the bridges most suitable for such analyzes, equipping them with ad hoc sensors, thus building a test scenario. In this way the IoT platform would be able to receive data coming from both train sensors and those present on the bridges, calculating the parameters of the bridge motion, function of the relative boundary conditions. This test environment would therefore be able, in an automated form, to read the boundary conditions of the dynamic load, integrate them with those of the bridge to be crossed, calculate the expected modal functions, identify any anomalies between the expected values and those measured in real-time from the instrumentation both on board the train and on the bridge. The know-how deriving from a test environment of this caliber would be of fundamental importance for the calibration and validation of mathematical models, but also for the certification of the end-to-end IoT architecture necessary to scale from the test environment to a more extensive production scenario.

The construction of an automated and data-driven decision support system could represent, in the maintenance domain, an objective function able to guarantee the improvement of both efficiency and effectiveness indicators, minimizing, at the same time, the risks for train circulation.

Within the era of the Industrial Internet of Things there is a cross fertilization between railway engineering and Information Technology, which requires the utilization of vertically integrated knowledge that tend to complement, extend and overtake the paradigms of the classical railway engineering.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] A. LUGARÀ, "The railway predictive maintenance and the enabling role of the internet of things", *Ingegneria Ferroviaria*, May 2018, pag. 434-463.
- [2] <http://www.rfi.it/rfi/linee-stazioni-territorio/Istantanea-sulla-rete#2>
- [3] Workshop, "La manutenzione integrata nell'ambito di Industria 4.0", Università di Napoli, 28/09/2018.
- [4] <http://www.rfi.it/rfi/sicurezza-e-innovazione/Circolazione-ed-efficienza-della-rete/Rotabili-e-diagnostica-dell%E2%80%99infrastruttura-nazionale/Rotabili-e-diagnostica-dell%E2%80%99infrastruttura-nazionale>
- [5] H.M. HASHEMIAN, W.C. BEAN, "State-of-the-Art Predictive Maintenance Techniques", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* (Volume: 60, Issue:10, Oct. 2011).
- [6] L. FRYBA, "Dynamics of Railway Bridges", Ch. 1 and Ch.5, Thomas Telford, London, 1996.
- [7] L. FRYBA, "Vibration of Solids and Structures under Moving Load", Ch. 1, Thomas Telford, London, 1999.
- [8] R.F. HOSKINS, "Delta Functions: An introduction to Generalised Functions", 2nd edition, Ch2 and Ch.3, Woodhead Publishing, 2009.
- [9] A.K. CHOPRA, "Dynamics of Structures", Ch. 17, 4th Edition, Prentice Hall, 2012.
- [10] G. BUDA, S. CADDEMI, "Identificazione del danno di travi di Eulero-Bernoulli soggette a carichi quasi statici", 16th AIMETA Congress of Theoretical and Applied Mechanics, AIMETA, 2003.
- [11] C.S. DESAI, A.M. SIRIWARDANE, "Numerical models for track support structures", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 108 (1982), No 3, pg. 461-480.
- [12] P. SALKER, C. ADAM, "Modeling of dynamic train bridge interaction in high speed railways". *Springer Journal*, (226) 2473-2495, 2015.
- [13] ETSI TS 102 690 V2.1.1 "Machine-to-Machine communications" (M2M); Functional architecture.
- [14] A. BRUNETTI, P. MAZZANTI, "Il monitoraggio dinamico delle strutture e delle infrastrutture con interferometria radar terrestre". www.ingenio-web.it.
- [15] Allegato 1 all'Istruzione 44 C, "Visite di controllo ai ponti, alle gallerie e alle altre opere d'arte dell'infrastruttura ferroviaria", catalogo difetti ponti, 2014.
- [16] L. LUZI, S. HAILEMIKAEL, D. BINDI, F. PACOR, F. MELE, F. SABETTA, "Italian Accelerometric Archive (ITACA)", version 2.0: A Web Portal for the Dissemination of Italian Strong-motion Data, *Seismological Research Letters*, 79 (5), 716-722. Doi: 10.1785/gssrl.79.5.716, 2008.
- [17] LENZI et al., "Annotazioni sulla dinamica dei ponti ferroviari", *Ingegneria Ferroviaria*, Gennaio 2018.
- [18] R. THARAKAN, "Brewers CAP Theorem on distributed systems", February 14, 2010.
- [19] G. BOX, G. JENKINS, "Time Series Analysis: Forecasting and Control". San Francisco: Holden-Day, 1970.
- [20] T.K. HO, "The Random Subspace Method for Constructing Decision Forests" (PDF). *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 20 (8): 832-844, 1998.
- [21] M. BRUNER, E. CIOFFI, G.R. CORAZZA, G. KAJON, *Modelli analitici d'armamento e loro impiego nello studio del degrado della via*. *Ingegneria Ferroviaria*, pag.895/11, 2005.
- [22] F. NATONI "Le vibrazioni del binario". *Ingegneria Ferroviaria*, pag.913/11, 2005.
- [23] E. GIOIA, P. PASSARO, M. PETRACCA, "AMBER: an advanced gateway solution to support heterogeneous IoT technologies", in *Proceedings of IEEE International Conference on Software Telecommunications and Computer Networks*, Split, Croatia, 2016, pp. 1-5. (DOI: 10.1109/SOFTCOM.2016.7772115).