

Cantieri

Digital twin e manutenzione predittiva del **viadotto Masaè**

Sina (Gruppo ASTM) ha collaborato con CAEmate nello sviluppo del gemello digitale del Viadotto Masaè sull'autostrada A6 Torino-Savona: collegamento cruciale tra il nord Italia e il porto di Savona

Ponti e viadotti costituiscono l'ossatura fondamentale della nostra rete di trasporto, ma queste infrastrutture critiche sono esposte a rischi sempre maggiori. L'invecchiamento dei materiali, l'aumento dei volumi di traffico e le severe condizioni ambientali, come le temperature estreme e i sali antigelo, accelerano il loro deterioramento, compromettendone l'integrità strutturale. Molte di queste opere, costruite decenni fa e progettate facendo riferimento a carichi ormai obsoleti, faticano a soddisfare le esigenze dell'uso moderno, esponendosi al rischio di danneggiamento, degrado dei materiali e potenziali cedimenti. Nei casi estremi, questo deterioramento può portare a collassi improvvisi, generando seri rischi per la sicurezza pubblica e causando gravi interruzioni nelle reti di trasporto.

Per affrontare queste sfide, le tecnologie digitali stanno emergendo come strumenti essenziali. Sistemi di monitoraggio avanzati e gemelli digitali simulation-based consentono valutazioni preci-

se dello stato di salute delle strutture e abilitano una manutenzione predittiva basata sul comportamento reale dell'opera, contribuendo a prevenire i problemi strutturali prima che si verifichino. Sina, società di ingegneria delle grandi opere infrastrutturali del gruppo ASTM, secondo operatore al mondo di autostrade in concessione, ha collaborato con CAEmate, azienda di ingegneria informatica che ha ideato la piattaforma cloud per il monitoraggio strutturale e la manutenzione predittiva delle infrastrutture WeStatiX SHM, nello sviluppo del gemello digitale del Viadotto Masaè. L'obiettivo di SINA è quello di migliorare la sicurezza delle infrastrutture, ottimizzare gli interventi di manutenzione e prolungare la durata delle strutture. WeStatiX SHM consente un nuovo tipo di approccio al monitoraggio strutturale: mediante avanzati modelli di intelligenza artificiale, permette di sincronizzare il modello agli elementi finiti dell'opera con i dati di monitoraggio, consentendo una più approfondita co-

Ing. Andrea Piscini
Servizi Tecnici - Asset Management, SINA

Ing. Edoardo Troielli
Servizi Tecnici - Asset Management, SINA

Ing. Massimo Penasa
Amministratore Delegato, CAEmate

Ing. Matteo Penasa
Chief Technology Officer, CAEmate



English Version

Digital twin and predictive maintenance of the Masaè Viaduct

Enhancing infrastructure safety through Digital Twins

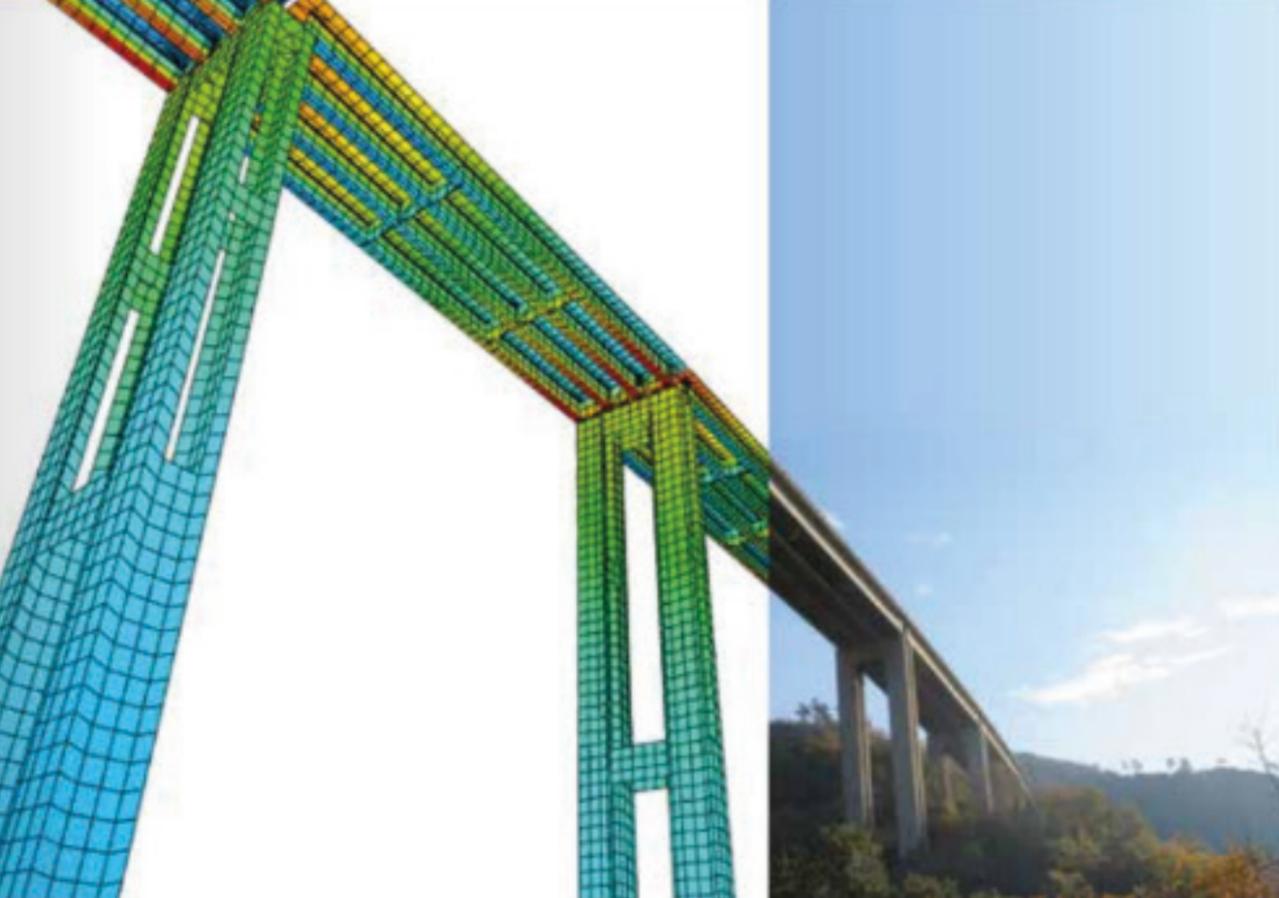
Bridges and viaducts are fundamental to our transportation network, yet these critical structures face increasing risks. Aging materials, rising traffic volumes, and harsh environmental conditions, such as extreme temperatures and de-icing salts, accelerate their deterioration, compromising structural integrity. Many of these structures, built decades ago and designed for outdated load requirements, now struggle to meet modern usage demands, making them vulnerable to damage, material degrada-

tion, and potential failure. In extreme cases, this deterioration can lead to sudden collapses, posing significant safety risks and causing major disruptions to transportation networks.

To address these challenges, digital technologies are emerging as essential tools. Advanced monitoring systems and simulation-based digital twins enable precise assessments of structural health and facilitate predictive maintenance, helping to prevent structural issues before they arise.

Sina, the engineering division specialized in major infrastructure projects within the ASTM Group, the world's second-largest operator of toll motorways, partnered with CAEmate, IT engineering company that developed WeStatiX SHM cloud-based platform for structural health monitoring (SHM) and predictive maintenance of infrastructure, to create the digital twin of the Masaè Viaduct. Sina's goal is to enhance infrastructure safety,

Gli innovatori



Transizione tra immagine reale del viadotto Masaè e relativo gemello digitale.

Representative image of the Masaè Viaduct.

Immagine rappresentativa del viadotto Masaè.

Representative image of the Masaè Viaduct.

noscenza del comportamento fisico dell'opera e analisi predittiva.

La struttura tecnica di Sina è altamente specializzata e si distingue per la capacità di effettuare controlli funzionali e strutturali delle opere civili. Da questi controlli dipende la valutazione dello stato di esercizio delle infrastrutture, attraverso un'analisi approfondita e dettagliata. Sina si occupa, in sinergia con le Concessionarie autostradali, della gestione programmata della manutenzione su ponti, gallerie e pavimentazioni. Un altro



optimize maintenance activities, and extend the lifespan of its structures. The WeStatix SHM platform introduces a new approach to structural monitoring: using advanced artificial intelligence models, it synchronizes finite element models of the structure with real monitoring data, enabling a deeper understanding of the structure's physical behavior and predictive analysis.

Sina's technical team specializes in conducting functional and structural inspections of civil works. These inspections determine the operational state of infrastructure through detailed and thorough analysis. In collaboration with motorway concessionaires, Sina oversees planned maintenance of bridges, tunnels, and pavements. Another area of Sina's expertise lies in designing and implementing monitoring systems, advanced technologies crucial for collecting real-time data on the state of struc-

ture. These systems allow engineers to analyze both long-term and short-term structural behavior, ensuring timely interventions in the event of anomalies

campo in cui Sina è coinvolta è la progettazione e realizzazione di sistemi di monitoraggio; tali sistemi sono tecnologie avanzate fondamentali per la raccolta di dati in tempo reale sullo stato delle opere, che consentono agli ingegneri di analizzare il comportamento delle strutture sia sul lungo periodo, sia nel breve, intervenendo tempestivamente in caso di anomalie. La divisione Sina di Asset Management è a supporto delle Società concessionarie autostradali nel mantenimento di definiti livelli di performance e sicurezza dell'infrastruttura. Nell'ottica di un continuo miglioramento dei suoi servizi e in compliance con le normative in costante evoluzione, Sina opera attraverso molteplici iniziative tra le quali lo sviluppo e il coordinamento di soluzioni tecnologiche all'avanguardia come nel caso del gemello digitale di CAEmate.

Un esempio di ingegneria avanzata: il viadotto Masaè

Le infrastrutture gestite dal gruppo ASTM comprendono meraviglie ingegneristiche come il viadotto Masaè, un collegamento cruciale tra il nord Italia e il porto di Savona che si estende per 600 metri lungo l'autostrada A6 Torino-Savona. La sua struttura isostatica, completata nel 1970, è costituita da 14 campate e pile in calcestruzzo armato a sezione scatolare, che sostengono un impalcato precompresso a doppia T. Le travi, con

tures. These systems allow engineers to analyze both long-term and short-term structural behavior, ensuring timely interventions in the event of anomalies

The Sina Asset Management division supports motorway concessionaires in maintaining defined levels of infrastructure performance and safety. Committed to continuously improving its services and ensuring compliance with evolving regulations, Sina spearheads innovative solutions such as CAEmate's digital twin technology.

An example of advanced engineering: the Masaè Viaduct

The infrastructure managed by the ASTM Group includes engineering marvels like the Masaè Viaduct, a vital link between northern Italy and the port of Savona. Spanning 600 meters along



sezione trasversale variabile, si rastremano verso il centro, assicurando una distribuzione ottimale delle sollecitazioni.

Monitoraggio delle opere maggiori

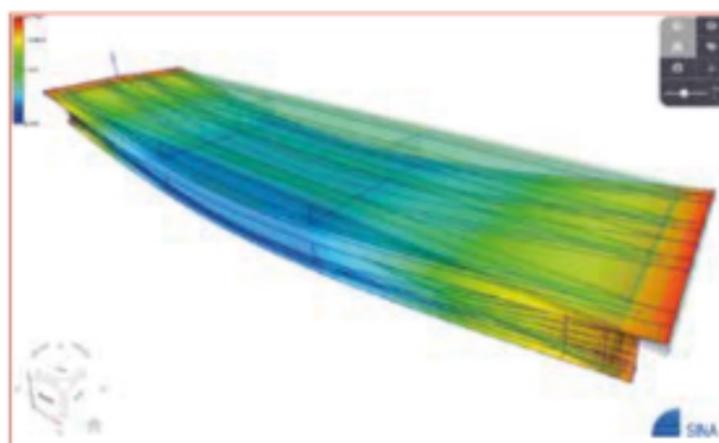
Il monitoraggio delle opere dell'autostrada A6, dal 2018, avviene grazie alla collaborazione di Sina con Sacertis Ingegneria S.r.l. che supporta le attività di progettazione dei sistemi stessi, nonché quelle di raccolta e interpretazione dei dati che ne derivano. L'installazione del sistema di monitoraggio del viadotto Masaè è avvenuta nella seconda metà del 2023 e ha visto il posizionamento di 132 accelerometri triassiali e 188 clinometri biassiali distribuiti sulle campate del viadotto.

Strategia di analisi basata su modellazione e aggiornamento continuo del gemello digitale

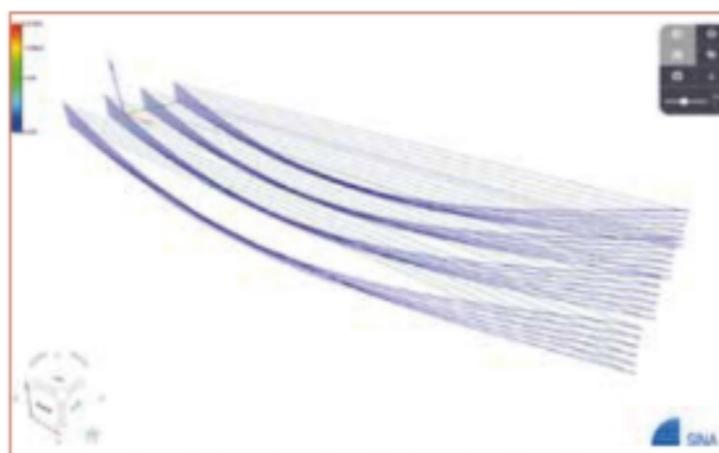
La strategia adottata da Sina in collaborazione con CAEmate per le attività di post-elaborazione dei dati acquisiti dal monitoraggio è indirizzata all'analisi sia degli aspetti statici sia dinamici per indagare in maniera approfondita la salute strutturale dell'opera monitorata. I sensori Sacertis installati sul Viadotto Masaè registrano in continuo vibrazioni, rotazioni e condizioni ambientali con la possibilità di alimentare il processo di diagnostica "intelligente" sviluppato da CAEmate.

Model Updating: Il Gemello Digitale Simulation-based

L'innovazione distintiva nell'approccio della piattaforma WeStatix SHM è l'aggiornamento continuo dei gemelli digitali, in cui i dati di monitoraggio raffinanano continuamente la simulazione basata sul Metodo degli Elementi Finiti (FEM).



Visualizzazione, nella piattaforma WeStatix SHM, di una campata e dei relativi cavi di precompressione caratterizzanti il gemello digitale del viadotto Masaè.



Visualization of a span and associated pre-stressing cables within the Masaè Viaduct's digital twin, displayed on the WeStatix SHM platform.

Questo modello computazionale integra dettagli precisi della geometria, dei materiali e delle proprietà termomeccaniche di ogni struttura, permettendo una rappresentazione accurata e dinamica dell'infrastruttura.

La piattaforma consente di calcolare con precisione le perdite di precompressione dovute a fattori come rilassamento dell'acciaio, andamento geometrico dei cavi, ed eventuale corrosione, fornendo una visione dettagliata dell'efficienza della precompressione nel corso della vita utile della struttura. Inoltre, il comportamento del conglomerato cementizio, che varia nel tempo, viene modellato attraverso specifici modelli costituti-



the A6 Torino-Savona motorway, this isostatic structure, completed in 1970, consists of 14 spans and reinforced concrete box-section piers that support a pre-stressed double-T deck. The beams, with a variable cross-section, taper toward the center, ensuring optimal stress distribution.

Monitoring of Major Structures

Since 2018, the monitoring of structures along the A6 motorway has been carried out through a collaboration between Sina and Sacertis Ingegneria S.r.l., which supports the design, data collection, and interpretation activities for the monitoring systems. The monitoring system for the Masaè Viaduct was installed in the latter half of 2023 and includes 132 tri-axial accelerometers and 188 bi-axial inclinometers distributed across the viaduct's spans.

Analysis Strategy Based on Modeling and Continuous Digital Twin Updating

The strategy adopted by Sina in collaboration with CAEmate for post-processing data from monitoring activities targets both static and dynamic aspects of structural health. Sacertis sensors installed on the Masaè Viaduct continuously record vibrations, rotations, and environmental conditions, feeding into the "intelligent" diagnostic process developed by CAEmate.

Model Updating: A Simulation-Based Digital Twin

A standout innovation in the WeStatix SHM platform is the continuous updating of digital twins, where monitoring data continuously refines the finite element method (FEM) simulation. This

vi non lineari, in grado di descrivere gli effetti di fluage e ritiro del calcestruzzo.

I dati raccolti dai sensori, inclusi inclinometri, accelerometri e termocoppie, vengono integrati nel gemello digitale per modificare e ottimizzare i parametri FEM, garantendo un allineamento tra modelli teorici e comportamento strutturale reale.

Una delle caratteristiche distintive di questa metodologia è la calibrazione continua, ottenuta mediante tecniche avanzate di analisi inversa in tempo reale, che catturano le risposte della struttura nel mondo reale, identificando e quantificando eventuali danni. Processando i dati dei sensori in tempo reale, il sistema correla le forzanti ope-

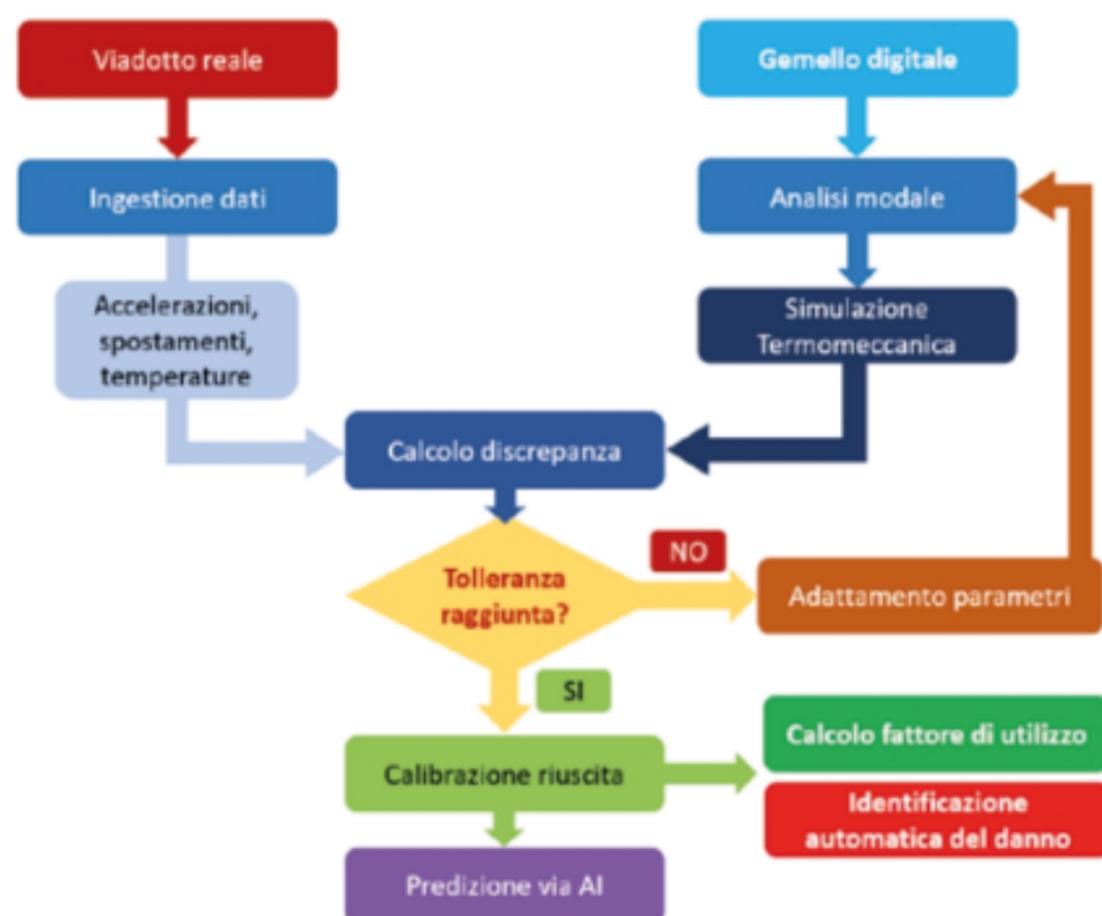
rativa con le risposte strutturali, offrendo una visione costantemente aggiornata delle condizioni di ciascun viadotto. Questo approccio non solo migliora la precisione delle simulazioni, ma fornisce agli ingegneri anche uno strumento reattivo per osservare come la struttura resiste a stress e carichi reali in condizioni operative.

I dati di monitoraggio dinamico e statico forniscono informazioni cruciali e complementari per la caratterizzazione delle infrastrutture. Attraverso i dati accelerometrici, il sistema utilizza Analisi Modale Operativa (OMA) per determinare parametri della struttura come la frequenza naturale, lo smorzamento e le forme modali, che offrono un'indicazione chiara di proprietà fondamentali come la rigidità e la stabilità di ogni singolo elemento strutturale. L'OMA sfrutta le vibrazioni naturali derivanti dal traffico e dalle condizioni ambientali, eliminando la necessità di dispositivi esterni invasivi, come martelli o shaker. Ciò consente il monitoraggio delle infrastrutture durante le normali operazioni, senza interruzioni al traffico.

Grazie all'integrazione di letture continue degli accelerometri, il sistema può identificare le frequenze naturali corrispondenti a forme modali chiave e adattare costantemente il gemello digitale per riflettere il comportamento in tempo reale della struttura. Questo processo di aggiornamento continuo consente di rilevare anche minime variazioni nei parametri strutturali, come cambiamenti di rigidità, anomalie nei giunti o alterazioni nelle proprietà elastiche dei materiali. Confrontando i risultati dell'analisi modale con le previsioni del modello FEM, la piattaforma di monitoraggio aggiorna automaticamente i parametri strutturali in caso di discrepanze, riducendo al minimo la differenza tra le condizioni

Esempio di analisi inversa eseguita mediante il gemello digitale.

Example of inverse analysis performed using the digital twin.



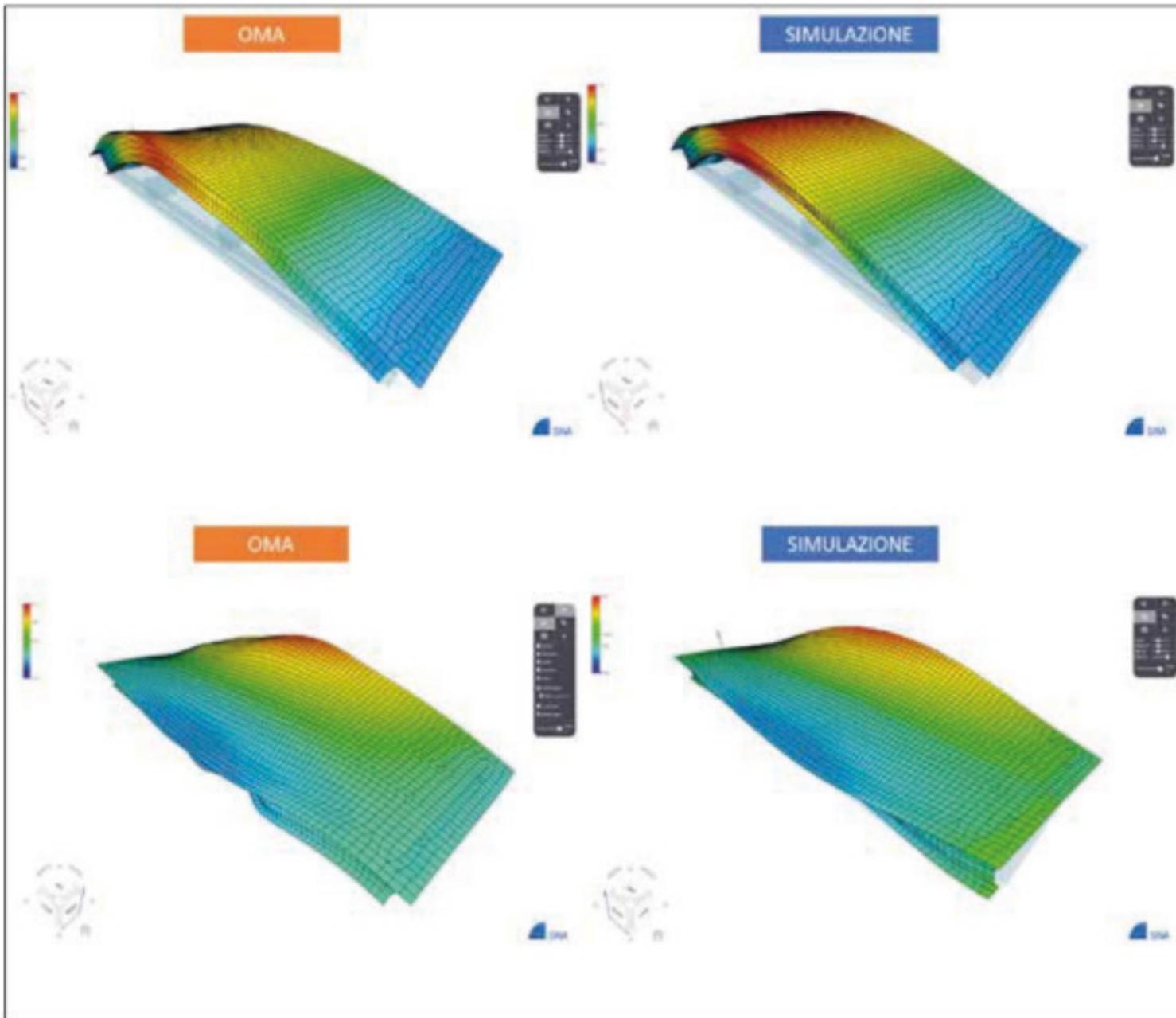
computational model integrates precise details about the geometry, materials, and thermomechanical properties of each structure, enabling an accurate and dynamic representation of the infrastructure. The platform enables precise calculations of pre-stress losses due to factors such as steel relaxation, geometric alignment of cables and corrosion, providing a detailed view of pre-stress efficiency throughout the structure's lifespan. Additionally, time-dependent behavior of concrete is modeled using specific nonlinear constitutive models that capture the effects of creep and shrinkage.

Sensor data, including readings from inclinometers, accelerometers, and thermocouples, are integrated into the digital twin, fine-tuning FEM parameters to ensure alignment between theoretical models and actual structural behavior.

Continuous calibration, achieved through advanced real-time in-

verse analysis techniques, is a hallmark of this methodology. It captures real-world structural responses, identifying and quantifying potential damage. By processing sensor data in real-time, the system correlates operational forces with structural responses, offering a constantly updated view of each viaduct's condition. This dynamic approach not only enhances simulation accuracy but also provides engineers with responsive tools to observe how the structure withstands real-world stresses and loads under operational conditions.

Dynamic and static monitoring data provide crucial, complementary information for infrastructure characterization. Accelerometer data enable Operational Modal Analysis (OMA) to determine structural parameters such as natural frequencies, damping ratios and modal shapes, which offer clear insights into the stiffness and stability of individual structural elements. By leverag-



Confronto tra forme modali, relative ad una campata del viadotto Masaè, ottenute mediante OMA e simulazione FEM in WeStatiX SHM.

Comparison of modal shapes for a Masaè Viaduct span, obtained through OMA and FEM simulation in WeStatiX SHM.

simulate e quelle reali. Questo processo adattivo consente al sistema di individuare in anticipo potenziali problematiche, come riduzioni localizzate di rigidità, schemi di deformazione insoliti o altri indicatori di degrado strutturale che po-

trebbero segnalare la necessità di interventi di manutenzione.

Complementare all'analisi dinamica, il monitoraggio statico svolge un ruolo essenziale nella valutazione delle deformazioni sia a lungo termine



English Version

ing natural vibrations from traffic and environmental conditions, OMA eliminates the need for intrusive external devices, enabling seamless monitoring during normal operations.

Continuous accelerometer readings allow the system to identify natural frequencies corresponding to key modal shapes and continuously adjust the digital twin to reflect the structure's real-time behavior. This ongoing update process detects even minor variations in structural parameters, such as changes in stiffness, joint anomalies, or alterations in material elastic properties. Comparing modal analysis results with FEM predictions, the monitoring platform automatically adjusts structural parameters in the event of discrepancies, minimizing the gap between simulated and real conditions. This adaptive process helps identify potential issues early, such as localized stiffness reductions, unusual deformation patterns, or other indicators

of structural degradation that may signal the need for maintenance.

Static monitoring complements dynamic monitoring by evaluating both long-term and temporary deformations along the viaduct. Using inclinometers positioned along the deck and piers, the system collects detailed rotation data, automatically deriving displacements. The system distinguishes between elastic (reversible) and inelastic (permanent) deformations, which are often early indicators of significant structural changes or deterioration. Permanent deformation trends, often associated with pre-stress losses or cracking, provide valuable insights into the long-term health of the structure and potential risks of progressive degradation.

Beyond long-term deformations, the system identifies transient deformations, typically reflecting the passage of heavy traffic.

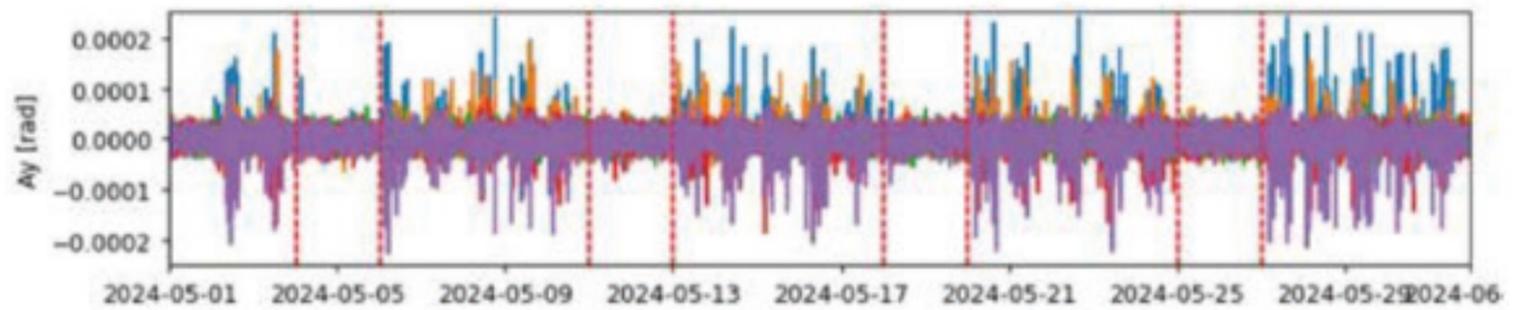
Gli innovatori

Analisi delle rotazioni transitorie indotte nel viadotto Masaè. Le linee tratteggiate verticali indicano l'inizio e la fine del fine settimana. Si osserva chiaramente come il traffico pesante, più intenso durante i giorni lavorativi, provochi deformazioni transitorie.

Analysis of transient rotations induced on the Masaè Viaduct; Vertical dashed lines indicate weekends. Note how heavy traffic, more intense during weekdays, causes transient deformations.

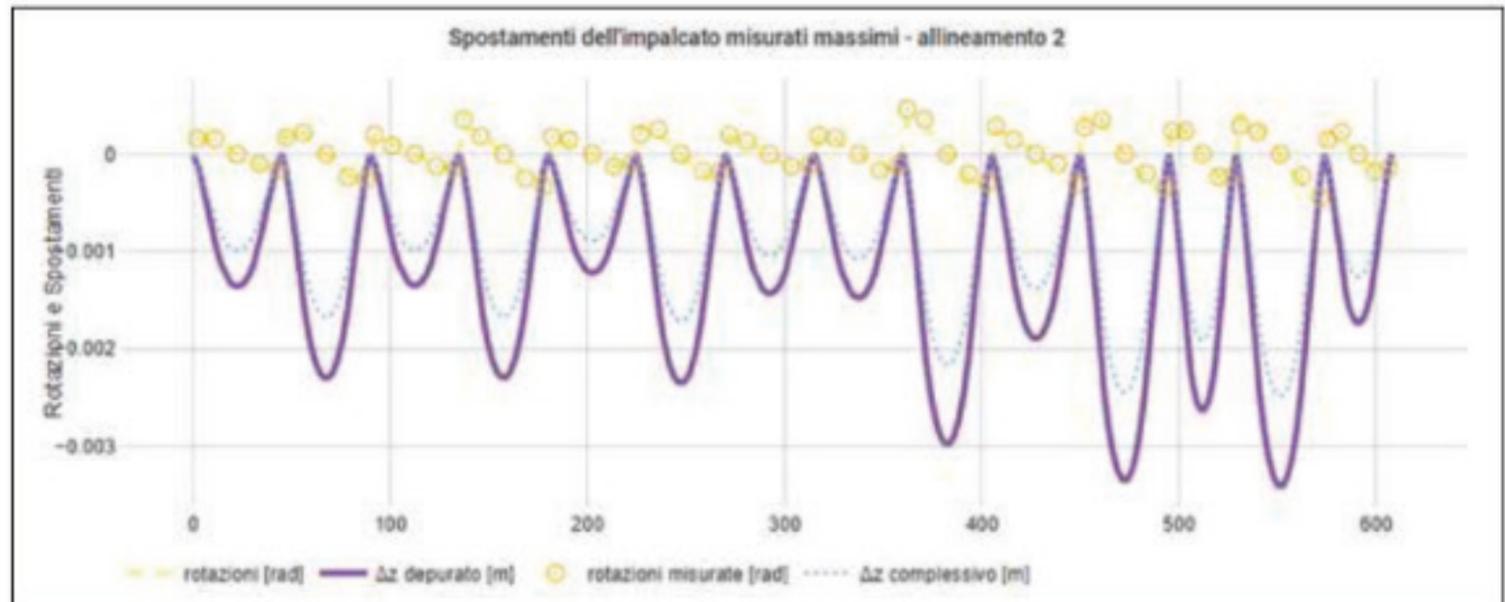
Esempio di visualizzazione delle rotazioni e degli spostamenti, complessivi e depurati dagli effetti termici, per il viadotto Masaè.

Example visualization of rotations and displacements, both total and thermal-effect-adjusted, for the Masaè Viaduct.



che temporanee lungo il viadotto. Utilizzando gli inclinometri posizionati lungo l'impalcato e le pile, il sistema raccoglie dati dettagliati sulle rotazioni, risalendo automaticamente agli spostamenti della struttura. Il sistema distingue tra deformazioni elastiche, quindi reversibili, e deformazioni anelastiche o permanenti, che rappresentano spesso segnali precoci di cambiamenti strutturali significativi o di deterioramento. Le tendenze di deformazione permanente, spesso associate a perdite di precompressione o fessurazione, forniscono preziose indicazioni sullo stato di salute a lungo termine della struttura e sui potenziali rischi di

degrado progressivo. Oltre alle deformazioni di lungo periodo, il sistema è predisposto per rilevare le deformazioni transitorie dell'opera, che solitamente riflettono il passaggio di traffico pesante. Ciò permette di identificare eventi di carico significativo, chiaramente visibili nell'immagine riportata ad inizio pagina. Parallelamente, il sistema individua deformazioni termiche causate dalle variazioni di temperatura, che influenzano le rotazioni strutturali e permettono di comprendere la risposta della struttura ai cambiamenti termici. Il risultato è la controparte virtuale della strut-



This capability allows significant load events to be pinpointed, as shown in the image at the top of the page.

In parallel, the system identifies thermal deformations caused by temperature variations, which affect structural rotations and provide valuable insights into the infrastructure's response to thermal changes.

The result is a virtual counterpart of the physical structure, a "digital twin" perfectly aligned with the real state of the infrastructure. This digital representation enables predictive and preventive maintenance based on actual structural conditions.

This integrated monitoring approach provides engineers and operators with an accurate, continuously updated tool that delivers critical structural information about the monitored asset, identifies potential vulnerabilities, and supports well-informed maintenance planning.

Forecasting Future Infrastructure Behavior

In addition to accurately representing the present, the implemented digital twin offers an extraordinary tool for forecasting the future behavior of monitored infrastructure. By employing "physics-informed" neural networks, the digital twin can simulate complex scenarios, analyzing how structures respond under various operational and environmental conditions. These scenarios may include the effects of variable loads such as increased traffic, extreme thermal fluctuations and even seismic events, offering insights into each structure's resilience to such stresses. This predictive technology is particularly effective as it combines historical sensor data with artificial intelligence to identify high-risk areas and vulnerable zones that require intervention. Instead of merely visualizing current conditions, the system pinpoints specific sections that could benefit from reinforcement or preventive main-

tura fisica, un "gemello digitale" perfettamente allineato con lo stato reale dell'infrastruttura, il quale consente interventi di manutenzione predittiva e preventiva basati sulle effettive condizioni strutturali. Questo approccio di monitoraggio integrato fornisce agli ingegneri e al gestore uno strumento preciso e continuamente aggiornato, che offre informazioni strutturali preziose circa l'opera monitorata, identificando potenziali vulnerabilità e supportando una pianificazione della manutenzione ben informata.

Prevedere il comportamento futuro dell'infrastruttura

Oltre alla capacità di rappresentare fedelmente il presente, il gemello digitale implementato offre uno strumento straordinario per prevedere l'evoluzione futura delle infrastrutture monitorate. Grazie all'utilizzo di reti neurali di tipo "physics-informed", il digital twin è in grado di simulare scenari complessi in cui la struttura è sottoposta a diverse condizioni operative e ambientali. Questi scenari possono includere l'effetto di cari-

chi variabili, come l'aumento del traffico, fluttuazioni termiche estreme e persino eventi sismici, fornendo approfondimenti su come ogni struttura potrebbe rispondere a queste sollecitazioni. Questa tecnologia predittiva è particolarmente efficace poiché combina i dati storici raccolti dai sensori con l'intelligenza artificiale per identificare aree ad alto rischio e zone vulnerabili che potrebbero richiedere interventi. Invece di limitarsi a visualizzare le condizioni attuali, il sistema identifica sezioni specifiche che potrebbero beneficiare di rinforzi o manutenzione preventiva, potenzialmente con anni di anticipo. Abilitando interventi pianificati e proattivi, il sistema riduce significativamente la probabilità di riparazioni d'emergenza, che tendono a essere più costose e meno efficienti.

Le capacità predittive della piattaforma WeStatix rafforzano la gestione degli asset di SINA, apportando vantaggi significativi sia per la sicurezza che per l'efficienza operativa. Grazie al monitoraggio continuo e alle simulazioni di scenario, l'ente gestore può prevedere potenziali problematiche, riducendo il rischio di deterioramenti



Esempio di dashboard disponibile nella piattaforma WeStatix SHM per la visualizzazione dei dati di monitoraggio e l'analisi predittiva.

Example of the WeStatix SHM platform dashboard for monitoring data visualization and predictive analysis.



English Version

tenance, potentially years in advance. By enabling planned and proactive interventions, the system significantly reduces the likelihood of emergency repairs, which are typically costlier and less efficient. The predictive capabilities of the WeStatix SHM platform strengthen Sina's asset management strategies, delivering significant benefits for both safety and operational efficiency. With continuous monitoring and scenario simulations, the managing authority can foresee potential issues, reduce the risk of unexpected deterioration, and ensure the long-term safety and functionality of infrastructure. This proactive approach not only lowers maintenance costs but also guarantees higher service levels for users, fostering public trust in the reliability and resilience of these critical structures.

Structural Safety Assessment

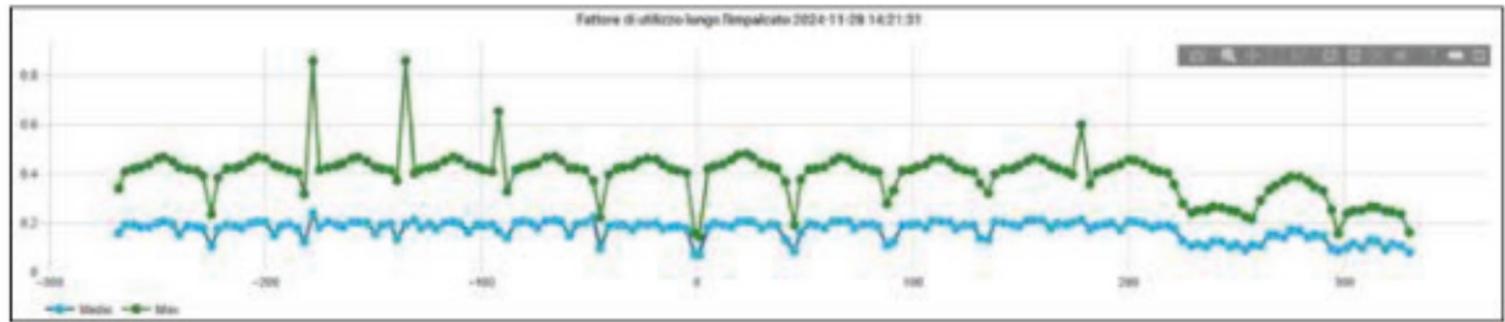
The implemented monitoring system provides a dedicated dash-

board for structural health indicators, focusing specifically on the utilization factor. Derived from structural evaluations in compliance with current regulations, the utilization factor helps identify areas under the highest stress. Its analysis compares the structure's capacity to withstand internal forces, such as axial loads and bending moments, against resistance limits. By monitoring these stress levels over time, the system assists in identifying emerging critical issues.

Using a model-based approach that integrates sensor data with numerical models in real time, the system transforms raw sensor readings – collected from inclinometers, accelerometers, and other devices – into actionable insights. This dynamic integration ensures the digital twin precisely reflects the current behavior of the infrastructure, giving the managing authority a clear and continuously updated view of the structure's condition.

Gli innovatori

Esempio di andamento del coefficiente di utilizzo lungo il viadotto Masaè. La linea verde rappresenta il valore puntuale massimo mentre quella blu indica il valore medio per un'intera sezione.



Example of the utilization factor progression along the Masaè Viaduct. The green line represents the maximum point value, while the blue line shows the average value for an entire section.

inattesi e assicurando la sicurezza e la funzionalità delle infrastrutture nel lungo periodo. Questo approccio proattivo non solo consente una riduzione dei costi di manutenzione, ma garantisce anche livelli superiori di servizio per gli utenti, consolidando la fiducia pubblica nell'affidabilità e nella resilienza di queste strutture cruciali.

Valutazione della sicurezza strutturale

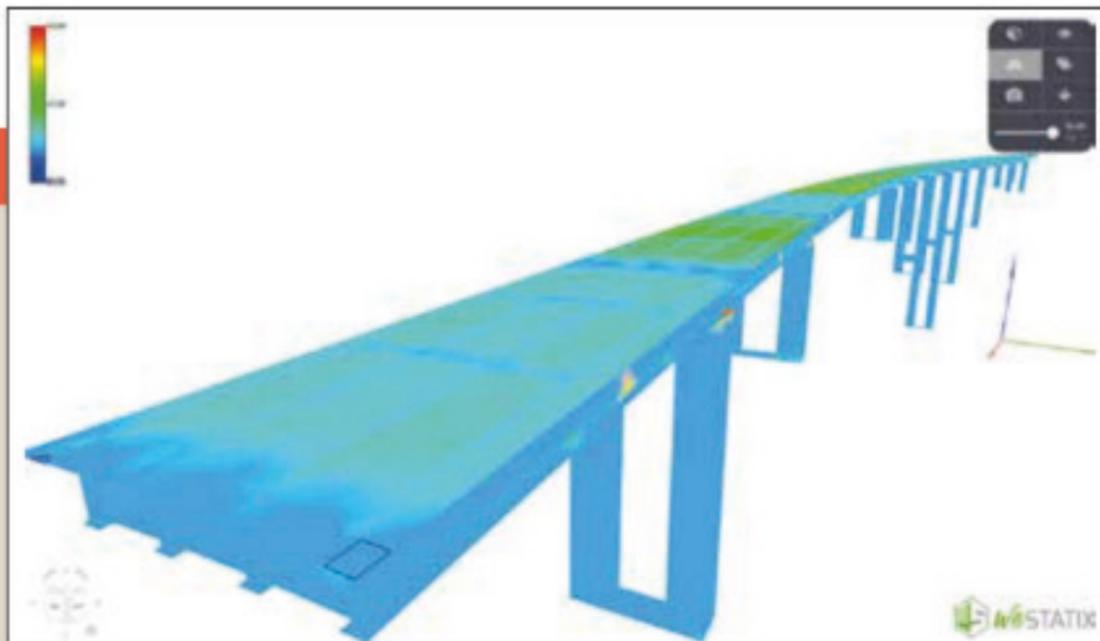
Il sistema di monitoraggio implementato fornisce una dashboard dedicata agli indicatori di salute strutturale, con un focus specifico sul fattore di utilizzo. Derivato dalle verifiche strutturali secondo la normativa vigente il fattore di utilizzo permette di determinare le aree sottoposte alle maggiori sollecitazioni. La sua analisi consente di confrontare la capacità della struttura di sostenere sollecitazioni interne - come forza normale e momento flettente - rispetto ai limiti di resistenza. Monitorando questi livelli di sollecitazione nel tempo, il sistema aiuta a individuare le potenziali criticità man mano che emergono.

Grazie a un approccio basato sull'integrazione tra dati misurati e modelli numerici (model-based), il sistema trasforma le letture grezze dei sensori, raccolte da inclinometri, accelerometri e altri di-

positivi, in informazioni fruibili. Questa integrazione dinamica e in tempo reale garantisce che il gemello digitale rifletta con precisione il comportamento attuale dell'infrastruttura, fornendo all'ente gestore una visione precisa e costantemente aggiornata delle condizioni della struttura. Per facilitare una rapida interpretazione, queste informazioni sono presentate tramite una dashboard intuitiva e un'interfaccia di ispezione virtuale 3D del gemello digitale. Questi strumenti avanzati permettono all'ente gestore di visualizzare in dettaglio le condizioni strutturali, migliorando la capacità di individuare anomalie e pianificare efficacemente la manutenzione preventiva. Inoltre, il sistema di monitoraggio verifica costantemente il rispetto delle normative tecniche, adattando dinamicamente i calcoli del fattore di utilizzo in base a condizioni operative in tempo reale, come variazioni di temperatura, carichi da traffico, deformazioni permanenti e assestamenti. In parallelo, il gemello digitale analizza scenari critici, stabilendo soglie di allerta, attenzione e notifica che consentono interventi tempestivi in caso di anomalie. Convertendo i dati dei sensori in informazioni strategiche, questa tecnologia avanzata permette di anticipare potenziali problemi e pianificare la manutenzione predittiva, riducendo così i costi operativi e migliorando la sicurezza dell'infrastruttura. ■

Esempio di visualizzazione grafica del fattore di utilizzo sul viadotto Masaè in WeStatix SHM.

Example of graphical visualization of the utilization factor for the Masaè Viaduct in WeStatix SHM.



To facilitate quick interpretation, this information is presented via an intuitive dashboard and a 3D virtual inspection interface of the digital twin. These advanced tools allow the managing authority to visualize structural conditions in detail, enhancing their

ability to detect anomalies and effectively plan preventive maintenance. Moreover, the monitoring system continuously verifies compliance with technical standards, dynamically adjusting utilization factor calculations based on real-time operational conditions, such as temperature fluctuations, traffic loads, permanent deformations and settlements. In parallel, the digital twin analyzes critical scenarios, establishing alert, attention and notification thresholds to enable timely interventions when anomalies arise. By converting sensor data into strategic insights, this advanced technology anticipates potential issues and enables predictive maintenance planning, thus reducing operational costs and enhancing infrastructure safety.