

InfraBIM e Monitoraggio Strutturale. Digitalizzazione e installazione di sistemi SHM.

Giorgia Potestà
Lorenzo Lepori
Paolo Mannella

Abstract

La conservazione di un patrimonio infrastrutturale vasto e sempre più datato, esposto ad ambienti aggressivi e a carichi di traffico elevati, è indispensabile per il nostro paese e obiettivo primario per Anas, che negli ultimi anni ha incrementato gli investimenti per lavori di manutenzione straordinaria delle opere d'arte, in particolare Ponti, Viadotti e Tunnel. A tal proposito, l'emanazione del DL 109/2018 – Decreto Genova – ha portato il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici a redigere una norma atta a definire criteri e procedure per una gestione uniforme ed armonica dei ponti e viadotti esistenti. Le Linee Guida per la classificazione e la gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio di ponti esistenti, emanate con DM n.578 del 2020, introducono e prevedono un approccio multilivello che, a partire dalla conoscenza dell'opera, fornisce indicazioni per procedere alla classificazione delle opere in classi di rischio, alla valutazione della sicurezza e al monitoraggio dei ponti esistenti. L'archiviazione dei dati e delle informazioni sui ponti all'interno di una piattaforma CDE e il loro possibile aggiornamento a seguito di approfondimenti conoscitivi consente infatti una gestione integrata e intelligente dell'opera nel corso della sua intera vita utile. Punto di partenza del progetto "Strade sicure" è proprio la digitalizzazione del patrimonio di opere d'arte Anas, che avviene tramite restituzione tridimensionale con metodologia BIM. A partire dal rilievo dello stato di fatto mediante acquisizione massiva di dati con tecnologie TLS, e successiva modellazione BIM sulla nuvola di punti acquisita ed allineata, viene digitalizzato l'intero patrimonio infrastrutturale. Contestualmente è prevista l'installazione di impianti di monitoraggio strutturale SHM, che consentirà di monitorare in tempo reale le opere d'arte Anas grazie ai Digital Twins realizzati.

Parole chiave

Digitalizzazione, BIM, SHM, Ponti, TLS



Il progetto SHM Strade Sicure. Immagine degli autori.

Il contesto del progetto “Strade Sicure”

Una massiccia raccolta delle informazioni di base sul patrimonio infrastrutturale Anas, come documentazione tecnica originale, rilievi dei difetti, indagini conoscitive su geometrie, dettagli costruttivi e materiali, è attività indispensabile per l'applicazione delle Linee Guida [1], redatte in riferimento a ponti e viadotti “stradali”, che prevedono la loro applicazione sia agli enti gestori che alle Province, ai Comuni ed agli enti locali. Al contempo, con la pubblicazione del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza ed il Decreto MIMS 312/2021 si ribadisce ed amplifica quanto già contenuto nel D.M. Infrastrutture e Trasporti 560/2017 (c.d. decreto BIM) e la prevista obbligatorietà dei metodi e strumenti di modellazione informativa nelle opere pubbliche. Inoltre, nel Nuovo Codice dei Contratti Pubblici, si prevede per tutte le Stazioni Appaltanti un termine per l'adozione obbligatoria della metodologia BIM a partire dal primo gennaio 2025; le SA saranno pertanto tenute a adottare metodi e strumenti di gestione informativa digitale delle costruzioni per progettazione e realizzazione di opere ex novo, ma anche per interventi su opere esistenti per importi maggiori di 1.000.000,00 €. A decorrere dal primo gennaio 2025, il BIM sarà richiesto per tutti gli interventi di ordinaria e straordinaria manutenzione i cui asset sono già stati digitalizzati. Quanto detto conferma come il BIM, ma più in generale la digitalizzazione, sia ormai elemento non più prescindibile per ogni fase del ciclo di vita delle opere d'arte.

L'obiettivo del progetto “Strade Sicure - Implementazione di un sistema di monitoraggio dinamico per il controllo da remoto di ponti, viadotti e tunnel della rete viaria principale”, per il quale Anas ha ricevuto un finanziamento pari a 275 milioni di euro, si pone come obiettivo l'installazione e la messa in esercizio di sistemi di monitoraggio strutturale per mille opere d'arte entro marzo 2026.

I dati letti dai sensori in campo alimenteranno una piattaforma che consentirà di monitorare in tempo reale le opere d'arte Anas grazie ai “Gemelli Digitali” realizzati attraverso modellazione Building Information Modeling dei ponti e del layout dei sensori preventivamente progettato a livello esecutivo. Il patrimonio digitale sarà inoltre utile per fini ispettivi e manutentivi delle opere reali.

La digitalizzazione del patrimonio infrastrutturale

Nell'ambito della modellazione tridimensionale e nella gestione delle opere d'arte, soprattutto se di carattere monumentale e di elevato valore strategico e di connessione, la possibilità di applicare un approccio Building Information Modeling costituisce un'interessante

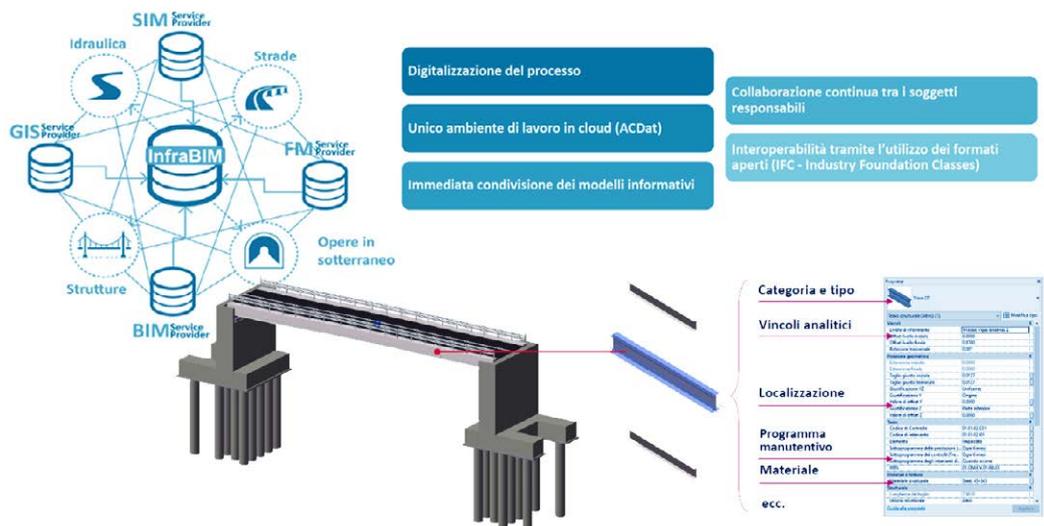


Fig. 1. Il BIM per le infrastrutture. Elaborazione degli autori.

sfida e rappresenta una oggettiva potenzialità per le Stazioni Appaltanti e gli Enti Gestori. I processi BIM per le nuove opere si sono ormai affermati da tempo nel campo della rappresentazione tridimensionale, garantendo il controllo della progettazione e di tutte le fasi del ciclo di vita. Questione aperta, e molto dibattuta negli ultimi anni, è invece la possibilità di impiego dei medesimi processi nel campo del patrimonio edilizio monumentale o di quello infrastrutturale esistente, tanto che si parla di Heritage BIM o Infra BIM. Il BIM offre la possibilità di gestire un'importante quantità di dati eterogenei che, andando oltre il semplice aspetto geometrico, possano costituire un archivio digitale di dati ed informazioni, utile alla documentazione ed alla conservazione delle opere (Bianchini et al. 2016) (fig.1).

La transizione da modelli numerici a modelli geometrici implica un'operazione cruciale critica di "discretizzazione", nella costruzione BIM, il modello comporta un ulteriore passo interpretativo: la strutturazione semantica dei suoi elementi compositivi. Questa operazione ontologica, innegabilmente soggettiva, va ben oltre il riconoscimento delle caratteristiche geometriche degli elementi. L'aggregazione di questi oggetti, sottoposti a rapporti reciproci di incorporazione o appartenenza nonché a vincoli e regole di interazione, guida l'effettiva costruzione del modello informativo virtuale (Potestà, 2022). Al fine di standardizzare il più possibile la modellazione degli Asset, Anas si è dotata di un proprio Modello Dati attraverso cui discretizzare, e dunque scomporre, le parti che costituiscono le opere d'arte oggetto di modellazione dal punto di vista geometrico LOG, e soprattutto dal punto di vista degli attributi informativi LOI che popolano ciascun elemento del modello. Questa fase di scomposizione, il cui obiettivo è di individuare gerarchicamente gli elementi dell'opera e la loro definizione ontologica, è di cruciale importanza nella definizione delle componenti di qualunque modello tridimensionale ed in particolar modo nella realizzazione di un modello Infra BIM,

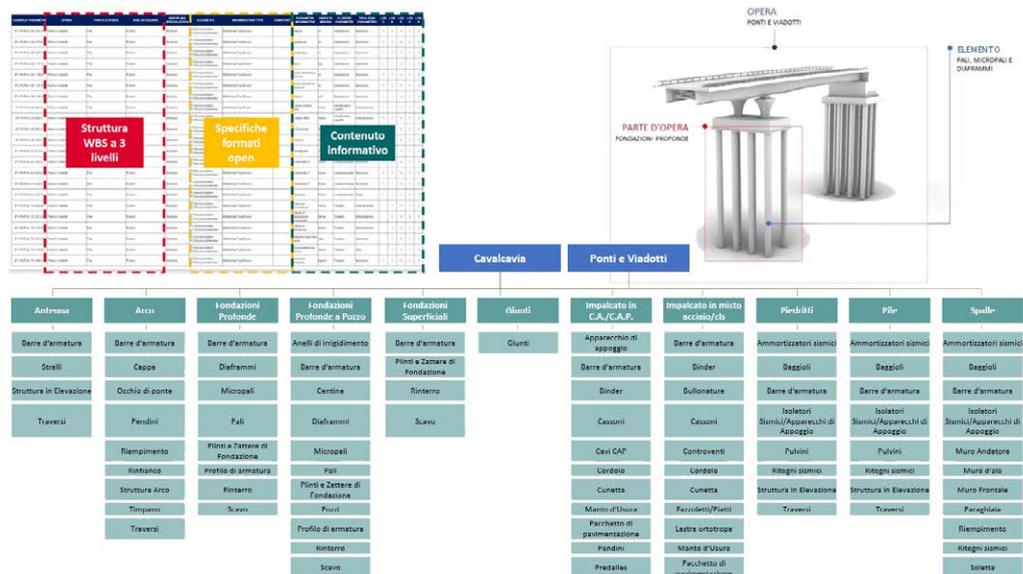


Fig. 2. Il Modello Dati Anas e l'alberatura logica degli Asset Ponti e Viadotti. Elaborazione degli autori.

dove più che mai è necessaria chiarezza sulle relazioni e dipendenze reciproche tra le parti (fig. 2). Tutte le operazioni che riguardano la conoscenza di questo tipo di manufatti, secondo una letteratura ormai consolidata, hanno sempre a che fare con le acquisizioni massive di dati che, da modelli numerici si trasformano in modelli 3D texturizzati o mesh, e modelli 2D (Centofanti et al. 2016). Anche per i modelli Infra BIM, il sostrato è costituito dalle nuvole di punti, da TLS e SfM [2], che interessano l'opera d'arte. La difficoltà nella traduzione del modello numerico della nuvola di punti derivante dal rilievo, ad un modello parametrico BIM è rappresentata in primo luogo dalla capacità delle nuvole di punti di descrivere solamente lo stato di fatto, dando conto delle caratteristiche geometriche, cromatiche e materiche, e

di conseguenza superficiali. Per realizzare un modello BIM parametrico, occorrono tutta una serie di altre informazioni che vanno oltre la superficie scansionata, come indagini approfondite, ispezioni, ma anche informazioni storiche relative alle tavole di progetto esecutivo e costruttivo delle opere d'arte oggetto di restituzione.

La raccolta di tutte le informazioni sulle opere d'arte oggetto di digitalizzazione avviene all'interno di un ACDat, ovvero un Ambiente di Condivisione Dati, in inglese Common Data Environment (CDE), appositamente predisposto da Anas affinché possa ricevere i dati eterogenei provenienti da ispezioni, progettazione, rilievi, modelli e tutto ciò che riguarda l'opera d'arte. La creazione del database ha un duplice scopo: da un lato quello di aiutare e supportare la modellazione BIM ed il processo di digitalizzazione, dall'altro costituisce un vero e proprio raccoglitore di informazioni sui ponti, sempre consultabile ed implementabile (fig.03). Le attività che definiamo Rilievo rappresentano il corpo teorico-operativo mediante il quale si tende alla conoscenza degli elementi materiali che costituiscono un'opera d'arte. Questo processo, multidisciplinare e multidimensionale, è suddiviso in una fase di acquisizione dei dati sul campo (rilevamento) dipendente dalle nuove tecnologie di scansione 3D ed acquisizione massiva di dati, e le modalità con cui si restituisce l'oggetto studiato. Il rilievo per la conoscenza e documentazione delle opere oggetto di studio prevede una acquisizione massiva di dati, ovvero la restituzione di una nuvola di punti registrata e georeferita; questa viene realizzata tramite l'utilizzo di Laser Scanner in modalità statica per intradosso ed estradosso del ponte; per quest'ultimo è anche consentita l'acquisizione in modalità dinamica, attraverso Mobile Mapping Systems [3].

Tutte le misure vengono riferite al sistema piano UTM-ETRF2000; le quote determinate con riferimento al l.m.m. con derivazione dai vertici della rete IGM95 o dalle linee di livellazione di alta precisione dell'Istituto Geografico Militare Italiano. Per ogni opera vengono materializzati i necessari punti di inquadramento, per un minimo di quattro punti stabili di riferimento, con chiodi di tipo topografico con sottostante rondella in acciaio inox, infissi su strutture stabili esistenti o appositamente realizzate. Il rilievo laser scanner viene inoltre integrato con un rilievo topografico celerimetrico dei punti notevoli delle strutture orizzontali e verticali oltre che del piano viabile, in modo da poter ricostruire un modello semplificato dell'opera. Insieme al rilievo laser scanner vengono esaminati ed archiviati all'interno dell'Ambiente di Condivisione Dati tutti i documenti propedeutici alla modellazione informativa, che garantiscono il raggiungimento del Livello di Sviluppo LOD che si attende; tutta la documentazione tecnica esistente (tavole, relazioni, collaudi, altri documenti) relativa ai Ponti, Viadotti e Cavalcavia come progetti originari, perizie di variante, elaborati di contabilità dei lavori e tavole As-built, nonché progetti di manutenzione già effettuati divengono il sostrato su cui si sviluppa la parte informativa dei modelli e le stratigrafie geometriche di parti d'opera ed

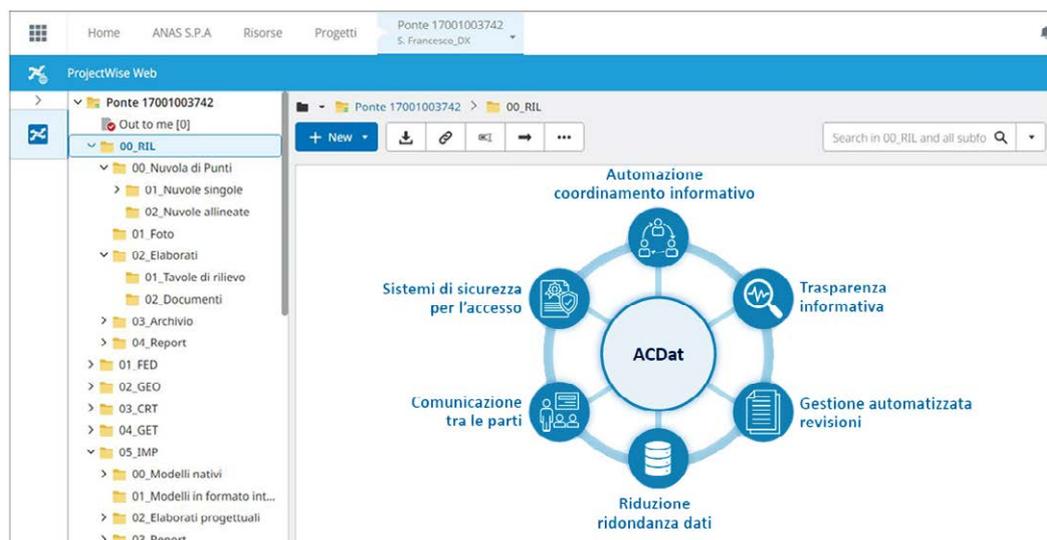


Fig. 3. L'Ambiente di Condivisione Dati Anas. Elaborazione degli autori.

elementi. I modelli realizzati rispondono tutti ad un Livello di Sviluppo LOD C, in conformità con il riferimento normativo Norma UNI 11337-4 2017. I modelli, pertanto, sono caratterizzati da un'adeguata e corretta rappresentazione della geometria e della carpenteria degli elementi costruttivi dell'opera, nonché corredati da dettagli strutturali e da tutte le informazioni reperibili dalla documentazione d'archivio. Tanto gli attributi geometrici LOG quanto quelli informativi LOIN tengono conto del Modello Dati Anas.

Questa rappresentazione tematica, basata su livelli, verifica gli elementi del modello sulla base dell'oggettività delle informazioni tangibili reperite dal rilievo e dalla documentazione disponibile. Tali livelli vengono espressi attraverso la distinzione in quattro differenti range di valutazione del LOR.

Il Viadotto San Francesco: rilievo e InfraBIM

Il Viadotto San Francesco, in questo caso preso ad esempio del processo di digitalizzazione, è costituito da due impalcati indipendenti, ciascuno a servizio di una carreggiata, tra loro affiancati e in appoggio sulle medesime pile. Il viadotto ha una lunghezza complessiva pari a circa 500m, presenta un tracciato lievemente in curva ed è costituito complessivamente da undici campate di luci mediamente pari a 44m, ad eccezione della prima campata avente luce pari a 52 m. Lo schema statico è quello di campate semplicemente appoggiate, con struttura di impalcato "a graticcio di travi" con quattro travi "a doppio T" in c.a.p. a cui è stata aggiunta una ulteriore trave sul lato esterno, per consentire l'allargamento della carreggiata stradale, in sezione prismatica e materiale acciaio. Le pile, in c.a. ordinario, sono della tipologia "a setto" e sono costituite da due setti affiancati solidarizzati a livello del pulvino. L'altezza è variabile tra un minimo di 8m ad un massimo di 22m circa.



Fig. 4. Inquadramento dell'opera e viste della nuvola di punti. Elaborazione degli autori.

L'acquisizione massiva dei dati tramite TLS è stata condotta a settembre 2023 con una squadra topografica di 3 operatori specializzati che hanno operato sia sull'impalcato negli orari di chiusura della strada, sia al di sotto del viadotto tramite strumento Leica RTC360. Le scansioni sono state di seguito registrate e unite con la metodologia cloud to cloud e con la verifica dei target (fig. 4). Il rilievo celerimetrico, finalizzato alla georeferenziazione dei target posizionati sulle spalle e sulle pile in modo da poter in seguito orientare l'intera nuvola di punti è stato eseguito con strumento Leica serie FLKEXLINE modello TS06 ultra5. La nuvola è stata pulita dal rumore, decimata dei punti sovrabbondanti e georeferita con le coordinate dei target battuti con la celerimensura.

Per la georeferenziazione dell'opera in coordinate ETRF2000 con una proiezione locale e l'utilizzo di coordinate rettilinee (Eureliane) si sono ubicati sul posto quattro capisaldi principali, ben materializzati su una strada limitrofa al viadotto in posizione tale di ricevere il massimo numero di satelliti. I quattro capisaldi si sono acquisiti con rilievo statico, attraverso strumento Leica GPS GS15, di oltre 30 mn e con epoche di 5 secondi e un angolo di cutoff di 15 gradi il tutto per garantire i diversi DOP tali da garantire elevata precisione; il calcolo in post processing è stato realizzato utilizzando in contemporanea le seguenti 4 basi della rete Smartnet: Prignano, Rivello, Sinise e Villa D'Agri, tutte basi fisse (fig. 5).

A seguire è stata condotta una ricerca d'archivio volta a raccogliere la documentazione disponibile sul Viadotto San Francesco, come progetti di manutenzione As-Built, progetti originari, schede di ispezione e indagini geognostiche propedeutiche alla modellazione BIM dell'opera. Tutta la documentazione rintracciata è stata archiviata all'interno dell'ACDat e correlata ai modelli BIM tramite appositi link url; tale documentazione ha consentito di dettagliare dal punto di vista informativo i modelli BIM delle diverse discipline specialistiche e soprattutto di modellare porzione dell'opera che non è stato possibile rilevare, come le fondazioni e gli apparecchi di appoggio (fig. 06).

Il processo di digitalizzazione, iniziato con l'acquisizione laser scanner, termina con la modellazione BIM dell'opera. Il modello è stato realizzato modellando direttamente le geometrie parametriche sulla nuvola di punti importata all'interno della piattaforma Bim Authoring scelta ed integrando il dato rilevato con quanto presente all'interno degli archivi fisici e digitali di Anas (fig. 07). Tale modellazione è stata condotta tenendo conto tanto del modello dati quanto delle singole discipline specialistiche, in questo caso Sicurezza e Strutture per la parte di restituzione As-Is del ponte. Tutte le discipline sono state poi unite all'interno di un modello federato e i diversi files, sia in formato nativo che in formato interoperabile .ifc sono stati caricati all'interno dell'ACDat. Di particolare interesse per la manutenzione all'interno del modello BIM del ponte risultano essere i parametri informativi raggruppati nei set "Identificativo oggetto" e "Informazioni 6D", che danno contezza rispettivamente: il primo, della sintassi logica del ponte attribuendo caratteri alfanumerici a ciascuna parte d'opera ed elemento in funzione della tipologia e del progressivo, indicato secondo il Manuale di Ispezioni e seguendo la logica della progressiva crescente, da sinistra a destra; il secondo, dando evidenza dei parametri che dovranno interagire con la piattaforma BMS per le ispezioni, già in uso in Anas, e che individuano per ciascun elemento la campata di appartenenza, l'impalcato e la struttura campata (fig. 8). Per ogni elemento rappresentato nel modello, viene inoltre valorizzato il parametro Level of Reliability (LOR) ovvero espressione dell'affidabilità geometrica dell'oggetto digitale e della rispondenza dello stesso alla realtà, nonché alla sua

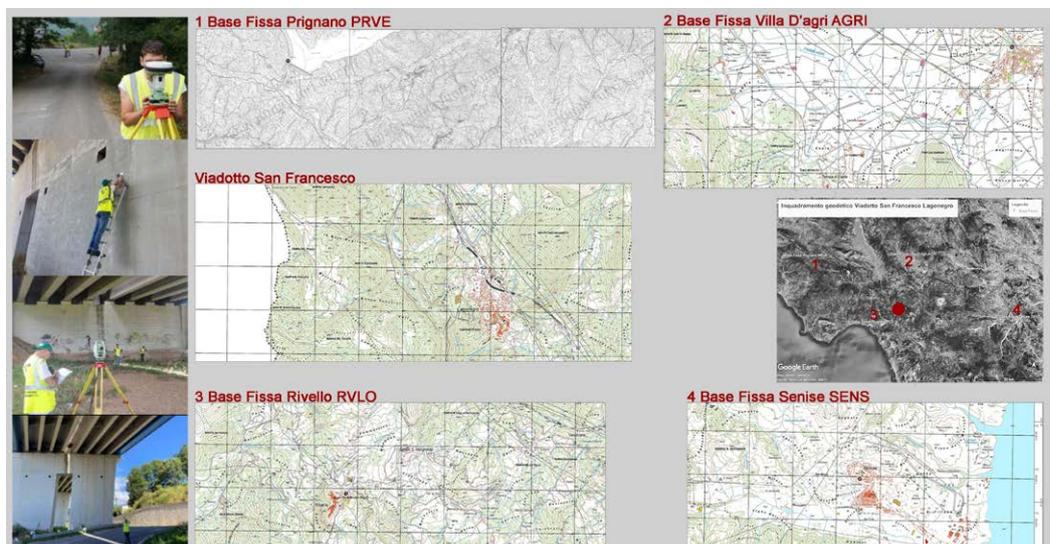


Fig. 5. Inquadramento geodetico e foto della campagna di rilevamento. Elaborazione degli autori.

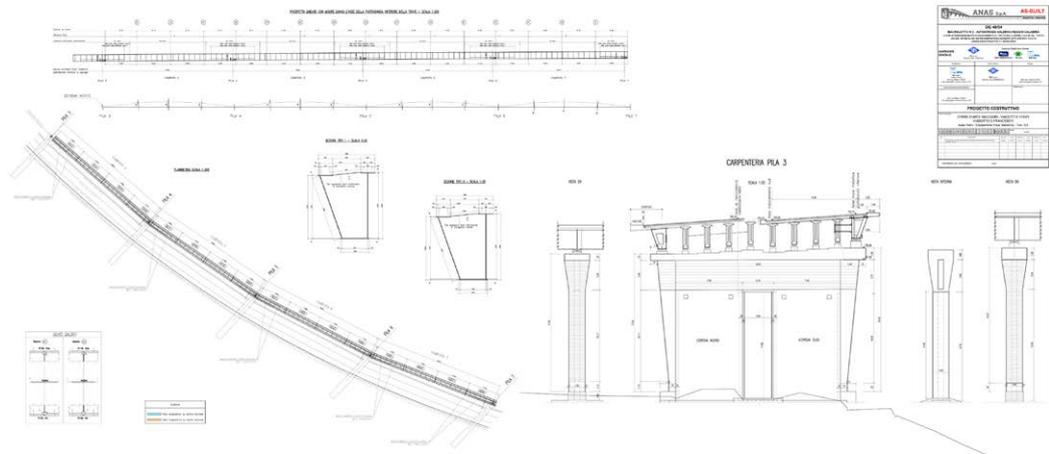


Fig. 6. Progetto Costruttivo As Built per intervento di manutenzione straordinaria del viadotto archiviata in ACDat. Archivi Digitali Anas.

graficizzazione sul modello stesso (fig. 8) (Bianchini, Nicastro 2017). L'affidabilità della modellazione per ciascun elemento viene infatti espressa in una scala da Alto a Molto Basso, e tematizzata sul modello stesso attraverso differenti colorazioni degli elementi.

Il monitoraggio strutturale: un approccio sistematico

Relativamente al monitoraggio delle opere d'arte (Ponti e Viadotti), Anas ha concepito la realizzazione di un processo di controllo basato sull'installazione di impianti di monitoraggio strumentale [4], con l'obiettivo di integrare e supportare il processo di sorveglianza periodica eseguito tramite ispezioni visive.

Il monitoraggio strutturale di tali opere risulta essere una operazione piuttosto complessa ed è pertanto necessario, al fine di applicare un approccio sistematico ed industrializzato al problema, definire in via prioritaria l'approccio che si intende seguire per monitorare



Fig. 7. Modello BIM del Viadotto San Francesco. Elaborazione degli autori.

Ulteriori aspetti a vantaggio di tale scelta consistono nel fatto che tale metodo può essere facilmente standardizzato in riferimento a opere simili per concezione e tipologia strutturale e che la strumentazione richiesta per tali impianti ha raggiunto un elevato grado di affidabilità nelle caratteristiche tecniche ad un costo contenuto.

L'obiettivo del monitoraggio consiste quindi nell'identificazione in continuo dei parametri modali dell'opera ad ogni set di dati acquisito dall'impianto, in particolare frequenze di oscillazione e deformate modali, e di effettuare il controllo della loro stazionarietà tramite l'applicazione di test statistici di verifica delle ipotesi su uno o più parametri di controllo. Nel caso del monitoraggio modale, tali parametri sono appunto le frequenze proprie di oscillazione ed i vettori modali. L'approccio scelto prevede quindi il controllo delle condizioni di conservazione dell'opera tramite applicazione di un modello di machine learning che contiene in sé la fisica del problema.

Il monitoraggio previsto si fonda, quindi, prevalentemente sul monitoraggio dinamico modale, nel senso che tutte le opere individuate sono strumentate con sensori atti all'applicazione di tale metodo: accelerometri installati su tutte le campate componenti l'opera. In aggiunta, per le campate maggiormente ammalorate o per casi singolari quali opere situate in contesti a potenziale rischio idrogeologico, è possibile integrare gli impianti di monitoraggio di tipo "dinamico" anche sistemi di tipo "statico", prevedendo quindi l'installazione di ulteriori sensori quali inclinometri, deformometri (barrette estensimetriche) o misuratori di spostamento ai giunti. Per la depurazione degli effetti di natura ambientale è previsto sempre anche l'installazione di sensori atti alla misura della temperatura media dell'aria. Affinché le logiche di monitoraggio descritte possano correttamente funzionare e fornire le informazioni richieste è prioritariamente necessario redigere il progetto dell'impianto, il cui nucleo è rappresentato dalla scelta delle grandezze fisiche da monitorare e dalla definizione dei punti di misura, con indicazione del loro posizionamento sulla struttura tramite uno o più elaborati grafici, redatti sulla base del rilievo effettivo dell'opera eseguito mediante tecnica laser scanner. Tenendo conto dell'approccio scelto quale monitoraggio "standard", che prevede il controllo della stazionarietà dei parametri modali, il principale obiettivo del progetto è definire un layout di misura che sia il miglior compromesso fra una adeguata descrizione del comportamento strutturale, in termini frequenze e di deformate modali identificabili, ed il relativo costo, in ragione dell'importo destinato da Anas per tale attività nell'ambito del finanziamento complessivo concesso al progetto "Strade Sicure".

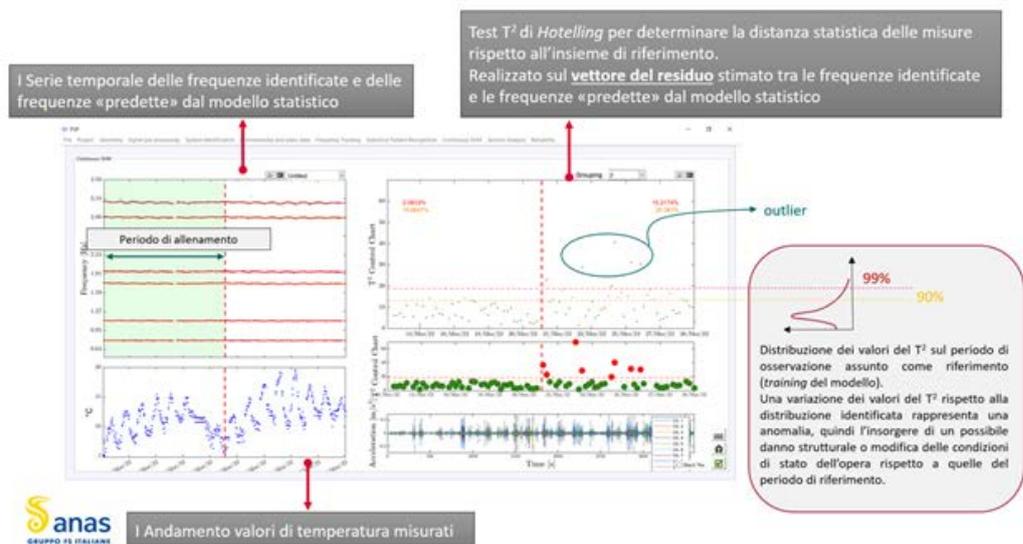


Fig. 10. Carta di controllo. Elaborazione degli autori.

L'installazione tipologica può prevedere complessivamente sei accelerometri monoassiali per campata, con asse di misura orientato secondo la gravità, installati sulle due travi esterne in corrispondenza delle sezioni di mezzeria e delle sezioni ai quarti e 2 accelerometri monoassiali in testa a ciascuna pila (orientati nelle direzioni longitudinale e trasversale all'opera sul piano orizzontale). Nei casi di impalcati a graticcio di travi aventi un rapporto larghezza / lunghezza prossimi a 0,5 o superiori, è ragionevole integrare i punti di misura disponendo ulteriori accelerometri monoassiali nelle sezioni di mezzeria di alcune travi interne. Si riporta di seguito un quadro sinottico per l'identificazione della tipologia di sensori previsti e loro distribuzione sull'opera.

Parte d'opera	Strumentazione	Quantità per parte d'opera	Estensione sull'opera
impalcati	accelerometri <u>mems</u> ad elevata sensibilità e basso rumore di fondo	da 6 a 10	tutte le campate
pile		2	tutte le pile
spalle		1 (a quota pc)	una spalla (caso corrente) entrambe se presenti aste fluviali
opera globale	sensori temperatura	da 1 a 4	distribuiti su opera

Definite poi le specifiche prestazionali per la strumentazione, risulta parimenti necessario definire uno strato software tramite cui gestire il collegamento di ciascun impianto alla piattaforma centrale di controllo, in modo tale che il dialogo tra l'impianto ed il centro avvenga in modo univoco ed indipendente dalla specifica tecnologia con cui è realizzato lo specifico impianto. Si parla appunto di "standard di interoperabilità". L'obiettivo dello standard è quello di definire i protocolli di interazione garantendo la completezza e la correttezza del contenuto informativo raccolto sul campo e il controllo in *near-real-time* dello stato delle infrastrutture, adottando soluzioni modulari e scalabili. Lo standard si articola in tre macro-contesti funzionali: il primo riguarda la gestione dello stato e delle configurazioni operative dei dispositivi che compongono l'infrastruttura fisica di monitoraggio, quali sensori ed elaboratori di campo, denominato "*Device Management*"; il secondo riguarda i processi e i protocolli di acquisizione e trasferimento delle grandezze misurate sul campo verso i sistemi centralizzati di immagazzinamento, elaborazione e visualizzazione dei dati, denominato "*Data-Flow Management*"; il terzo riguarda il rilevamento, il filtraggio e la notifica degli eventi di Alert verso gli utenti, denominato "*Alert Management*".

Ciascun impianto di monitoraggio potrà pertanto essere realizzato con una sua propria tecnologia e relativa architettura (nel rispetto delle specifiche minime previste per la strumentazione) ma gli apparati in esso previsti, equipaggiati con lo strato software previsto dallo standard di interoperabilità, potranno essere collegati alla medesima piattaforma centrale di controllo (fig. 10). Tramite tale piattaforma è possibile monitorare da remoto lo stato di funzionamento dell'impianto, visualizzare gli output prodotti dagli algoritmi di elaborazione dati e di visualizzare real-time l'eventuale insorgere di variazioni comportamentali dell'opera, consentendo ai tecnici ingegneri impiegati nella manutenzione dell'infrastruttura di poter attivare tempestivamente i necessari approfondimenti.

Note

[1] Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti, previste dall'articolo 1, comma 3, del Decreto del Ministro delle Infrastrutture e della Mobilità sostenibili 1° luglio 2022, pubblicato nella GURI del 23.08.2022, sono Istruzioni Operative redatte da ANSFISA per l'applicazione del DM n.578 del 2020.

[2] Laser scanner terrestre e fotomodellazione.

[3] La mappatura mobile è il processo di raccolta di dati geospaziali da un veicolo mobile, generalmente dotato di una gamma di sistemi GNSS, fotografici, radar, laser, LiDAR o un numero qualsiasi di sistemi di telerilevamento.

[4] Con Structural Health Monitoring si intende il monitoraggio dello stato di salute del manufatto nel tempo. Lo scopo è individuare variazioni strutturali legate a danneggiamenti locali, cambiamenti nella geometria anomali o variazioni nel comportamento dei materiali. Si può controllare la salute del manufatto attraverso le misure di grandezze di riferimento per mezzo di sistemi di monitoraggio statico (per approfondimenti) oppure con sistemi di monitoraggio dinamico della struttura. Quest'ultimo approccio, molto più veloce e diretto, prevede il continuo monitoraggio nel tempo di grandezze dinamiche ritenute caratterizzanti per lo stato operativo dell'opera mediante le misure acquisite periodicamente da una serie di sensori installati secondo un pattern variabile con la mole e la geometria della stessa.

Riferimenti bibliografici

Bianchini C., Inglese C., Ippolito A. (2016). Il contributo della Rappresentazione nel Building Information Modeling (BIM) per la gestione del costruito. In *Disegnare Con, Le dimensioni del BIM*, vol.9, n.16.

Bianchini C., Nicasro S. (2017). La definizione del Level of Reliability: un contributo alla trasparenza dei processi historic – BIM. In T. Emler (a cura di), *3D modeling & BIM, applicazioni e possibili sviluppi futuri*, Roma, pp. 20 –225.

Centofanti M., Brusaporci S., Maiezza P. (2016). Tra "HistoricalBIM" ed "HeritageBIM": Building Information Modeling per la documentazione dei beni architettonici. In Parrinello, S. Besana D., *Reuso 2016 contributi per la documentazione, conservazione e recupero del patrimonio architettonico e per la tutela paesaggistica*, Edizioni Firenze, 2016.

Deal B., Grove A., (1965). General Relationship for the Thermal Oxidation of Silicon. In *Journal of Applied Physics*, n. 36, pp. 37–70.

Farrar, C. R., Worden K., (2006). An introduction to structural health monitoring. In *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. 365, n. 1851, pp. 03–315. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1928>>

Gragnaniello, C., Mariniello, G., Pastore, T., Asprone, D. (2024). BIM-based design and setup of structural health monitoring systems. In *Automation in Construction*, n. 158.

Potestà G. (2022). Modeling and Tradeoffs. Limits and potential of the BIM platform for the architectural heritage. In L. Inzerillo, F. Acuto (a cura di), *Digital & Documentation. The new boundaries of digitization*. Pavia University Press, pp. 90-105.

Shafie Panah R., Kioumars M., (2021). Application of Building Information Modelling (BIM) in the health monitoring and maintenance process: A systematic review. In *Sensors*, vol. 3, n. 837. <<https://doi.org/10.3390/s21030837>>

Autori

Giorgia Potestà, Università di Roma, giorgia.potesta@uniroma1.it, g.potesta@stradeanas.it
Lorenzo Lepori, ANAS S.p.A. Direzione Operativa Ponti e Viadotti, llepори@stradeanas.it
Paolo Mannella, ANAS S.p.A. Direzione Operativa Ponti e Viadotti, p.mannella@stradeanas.it

Per citare questo capitolo: Giorgia Potestà, Lorenzo Lepori, Paolo Mannella (2024). InfraBIM e Monitoraggio Strutturale. Digitalizzazione e installazione di sistemi SHM/InfraBIM and Structural Monitoring. Digitalization and installation of SHM systems. In Bergamo F., Calandriello A., Ciammaichella M., Friso I., Gay F., Liva G., Monteleone C. (Eds.), *Misura / Dismisura. Atti del 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione / Measure / Out of Measure. Transitions. Proceedings of the 45th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 583-604.

InfraBIM and Structural Monitoring. Digitalization and installation of SHM systems.

Giorgia Potestà
Lorenzo Lepori
Paolo Mannella

Abstract

The preservation of a vast and increasingly dated infrastructural heritage, exposed to aggressive environments and high traffic loads, is indispensable for our country and a primary objective for Anas, which in recent years has increased investment in maintenance works on Bridges, Viaducts and Tunnels. In this regard, the enactment of DL 109/2018 - Genoa Decree - led the Superior Council of Public Works to draft a standard aimed at defining criteria and procedures for a uniform and harmonious management of existing bridges and viaducts. The Guidelines for the classification and management of risk, safety assessment and monitoring of existing bridges, issued by Ministerial Decree No. 578 of 2020, introduce and provide for a multilevel approach that, starting from the knowledge of the work, provides guidance to proceed with the classification of works into risk classes, safety assessment and monitoring of existing bridges. In fact, the storage of bridge data and information within a CDE platform and their possible update following cognitive insights allows for an integrated and intelligent management of the work throughout its entire useful life. Starting point of the "Safe Roads" project is precisely the digitization of Anas' infrastructure heritage, which is done through three-dimensional restitution using BIM methodology. Starting from the survey of the situation by massive data acquisition with TLS technologies, and subsequent BIM modeling on the acquired and aligned point cloud, the entire infrastructure heritage is digitalized. At the same time, the installation of SHM structural monitoring systems is planned, which will enable real-time monitoring of Anas' bridges thanks to the Digital Twins implemented.

Keywords

Digitalization, BIM, SHM, Bridges, TLS.



SHM Project. Elaboration by the authors.

The context of the “Safe Roads” project

A massive collection of basic information on Anas' infrastructure assets, such as original technical documentation, defect surveys, cognitive investigations on geometries, construction details and materials, is an indispensable activity for the application of the Guidelines [1], drafted with reference to “road” bridges and viaducts, which provide for their application to both Managing Companies and Provinces, municipalities, and local authorities. At the same time, the publication of the National Recovery and Resilience Plan and the MIMS Decree 312/2021 reaffirms and amplifies what is already contained in the Ministerial Decree of Infrastructure and Transport 560/2017 (so-called BIM Decree) and the planned mandatory use of information modeling methods and tools in public works. Moreover, in the New Public Contracts Code, there is a deadline for all Contracting Stations to compulsorily adopt the BIM methodology as of January 1, 2025; therefore, Contracting Stations will be required to adopt digital construction information management methods and tools for design and construction of works from scratch, but also for interventions on existing works for amounts greater than €1,000,000.00. As of January 1, 2025, BIM will be required for all ordinary and extraordinary maintenance works whose assets have already been digitized. It's confirmed how BIM, but more generally digitization, is now an element that can no longer be prescinded for every stage of the artwork life cycle.

The goal of the project “Safe Roads - Implementation of a dynamic monitoring system for the remote control of bridges, viaducts and tunnels on the main road network,” for which Anas has received €275 million in funding, is to install and commission structural monitoring systems for a thousand bridges by March 2026.

The data read by the sensors in the field will feed a platform that will enable real-time monitoring of Anas' bridges thanks to “Digital Twins” created through Building Information Modeling of bridges and sensor layouts previously designed at the executive level. The digital assets will also be useful for inspection and maintenance purposes of the actual works.

Digitalization of infrastructure assets

In the field of three-dimensional modeling and management of bridges, especially if they are monumental in nature and of high strategic and connecting value, the possibility of applying a Building Information Modeling approach is an interesting challenge and represents an objective potential for Contracting Stations and Managing Authorities. BIM processes for new works have long been established in the field of three-dimensional representation,

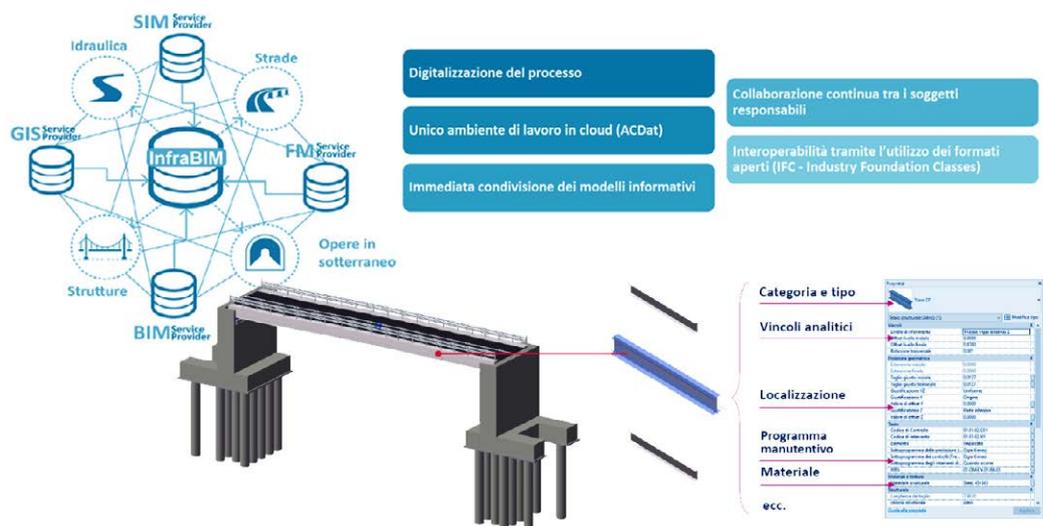


Fig. 1. BIM for infrastructure. Elaboration by the authors.

ensuring control of the design and all phases of the life cycle. Open question, however, and much debated in recent years, is the possibility of using the same processes in the field of monumental building heritage or existing infrastructure, so much so that we speak of Heritage BIM or Infra BIM. BIM offers the possibility to manage an important amount of heterogeneous data that, going beyond the simple geometric aspect, can constitute a digital archive of data and information, useful for the documentation and preservation of works (Bianchini et al. 2016) (Fig.1). The transition from numerical to geometric models implies a crucial critical operation of “discretization”; in BIM construction, the model involves an additional interpretive step: the semantic structuring of its compositional elements. This ontological operation, undeniably subjective, goes far beyond the recognition of geometric features of the elements. The aggregation of these objects, subject to mutual relationships of incorporation or belonging as well as constraints and rules of interaction, guides the actual construction of the virtual information model (Potestà, 2022). To standardize the modeling of the Assets as much as possible, Anas has equipped itself with its own Data Model through which to discretize, and thus decompose, the parts that constitute the artworks being modeled from the LOG geometric point of view, and especially from the point of view of the LOI information attributes that populate each element of the model. This step of decomposition, whose goal is to hierarchically identify the elements of the artwork and their ontological definition, is of crucial importance in defining the components of any three-dimensional model and especially in the creation of an Infra BIM model, where clarity about the mutual relationships and dependencies between parts is needed more than ever. (Fig. 02). All operations involving knowledge of this type of artifacts, according to well-established literature, always have to do with the massive acquisitions of data that, from numerical mo-

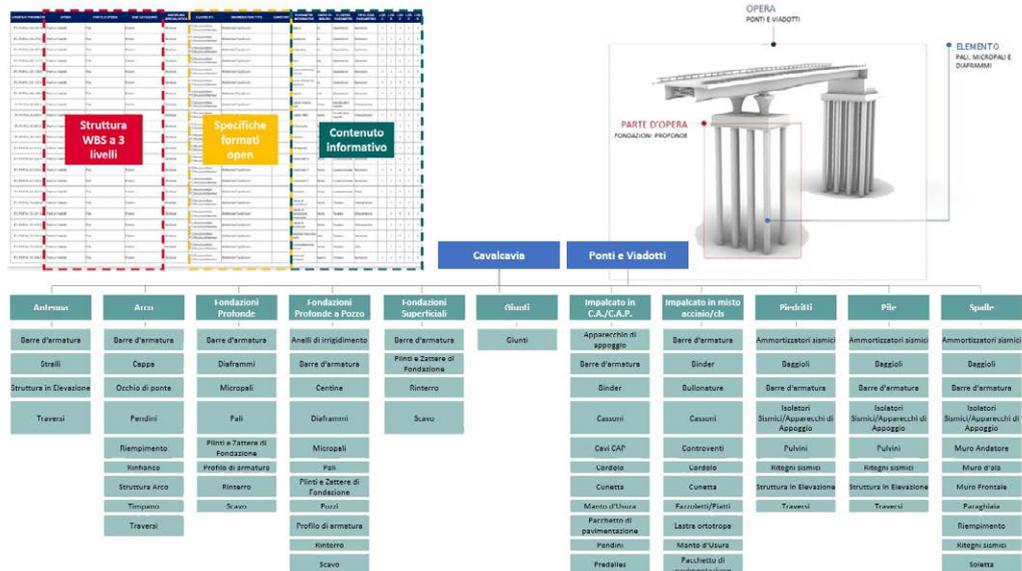


Fig. 2. Anas Data Model and work breakdown structure of Bridges and Viaducts Assets. Elaboration by the authors.

odels are transformed into textured or meshed 3D models, and 2D models (Centofanti et al. 2016). Also, for Infra BIM models, the substrate is point clouds, TLS and SfM [2], which affect the artwork. The difficulty in translating the numerical model of the point cloud derived from the survey to a parametric BIM model is primarily represented by the ability of the point clouds to describe only the situation, accounting for geometric, chromatic, and textural, and consequently superficial characteristics. To make a parametric BIM model, a whole range of other information beyond the scanned surface is needed, such as in-depth surveys, inspections, but also historical information related to the executive and construction design tables of the artworks being returned.

The collection of all information about the bridges being digitized is done within an ACDat, which is a Data Sharing Environment, in English Common Data Environment (CDE), specially prepared by Anas so that it can receive heterogeneous data from inspections, design, surveys, models, and everything related to the bridge. The creation of the database has a twofold purpose: on the one hand, to help and support the BIM modeling and digitization process; on the other hand, it constitutes a real binder of bridge information, which can always be consulted and implemented (Fig.03). The activities we call Survey represent the theoretical-operational body through which we tend to knowledge of the material elements that constitute a bridge. This multidisciplinary and multidimensional process is divided into a phase of field data acquisition (survey) dependent on new technologies of 3D scanning and massive data acquisition, and the ways in which the studied object is returned. The survey for the knowledge and documentation of the works under study involves massive data acquisition, i.e., the return of a recorded and georeferenced point cloud; this is carried out through the use of Laser Scanner in static mode for intrados and extrados of the bridge; for the latter, acquisition in dynamic mode is also allowed, through Mobile Mapping [3]. All measurements are referred to the UTM-ETRF2000 plane system; elevations determined with reference to I.m.m. with derivation from the vertices of the IGM95 network or the high-precision leveling lines of the Italian Military Geographic Institute. For each piece of work, the necessary framing points are materialized, for a minimum of four stable reference points, with topographic type nails with underlying stainless-steel washer, driven into existing or specially built stable structures. The laser scanner survey is also supplemented with a celerimetric topographic survey of the notable points of the horizontal and vertical structures as well as the road surface, so that a simplified model of the work can be reconstructed. Along with the laser scanner survey, all documents preparatory to information modeling are reviewed and stored within the Data Sharing Environment, which ensure that the expected Level of LOD Development is achieved; all existing technical documentation (tables, reports, tests, other documents) related to Bridges, Viaducts and Overpasses such as original plans, variant reports, works accounting and As-built tables, as well as maintenance projects already carried out become the substrate on which the information part of the models and the geometric stratigraphies of parts of works and elements are developed. The models created all meet a Level of Development LOD C, in accordance with the normative reference Standard UNI 11337-4 2017. The models, therefore, are characterized by an adequate and correct representation of the geometry and carpentry of the construction elements of the work, as well as accompanied by structural details and all the information available from the archival documentation. Both the geometric LOG and the informational LOIN attributes consider the Anas Data Model. This thematic representation, based on

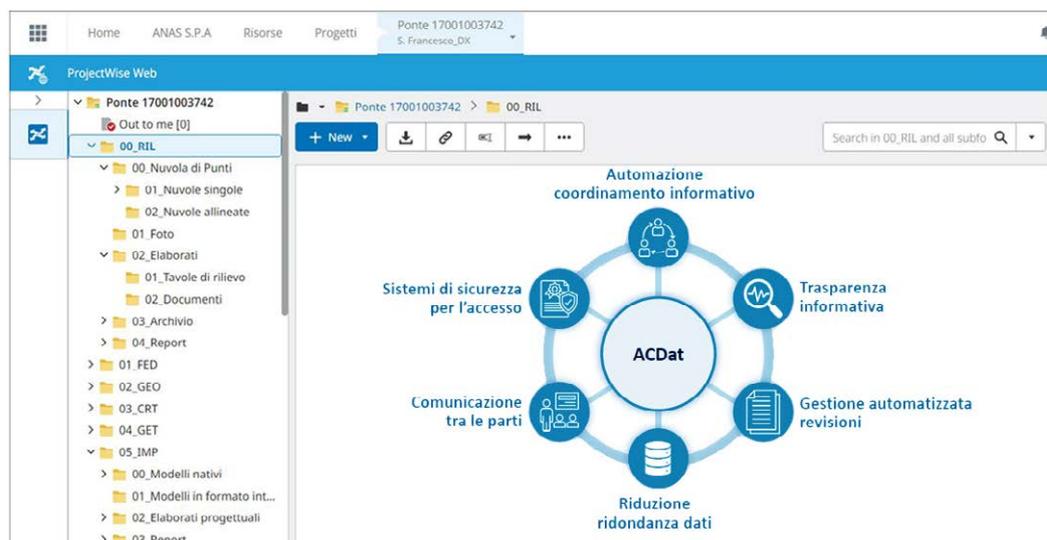


Fig. 3. Anas Common Data Environment. Elaboration by the authors.

levels, verifies the elements of the model based on the objectivity of tangible information found from the survey and available documentation. These levels shall be expressed through the distinction into four different LOR evaluation ranges.

Saint Francis Viaduct: survey and InfraBIM

The St. Francis Viaduct, in this case taken as an example of the digitization process, consists of two independent decks, each serving one carriageway, side by side and resting on the same piers. The viaduct has an overall length of about 500m, has a slightly curved layout and consists of a total of eleven spans with average spans of 44m, except for the first span having a span of 52m. The static scheme is that of simply supported spans, with a "girder lattice" deck structure with four "double-T" girders in reinforced concrete to which an additional girder was added on the outer side, to allow for the widening of the roadway, in prismatic section and steel material. The piers, made of ordinary reinforced concrete, are of the "septum" type and consist of two side-by-side baffles solidified at the pulvinus level. The height varies from a minimum of 8m to a maximum of about 22m.

Massive data acquisition via TLS was conducted in September 2023 with a topographic team of 3 specialized operators who operated both on the deck during road closure hours and below the viaduct using Leica RTC360 instrument. The scans were subsequently recorded and merged using cloud-to-cloud methodology and target verification (Fig. 04). The



Fig. 4. Framing of the work and views of the point cloud. Elaboration by the authors.

celerimetric survey, aimed at georeferencing the targets placed on the abutments and piers so that the entire point cloud could later be oriented, was performed with Leica FLKEXLINE series instrument model TS06 ultra5. The cloud was cleaned of noise, decimated of overabundant points, and georeferenced with the coordinates of the targets beaten with celerimensura.

For the georeferencing of the work in ETRF2000 coordinates with a local projection and the use of rectilinear (Eurelian) coordinates, four main cornerstones were located on site, well materialized on a road adjacent to the viaduct in a position to receive the maximum number of satellites. The four cornerstones were acquired by static surveying, through Leica GPS GS15 instrument, of more than 30 mn and with epochs of 5 seconds and a cutoff angle of 15 degrees all to ensure the different PDOs such as to guarantee high accuracy; post-processing calculation was carried out using the following 4 bases of the Smartnet network at the same time: Prignano, Rivello, Sinise and Villa D'Agri, all fixed bases (Fig. 05).

This was followed by an archival search aimed at collecting available documentation on the St. Francis Viaduct, such as As-Built maintenance plans, original designs, inspection sheets, and geognostic surveys preparatory to BIM modeling of the work. All the documentation tracked down was archived within ACDat and correlated to the BIM models via appropriate url links; this documentation made it possible to detail from an informational point of view the BIM models of the different specialist disciplines and especially to model portions of the work that could not be surveyed, such as the foundations and support apparatuses (Fig. 06). The digitalization process, which began with laser scanner acquisition, ends with BIM modeling of the work. The model was created by directly modeling the parametric geometries on the point cloud imported within the chosen Bim Authoring platform and integrating the surveyed data with what is present within the physical and digital archives of Anas (Fig. 07). This modeling was conducted considering both the data model and the individual specialist disciplines, in this case Safety and Structures for the As-Is restitution part of the bridge. All disciplines were then merged within a federated model and the different files, both in native and interoperable .ifc format were uploaded within ACDat. Of particular interest for the maintenance within the BIM model of the bridge turn out to be the information parameters grouped in the sets "Object Identifier" and "6D Information," which give an account respectively: the first one, of the logical syntax of the bridge by attributing alphanumeric characters to each part of the work and element according to the type and progressive, indicated according to the Inspection Manual and following the logic of increasing progressive, from left to right; the second one, giving evidence of the parameters that will have to interact with the BMS platform for inspections, already in use in Anas, and that identify for each element the belonging span, the deck and the span structure (Fig. 08). For each element represented in the model, the Level of Reliability (LOR) parameter is also valued, i.e., an expression of the geometric reliability of the digital object and its correspondence to reality, as well as its graphization on the model itself (Fig. 08) (Bianchini, Nicastro 2017). The modeling reliability for each element is in fact expressed on a scale from High to Very Low, and thematized on the model itself through different colorations of the elements.

Structural monitoring: a systematic approach

About the monitoring of Bridges and Viaducts, Anas has conceived the implementation of a control process based on the installation of instrumental monitoring systems [4], with the aim of integrating and supporting the periodic surveillance process performed through visual inspections.

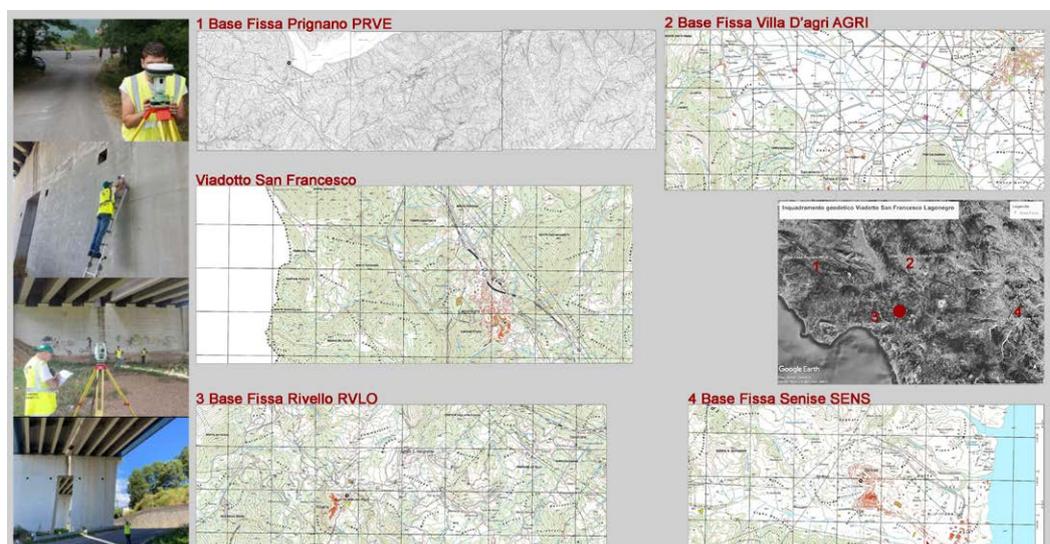


Fig. 5. Geodetic framing and photos of the survey campaign. Elaboration by the authors.

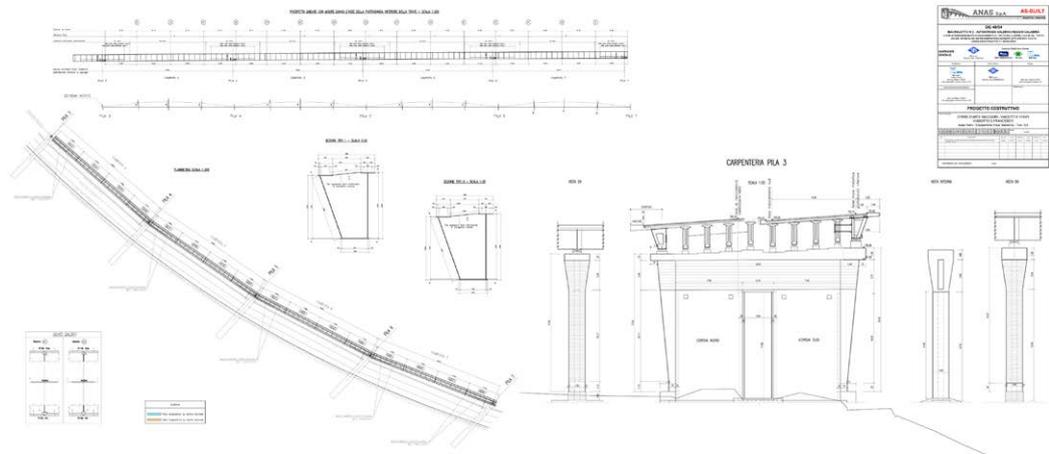


Fig. 6. As Built Construction Project for maintenance work on the viaduct shared in CDE. Anas Digital Archives.

The structural monitoring of these works turns out to be a rather complex operation and it is therefore necessary, to apply a systematic and industrialized approach to the problem, to define as a priority the approach to be followed to monitor these works. In fact, this choice influences the definition of fundamental aspects such as the selection of the type of instruments (sensors and acquisition hardware) and the definition of their minimum characteristics, the definition of measurement logics, the choice of measurement analysis techniques, the definition of control parameters, and the choice of an architecture to connect and manage the system with a remote-control center. The approach best suited for a massive application of structural monitoring on managed infrastructure assets is one based on continuous monitoring of modal characteristics, conjugated by data-driven damage interpretation models (Fig. 9).

This method turns out to be well-established for structural monitoring applications and being based on the control of intrinsic parameters of the structure, it does not need to know the magnitude of the variable loads present, thus allowing for cost containment since for road bridges such measurement turns out to be possible only by resorting to a widespread installation of dynamic weighbridges.

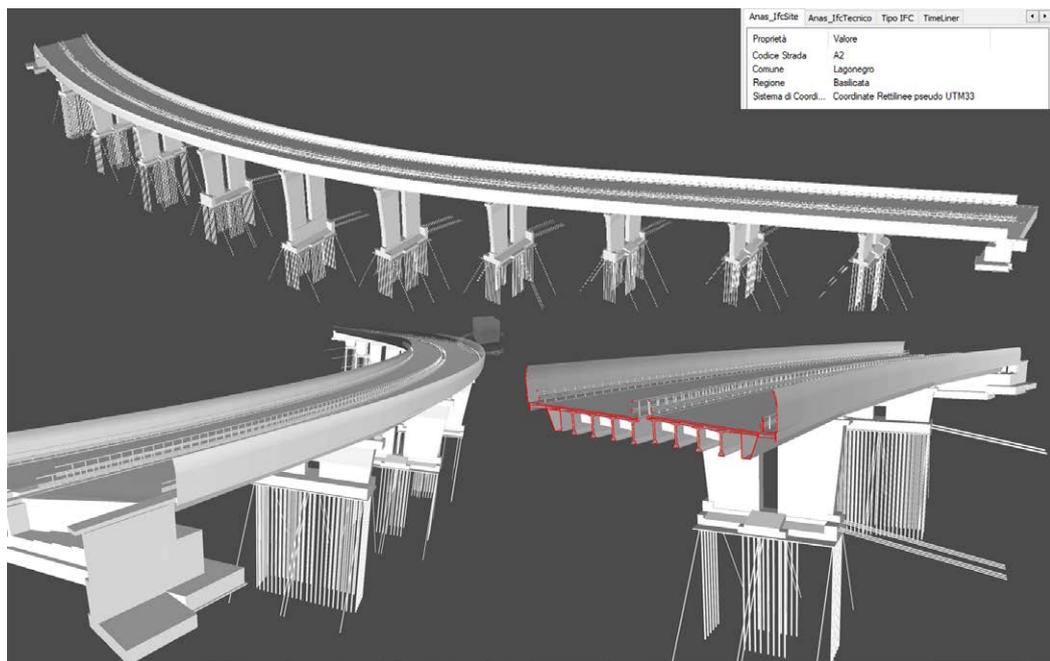


Fig. 7. BIM model of the San Francesco Viaduct. Elaboration by the authors.

A synoptic overview is given below to identify the type of sensors planned and their distribution on the work.

Structural elements	Instrumentation	Quantity for each element	Exstension on the bridge
decks	accelerometer mems with high sensitivity and low noise floor	from 6 to 10	all spans
piers		2	all pier
abutment		1	one abutment (current case) both if river rods are present
on the bridge	temperature sensors	from 1 to 4	distributed on the bridge

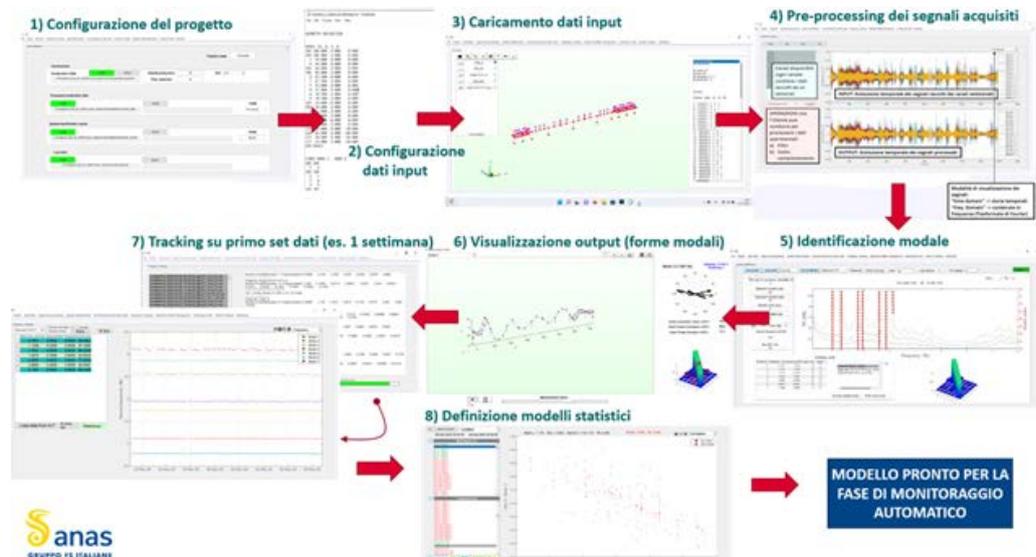


Fig. 9. Data analysis flow for modal parameter identification.

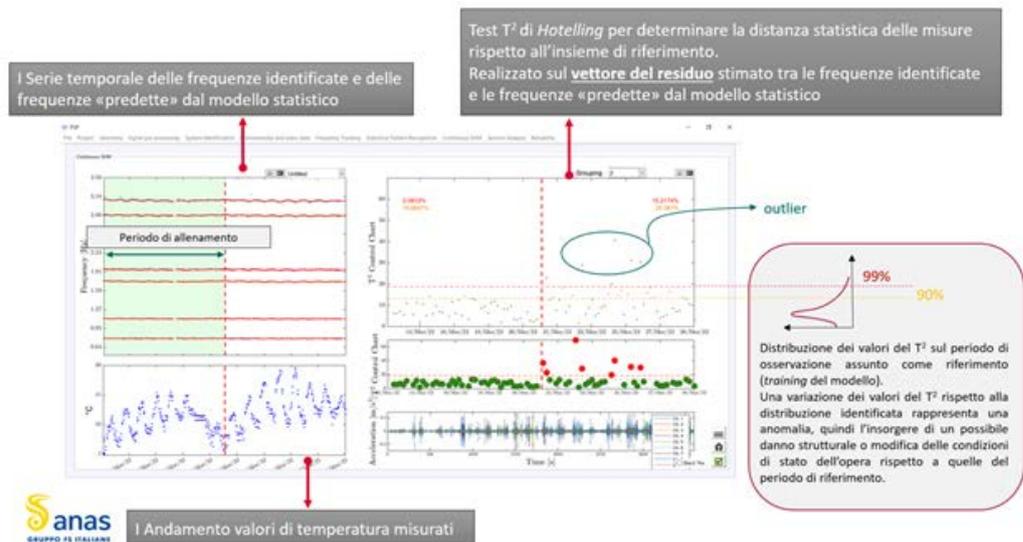


Fig. 10. Control chart.

Then, having defined the performance specifications for the instrumentation, it is equally necessary to define a software layer through which to manage the connection of each plant to the central control platform, so that the dialogue between the plant and the center occurs uniquely and independently of the specific technology with which the specific plant is made. This is precisely referred to as an “interoperability standard.” The goal of the standard is to define interaction protocols ensuring the completeness and correctness of the information content collected in the field and near-real-time control of infrastructure status, adopting modular and scalable solutions. The standard is divided into three functional macro-contexts: the first deals with the management of the status and operational configurations of the devices that make up the physical monitoring infrastructure, such as sensors and field processors, referred to as “Device Management”; the second deals with the processes and protocols for acquiring and transferring measured quantities in the field to centralized data storage, processing and visualization systems, referred to as “Data-Flow Management”; and the third deals with the detection, filtering and notification of Alert events to users, referred to as “Alert Management.” Each monitoring plant can therefore be built with its own technology and related architecture (in compliance with the minimum specifications provided for the instrumentation), but the equipment provided in it, equipped with the software layer provided by the interoperability standard, can be connected to the same central control platform (Fig. 10). Through such a platform platform, it is possible to remotely monitor the operating status of the plant, view the outputs produced by the data processing algorithms, and to visualize in real-time any occurrence of behavioral variations in the work, allowing the engineering technicians employed in the maintenance of the infrastructure to be able to promptly activate the necessary investigations.

Notes

[1] Guidelines for Risk Classification and Management, Safety Assessment and Monitoring of Existing Bridges, provided by Article 1, Paragraph 3, of the Decree of the Minister of Infrastructure and Sustainable Mobility July 1, 2022, published in the Official Gazette on Aug. 23, 2022, are Operating Instructions prepared by ANSFISA for the implementation of DM No. 578 of 2020.

[2] Terrestrial Laser Scanner and Structure from motions.

[3] Mobile mapping is the process of collecting geospatial data from a mobile vehicle, usually equipped with a range of GNSS, photographic, radar, laser, LiDAR, or any number of remote sensing systems.

[4] Structural Health Monitoring refers to the monitoring of the health of the artifact over time. The purpose is to detect structural changes related to local damage, changes in abnormal geometry, or changes in material behavior. One can monitor the health of the artifact through measurements of reference quantities by means of static monitoring systems (for further study) or by dynamic structure monitoring systems. The latter approach, which is much faster and more direct, involves the continuous monitoring over time of dynamic quantities considered to be characteristic for the operational state of the structure by means of measurements acquired periodically from a series of sensors installed in a pattern that varies with the size and geometry of the structure.

References

- Bianchini C., Inglese C., Ippolito A. (2016). Il contributo della Rappresentazione nel Building Information Modeling (BIM) per la gestione del costruito. In *Disegnare Con, Le dimensioni del BIM*, vol.9, n.16.
- Bianchini C., Nicastro S. (2017). La definizione del Level of Reliability: un contributo alla trasparenza dei processi historic – BIM. In T. Emler (a cura di), *3D modeling & BIM, applicazioni e possibili sviluppi futuri*, Roma, pp. 20 –225.
- Centofanti M., Brusaporci S., Maiezza P. (2016). Tra “HistoricalBIM” ed “HeritageBIM”: Building Information Modeling per la documentazione dei beni architettonici. In Parrinello, S. Besana D., *Reuso 2016 contributi per la documentazione, conservazione e recupero del patrimonio architettonico e per la tutela paesaggistica*, Edizioni Firenze, 2016.
- Deal B., Grove A., (1965). General Relationship for the Thermal Oxidation of Silicon. In *Journal of Applied Physics*, n. 36, pp. 37–70.
- Farrar, C. R., Worden K., (2006). An introduction to structural health monitoring. In *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. 365, n. 1851, pp. 03–315. <<https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1928>>
- Gragnaniello, C., Mariniello, G., Pastore, T., Asprone, D. (2024). BIM-based design and setup of structural health monitoring systems. In *Automation in Construction*, n. 158.
- Potestà G. (2022). Modeling and Tradeoffs. Limits and potential of the BIM platform for the architectural heritage. In L. Inzerillo, F. Acuto (a cura di), *Digital & Documentation. The new boundaries of digitization*. Pavia University Press, pp. 90-105.
- Shafie Panah R., Kioumars M., (2021). Application of Building Information Modelling (BIM) in the health monitoring and maintenance process: A systematic review. In *Sensors*, vol, 3, n. 837. <<https://doi.org/10.3390/s21030837>>

Authors

Giorgia Potestà, University of Rome, giorgia.potesta@uniroma1.it
Lorenzo Lepori, ANAS S.p.A. Direzione Operativa Ponti e Viadotti, llepori@stradeanas.it
Paolo Mannella, ANAS S.p.A. Direzione Operativa Ponti e Viadotti, p.mannella@stradeanas.it

To cite this chapter: Giorgia Potestà, Lorenzo Lepori, Paolo Mannella (2024). InfraBIM e Monitoraggio Strutturale. Digitalizzazione e installazione di sistemi SHM/InfraBIM and Structural Monitoring. Digitalization and installation of SHM systems. In Bergamo F., Calandriello A., Ciammaicella M., Friso I., Gay F., Liva G., Monteleone C. (Eds.), *Misura / Dismisura. Atti del 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione / Measure / Out of Measure. Transitions. Proceedings of the 45th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 583-604.