

COMMITTENTE:



DIREZIONE LAVORI:



APPALTATORE:



PROGETTAZIONE:

MANDATARIA:

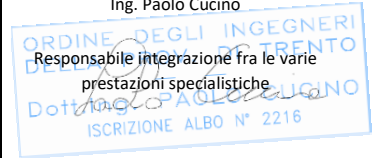


MANDANTI:



IL DIRETTORE DELLA PROGETTAZIONE:

Ing. Paolo Cucino



### PROGETTO ESECUTIVO

**PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"**

RELAZIONE

11 - OPERE CIVILI

A-PONTE SUL FIUME ISARCO

Elaborati Generali

Relazione monitoraggio

APPALTATORE		SCALA:
IL DIRETTORE TECNICO  Ing. Pietro Gianvecchio 		-

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC.	OPERA/DISCIPLINA	PROGR.	REV.
I B O U	1 B	E	Z Z	R H	V I O O O O	0 0 2	A

Rev	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione	-	14/01/2022	F.Favaro	18/01/2022	D.Buttafoco (Dolomiti)	19/01/2022	IL PROGETTISTA M.Organte
								 29/01/2022

File: IB0U1BEZZRHVI000001A.docx

n. Elab.: X

APPALTATORE:		<b>PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"</b>				
PROGETTAZIONE:		<b>PROGETTO ESECUTIVO</b>				
Mandatario:	Mandanti:					
SWS Engineering S.p.A.	PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria					
<b>11 - OPERE CIVILI</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO.
Relazione monitoraggio	IBOU	1BEZZ	RH	VI0000002	A	2 di 18

## SOMMARIO

<b>1. PREMESSA.....</b>	<b>3</b>
<b>2. DESCRIZIONE SINTETICA DEL PONTE SULL'ISARCO. ....</b>	<b>4</b>
<b>3. IL MONITORAGGIO STRUTTURALE.....</b>	<b>6</b>
3.1 PREMESSA. ....	6
3.2 I PARAMETRI DA MONITORARE .....	6
3.3 LA SENSORISTICA.....	10
3.4 IL SISTEMA DI TRASMISSIONE DATI.....	12
3.5 LA GESTIONE DEI DATI.....	13

APPALTATORE:		<b>PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"</b>				
PROGETTAZIONE:		<b>PROGETTO ESECUTIVO</b>				
Mandatario:	Mandanti:					
SWS Engineering S.p.A.	PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria					
<b>11 - OPERE CIVILI</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO.
Relazione monitoraggio	IBOU	1BEZZ	RH	VI0000002	A	3 di 18

## 1. PREMESSA

Il presente fascicolo tratta delle soluzioni tecniche per quanto riguarda il monitoraggio delle principali grandezze fisiche (spostamenti pseudo-statici e dinamici, accelerazioni, frequenze di vibrazione, stati tensionali) che caratterizzano il comportamento del il Ponte Gardena sotto i carichi di esercizio e in condizioni dinamiche.

Dopo una breve descrizione del ponte ed un richiamo agli altri provvedimenti per l'ispezione e la manutenzione, oggetto di relazione separata, vengono elencati i principi e gli obiettivi che si intende raggiungere con il monitoraggio in continuo strumentale del ponte.

APPALTATORE:						
PROGETTAZIONE:	<b>PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"</b>					
Mandatario:	Mandanti:		PROGETTO ESECUTIVO			
SWS Engineering S.p.A.	PINI ITALIA	GDP GEOMIN	SIFEL SIST			
	M Ingegneria					
11 - OPERE CIVILI	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO.
Relazione monitoraggio	IBOU	1BEZZ	RH	VI000002	A	4 di 18

## 2. DESCRIZIONE SINTETICA DEL PONTE SULL'ISARCO.

Il ponte, a vie separate per ciascun binario distanti fra loro circa 40m, consente di superare sia l'Isarco che alcune vie di comunicazione importanti: la linea ferroviaria storica, l'autostrada A22, la S.S. 12 e la S.P. per Funes. I due impalcati hanno lunghezza pari a 220,90m (binario pari) e 250,75m (binario dispari), e collegano le gallerie Gardena e Scaleres.

Le due campate principali del ponte, una a scavalco dell'Autostrada e l'altra a scavalco del fiume Isarco e della linea ferroviaria "storica", hanno struttura in acciaio ad arco gemello affiancato, a via superiore. Le campate di riva sono a travata semplicemente appoggiata ed hanno luce variabile da 23m a 28m. Gli archi, che hanno luce di circa 84m e sono incernierati al piede e gemellati tramite traversi di collegamento, sono realizzati in struttura metallica a cassone e sostengono alle reni ed in chiave un classico impalcato metallico a due travi portanti principali, a via inferiore, a doppio T simmetrico parete piena alto 2,80m; l'impalcato sostenuto dagli archi ha quindi schema statico di trave continua su 5 appoggi.

Gli appoggi sono a calotta sferica in acciaio e teflon.

Gli archi sono scanditi da pile in c.a. di altezza circa 30m, alle base delle quali vi sono le sedi delle cerniere cilindriche a perno; le pile hanno fondazioni del tipo a pozzo.

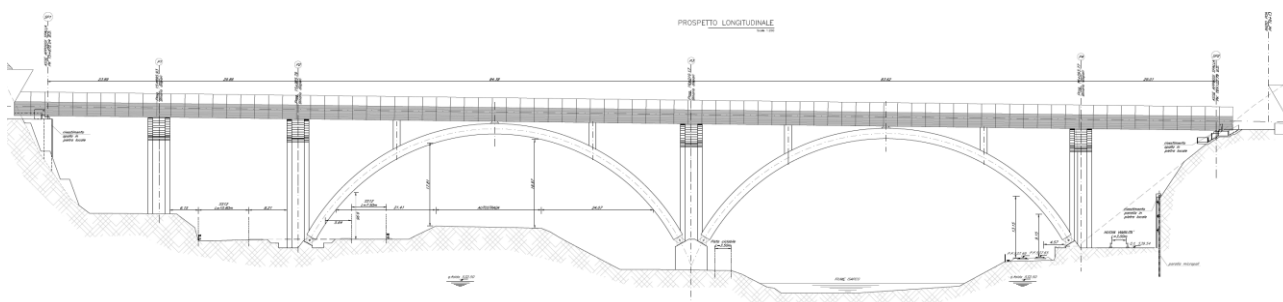


Figura 1: Prospetto del ponte sul binario dispari

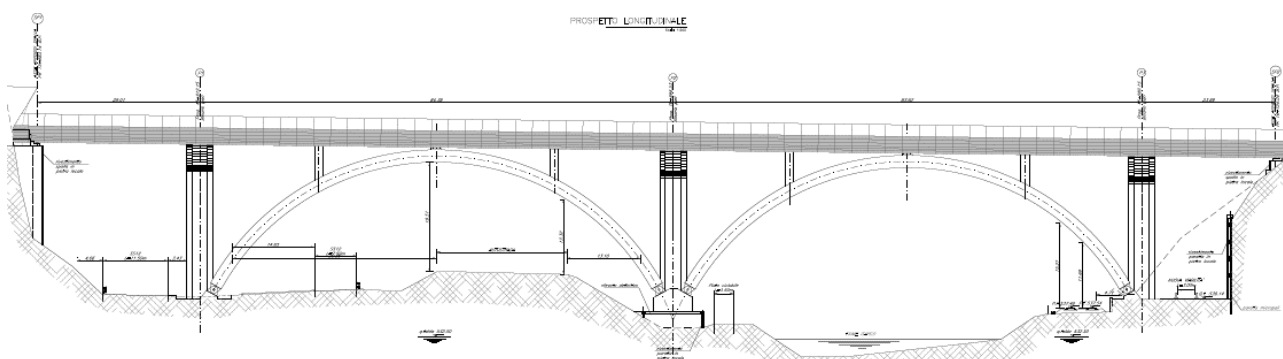


Figura 2: prospetto del ponte sul binario pari.

APPALTATORE: 	<b>PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"</b>					
PROGETTAZIONE: Mandatario: SWS Engineering S.p.A. Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	<b>PROGETTO ESECUTIVO</b>					
<b>11 - OPERE CIVILI</b> Relazione monitoraggio	COMMESSA <b>IBOU</b>	LOTTO <b>1BEZZ</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>VI000002</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO. <b>5 di 18</b>

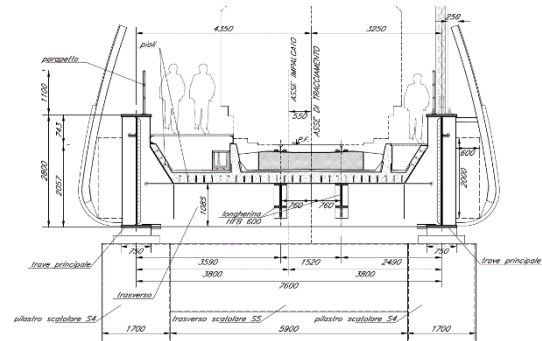


Figura 3: rendering (a sinistra) e sezione trasversale dell'impalcato (a destra)

La geometria del ponte e la sua particolare ubicazione rendono l'accessibilità per ispezione e manutenzione ad ogni parte strutturale particolarmente complessa, ed in particolare sostanzialmente impossibile dal basso per la presenza del fiume e dell'autostrada. Per contro, il ponte, per luci e soluzioni strutturali (con molti dettagli, per esempio, sensibili a fatica) necessita certamente di frequenti ispezioni che dovranno essere sufficientemente agevoli e non condizionanti per l'esercizio.

Appare quindi necessario predisporre un sistema integrato di mezzi, strumenti e soluzioni che consentano: un agevole accesso ad ogni parte strutturale per l'ispezione e la manutenzione senza pregiudizio per l'esercizio stradale e ferroviario sottostante e per la circolazione dei treni sul nuovo ponte di facilitare le operazioni di ispezione per le parti strutturali inevitabilmente più disagiati (l'interno dei cassoni metallici che costituiscono gli archi, i traversi e le pile intermedie)

di controllare, mediante un adeguato monitoraggio statico e dinamico, il comportamento reale dell'opera in campo statico e dinamico, sia relativamente alle previsioni del modello teorico di progetto sia relativamente alla evoluzione dei parametri monitorati nel tempo. Tale controllo fornisce indicazioni di grande importanza sia per la individuazione in tempi rapidi di eventuali anomalie di comportamento e per la messa in atto dei necessari conseguenti interventi correttivi, sia per la migliore pianificazione di interventi comunque programmati.

I punti a) e b) sono oggetto di una relazione separata.

APPALTATORE:						
PROGETTAZIONE:	<b>PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"</b>					
Mandatario:	Mandanti:	PROGETTO ESECUTIVO				
SWS Engineering S.p.A.	PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria					
11 - OPERE CIVILI	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO.
Relazione monitoraggio	IBOU	1BEZZ	RH	VI0000002	A	6 di 18

### 3. IL MONITORAGGIO STRUTTURALE

#### 3.1 PREMESSA.

Il monitoraggio strutturale rappresenta il processo di caratterizzazione dell'opera con il quale ci si propone di ottenere informazioni sul livello prestazionale della struttura al fine di poter mantenere nel tempo elevati livelli di sicurezza ed efficienza. Attraverso la misura di specifici parametri fisici ad intervalli di tempo determinati, è possibile seguire l'evoluzione nel tempo delle condizioni della struttura esaminata e di sviluppare modelli analitici per la valutazione di eventuali cambiamenti nel comportamento della stessa e quindi rispondere celermente ad eventuali necessità di intervento e pianificare in maniera efficiente qualsiasi attività manutentiva.

Il sistema di monitoraggio proposto è integrabile con i sistemi di gestione delle attività di ispezione (es: domus) e con i sistemi di ispezione automatica descritti in questa relazione.

#### 3.2 I PARAMETRI DA MONITORARE

L'obiettivo del monitoraggio è indagare il comportamento reale delle opere (riducendo le incertezze derivanti dalle variabilità intrinseche nei materiali e nelle azioni) per ottimizzare gli interventi di manutenzione (segnalando l'eventuale presenza di criticità strutturali) e di eventuale ripristino sulla base di dati oggettivi. Il monitoraggio consente infatti di evidenziare con elevata attendibilità la presenza di eventuali danni alla struttura e di localizzarne la posizione ed estensione e valutare l'integrità strutturale a seguito di eventi accidentali. In particolare, il monitoraggio può fornire informazioni utili sull'evoluzione del degrado della struttura nel tempo, permettendo di mettere in atto azioni preventive per ripristinare la corretta funzionalità della stessa. Il controllo periodico in esercizio permette di definire in maniera efficace un dedicato ed efficace piano di manutenzione. il controllo periodico in esercizio che permette di definire in maniera efficace un dedicato piano di manutenzione.

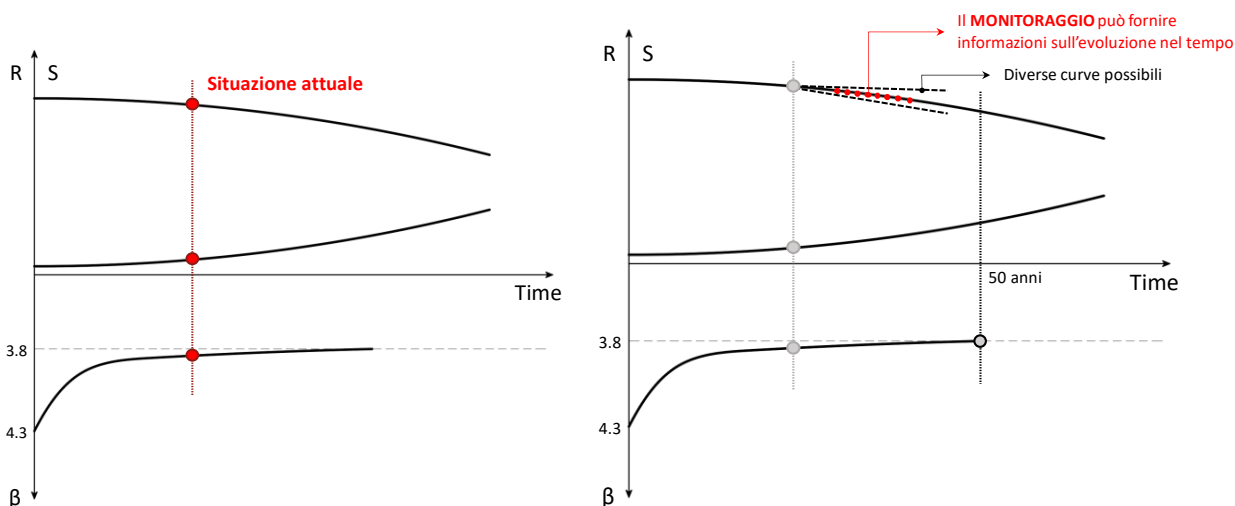


Figura 4: Evoluzione nel tempo di Resistenza, Sollecitazioni e Coefficiente di affidabilità ( $\beta$ ) di una struttura.

APPALTATORE:		<b>PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"</b>				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	<b>PROGETTO ESECUTIVO</b>			
11 - OPERE CIVILI Relazione monitoraggio	COMMESSA IBOU	LOTTO 1BEZZ	CODIFICA RH	DOCUMENTO VI0000002	REV. A	FOGLIO. 7 di 18

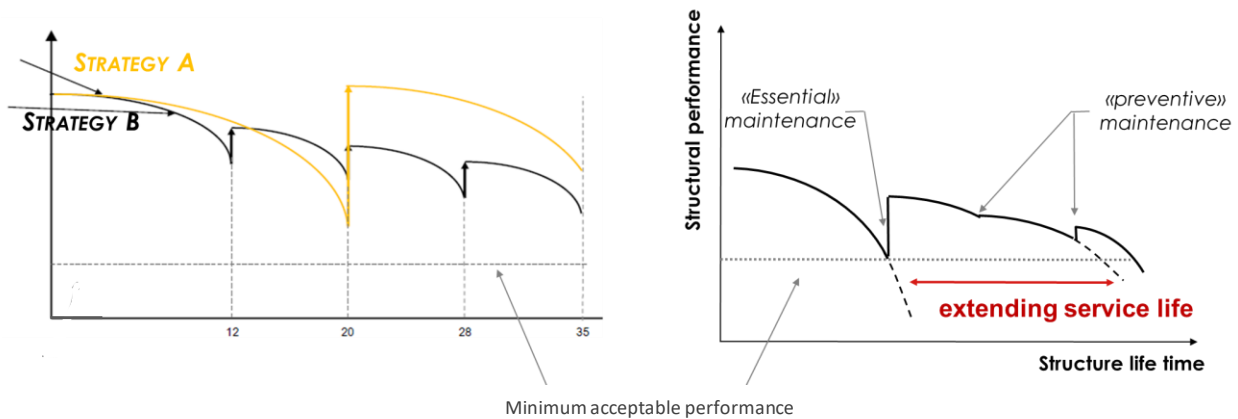


Figura 5: Strategie di intervento per una manutenzione preventiva

Il sistema di diagnostica è basato sulla combinazione di modelli matematici e di un monitoraggio innovativo, diffuso e poco invasivo, in grado di fornire all'utente in tempo reale informazioni sullo stato della struttura e la sua evoluzione. Nel caso oggetto della presente analisi i parametri di monitoraggio sono stati scelti proprio con lo scopo di ottimizzare le operazioni di manutenzione nel tempo e di conseguenza garantire una performance sempre elevata del ponte.

I parametri oggetto del monitoraggio del ponte sull'Isarco sono:

- scorrimenti sul piano dell'impalcato di questo rispetto alle pile (strumenti impiegati: distanziometri su fibra ottica); tali strumenti sono posti sulle pile fra gli archi ed ai lati degli stessi
- carico trasmesso dall'impalcato alle sottostrutture (strumenti impiegati: celle di carico su fibra ottica); tali strumenti sono posti in corrispondenza di tutti gli appoggi dell'impalcato a schema statico di trave continua
- deformazioni locali dell'acciaio (strumenti impiegati: estensimetri su fibra ottica); tali strumenti, che consentono di valutare lo stato tensionale mediante la relazione  $\sigma = E_a \times \varepsilon$ , sono posizionati in corrispondenza delle sezioni più impegnate di uno dei due archi per ciascuna via (in chiave ed alle reni) e del relativo impalcato (piattabande superiori ed inferiori di tutte le sezioni di pila.
- evoluzione deformativa globale e delle caratteristiche dinamiche del ponte per valutare l'eventuale insorgenza di fenomeni legati al danno (strumenti impiegati: accelerometri ed inclinometri basati sulla tecnologia MEMS). Tali strumenti vengono distribuiti su tutto il ponte e consentono di:
  - individuare il comportamento dinamico del ponte e di tenerlo monitorato nel tempo
  - controllare la risposta della struttura in termini di deformazione sia sotto carichi di preve durata, sia se soggetta a evoluzioni deformative non previste.

Inoltre, sono disposti sui ponti diverse termocoppie in punti sensibili che consentono di interpretare le misure in relazione alla temperatura sulle strutture. Il sistema di misura si avvale dell'utilizzo combinato della tecnologia MEMS e su fibra ottica e di un'architettura informatica su piattaforma cloud o server locale capace di eseguire l'acquisizione automatica, l'elaborazione e la conservazione dei dati. L'ingegnere strutturista confronta le misure in campo dei parametri strutturali con i risultati attesi dal modello di calcolo agli elementi

APPALTATORE: 	<b>PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"</b>					
PROGETTAZIONE: Mandatario: SWS Engineering S.p.A. Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	<b>PROGETTO ESECUTIVO</b>					
11 - OPERE CIVILI Relazione monitoraggio	COMMESSA IBOU	LOTTO 1BEZZ	CODIFICA RH	DOCUMENTO VI000002	REV. A	FOGLIO. 8 di 18

finiti della struttura, per determinare le soglie di attenzione e di allarme e per rilevare mediante algoritmi avanzati eventuali criticità strutturali. Al superamento di tali soglie critiche, o in caso di anomalie del comportamento strutturale, vengono attivate comunicazioni alle figure preposto dell'Ente Gestore.

Di seguito sono riportati gli schemi di disposizione dei sensori previsti sia sul ponte di sostegno del binario dispari che su quello pari; i layout di dettaglio sono allegati al progetto

Tipologia di sensori	Elemento strutturale		Posizionamento sensori per elemento
INCLINOMETRI BIASSIALI	TP	Trave Principale	2 sensori per Campata per 2 allineamenti
ACCELEROMETRI TRIASSIALI E INCLINOMETRI BIASSIALI	TP	Trave Principale	3 sensori per Campata per 2 allineamenti
	P	Pila	2 sensori posti in sommità e alla base pila
	SP	Spalla	2 sensori posti in sommità e alla base su SP1
	AR	Arco	5 sensori per 2 allineamenti scatolari per C3-C4
Tipologia di sensori	Elemento strutturale		Posizionamento sensori per elemento
DISTANZIOMETRO	G	Giunto	1 dispositivo per i giunti tra le campate C2-C3/C3-C4/C4-C5
ESTENSIMETRO IN FIBRA OTTICA	TP	Trave Principale	2 sensori per sezioni S1-S2-S3 per 2 allineamenti
	Tr	Traverso	2 sensori in sezione S2
	AR	Arco	2 sensori per sezioni S2-S4-S5 per 2 allineamenti
CELLA DI CARICO	App	Appoggio	2 sensori per 2 appoggi su pila P3 1 sensore per 2 appoggi su pile P2-P4 e 3+3 sui supporti degli archi
TERMOCOPPIA	TP	Trave Principale	2 sensori per sezioni S1-S2-S3 per 2 allineamenti
	AR	Arco	2 sensori per sezioni S2-S4-S5 per 2 allineamenti

Figura 6: Disposizione dei sensori sugli elementi strutturali

Complessivamente gli strumenti previsti sono riportati in tabella:

Struttura	Monitoraggio dinamico e deformativo diffuso			Monitoraggio dinamico e deformativo diffuso			
	Tot. inc.	Tot. acc.	Tot. GTW	Tot. Distanziometro	Tot. Estensimetro in fibra ottica	Tot. Termocoppie	Tot. Celle Di Carico
Ponte binario dispari	80	60	3	3	26	24	20
Ponte binario pari	68	52	3	3	26	24	20
<b>TOT</b>	<b>148</b>	<b>112</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>52</b>	<b>48</b>	<b>40</b>

Figura 7: Tabella riepilogativa degli strumenti previsti

La conoscenza del comportamento della struttura nel tempo e l'aggiornamento dei modelli matematici sulla base delle misure ricavate dalla rete di sensori permettono di individuare tempestivamente eventuali



APPALTATORE:		<b>PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"</b>				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	<b>PROGETTO ESECUTIVO</b>			
<b>11 - OPERE CIVILI</b> Relazione monitoraggio	COMMESSA IBOU	LOTTO 1BEZZ	CODIFICA RH	DOCUMENTO VI000002	REV. A	FOGLIO. 9 di 18

criticità, suggerire interventi mirati e di proporre interventi di manutenzione preventiva, volti a prolungare la vita utile delle strutture e ad ottimizzare la pianificazione delle manutenzioni.

Per il sistema di monitoraggio è stato sviluppato un protocollo di trattamento dati in grado di trasformare le letture provenienti dai sensori in dati "consistenti", ovvero significativi per le successive fasi di modellazione numerica. La rete di raccolta e trasmissione dei dati è caratterizzata da acquisizione continua ed automatica delle letture derivanti dai sensori da parte di un concentratore, trasmissione ad intervalli di tempo prestabiliti di dati e di statistiche di sistema alla piattaforma cloud per archiviazione e successiva elaborazione degli stessi. Nella piattaforma cloud, il trattamento dei dati si articola in un processo di elaborazione, che comprende tutte le procedure di trattamento delle misure rilevate, al fine di ottenere un dato depurato da eventuali errori e/o influenze ambientali, con il quale poter operare analisi di tipo strutturale. Il dato elaborato è utilizzato dall'ingegnere per eseguire analisi matematiche e strutturali.

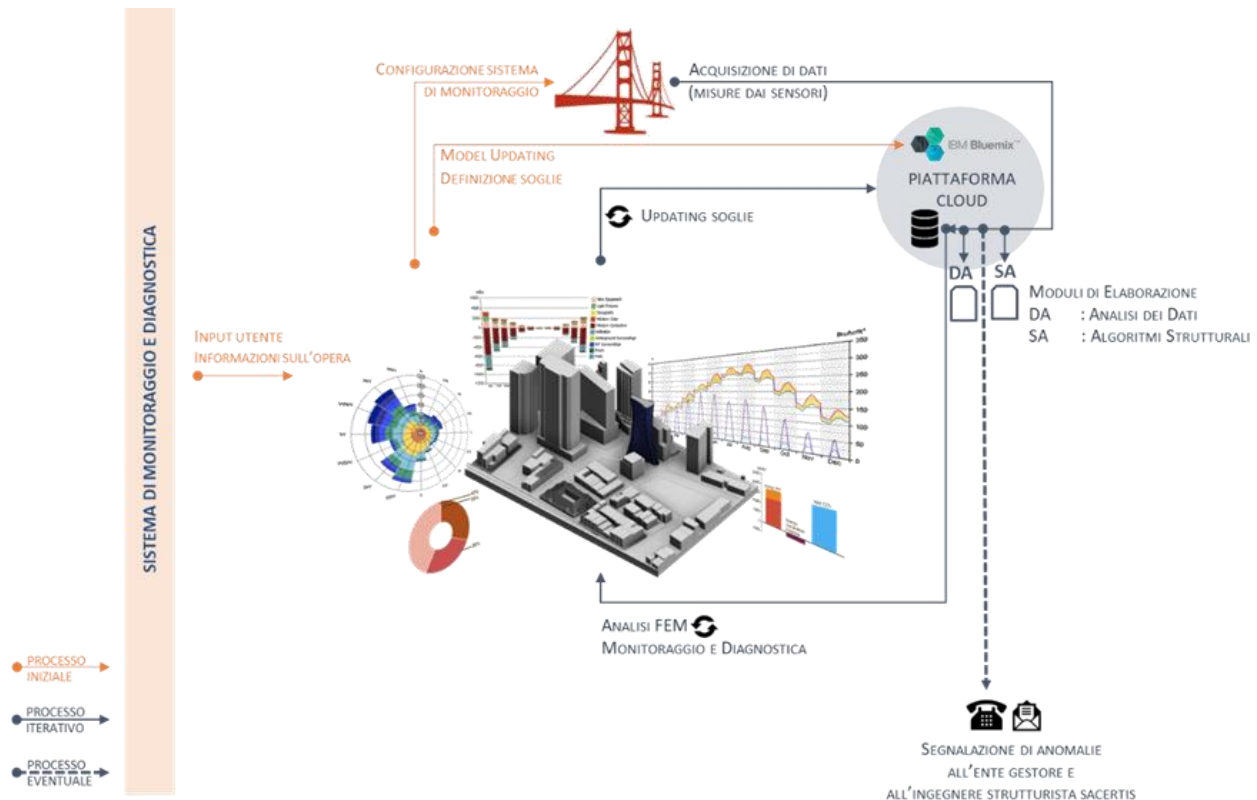


Figura 8: Processo del sistema di monitoraggio e diagnostica

Per la determinazione del comportamento atteso dell'opera monitorata, con cui confrontare i segnali ricevuti dal sistema di monitoraggio in campo, l'attività ingegneristica di post-processing strutturale consta nell'implementazione di un modello numerico ad elementi finiti della struttura.

La modellazione è finalizzata ad individuare le deformazioni e lo stato tensionale iniziale, supposti presenti al momento dell'avvio delle attività e valutati sulla base delle informazioni relative a geometria, materiali e storia evolutiva dell'opera.

APPALTATORE:		<b>PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"</b>				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	<b>PROGETTO ESECUTIVO</b>			
<b>11 - OPERE CIVILI</b> Relazione monitoraggio	COMMESSA <b>IBOU</b>	LOTTO <b>1BEZZ</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>VI000002</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO. <b>10 di 18</b>

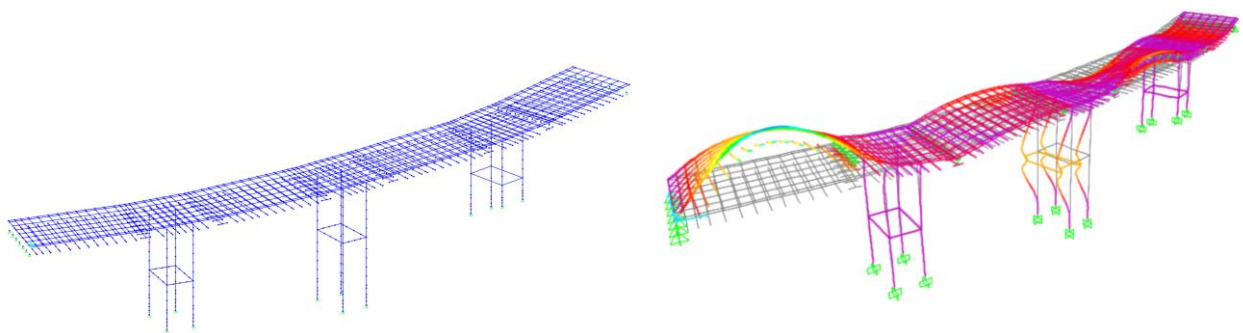


Figura 9: Esempio di modello matematico di una struttura

### 3.3 LA SENSORISTICA

Il sistema di monitoraggio proposto è costituito da una rete di sensori di alta qualità ed accuratezza in grado di monitorare i parametri ritenuti significativi. Sono impiegati dispositivi basati su tecnologie avanzate ovvero tipo MEMS (Micro Electro - Mechanical Systems) e fibra ottica.

**Inclinometri biassiali con tecnologia MEMS:** utilizzati per applicazioni strutturali, sono in grado di rilevare la componente dell'accelerazione di gravità lungo una direzione preferenziale e derivarne la corrispondente inclinazione assunta dallo strumento rispetto ad uno zero iniziale.



General features	
Enclosure:	
dimensions	210 x 120 x 60 mm
protection level	IP67
Operating Temperature	-20 ÷ +65 °C
Microcontroller	STM32F405 @168MHz 192KB RAM, 1MB flash
FW upgrade	Remote FW upgrade available through PLC channel

Temperature and humidity sensor specs (HTS221)	
Temperature compensation	± 0.5 °C temperature accuracy
Humidity compensation	± 3.5% rH humidity accuracy

Clinometer specs (Berkley)	
Active axes	2-axes
Full scale	selectable full-scale (FS): ± 0.5g ± 1g ± 2g
Sensitivity (typ)	65'536 LSB/g for FS <sub>0.5g</sub> 32'768 LSB/g for FS <sub>1g</sub> 16'384 LSB/g for FS <sub>2g</sub>
Zero-g Offset accuracy	± 0.02 mg/°C for FS <sub>2g</sub>
Temperature Drift	
Resolution	0.001 °
Noise density	15 µg/√Hz

Electrical features	
Connector	Wieland RSTI3 connectors or PG
Supply voltage	
Nominal	230V <sub>AC</sub> @50Hz or 115V <sub>AC</sub> @60Hz
Power consumption	2W typical, 3W peak Tx burst
PLC modem	9.6kbps gross datarate, CENELEC B band (95 ÷ 125kHz)

APPALTATORE:						
PROGETTAZIONE:	<b>PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"</b>					
Mandatario:	Mandanti:					
SWS Engineering S.p.A.	PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria					
<b>11 - OPERE CIVILI</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO.
Relazione monitoraggio	IBOU	1BEZZ	RH	VI000002	A	11 di 18

Figura 10: Sensori inclinometrici MEMS e loro caratteristiche tecniche.

**Accelerometri triassiali con tecnologia MEMS:** utilizzati per applicazioni in strutture dell'ingegneria civile (ponti, gallerie, edifici, pale eoliche...), sono in grado di rilevare l'accelerazione lineare lungo 3 assi principali.



Figura 11: Accelerometro triassiale e caratteristiche tecniche degli accelerometri

General features	
Enclosure:	
dimensions	210 x 120 x 60 mm
protection level	IP67
Operating Temperature	-20 ÷ +65 °C
Microcontroller	STM32F405 @168MHz 192KB RAM, 1MB flash
FW upgrade	Remote FW upgrade available through PLC channel

Temperature and humidity sensor specs (HTS221)	
Temperature compensation	± 0.5 °C temperature accuracy
Humidity compensation	± 3.5% rH humidity accuracy

Accelerometer specs (LIS344ALH)	
Active axes	3-axes
Full scale	± 2g and ± 6g selectable full-scale (FS)
Noise density	50 µg/√Hz
Bandwidth	max 1.8 kHz

Electrical features	
Connector	Wieland RST15 connectors or PG
Supply voltage	
Nominal	230V <sub>AC</sub> @50Hz or 115V <sub>AC</sub> @60Hz
Power consumption	2W typical
CAN bus (2x)	Up to 4 Mbaud
Electromagnetic compatibility	The product is devoted for OEM installation only. EC must be verified together with the complete system used.

**Gli estensimetri FBG a fibra ottica** basati sul reticolo di Bragg sono equivalenti ad un classico estensimetro elettrico ma non presentano i fenomeni di deriva elettrica di quest'ultimi garantendo inoltre una durata molto superiore nel tempo. Gli estensimetri, con la compensazione integrata in temperatura, saranno opportunamente incollati direttamente sulla superficie degli elementi in acciaio dell'impalcato per rilevarne la deformazione.

Performance properties	
Strain range	±2000µε
Accuracy (guaranteed) <sup>1)</sup>	<0.5% FS <sup>3)</sup>
Accuracy (typical) <sup>1)</sup>	<0.23% FS <sup>3)</sup>
Precision (guaranteed) <sup>2)</sup>	<0.25% FS <sup>3)</sup>
Precision (typical) <sup>2)</sup>	<0.15% FS <sup>3)</sup>
Temperature compensation	Integrated
Temperature accuracy <sup>1)</sup>	<1°C
Temperature precision <sup>2)</sup>	±0.3°C
Operating Temperature range	-20°C to +60°C
Ingress Protection rating	IP 67

Figura 12: Caratteristiche tecniche degli estensimetri

**Celle di carico**, operanti sempre mediante la tecnologia del reticolo di Bragg (FBG); essi sono previsti per il controllo delle reazioni trasmesse dall'impalcato alle strutture sottostanti. Anche in questo caso ciascun sensore è dotato anche di un sensore di temperatura necessario alla compensazione delle misure.

APPALTATORE:		<b>PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"</b>				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	<b>PROGETTO ESECUTIVO</b>			
<b>11 - OPERE CIVILI</b> Relazione monitoraggio	COMMESSA <b>IBOU</b>	LOTTO <b>1BEZZ</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>VI000002</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO. <b>12 di 18</b>

Load Cell specifications	
Maximum load	500 kN
Breaking load	> 1000 kN
Resolution	100 N
Accuracy	±1% F.S.
Operating temperature	-30°C - 60°C
Environment	IP68

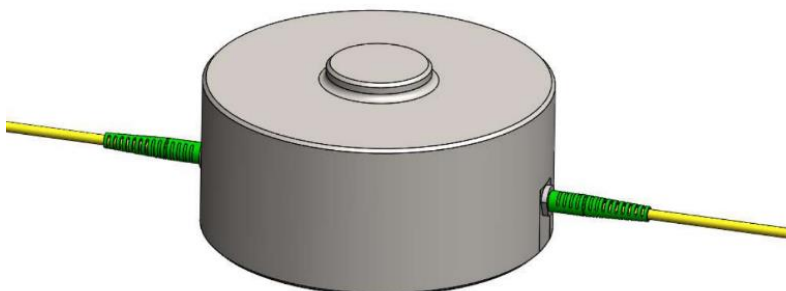


Figura 13: Caratteristiche tecniche delle celle di carico

**I distanziometri** sono realizzati mediante la tecnologia reticolo di Bragg (FBG); in particolare il distanziometro scelto è stato progettato specificamente per misurare lo spostamento tra due punti sullo stesso piano. Ciascun sensore è dotato anche di un sensore di temperatura necessario alla compensazione delle misure.

Performance Properties	os5500
Displacement Measurement Range <sup>1</sup>	150 mm, 300 mm, or 450 mm
Resolution <sup>2</sup>	0.02% F.S.
Linearity <sup>3</sup>	< 0.4% F.S.
Repeatability <sup>3</sup>	± 0.05% F.S.
Operating Temperature Range	-40 to 80°C
Environmental Ingress	IP65
Fatigue Life (Tested to)	16x 10 <sup>6</sup> cycles at 63 mm stroke
Temperature Dependence	0.006%/ °C F.S
Physical Properties	
Dimensions (mm)	190 L x 175 W x 90 H
Weight	< 3.1 kg
Material	Hardcoat anodized aluminum
Wire Pull-Cable Length	2 m with 6 mm loop termination
Fiber Optic Connection	Internal to gage, accepts cables between 3 to 7 mm diameter
Fastening Method <sup>4</sup>	Bolt-on, two 8.8 mm dia. holes
Optical Properties	
Peak Reflectivity (R <sub>max</sub> )	> 70%
FWHM (-3 dB point)	0.25 nm (± .05 nm; apodized grating)
Isolation	> 15 dB (@ ± 0.4 nm around center wavelength)

Figura 14: Caratteristiche tecniche dei distanziometri

### 3.4 IL SISTEMA DI TRASMISSIONE DATI

Per il sistema di monitoraggio sopra descritto è stato sviluppato un protocollo di trattamento dati in grado di trasformare le letture provenienti dai sensori in dati "consistenti", ovvero significativi per le successive fasi di modellazione numerica. La rete di raccolta e trasmissione dei dati dai sensori alla piattaforma cloud o ad un server locale è così caratterizzata:

Acquisizione continua ed automatica dei dati derivanti dai sensori (24h/24h e 7gg/7gg).

APPALTATORE:		<b>PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"</b>				
PROGETTAZIONE:		<b>PROGETTO ESECUTIVO</b>				
Mandatario:	Mandanti:					
SWS Engineering S.p.A.	PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria					
<b>11 - OPERE CIVILI</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO.
Relazione monitoraggio	IBOU	1BEZZ	RH	VI000002	A	13 di 18

Acquisizione delle letture a frequenze di campionamento e su finestre temporali prestabilito, modificabile da un operatore in remoto. Le disposizioni e la frequenza delle misure potranno nondimeno subire dei cambiamenti nel caso in cui si riscontrasse un comportamento anomalo in situ.

- ✓ Letture dei sensori associabili in modo univoco ad un istante temporale, tali cioè da permettere analisi dati complesse.
- ✓ Fornitura dei dati di monitoraggio in formati variabili, quali il formato originale del programma di analisi, in formato Excel, o altri formati su specifica richiesta.
- ✓ Trasmissione dei dati dal sensore alla centralina (dispositivo che collega le unità periferiche, ovvero i sensori, utilizzato per la raccolta dei segnali provenienti dalla medesima opera d'arte) tramite connessioni cablate con CAN bus.
- ✓ Microcontroller a 32 bit integrato per l'elaborazione dei dati in locale.
- ✓ Impiego di centraline IoT che permettono la programmazione per filtrare le informazioni ridondanti, ridurre la quantità di dati trasferiti al cloud e generare allarmi quando vengono soddisfatte le condizioni definite dall'utente. Sulla centralina, i dati sono memorizzati su un Solid State Disk, che funge quindi da cache locale per evitare la perdita di dati in caso di interruzione della connettività Internet.
- ✓ Alimentazione 230V delle centraline lungo lo sviluppo longitudinale dei viadotti.
- ✓ Collegamento dei sensori alle centraline di acquisizione, la quali memorizzano, elaborano ed inoltrano i dati dei sensori al cloud attraverso una connessione LTE. Essa crea una rete Wi-Fi protetta che viene utilizzata durante l'installazione e la manutenzione per eseguire test funzionali sul sistema di sensori.
- ✓ Possibilità di utilizzo delle centraline come datalogger locale per letture manuali per ovviare a periodi transitori iniziali in mancanza/attesa di collegamento definitivo per il trasferimento dei dati.
- ✓ Registrazione sul cloud o su server locale delle informazioni tecniche sui singoli elementi strutturali, quali la geometria, l'identificativo dei sensori, la disposizione dei sensori nella struttura, etc...
- ✓ Archiviazione e successiva elaborazione dei dati derivanti dai dispositivi sia in locale che su piattaforma dedicata cloud.

### 3.5 LA GESTIONE DEI DATI

I dati provenienti dai sensori vengono archiviati su un database cloud dedicato. Nell'infrastruttura cloud vengono memorizzate tutte le informazioni tecniche caratterizzanti la struttura in esame, quali ad esempio la geometria, l'identificativo dei sensori, la disposizione dei sensori nella struttura, etc... Una volta raccolti i dati questi vengono elaborati e trasformati in dati "strutturali". L'elaborazione dei dati comprende tutte le procedure di trattamento delle misure rilevate, al fine di ottenere un dato depurato da eventuali influenze ambientali, con il quale poter operare analisi di tipo strutturale. In particolare, un apposito algoritmo elabora il dato grezzo, estraendo le letture dei sensori dal database, con una frequenza temporale prestabilita, e restituisce un set di dati preliminarmente trattati, che viene a sua volta archiviato sul database per essere successivamente utilizzato.

APPALTATORE: 	<b>PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"</b>					
PROGETTAZIONE: Mandatario: SWS Engineering S.p.A. Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	<b>PROGETTO ESECUTIVO</b>					
<b>11 - OPERE CIVILI</b> Relazione monitoraggio	COMMESSA IBOU	LOTTO 1BEZZ	CODIFICA RH	DOCUMENTO VI000002	REV. A	FOGLIO. 14 di 18

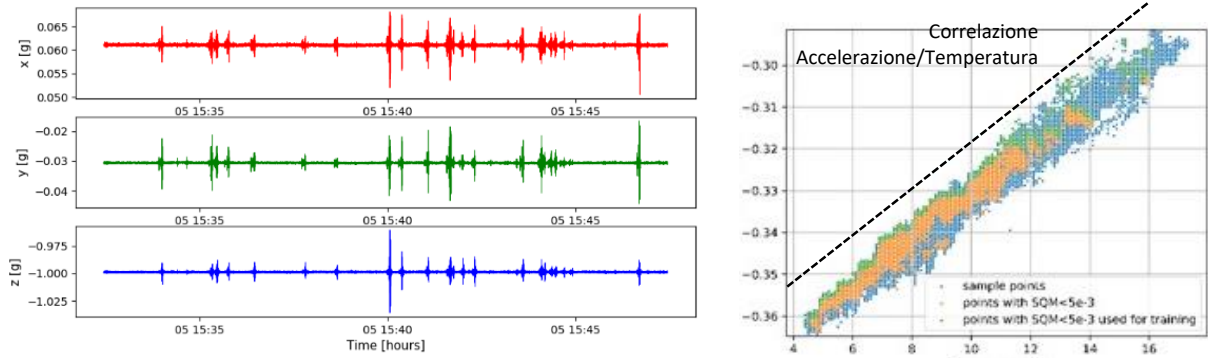


Figura 15: Elaborazione dei dati - Influenze ambientali

Per ciascuna struttura monitorata viene eseguita un'apposita prova di carico per la validazione strutturale del sistema di monitoraggio e diagnostica.

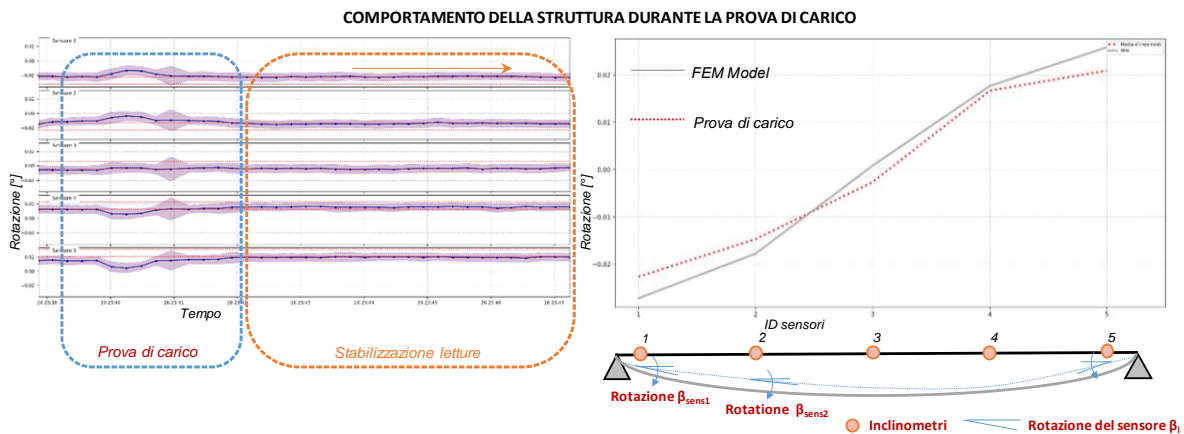


Figura 16: Prova di carico eseguita per la taratura del sistema

La validazione delle assunzioni teoriche effettuate avviene con opportuna taratura del modello di calcolo ad elementi finiti sviluppato (Model Updating), a cui riferire la valutazione dell'eventuale degrado futuro dei materiali o di eventuali dissesti occorrenti durante la vita in esercizio dell'opera. Confrontando i valori attesi dei parametri significativi monitorati ricavabili dal modello ad elementi finiti con i valori degli stessi parametri raccolti durante la prova di carico vengono tarate le rigidzze e le condizioni di vincolo del digital twin. Il model updating avviene con continuità durante l'esercizio del sistema di monitoraggio.

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
11 - OPERE CIVILI Relazione monitoraggio	COMMESSA IBOU	LOTTO 1BEZZ	CODIFICA RH	DOCUMENTO VI000002	REV. A	FOGLIO. 15 di 18

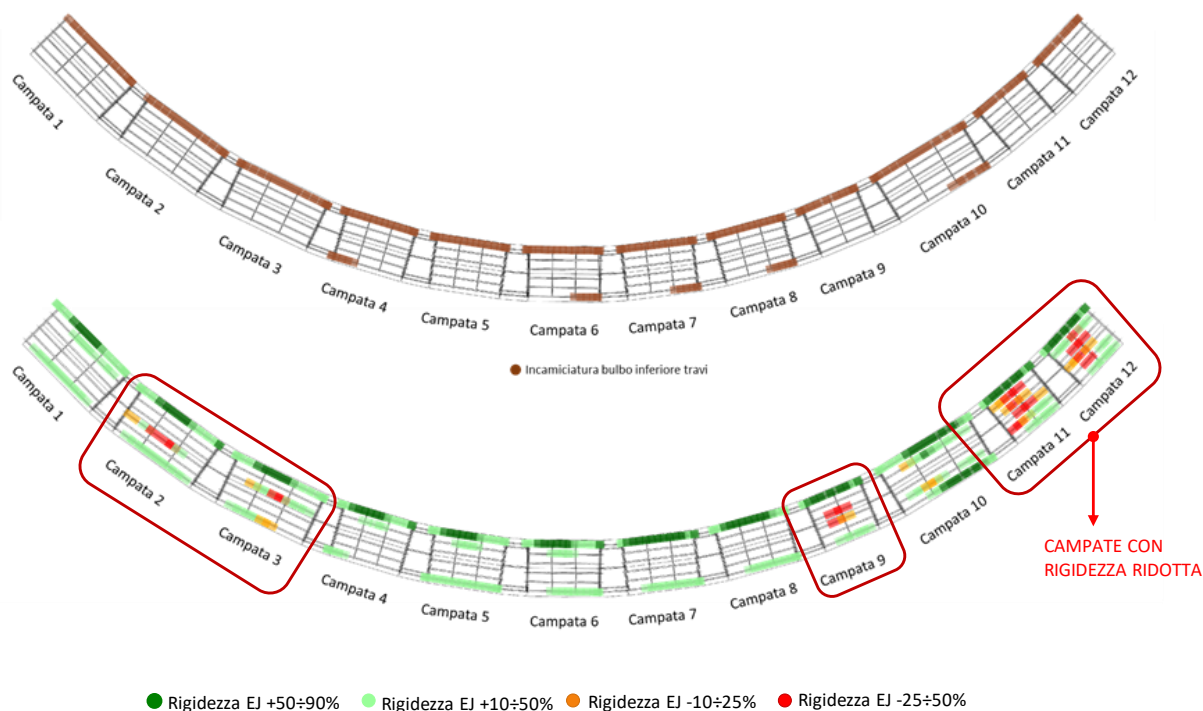


Figura 17: Esempio di Model Updating di una struttura

L'attività di diagnostica e monitoraggio si basa sulla determinazione di soglie con cui vengono confrontate le misure collezionate. I livelli di soglia impostati sono funzione dei valori assunti dalle grandezze in misura (deformazioni, spostamenti, rotazioni, ecc.), differenziati per tipo e posizione di sensore all'interno delle diverse tipologie di struttura e/o elemento monitorati. Si individuano due livelli principali di soglia:

**Soglia di Attenzione:** sotto la quale si svolge la vita ordinaria della costruzione, ottenuta per raggiungimento di una variazione del parametro monitorato fuori dal trend standard, ma entro i limiti di sicurezza della struttura. Tale soglia indica la necessità di tenere sotto controllo la successiva evoluzione del fenomeno rilevato. La soglia di attenzione scatta quando il tasso di sicurezza in relazione alla vita umana passa da  $10^{-6}/5$  a  $10^{-5}/4$ .

**Soglia di Allarme:** rappresenta un danneggiamento permanente della struttura; tale soglia viene attivata per il raggiungimento di una variazione significativa del parametro monitorato, con utilizzazione ai limiti della struttura, corrispondente ad una riduzione inaccettabile della sicurezza con riferimento alla vita umana. Tale allarme indica la necessità di predisporre interventi strutturali.

I dati provenienti dai sensori, elaborati attraverso procedure ad hoc che permettono di trasformare il dato "grezzo" nel parametro fisico di interesse, vengono confrontati in real-time con i valori di soglia preimpostati al fine di rilevare mediante algoritmi avanzati eventuali criticità strutturali.

APPALTATORE: 	<b>PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"</b>					
PROGETTAZIONE: Mandatario: SWS Engineering S.p.A. Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	<b>PROGETTO ESECUTIVO</b>					
<b>11 - OPERE CIVILI</b> Relazione monitoraggio	COMMESSA IBOU	LOTTO 1BEZZ	CODIFICA RH	DOCUMENTO VI0000002	REV. A	FOGLIO. 16 di 18

Naturalmente, un sottoinsieme del sistema di monitoraggio potrà essere installato anche durante la costruzione, per registrare l'evoluzione dello stato tensionale deformazionale durante le complesse fasi di sollevamento e posa in opera delle parti del ponte.

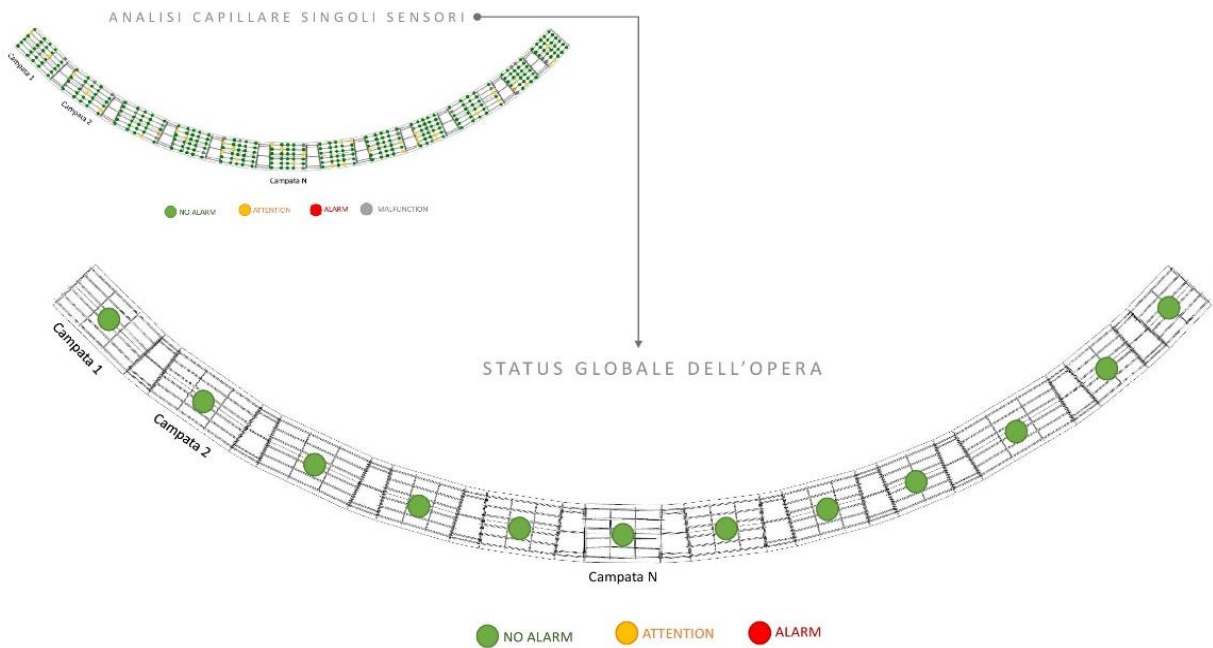


Figura 18: Esempio di status generale di un viadotto monitorato

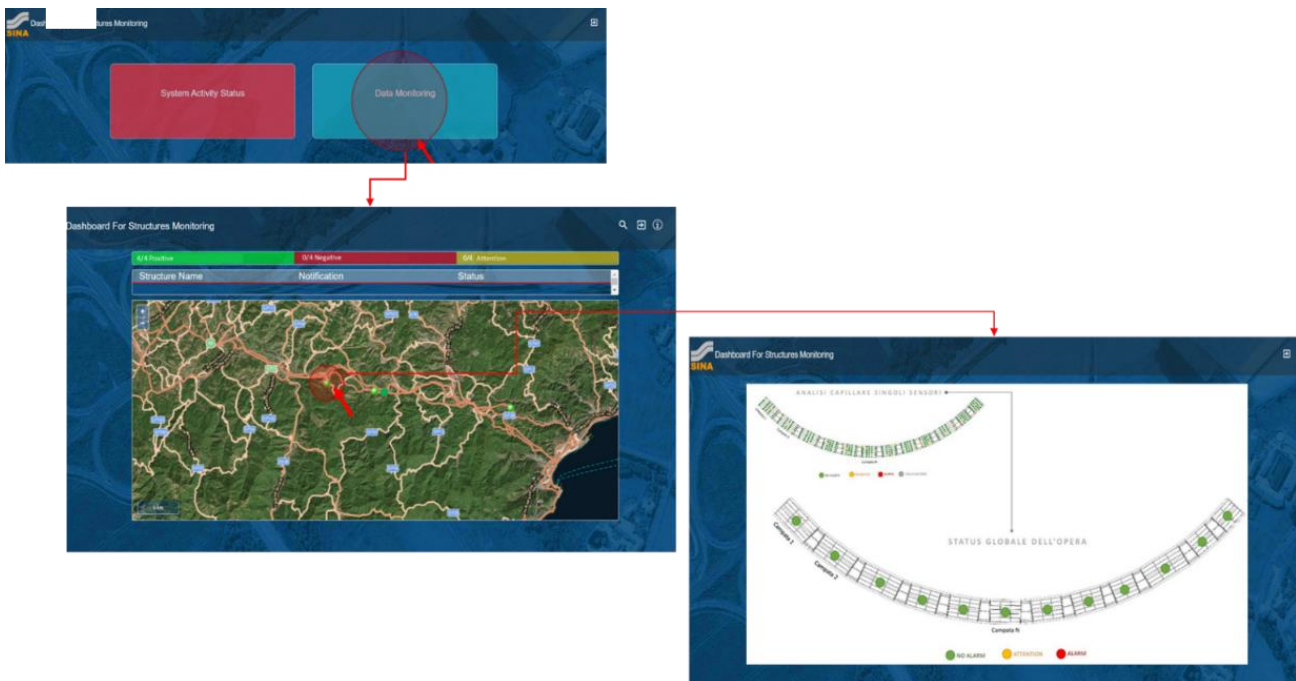


Figura 19: Esempio di visualizzazione dei risultati



APPALTATORE: 	<b>PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI  REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA  LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA  TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"</b>					
PROGETTAZIONE: Mandatario: <b>SWS Engineering S.p.A.</b> Mandanti: <b>PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST  M Ingegneria</b>	<b>PROGETTO ESECUTIVO</b>					
<b>11 - OPERE CIVILI</b> Relazione monitoraggio	COMMESSA <b>IBOU</b>	LOTTO <b>1BEZZ</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>VI0000002</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO. <b>17 di 18</b>

Viene definito un adeguato protocollo di comunicazione delle eventuali anomalie riscontrate, a cui è associato un relativo processo decisionale per la messa in atto di azioni preventive atte a mantenere elevato il livello di sicurezza dell'opera ed ottimizzare le operazioni manutentive.

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
11 - OPERE CIVILI Relazione monitoraggio	COMMESSA IBOU	LOTTO 1BEZZ	CODIFICA RH	DOCUMENTO VI0000002	REV. A	FOGLIO. 18 di 18

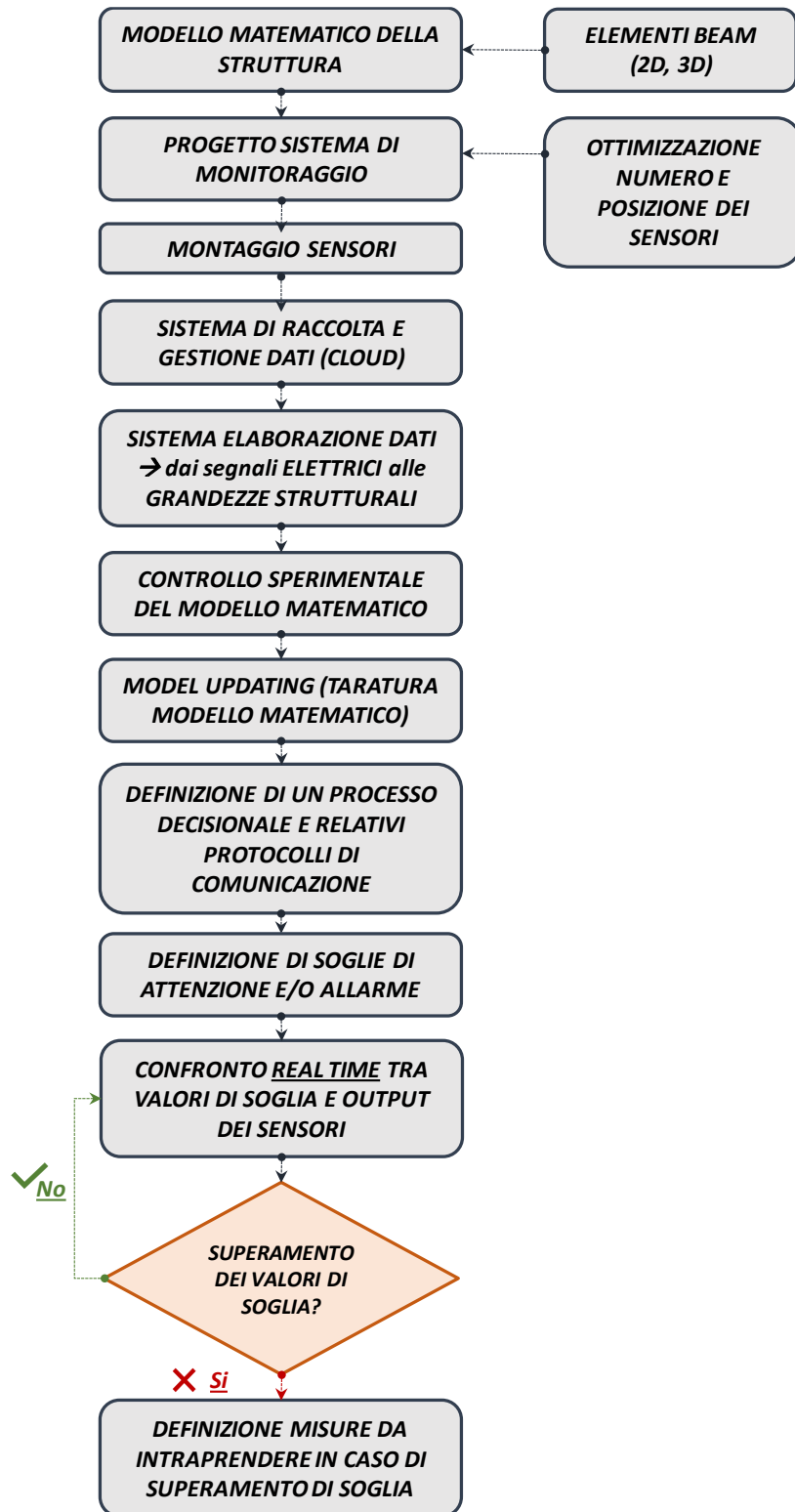


Figura 20: Elementi fondamentali del processo di monitoraggio e diagnostica