

REMTECH EXPO



MONITORAGGIO E DIAGNOSTICA STRUTTURALE

Applicazioni su ponti ferroviari

Ing. Franco Iacobini

RFI – Direzione Tecnica

Standard Infrastruttura

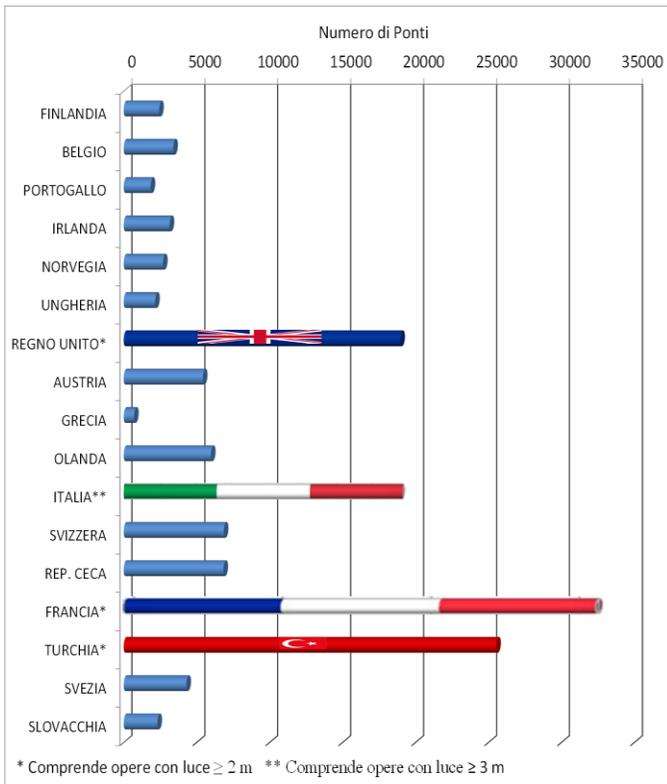


19 settembre 2019



MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI DELL'INFRASTRUTTURA FERROVIARIA

L'INFRASTRUTTURA FERROVIARIA - OPERE IN CIFRE



I *Ponti gestiti da RFI* costituiscono un patrimonio di gran lunga tra i più cospicui tra tutte le *nazioni europee*



In circa **17.000** km di rete ferroviaria gestita da RFI sono presenti:



Viadotti
n° 1.575

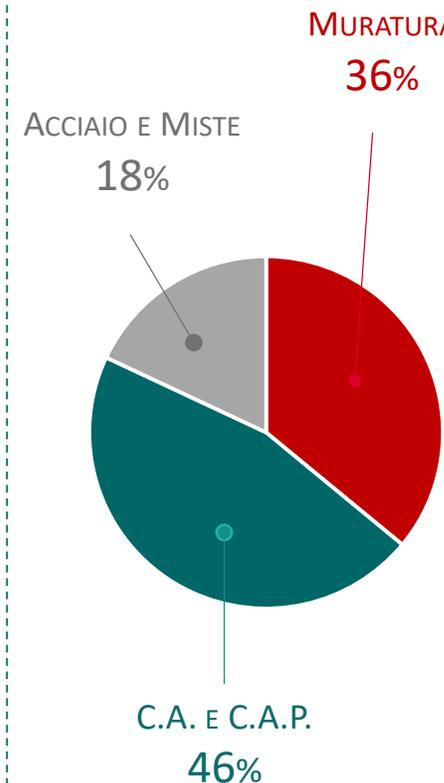
circa **19.000** ponti
con Luce > 3 m
circa 570 km di linea

Ponti
n° 8.085



Sottovia
n° 10.162

MATERIALI





MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI FERROVIARI

SISTEMI DI MONITORAGGIO DEI PONTI – VALUTAZIONE DELLO STATO DI CONSERVAZIONE DELLE OPERE

IERI

ISPEZIONE VISIVA

secondo procedure e in caso di eventi eccezionali (sisma)



Sistemi strumentali di monitoraggio su condizione opere con caratteristiche strutturali particolari opere con stato di conservazione particolare

OGGI

ISPEZIONE VISIVA



+ DRONI



Sistemi strumentali di monitoraggio su condizione opere con caratteristiche strutturali particolari opere con stato di conservazione particolare

DOMANI

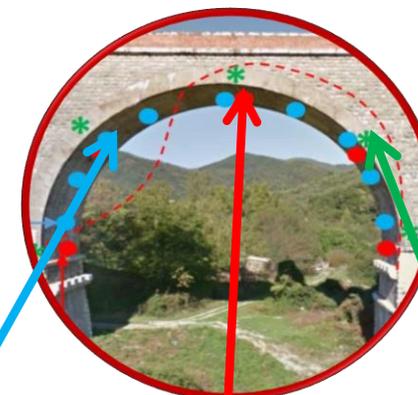


ISPEZIONE VISIVA

DRONI



Sistemi Strumentali di Monitoraggio su logiche IoT



Inclinometri



Accelerometri



Sensori di deformazione



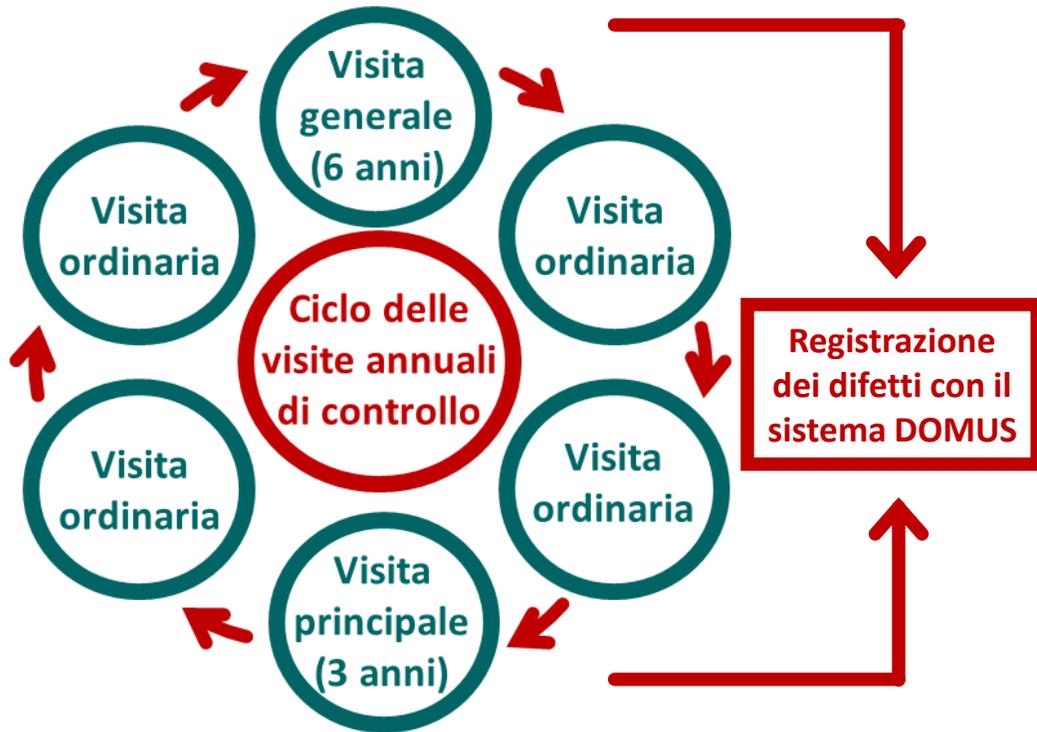
MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI FERROVIARI: ISPEZIONE VISIVA



QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO

Ciclo Visite

PONTI, VIADOTTI E SOTTOVIA AD ARCO O AD IMPALCATO



VISITE PERIODICHE ORDINARIE

- **Annuale** per quelle opere riscontrate nell'ultima precedente visita perfettamente integre per quanto può avere riflessi nei riguardi della sicurezza e della regolarità della circolazione dei treni;
- **Almeno semestrale** per quelle opere in cui sono state riscontrate anomalie o deficienze o che sono tenute in esercizio con particolari limitazioni e cautele.

VISITE PERIODICHE SPECIALI

- **Triennale – PRINCIPALE** viene effettuata la registrazione dei difetti mediante specifico sistema di Bridge Management System (DOMUS). La visita principale ricomprensce e sostituisce la visita ordinaria prevista nel medesimo anno;
- **Sessennale – GENERALE** prevede la registrazione dei difetti mediante specifico sistema di Bridge Management System (DOMUS) e ricomprensce e sostituisce la visita ordinaria e la visita principale previste nel medesimo anno e deve essere eseguita a “*distanza di contatto*” rispetto alla struttura oggetto di ispezione.
- **Opere di nuova costruzione**

VISITE STRAORDINARIE

- A seguito di *eventi eccezionali* (alluvioni, terremoti, piene eccezionali, etc.);
- *Specialistiche* potranno essere disposte dai Dirigenti dell'UT o della SO Ingegneria, per l'effettuazione di specifici accertamenti sulle opere con caratteristiche strutturali o con ammaloramenti che richiedono un giudizio professionale di livello specialistico adeguato.



MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI FERROVIARI: ISPEZIONE VISIVA



MODALITÀ DI ESECUZIONE DELLE VISITE ALLE OPERE D'ARTE

- *Ispezione visiva delle difettosità* secondo procedure e metodologia operativa;
- *Monitoraggio strumentale* su condizione;
- Valutazione dello *stato di conservazione*;
- Eventuali *esigenze manutentive* dovranno essere segnalate al Responsabile della tratta per l'eventuale apertura di appositi *avvisi A1*.

Il raggiungimento della *distanza di contatto*, quando necessaria, richiede l'utilizzo di *mezzi d'opera adatti a superare gli ostacoli*, di origine naturale o antropica, presenti al disotto delle opere.



In fase di acquisizione:

- n. 9 Piattaforme di Lavoro Elevabili (PLE)
- n. 7 Mezzi speciali BY-BRIDGE

PIATTAFORME DI LAVORO ELEVABILI



PIATTAFORME SU GUIDE INSTALLATE SULL'OPERA



MEZZI SPECIALI BY-BRIDGE





MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI FERROVIARI: DRONI



MODALITÀ DI ESECUZIONE DELLE VISITE ALLE OPERE D'ARTE - SPERIMENTAZIONI

Alcune opere d'arte, a *causa* della *morfologia del territorio* e/o delle loro *caratteristiche geometriche*, risultano essere di difficile ispezione anche con l'ausilio di mezzi speciali (by bridge, piattaforme, etc.).



FASE di ATTIVITA' (terminata 10/2016)



n. **8** opere ispezionate DTP* Firenze



n. **36** campate



FASE di ATTIVITA' (in corso)

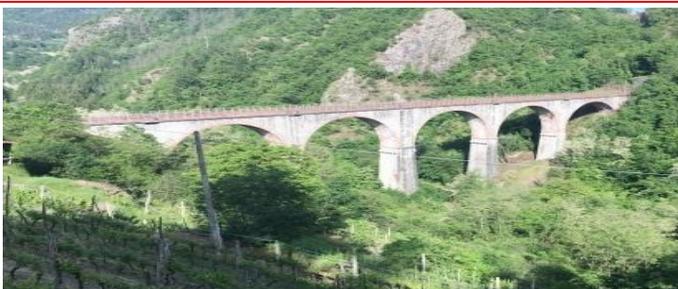


n. **100** opere ispezionate DTP* RC, RM, FI e TS



n. **550** campate circa

Tipologia di Opere indagate nella prima fase di attività



PONTI AD ARCO IN MURATURA

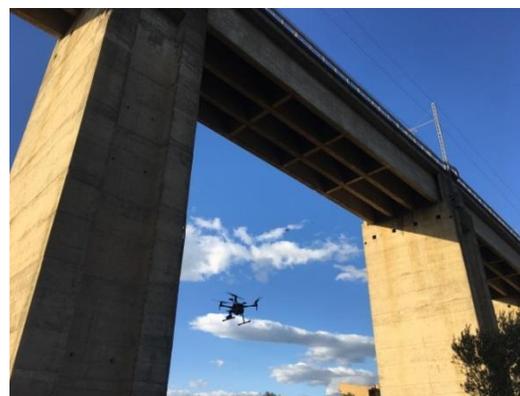


PONTI AD IMPALCATO IN C.A. E C.A.P.



TRAVATE METALLICHE

DRONE UTILIZZATO: Quadricottero DJI MATRICE 200 RTK





MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI FERROVIARI: DRONI



MODALITÀ DI ESECUZIONE DELLE VISITE ALLE OPERE D'ARTE - SPERIMENTAZIONI

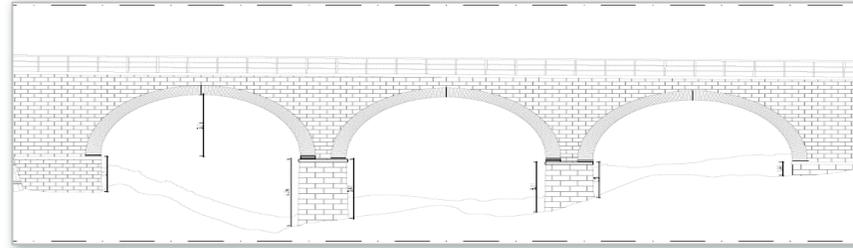
DATI RESTITUITI AD OGGI

L'utilizzo dei droni consente il rilievo 3D misurabile ed interfacciabile

MODELLO 3D FOTOGRAFICO MISURABILE

RILIEVO GEOMETRICO (PIANTE, PROSPETTI E SEZIONI)

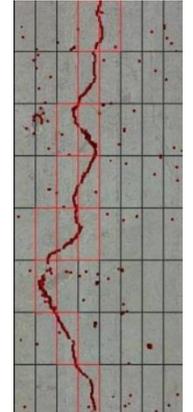
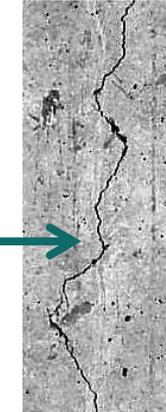
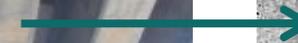
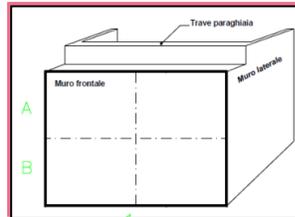
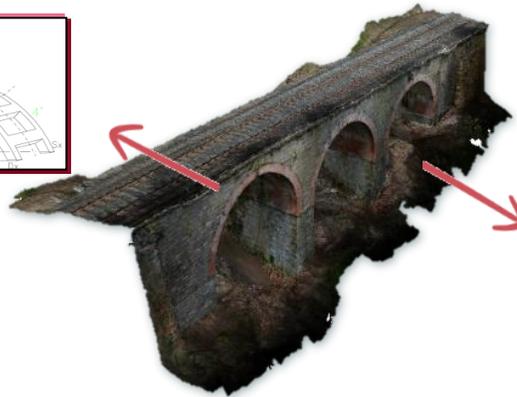
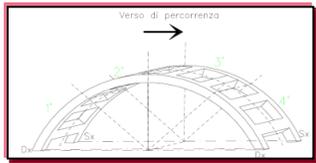
MATERIALE FOTOGRAFICO CATALOGATO SECONDO ANAGRAFICA DOMUS



SVILUPPI IN CORSO

Software di gestione e catalogazione automatica dei difetti

Sviluppo di algoritmi di machine learning e di pesatura dei difetti





MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI FERROVIARI: ISPEZIONE VISIVA



IL SISTEMA D.O.M.U.S. – BRIDGE MANAGEMENT SYSTEM

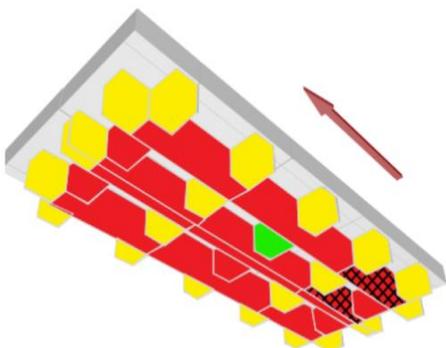
Il D.O.M.U.S. è un *sistema di gestione dei ponti* che consente di ottenere informazioni necessarie per *programmare la manutenzione* e il *controllo* del patrimonio, tenendo conto dei *fattori strutturali, operativi ed economici*.

ANAGRAFICA

Struttura



Modello in DOMUS



REGISTRAZIONE DIFETTI

Identificazione Difetti

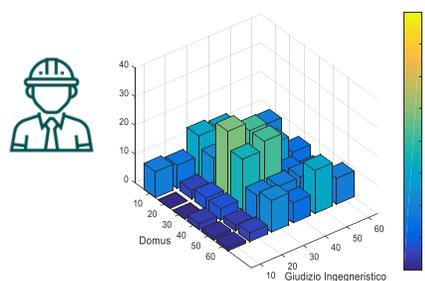


Catalogo Difetti

DIFETTI IN ELEMENTI IN C.A. e C.A.P.	
C18	FESSURE LONGITUDINALI
<p>Definizione: fessure longitudinali sulla superficie di elementi in c.a. Si intende fessure longitudinali allo sviluppo dell'elemento o, nel caso di solette, parallele alla direzione dell'impalcato.</p> <p>Modalità ispettive: visione, intero superficie degli elementi in c.a. Valutare le porzioni di superficie interessate dalle fessure.</p> <p>Descrizione sintetica: fessure parallele all'asse longitudinale degli elementi strutturali come impalcato, solette, traversi, etc.</p> <p>Procedura e strumenti: il controllo visivo della superficie di c.a. è sufficiente per la valutazione delle fessure. In presenza del difetto si può ricorrere alla misurazione della zona interessata con il metro. Riportare foto in presenza del difetto.</p>	
B	2
K₁	CRITERIO VALUTAZIONE INTENSITA'
K₁ = 0,5	Fessure di entità p < 0,3 mm
K₁ = 1,0	Fessure di entità 0,3 < p < 1 mm
K₁ = 1,5	Fessure di entità 1 < p < 3 mm
K₁ = 2,0	Fessure di entità p > 3mm

RISULTATI

Sintesi dell'Ispettore



Sintesi del DOMUS

CRITERIO DEL PEGGIOR ELEMENTO CRITICO																										
<p>È fatto un condono logico sufficientemente grave</p> <p>NO</p> <p>È fatto un condono logico sufficientemente grave</p> <p>NO</p> <p>È fatto un condono logico sufficientemente grave</p> <p>NO</p> <p>Classificato in codice giudizio: 0010</p>	<p>Classificato in codice giudizio: 0000</p> <p>Classificato in codice giudizio: 0010</p> <p>Classificato in codice giudizio: 0020</p>																									
piombo	<table border="1"> <tr> <td>K2=1,5</td> <td>K2=2,0</td> </tr> <tr> <td>0010</td> <td>0020</td> </tr> </table>	K2=1,5	K2=2,0	0010	0020																					
K2=1,5	K2=2,0																									
0010	0020																									
Se in contemporanea con difetto MCA12: fuori piombo pendoli	<table border="1"> <tr> <td>K2=1,5</td> <td>K2=2,0</td> </tr> <tr> <td>0010</td> <td>0020</td> </tr> </table>	K2=1,5	K2=2,0	0010	0020																					
K2=1,5	K2=2,0																									
0010	0020																									
Componenti: tutti	<table border="1"> <tr> <td>Cl: difetti di esecuzione</td> <td>K2=0,5</td> <td>K2=1,0</td> <td>K2=1,5</td> <td>K2=2,0</td> </tr> <tr> <td>K3=0,5</td> <td>0010</td> <td>0010</td> <td>0020</td> <td>0020</td> </tr> <tr> <td>K3=1,0</td> <td>0010</td> <td>0020</td> <td>0020</td> <td>0030</td> </tr> <tr> <td>K3=1,5</td> <td>0010</td> <td>0020</td> <td>0030</td> <td>0030</td> </tr> <tr> <td>K3=2,0</td> <td>0010</td> <td>0020</td> <td>0030</td> <td>0030</td> </tr> </table>	Cl: difetti di esecuzione	K2=0,5	K2=1,0	K2=1,5	K2=2,0	K3=0,5	0010	0010	0020	0020	K3=1,0	0010	0020	0020	0030	K3=1,5	0010	0020	0030	0030	K3=2,0	0010	0020	0030	0030
Cl: difetti di esecuzione	K2=0,5	K2=1,0	K2=1,5	K2=2,0																						
K3=0,5	0010	0010	0020	0020																						
K3=1,0	0010	0020	0020	0030																						
K3=1,5	0010	0020	0030	0030																						
K3=2,0	0010	0020	0030	0030																						

- OMOGENIZZAZIONE del GIUDIZIO
- OTTIMIZZAZIONE della PIANIFICAZIONE
- STORICIZZAZIONE e CONDIVISIONE dei RISULTATI

GIUDIZIO DELL'OPERA (SUPPORTO PER L'ISPETTORE)

Le *componenti del sistema di gestione* che mirano a soddisfare questi obiettivi sono tipicamente indicate come:

- *SISTEMA di INVENTARIO*
- *SISTEMA di ISPEZIONE*
- *SISTEMA di VALUTAZIONE*
- *SISTEMA DECISIONALE*



MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI FERROVIARI: ISPEZIONE VISIVA



IL SISTEMA D.O.M.U.S. – BRIDGE MANAGEMENT SYSTEM – SISTEMA DI VALUTAZIONE / DECISIONALE

A partire dai *dati registrati* nel corso dell'ispezione visiva è possibile valutare degli *indici* rappresentativi dello *stato* di *conservazione* delle opere. Questi costituiscono un utile *strumento di ausilio* per esprimere un *giudizio* sull'*efficienza* delle opere e per la *gestione* della loro *manutenzione*, agevolando la definizione delle priorità d'intervento.

1 INDICE DOMUS 2.0

di ausilio all'ispettore per la definizione del *codice di giudizio* in merito all'efficienza dell'opera nei riguardi della sicurezza e regolarità della circolazione ferroviaria. Questo si basa sul *criterio del peggior componente critico*, il quale prevede d'individuare una condizione logica sufficiente per l'appartenenza del ponte a una certa classe di condizione, tenendo in considerazione il peggior componente dell'opera.

2 INDICE DOMUS

Tale indice è una somma pesata di tutti i difetti presenti sull'opera:

- consente la rappresentazione dello *stato di ammaloramento* dell'opera ed è di supporto per la gestione della sua manutenzione.
- costituisce una *rappresentazione sintetica* della *quantità* ed *estensione* dei *difetti osservati*.

3 INDICE PROIETTATO

rappresentativo dello *stato evolutivo* dei difetti riscontrati e *predittivo* in termini di codice di giudizio. Considerando due ispezioni successive viene valutato se i difetti risultano *stabili* o se abbiano avuto un'*evoluzione* nel tempo.



MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI FERROVIARI: SISTEMI STRUMENTALI

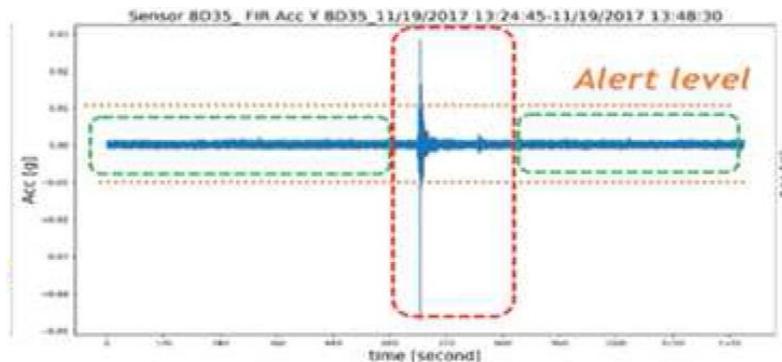
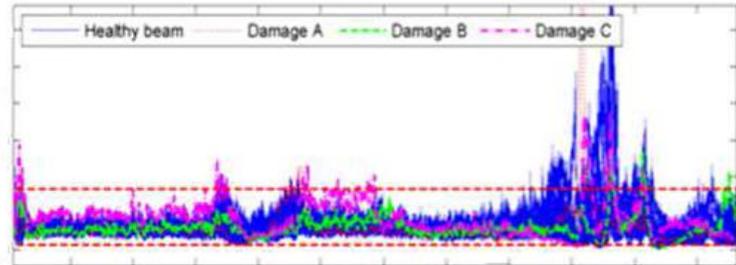


CASI DI APPLICAZIONE DI MONITORAGGIO STRUMENTALE DI PONTI/VIADOTTI

MONITORAGGIO IN CONTINUO DEI PONTI

Acquisizione dati:

- Deformazioni
- Rotazioni
- Spostamenti
- Stati tensionali



I parametri misurati vengono confrontati con *valori limite* da non superare determinati **LIVELLI di SOGLIA**:

Soglia di Allerta

I parametri monitorati sono compresi entro i limiti di sicurezza ma vanno attenzionati

Soglia di Allarme

I parametri monitorati superano i limiti di sicurezza e con potenziale danneggiamento dell'opera.



Definizione delle **AZIONI**:

(Supporto dell'Ispettore)

Aumento della **FREQUENZA** delle **VISITE** alle opere

Limitazioni **VELOCITA'**

Limitazioni di **CARICO**

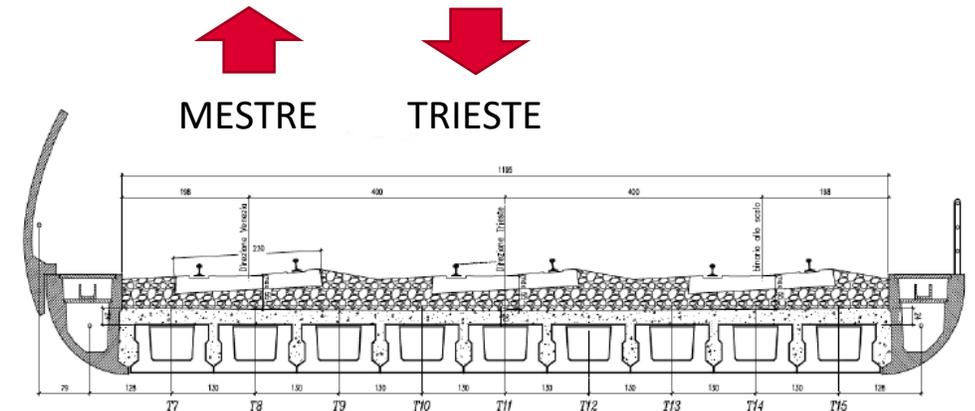
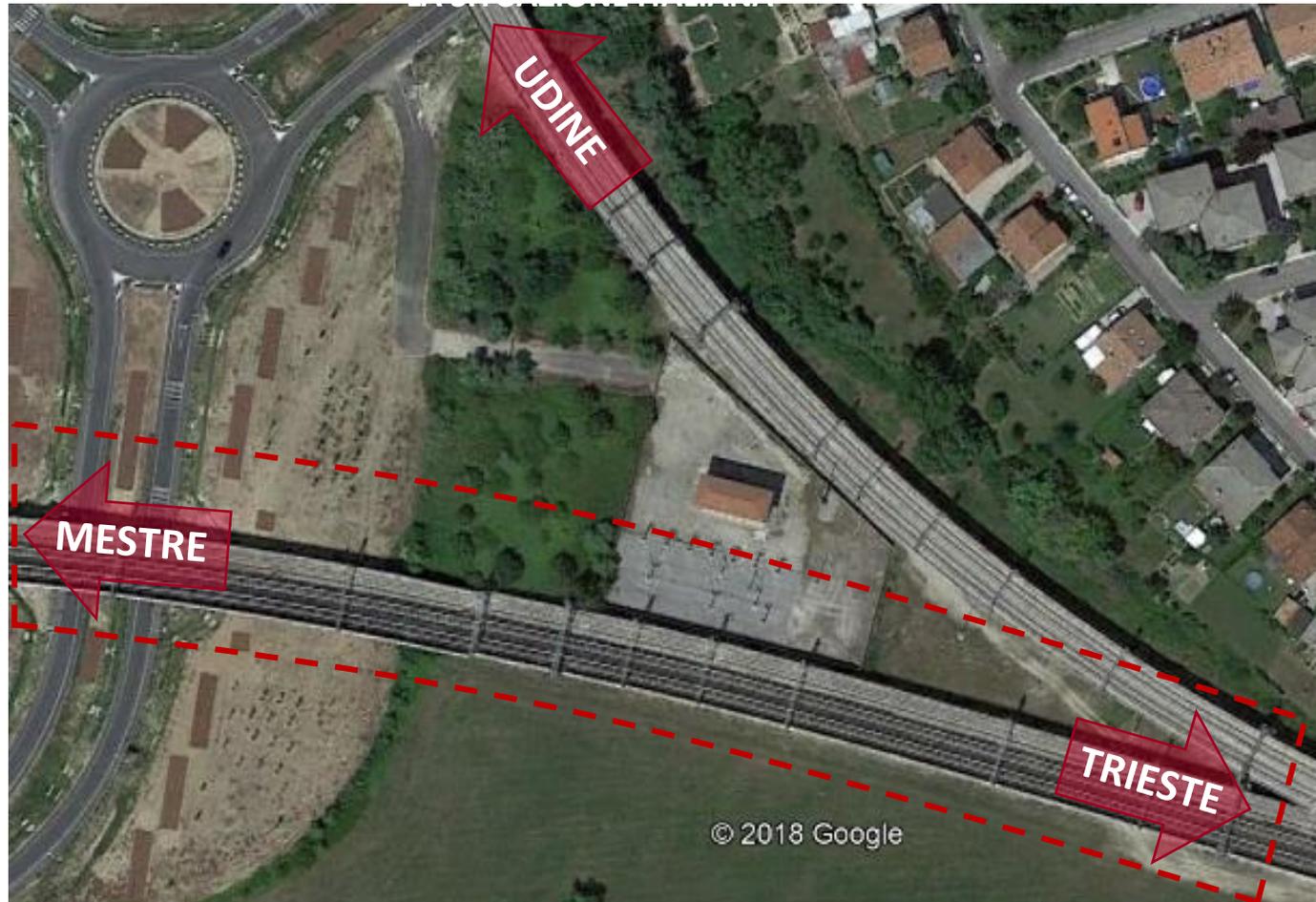
Eventuali altre **AZIONI CORRETTIVE**



MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI FERROVIARI: SISTEMI STRUMENTALI



CASO DI APPLICAZIONE: VIADOTTO FERROVIARIO CERVIGNANO DEL FRIULI (UD)



- Trave *semplicemente appoggiata* con sbalzi.
- Luce complessiva: 16.80 m
- *Travi longitudinali* precomprese a *cavi pre-tesi*
- *Travi trasversali* precomprese a *cavi post-tesi*
- Un *sistema di precompressione aggiuntivo* in senso longitudinale a cavi post-tesi

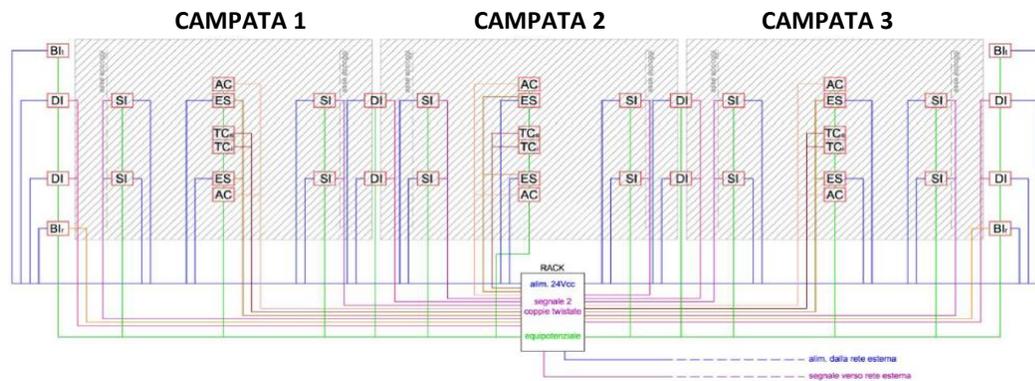


MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI FERROVIARI: SISTEMI STRUMENTALI

CASO DI APPLICAZIONE: VIADOTTO FERROVIARIO CERVIGNANO DEL FRIULI (UD)

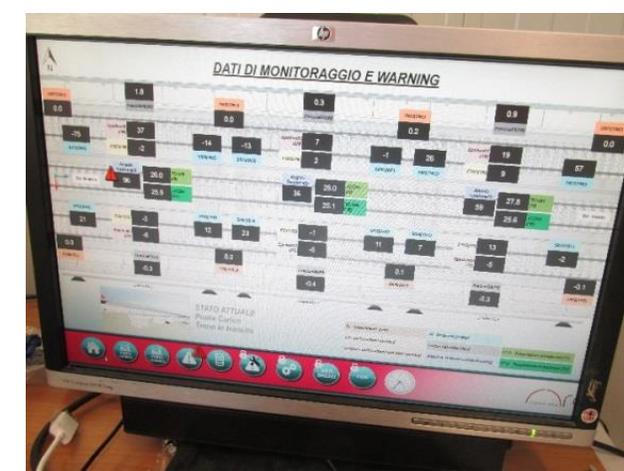


Nel 2018 RFI ha portato a termine l'installazione di un **SISTEMA DI MONITORAGGIO** su n. 3 campate del Viadotto, che *registra in continuo il comportamento strutturale dell'opera.*



Una **rete di sensori** misura in tempo reale gli spostamenti, le rotazioni, le deformazioni, le frequenze ed i modi di vibrare degli impalcati.

Un apposito **software di monitoraggio** elabora i dati ricevuti dalla rete di sensori, comunicando eventuali comportamenti anomali della struttura.

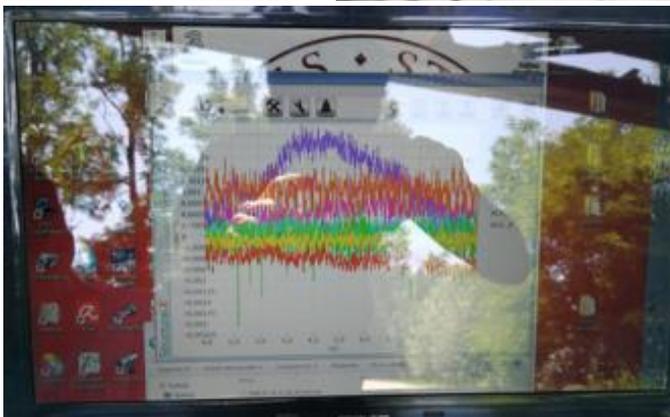
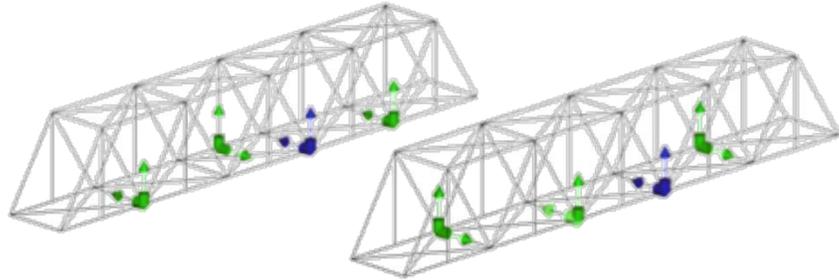




MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI FERROVIARI: SISTEMI STRUMENTALI



CASO DI APPLICAZIONE: IDENTIFICAZIONE DINAMICA DI PONTI FERROVIARI



OBBIETTIVO

Identificazione delle *grandezze dinamiche* idonee per l'individuazione degli *ammaloramenti* delle diverse tipologie di ponti ferroviari.

Prove sperimentali per l'identificazione dinamica

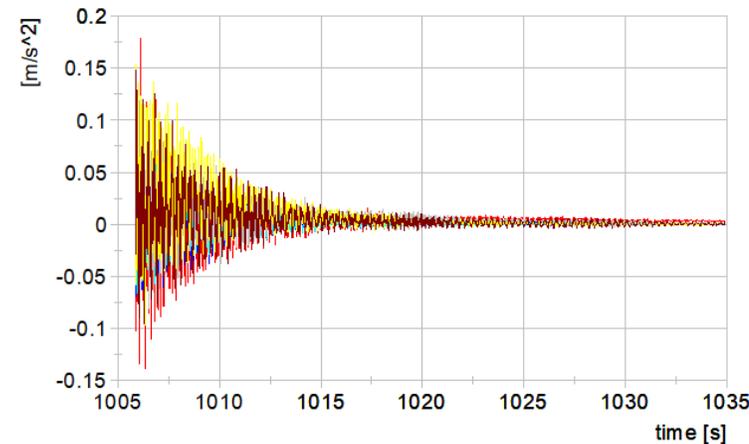
Installazione di una rete di sensori accelerometrici per misurare la risposta dinamica della struttura

Modellazione in ambito FEM

Calibrazione di modelli di calcolo atti a rappresentare il comportamento reale della struttura

Analisi critica dei risultati

Valutazione dell'influenza del degrado sul comportamento in campo dinamico della struttura oggetto di analisi





MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI FERROVIARI: SISTEMI STRUMENTALI

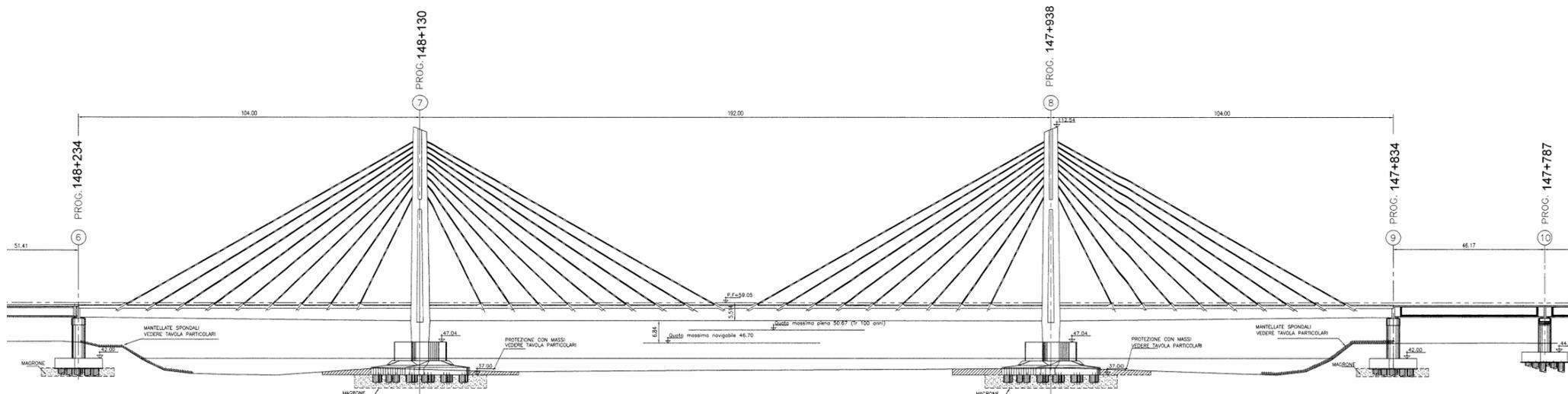
CASO DI APPLICAZIONE: TRATTA AV/AC BOLOGNA-MILANO – PONTE SUL PO: UPGRADE DEL SISTEMA



L'opera d'arte consente l'**attraversamento del fiume Po**, un chilometro a valle di Piacenza, dove l'alveo fluviale presenta una larghezza di 350 m circa e una distanza tra gli argini maestri di oltre 1 km.

L'attraversamento è realizzato mediante un ponte strallato che ha una lunghezza complessiva di **397,60 m**.

E' composto da **3** campate sorrette da n. **72** stralli ancorati su due torri in c.a. per sostenere l'impalcato continuo a sezione tricellulare in c.a.p.



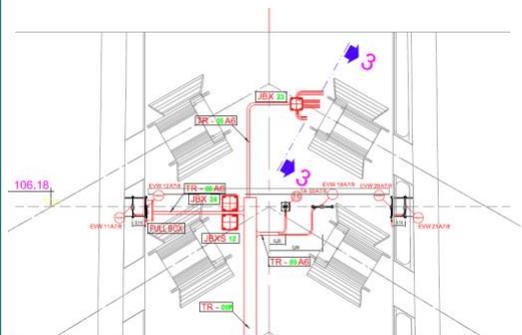


MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI FERROVIARI: SISTEMI STRUMENTALI

CASO DI APPLICAZIONE: PONTE SUL PO (LINEA MILANO - BOLOGNA) – UPGRADE DEL SISTEMA

In concomitanza della *manutenzione degli stralli*, è stata avviata l'attività di *upgrade tecnologico* del sistema di monitoraggio installato durante le fasi di costruzione. A seguito del *censimento puntuale di tutte le strumentazioni installate*, è stata svolta *un'analisi complessiva del sistema al fine della sua ottimizzazione*, prevedendo la *dismissione di tutti i sensori non più funzionali al monitoraggio in esercizio*.

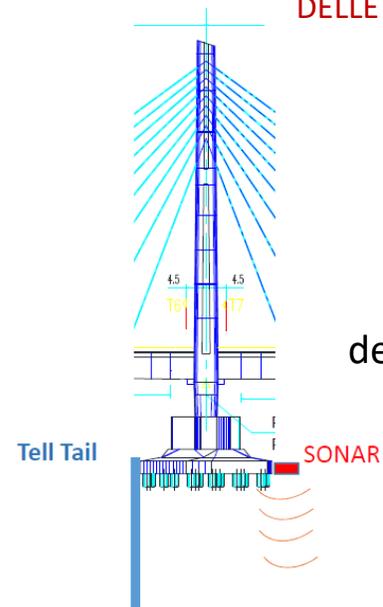
MONITORAGGIO DEGLI STRALLI E DEGLI APPOGGI



Dispositivi per la *misurazione del tiro degli stralli* e delle *azioni e le deformazioni sugli appoggi*.



MONITORAGGIO DELLO SCALZAMENTO DELLE PILE E DEL LIVELLO DELL'ACQUA



Dispositivi per il *monitoraggio del grado di scalzamento* delle pile e del *livello del fiume*

MONITORAGGIO DELL'IMPALCATO E DELLE ANTENNE

Vengono monitorate le *deformazioni dell'impalcato* (barrette estensimetriche), i *movimenti dei giunti* (trasduttori di spostamento), la *temperatura in vari punti della struttura* (termocoppie) e le *accelerazioni* sulle strutture (accelerometri).



MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI FERROVIARI: SISTEMI STRUMENTALI



CASO DI APPLICAZIONE: TRATTA AV/AC BOLOGNA-MILANO – PONTE SUL PO: UPGRADE DEL SISTEMA

A valle dell'analisi complessiva del sistema, è prevista *l'integrazione della strumentazione* presente e un *upgrade della piattaforma e delle logiche di monitoraggio* in analogia per caratteristiche al sistema installato sulla tratta AV/AC Treviglio-Brescia.

Tale sistema consentirà il monitoraggio del comportamento puntuale delle seguenti grandezze:

- Tiro degli stralli
- Reazioni agli appoggi
- Scalzamento

oltre che l'analisi del *comportamento strutturale complessivo* del ponte.

Il sistema consentirà la *generazione di avvisi istantanei in occasione del superamento delle soglie* (avviso grafico ed acustico sulle piattaforme informatiche del PCS e del CEI; sms e/o mail ai responsabili dell'infrastruttura ferroviaria) e *consentirà l'attivazione delle procedure operative di gestione degli avvisi*.





MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI FERROVIARI: SISTEMI STRUMENTALI



CASO DI APPLICAZIONE: TRATTA AV/AC TREVIGLIO-BRESCIA

Sono realizzati con la finalità di controllare le grandezze fisiche significative nelle *fasi di realizzazione* e *di esercizio* delle opere civili maggiori.

Fasi di realizzazione



Osservare il reale comportamento delle opere in costruzione, verificandone la rispondenza alle ipotesi di progetto e garantendo la possibilità di intraprendere tempestivamente eventuali azioni correttive.

Fase di esercizio



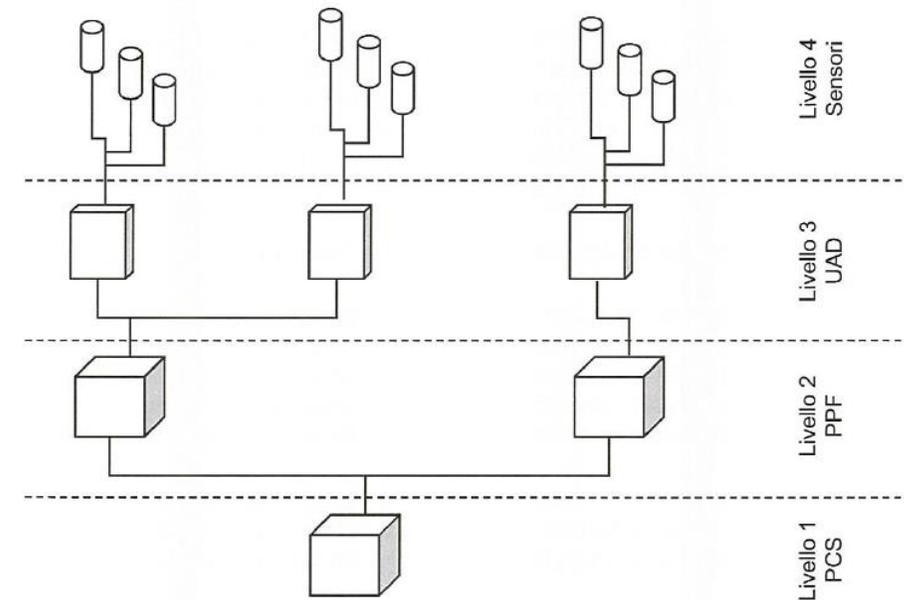
Verificare *in continuo il comportamento delle opere in esercizio sotto l'influenza delle azioni da traffico ferroviario e azioni ambientali* ordinarie ed eccezionali, ed individuare eventuali fenomeni evolutivi inattesi da attenzionare.

I sistemi di monitoraggio in esercizio consentono inoltre di:

- Controllare *grandezze ritenute sensibili* da Enti Ufficiali;
- Tenere sotto *osservazione situazioni particolari* emerse durante le fasi realizzative;
- Acquisire *informazioni utili e di supporto alle attività di manutenzione*.

L'*architettura generale del sistema* è basata su *livelli gerarchici*

Livello 1	>	PCS	(Posto Centrale Satellite)
Livello 2	>	PPF	(Posto Periferico Fisso)
Livello 3	>	UAD	(Unità di Acquisizione Dati)
Livello 4	>	SENSORI	





MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI FERROVIARI: SISTEMI STRUMENTALI



CASO DI APPLICAZIONE: TRATTA AV/AC TREVIGLIO-BRESCIA

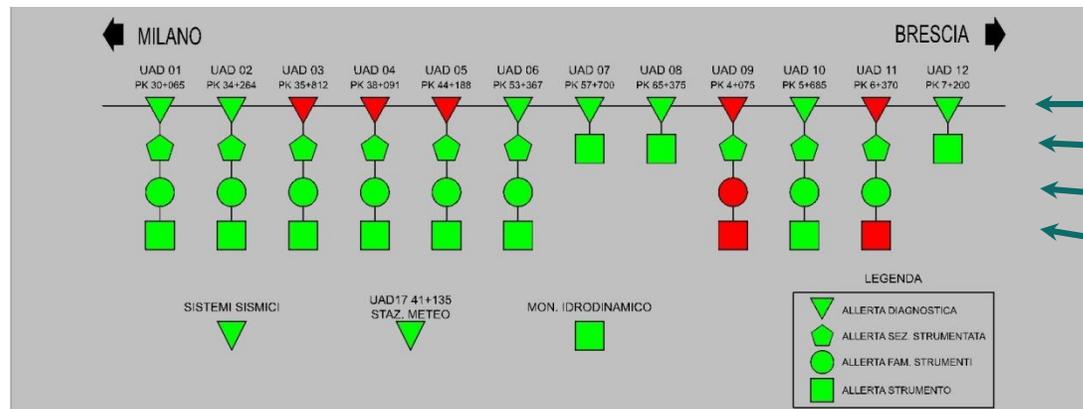
Il *sistema* viene gestito dal PCS di Milano Greco Pirelli dove un *server è direttamente connesso mediante fibra ottica con le UAD* (Unità di Acquisizione Dati), alimentate da pannelli solari.



OPERA D'ARTE MAGGIORI	TIPOLOGIA	PROGR. (Km)	CAMPATE (n.)	LUCE CAMPATA (m)
Viadotto Fontanile (VI01)	4 Cassoncini CAP	30+065	1	30
Viadotto Caravaggio (VI02)	CAP – Mista Acciaio/CLS	34+264	12	25 CAP; 20 Mista
Viadotto Serio (VI03)	4 Cassoncini CAP	44+188	32	30
Viadotto Oglio (VI04)	4 Cassoncini CAP	55+367	43	30
Viadotto S. Martino (VI09)	CAP – Mista Acciaio/CLS	4+075	25	30 CAP; 40 Mista

Il *quadro sinottico Galemys* rappresenta su **4** livelli lo stato *real-time* del sistema.

Ciascun livello rappresentato può assumere **3** aspetti: **verde = normalità** - **giallo = allerta** - **rosso = allarme**



- ① Livello UAD
- ② Livello Sezioni Strumentate
- ③ Livello Famiglie Di Strumenti
- ④ Livello Singoli Strumenti

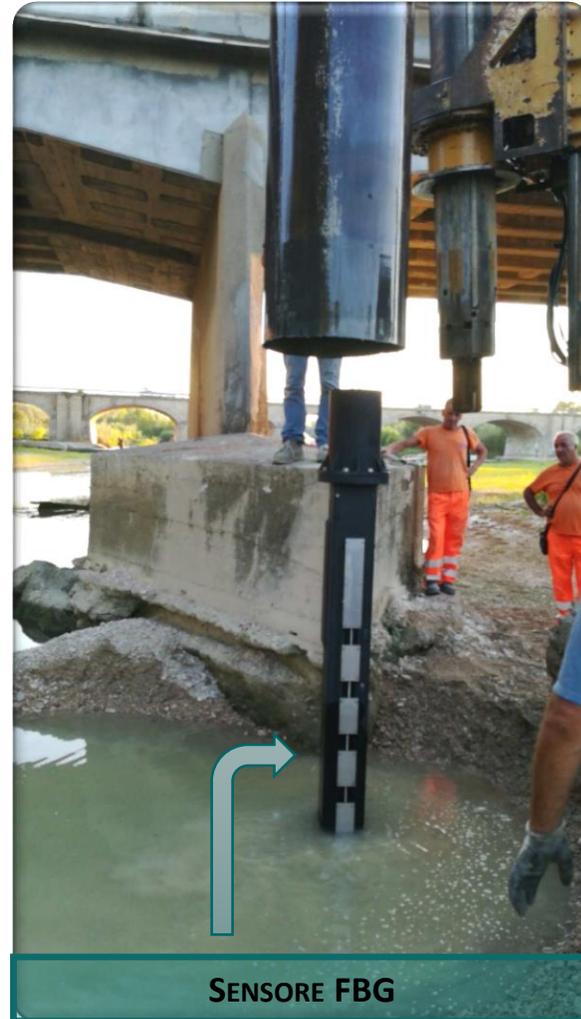
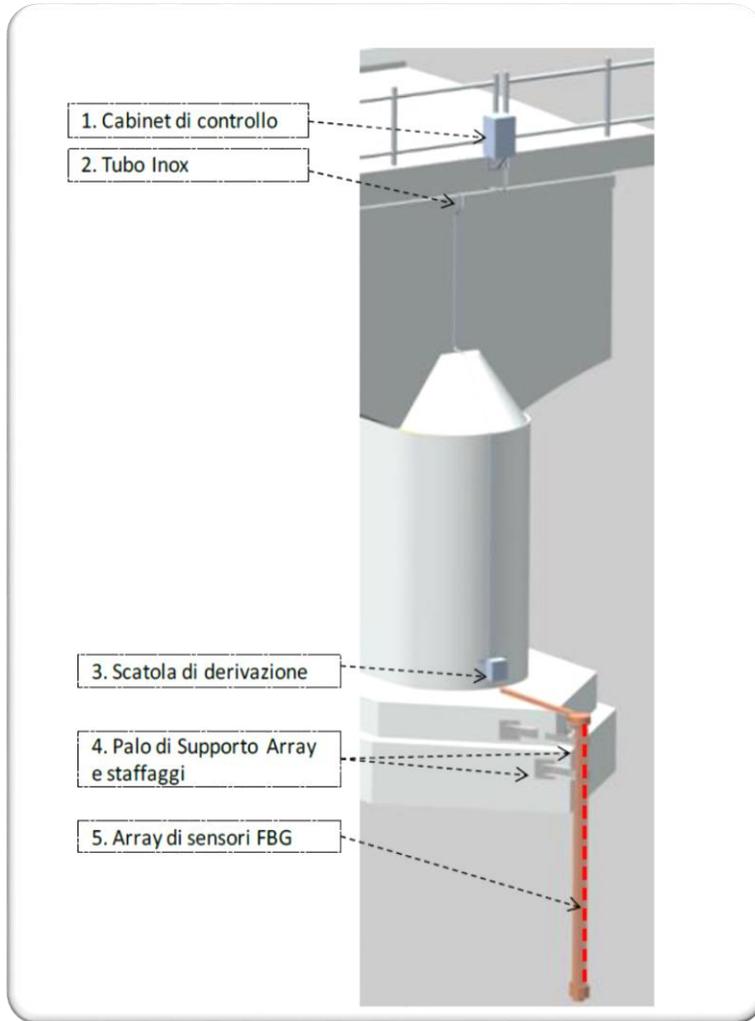
I dati, *acquisiti in continuo*, vengono registrati *ogni 2 ore* per le *UAD statiche*, mentre per le *UAD dinamiche* solo al *superamento dei trigger*.



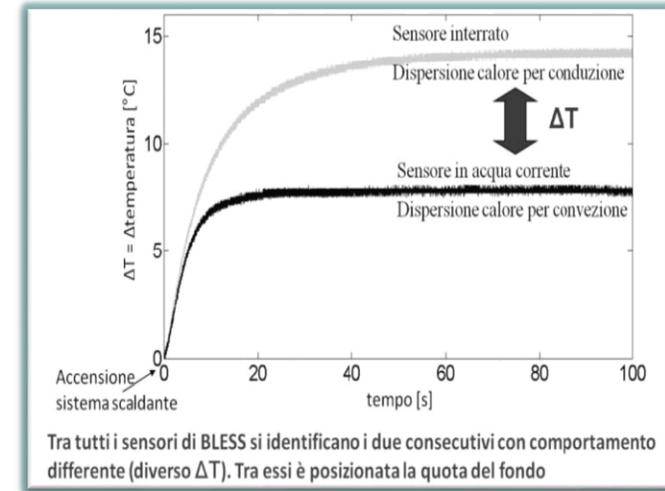
MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI FERROVIARI: SISTEMI STRUMENTALI



CASO DI APPLICAZIONE: SCALZAMENTO DELLE FONDAZIONI IN ALVEO



SENSORE per il monitoraggio dei fenomeni di scalzamento delle fondazioni in alveo



- Strumento interrato direttamente a contatto con l'ambiente di misura.
- Utilizza un *array di reticoli* di Bragg (FBG) stampati su una fibra ottica come sensori di temperatura, per determinare l'*interfaccia liquido-solido*.



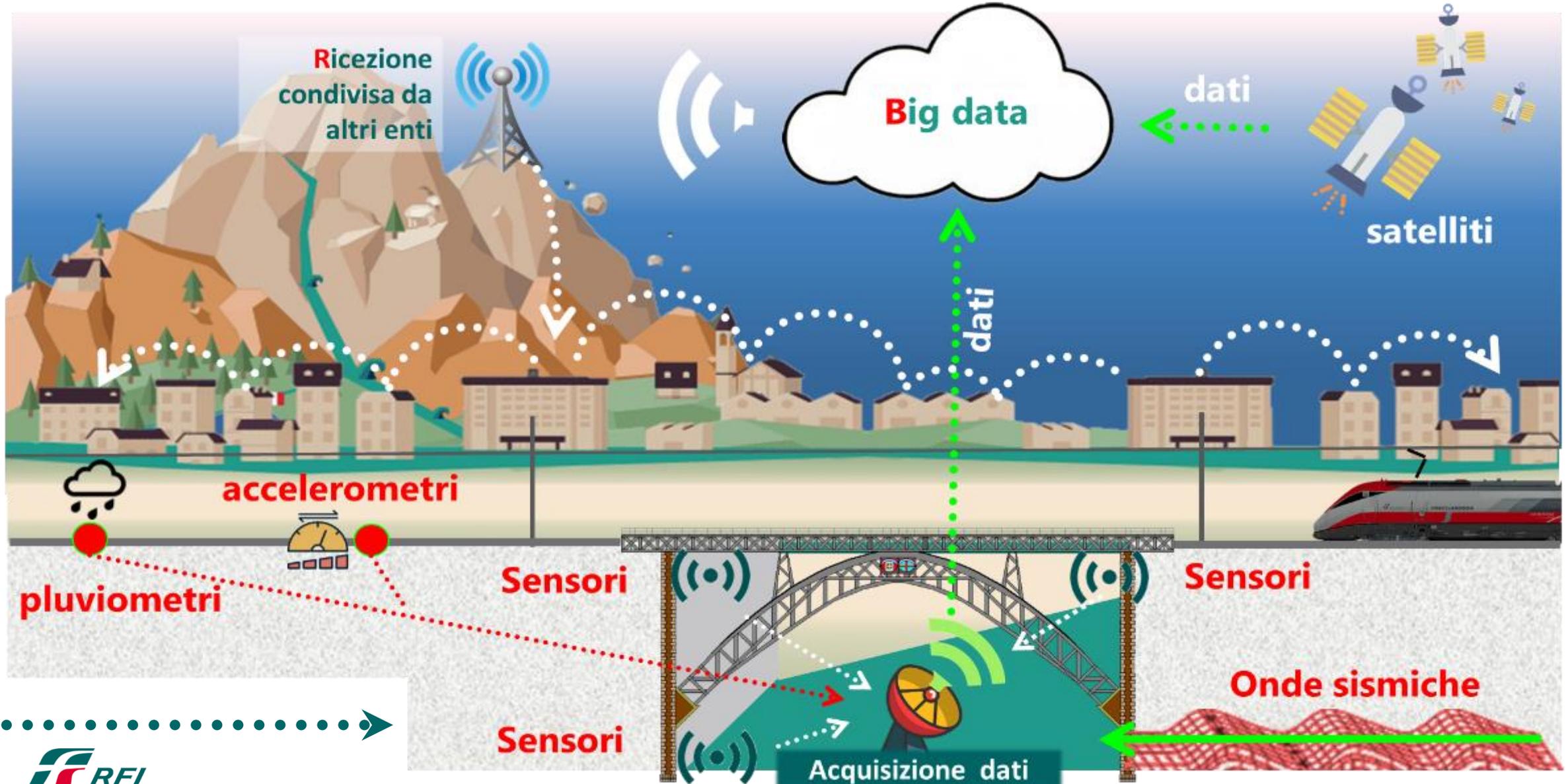
POSIZIONE del FONDO ALVEO



MONITORAGGIO DEI PONTI E VIADOTTI FERROVIARI: SISTEMI STRUMENTALI



SVILUPPI FUTURI - INTERNET OF THINGS & BIG DATA



GRAZIE PER L'ATTENZIONE

