LO STATO DELLA RICERCA SULLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO E LA VERIFICA DELLA SICUREZZA DEI PONTI E DEI VIADOTTI

Il monitoraggio dei ponti: aspetti applicativi

Ing. Paolo Mannella
ANAS / DOCT / AIR / PVG

Giornata di Studio
Padova, 2 settembre 2021

Settembre 2021

anas
GRUPPO FS ITALIANE

Informazione ad uso interno - Internal use information

ANAS, CONCESSIONARIO RETE STRADALE E AUTOSTRADALE DI INTERESSE NAZIONALE

L'**Anas** da 92 anni è l'Autorità Nazionale responsabile della costruzione, manutenzione e della gestione della Rete Stradale Nazionale.

ASSET AZIENDALI

- **2.035** GALLERIE
- **18.590** PONTI, VIADOTTI e SOVRAPPASSI
- **1.244** CASE CANTONIERE
- **1** SALA SITUAZIONI
- **21** SALE OPERATIVE COMPARTIMENTALI
- **38** SEDI SUL TERRITORIO

8 Milioni di Passeggeri al giorno

400.000 Veicoli Merci al giorno

anas
GRUPPO FS ITALIANE

Sorveglianza integrativa: monitoraggio strutturale

ANAS ha avviato la realizzazione di un processo di controllo ulteriore rispetto a quello delle ispezioni visive, basato sul monitoraggio strumentale in continuo delle opere d'arte (Ponti e ai Viadotti).

Sono state contrattualizzate n. 4 gare di Accordo Quadro, ciascuna dell'importo 3 milioni di euro, dedicate alla fornitura e posa in opera di strumentazione di misura per la realizzazione di impianti di monitoraggio strutturale in continuo nel tempo.

Si è convenuto di seguire l'approccio basato sul **controllo in continuo delle caratteristiche modali delle opere**, in quanto:

- è basato sul controllo di parametri intrinseci alla struttura;
- può essere facilmente standardizzato in riferimento a opere simili per concezione e tipologia strutturale;
- la strumentazione necessaria ha raggiunto oggi giorno un elevato grado di affidabilità nelle caratteristiche tecniche, mantenendo costi contenti, commisurati alla necessità di estendere tale attività ad un consistente numero di opere.

Per l' analisi e l'interpretazione dei dati acquisiti, è stata inoltre pubblicata una gara in modalità di procedura negoziata, con invito esteso a n. 7 Università italiane, finalizzata alla realizzazione di un applicativo software di proprietà ANAS.

Il servizio è stato affidato ad un raggruppamento di atenei avente quale capogruppo il *Politecnico di Milano* e come mandanti *l'Università di Perugia* e *l'Università di Padova*.

anas
GRUPPO FS ITALIANE

Monitoraggio strutturale di opere d'arte: gare di AQ

Sintesi gare di Accordo Quadro per fornitura e posa in opera di sensori:

PROSPETTO DI SINTESI DELLE GARE DI ACCORDO QUADRO PER MONITORAGGIO STRUTTURALE OPERE ARTE				
Id. Gara	**Area geografica**	**ST ricomprese**	**Importo complessivo a base di gara**	**Status gara**
DG 181-19	NORD	Piemonte – Valle D'Aosta – Lombardia – Veneto – Friuli V.G. – Emilia Romagna	3 M€	Contratto stipulato in data 6.11.2020
DG 180-19	CENTRO	Toscana - Umbria – Marche – Lazio – Abruzzo - Molise	3 M€	Contratto stipulato in data 7.10.2020
DG 182-19	SUD	Campania – Basilicata – Puglia - Calabria	3 M€	Contratto stipulato in data 15.12.2020
DG 183-19	ISOLE	Sicilia - Sardegna	3 M€	Contratto stipulato in data 23.10.2020

Sintesi opere in progettazione

Gara	Numero interventi	Numero opere	cui corrispondono numero campate	Importo lavori
DG180-19_CENTRO	8	11	85	3.276.923,99 €
DG181-19_NORD	8	11	63	2.444.259,05 €
DG182-19_SUD	6	8	70	3.067.437,89 €
DG183-19_ISOLE	4	4	48	1.259.072,05 €
Totale complessivo	**26**	**34**	**266**	**10.047.692,98 €**

Sintesi progetti approvati

Gara	Numero interventi	Numero opere	cui corrispondono numero campate	Importo lavori
DG180-19_CENTRO	8	11	85	3.276.923,99 €
DG181-19_NORD	8	11	63	2.444.259,05 €
DG182-19_SUD	5	7	67	2.528.598,13 €
DG183-19_ISOLE	3	3	43	1.111.727,80 €
Totale complessivo	**24**	**32**	**258**	**9.361.508,97 €**

anas
GRUPPO FS ITALIANE

Monitoraggio strutturale di opere d'arte: opere selezionate

GARA CENTRO			
AGR	Nome Opera	Strada	Km
Abruzzo	San Nicola 1	SS16	514.144
Lazio	Viadotto Ansa del Tevere	A91	2.926
Lazio	Ponte Strallato sul Fiume Garigliano	SS7var	14.154
Marche	FALCONARA I	SS16	288.338
Marche	CASTELFERRETTI	SS16	290.58
Molise	PO_TRIGNO 5_Km_36+075	SS650	36.075
Molise	PO_FOSSATO_Km_19+870	SS650	19.87
Toscana	Puleto	SS3BIS	162.005
Umbria	Toano	SS675	1.942
Umbria	VIADOTTO SAN FAUSTINO O SETTEVALLI	RA06<	53
Umbria	VIADOTTO SAN FAUSTINO O SETTEVALLI	RA06	53

GARA NORD			
AGR	Nome Opera	Strada	Km
Emilia Romagna	PO	SS16	69.52
Emilia Romagna	Savio VI	SS3BIS	203.333
Friuli Venezia Giulia	Ponte 3	SS202	0.202
Liguria	TRASO 4	SS45	17.03
Lombardia	Viadotto Sassello	SS38	35.473
Piemonte	Tangenziale Nord (43182 e 43174 alice)	RA 10	3.072
Piemonte	RA10-Sv.Tang.Nord_Ponte su Tang.Nord	RA10	3.1
Piemonte	Ponte FS Bussoleno-Susa	SS25	48.382
Valle di Aosta	Viadotto Cascata	SS26	53.207
Veneto	Ponte sul Po di Goro	SS309	55.73
Veneto	PONTE SUL fiume ADIGE	SS309	76.862

GARA SUD			
AGR	Nome Opera	Strada	Km
Basilicata	Carpineto I	RA05	16.626
Basilicata	Fiumara di Tito	RA05	31.225
Puglia	Ponte Punta Penna Pizzone	SS7ter	2.728
Campania	Viadotto Fiumarelle	SS90dir	1.77
Campania	Scavalco A30	SS7bis	40.215
Catanzaro	EMOLI I	SS107	16.815
Catanzaro	EMOLI II	SS107	15.907
Puglia	po_SS16_Km_810+000	SS16	810

GARA ISOLE			
AGR	Nome Opera	Strada	Km
Cagliari	PO_SS130_16+884	SS130	16.857
Cagliari	PO_SS195_0+857	SS195	857
Catania	Viadotto Coste	SS514	4.676
Palermo	Serra Cazzola	SS640	29.089

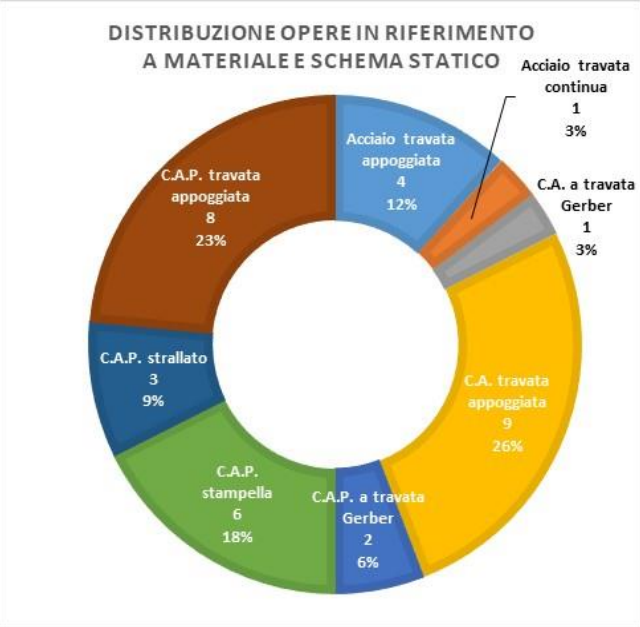
anas
GRUPPO FS ITALIANE

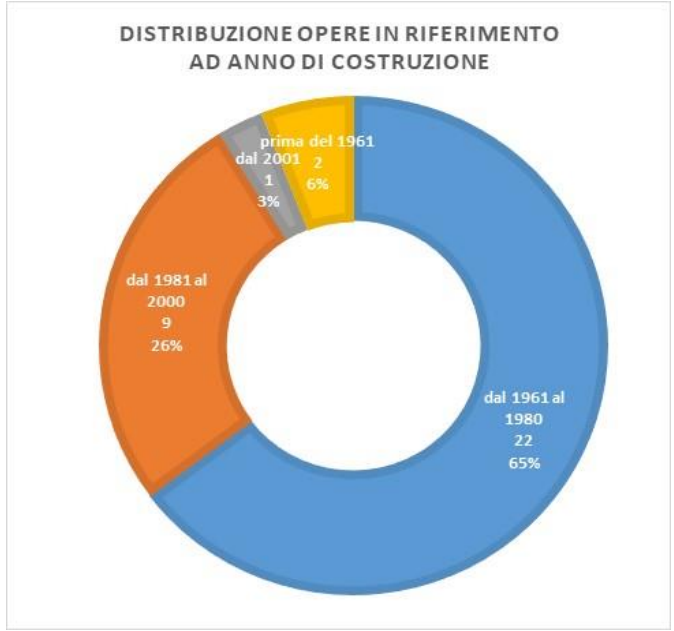
Monitoraggio strutturale di opere d'arte: criteri selezione opere

Il selezionamento delle 34 opere su cui andranno installati i primi sistemi di monitoraggio strutturale di tipo «dinamico» ha visto un continuo coinvolgimento delle varie ST /AGR ai fini di una condivisione delle scelte proposte dalla DOCT.

Criteri individuazione opere:

- ❑ localizzate su Itinerari Internazionali
- ❑ lunghezza campata maggiore >= 30m
- ❑ con impalcati in materiale c.a.p o c.a.
- ❑ con schemi statici a travate appoggiate o continue
- ❑ anno di realizzazione *ante* 1990





Monitoraggio strumentale di opere d'arte: aspetti teorici

Idea di base del monitoraggio dinamico «modale»

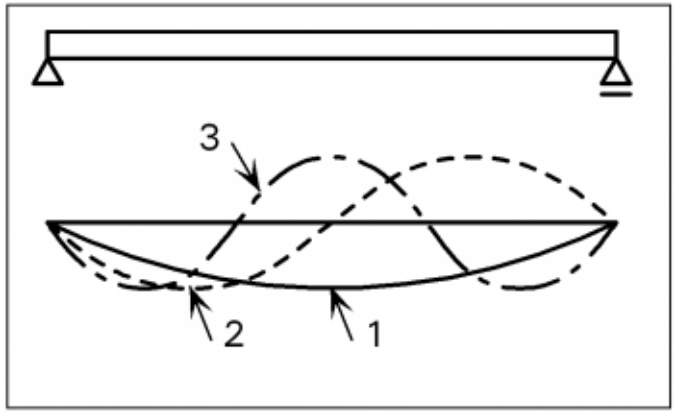
La risposta di una struttura soggetta ad eccitazione dinamica è rappresentata da una oscillazione nel tempo attorno alla propria posizione di equilibrio.

L' oscillazione complessiva può essere determinata come la somma di *n* oscillazioni «semplici», ciascuna avente una **propria forma,** una propria **frequenza di oscillazione** ed un proprio valore di **smorzamento** (Parametri Modali).

La risposta dinamica di una struttura, eccitata da una forzante dinamica, dipende dai seguenti parametri:

Massa **M** (derivante dai pesi propri e portati);
Rigidezza **K** (derivante dalla geometria e dal materiale);
Smorzamento **C** (derivante dal materiale e elementi specifici)

PRIOPRIETÀ INTRINSECHE



Esempio delle prime 3 deformate modali di una trave appoggiata

Monitoraggio strumentale di opere d'arte: aspetti teorici

Idea di base del monitoraggio dinamico «modale»

- l' Analisi Modale Sperimentale è una tecnica di indagine che consente di determinare i parametri modali di un sistema a partire dalla misurazione della sua risposta dinamica in un numero discreto di punti;
- sotto una eccitazione random, a media nulla («rumore bianco»), la risposta dinamica è indipendente dalla forzante che eccita il sistema;
- l'eccitazione ambientale, quale il vento, micro-tremore o il traffico di regolare esercizio su un ponte stradale, è assimilabile matematicamente ad un «rumore bianco»;
- la variazione di uno o più parametri **M, K, C** *(es. per degrado, danneggiamento, incremento masse ecc..)* determina la variazione dei parametri modali e quindi una variazione della risposta globale del sistema;

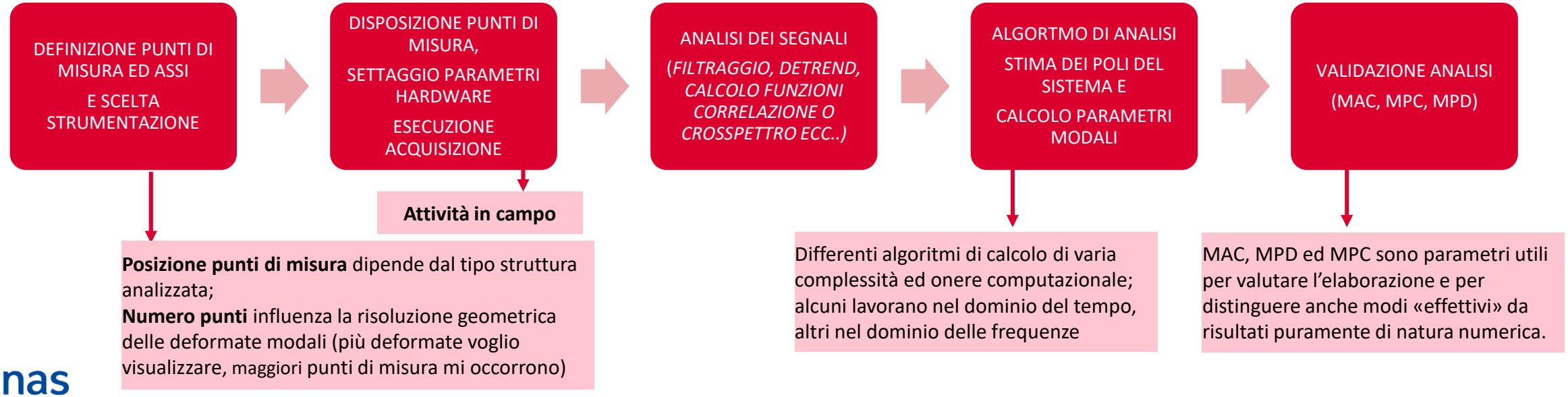
Misurando la risposta dinamica della struttura in alcuni punti significativi (sensori) ed **applicando l'analisi modale sperimentale** (OMA) è possibile monitorare la **variazione dei parametri modali** per identificare una **modifica delle condizioni di stato dell'opera**

anas
GRUPPO FS ITALIANE

Monitoraggio strumentale di opere d'arte: aspetti teorici

Alcuni aspetti fondamentali dell'Analisi Modale Operativa (OMA)

- La sua applicabilità è legata al fatto che l'eccitazione ambientale di input può essere assimilata ad un segnale «random» a media nulla (**rumore bianco**) e quindi non ha senso misurarla.
- La **risposta cinematica del sistema** è quindi assimilabile alla **risposta di un sistema meccanico in oscillazioni libere**.
- Si misura la risposta della struttura (output) per un tempo sufficientemente lungo (in genere 1 ora di registrazione) a frequenza di campionamento adeguata (per opere civili 100 - 200 Hz).
- Analizzando quindi il contenuto del segnale in output misurato (accelerometri) con i metodi di trattamento del *signal processing* ed opportuni algoritmi di analisi è possibile determinare le proprietà modali della struttura.



Monitoraggio strumentale di opere d'arte: aspetti teorici

Logiche per un monitoraggio dinamico «modale»

L'IDEA DI BASE E' QUELLA DI **SEGUIRE L'EVOLUZIONE DEI PARAMETRI MODALI** O DELLE CARATTERISTICHE DINAMICHE DELLA STRUTTURA, **TRAMITE ANALISI OMA** RIPETUTE PERIODICAMENTE, E CONFRONTARE I RISULTATI OTTENUTI DI VOLTA IN VOLTA CON PARAMETRI DI RIFERIMENTO ASSUNTI A TEMPO T_0 , PER **IDENTIFICARE VARIAZIONI SIGNIFICATIVE** SINTOMO DI UN POSSIBILE DANNO.

Tecniche ed Algoritmi di *Damage - Detection*

Campo tutt'ora in fase di studio e ricerca per quanto riguarda le applicazioni di ingegneria civile. Ancora poca sperimentazione e pochi sistemi di monitoraggio installati.

Tra questi, vi è l'approccio basato sul controllo in continuo di:

- ***Variazione frequenze proprie;***
- ***Variazione delle deformate modali tramite misura del MAC***

I valori stimati in continuo nel tempo, sotto differenti condizioni di temperatura, devono essere «depurati» dagli effetti termini. La temperatura genera variazione nel modulo ***E*** dei materiali creando quindi variazioni di rigidezza, quindi di frequenze, che però non sono ascrivibili ad un danno!

Il **MAC** (Modal Assurance Criterion) è una tecnica di confronto tra due set di modi per verificare se vi è una corrispondenza. Se il MAC è pari all'unità, i vettori corrispondenti a due modi di vibrare sono perfettamente identici nell'ambito di un fattore di scala.

Le forme modali non sono soggette a variazione a causa di una variazione omogenea di rigidezza (come quella da effetto termico) e sono un ottimo indicatore per controllare insorgenza di un danno

anas
GRUPPO FS ITALIANE

Monitoraggio strumentale di opere d'arte: aspetti teorici

Schema generale di un monitoraggio dinamico

SENSORI DI MISURA + SISTEMA DI ACQUISIZIONE (DAQ) + CABLAGGI + PC (può essere omesso per DAQ *embedded*)

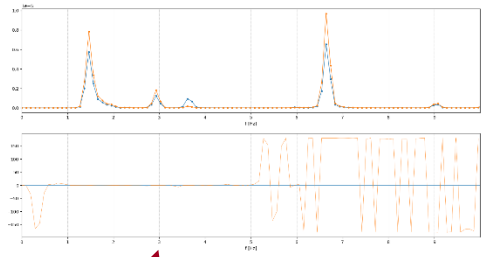
ARCHITETTURA DI SISTEMA A LIVELLO «EDGE» (ossia sull'opera)

ed è quanto occorre per misure *in-situ* finalizzate ad analisi OMA

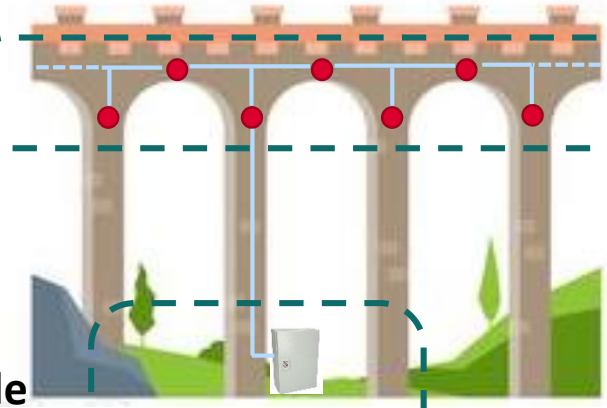
SISTEMI DI MONITORAGGIO

LIVELLO «EDGE» + **ARCHITETTURA RETE PER TRASMISSIONE VERSO DB CENTRALE**

Sensori



Unità locale
(Pc + DAQ)



Protocollo trasmissione

SIM, linea fisica..

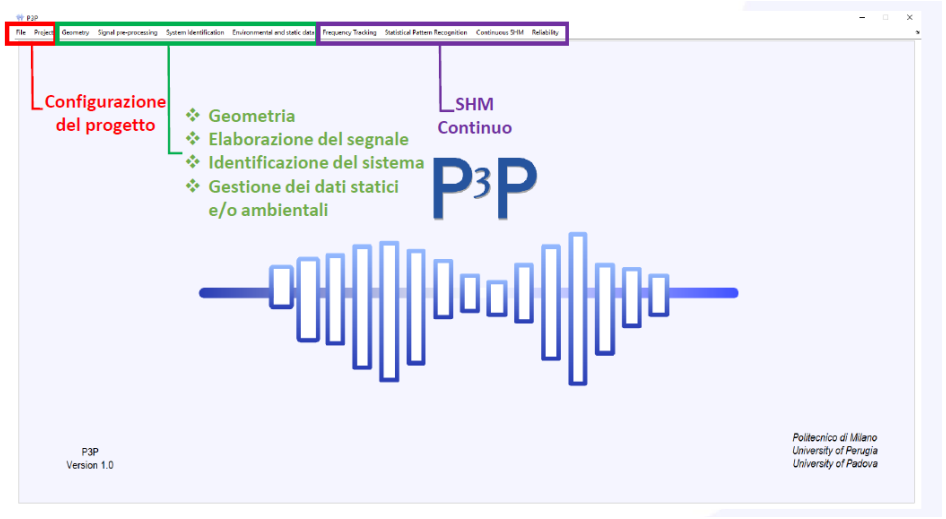
UTENTI

Output elaborazione + dati grezzi per backup

anas
GRUPPO FS ITALIANE

Monitoraggio strumentale di opere d'arte: il Software ANAS

Realizzato con la collaborazione del Politecnico di Milano, Università di Perugia ed Università di Padova



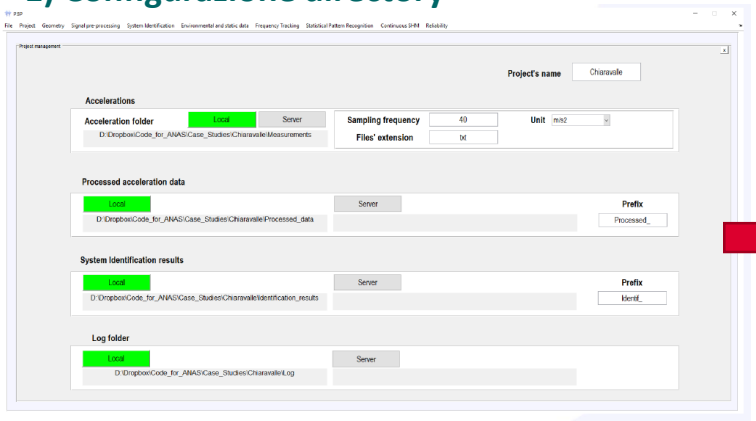
- Esecuzione di analisi di identificazione modale in modalità «da utente» e in modalità «automatica»
- Implementa metodi di analisi del segnale quale filtraggio, sotto-campionamento, calcolo delle funzioni di densità spettrale
- Implementa i metodi di identificazione modale quali FDD ed EFDD (dominio delle frequenze) per la modalità «da utente» e metodo COV-SSI (domino del tempo) sia per la modalità da utente che per quella «automatica»
- Contiene un modulo per il monitoraggio in continuo delle proprietà modali ed algoritmo di «damage – detection»
- Supporta analisi multiple in parallelo per identificazione automatica di «sottostrutture» definite, quali ad esempio le varie campate costituenti ponti a travate appoggiate

anas
GRUPPO FS ITALIANE

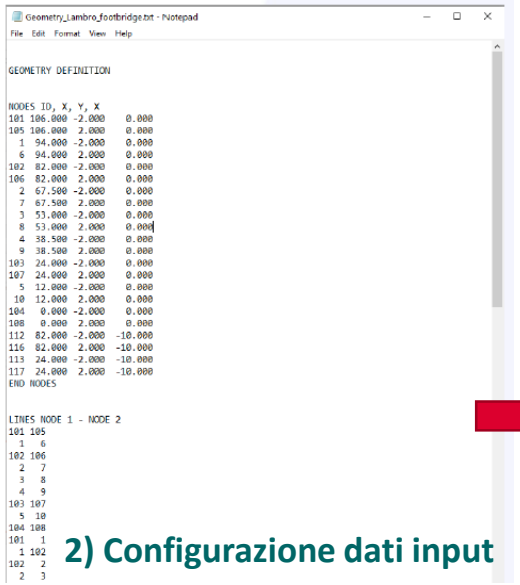
Monitoraggio strumentale di opere d'arte: il Software ANAS

Flusso di lavoro per analisi OMA

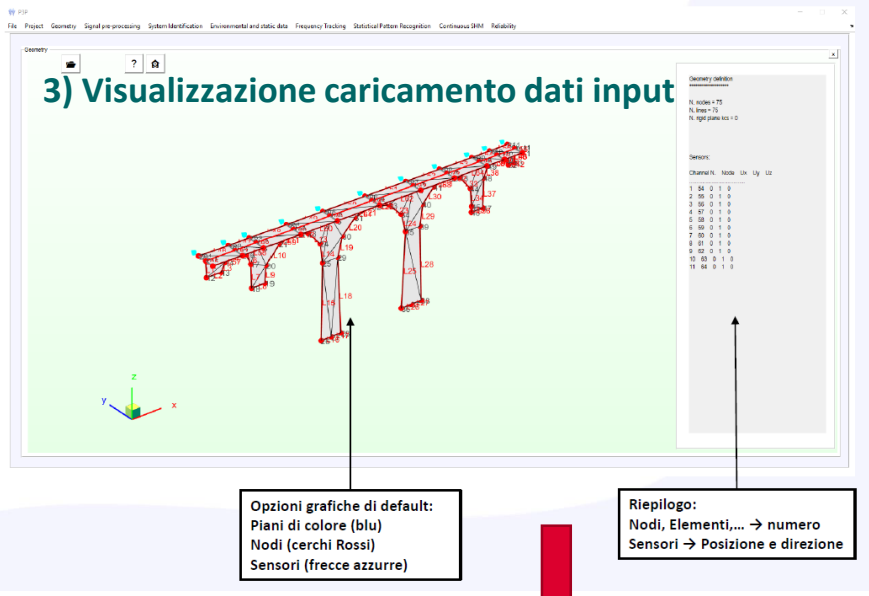
1) Configurazione directory



2) Configurazione dati input



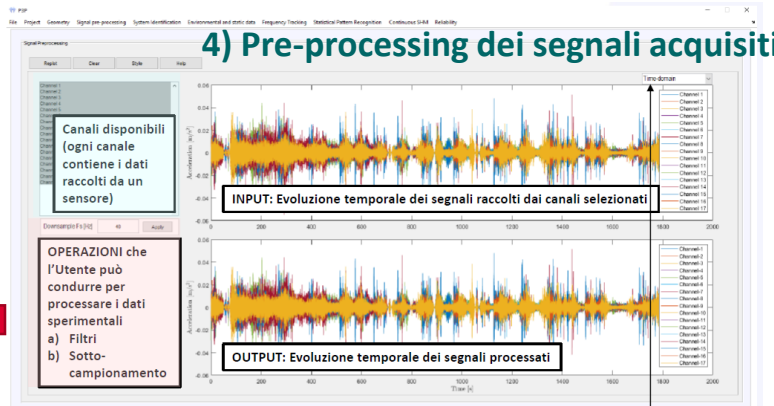
3) Visualizzazione caricamento dati input



Opzioni grafiche di default:
Piani di colore (blu)
Nodi (cerchi Rossi)
Sensori (frecce azzurre)

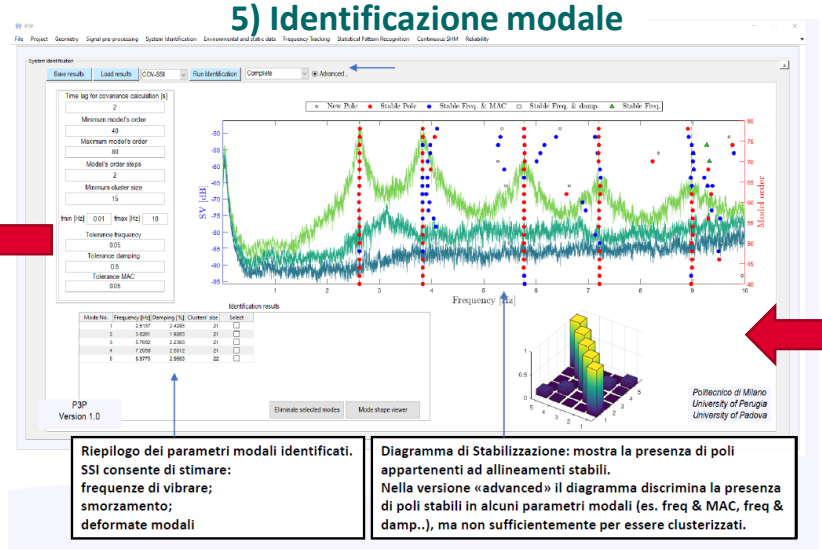
Riepilogo:
Nodi, Elementi,... → numero
Sensori → Posizione e direzione

4) Pre-processing dei segnali acquisiti



Modalità di visualizzazione dei segnali:
"time domain" -> storie temporali
"freq. Domain" -> contenuto in frequenza (Trasformate di Fourier)

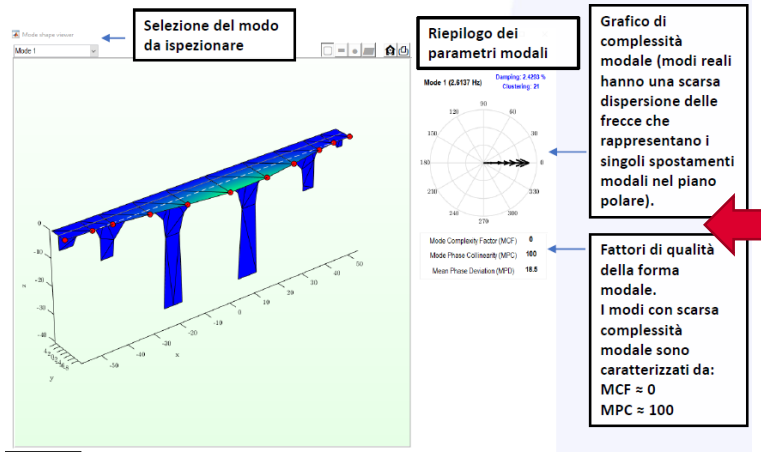
5) Identificazione modale



Riepilogo dei parametri modali identificati.
SSI consente di stimare:
frequenze di vibrare;
smorzamento;
deformate modali

Diagramma di Stabilizzazione: mostra la presenza di poli appartenenti ad allineamenti stabili.
Nella versione «advanced» il diagramma discrimina la presenza di poli stabili in alcuni parametri modali (es. freq & MAC, freq & damp..), ma non sufficientemente per essere clusterizzati.

6) Visualizzazione output (forme modali)



Selezione del modo da ispezionare

Riepilogo dei parametri modali

Grafico di complessità modale (modi reali hanno una scarsa dispersione delle frecce che rappresentano i singoli spostamenti modali nel piano polare).

Fattori di qualità della forma modale.
I modi con scarsa complessità modale sono caratterizzati da:
MCF ≈ 0
MPC ≈ 100

anas
GRUPPO FS ITALIANE

Monitoraggio strumentale di opere d'arte: il Software ANAS

Macro fasi di analisi dati

Per ciascuna struttura strumentata la fase di interpretazione dei dati misurati sarà articolata secondo tre macro-fasi:

1) settaggio

- definizione dei parametri di configurazione
- esecuzione delle prime analisi OMA in modalità «da utente» e valutazione dei dati
- definizione dei parametri di configurazione dell'algoritmo di analisi per la successiva fase di automazione del processo

2) avvio

- stima automatica delle caratteristiche modali dell'opera per intervalli temporali periodici
- osservazione variazione parametri modali (frequenze) con parametri ambientali
- regressione dati per rimuovere effetti natura ambientale (es. termici su frequenze)

3) monitoraggio

- stima automatica delle caratteristiche modali dell'opera per intervalli temporali periodici
- confronto automatico parametri determinati per verifica anomalie di comportamento rispetto a condizione di riferimento

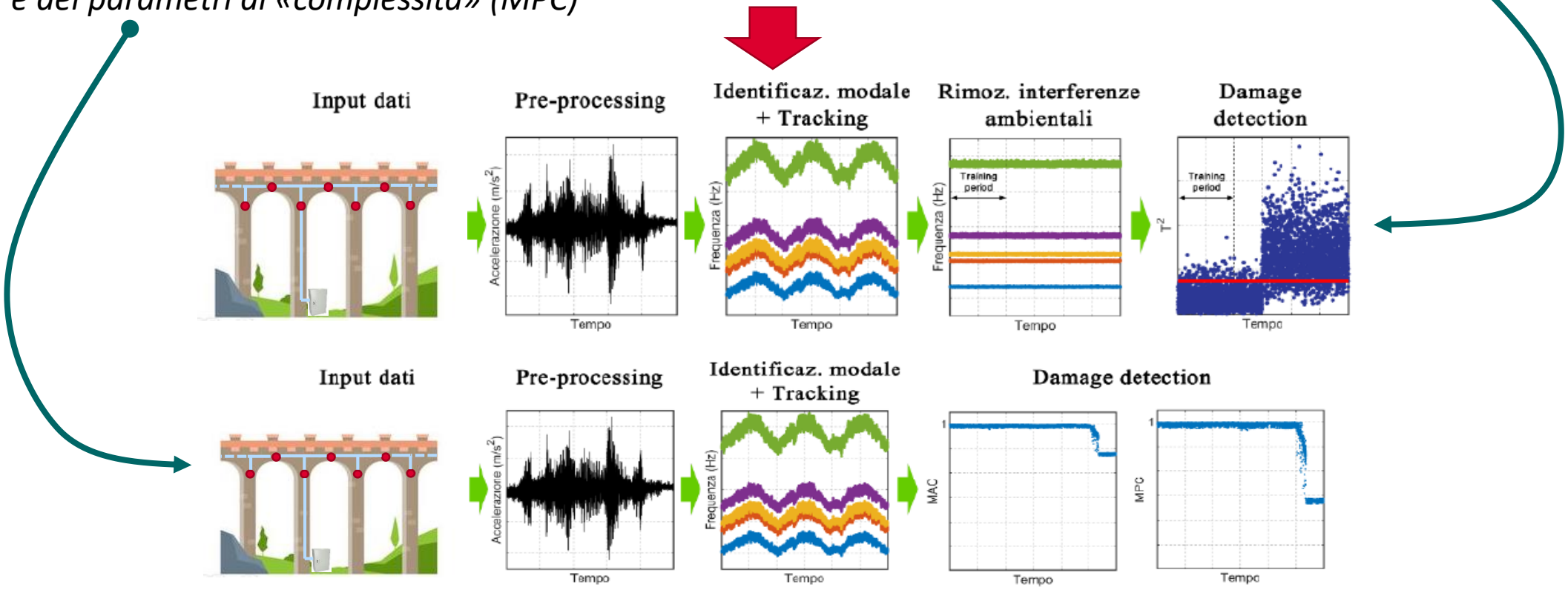
anas
GRUPPO FS ITALIANE

Monitoraggio strumentale di opere d'arte: il Software ANAS

Strategia di *Damage detecion*

Il software implementa due strategie di controllo per verificare insorgere del danno

1. *Variazione frequenze proprie nel tempo* → *dopo primo periodo di osservazione e rimozione effetti ambientali (fase 3)*
2. *Variazione delle deformate modali tramite misura del MAC e dei parametri di «complessità» (MPC)* → *già a partire dalla fase 2*



Monitoraggio strumentale di opere d'arte: il Software ANAS

FLUSSO DI LAVORO DEL SW IN MODALITA' AUTOMATICA

1. IMPIANTO MONITORAGGIO ACQUISISCE IL SEGNALE ACCELEROMETRICO A 200 HZ E SALVA UN FILE DI 1 ORA DI REGISTRAZIONE, CONTENENTE TUTTI I CANALI DI MISURA.
   SI GENERA N. 1 FILE /ORA PER OGNI ORA DEL GIORNO – TOTALE = 24 REGISTRAZIONI AL GIORNO

2. IL SW P3P INTERROGA AUTOMATICAMENTE LA DIRECTORY DESIGNATA DOVE VENGONO SALVATI I FILE DI ACQUISIZIONE PRODOTTI DAL SISTEMA DI MONITORAGGIO – UNA INTERROGAZIONE OGNI FILE GENERATO

3. PER PRIMA COSA, IL SW P3P CONTROLLA IL FILE «GREZZO» (A 200 Hz) MEDIANTE IL MODULO DEDICATO AL «DETECTION SISMICO» E CONTROLLA SE, NELL'ORA DI ACQUISIZIONE, L'ACCELEROMETRO «SENTINELLA» INSTALLATO AL PIEDE DI UNA PILA DEL PONTE HA RILEVATO UNA ECCITAZIONE COMPATIBILE CON UN PREFISSATO LIVELLO ASCRIVIBILE AD UN EVENTO SISMICO

   a) Se il modulo «sismica» individua un evento sismico, estrapola una porzione del segnale totale dell'ora di registrazione, lo salva in una apposita directory e contestualmente analizza il segnale determinando alcuni parametri relativi alla risposta sismica dell'opera.
   b) Se il modulo «sismica» non individua alcun evento sismico, non esegue alcuna calcolazione

4. SUCCESSIVAMENTE AL CONTROLLO «SISMICO» IL SW P3P PROCEDE CON IL FLUSSO DI ANALISI AUTOMATIZZATO PER L'ANALISI DEL SEGNALE E LA DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI MODALI

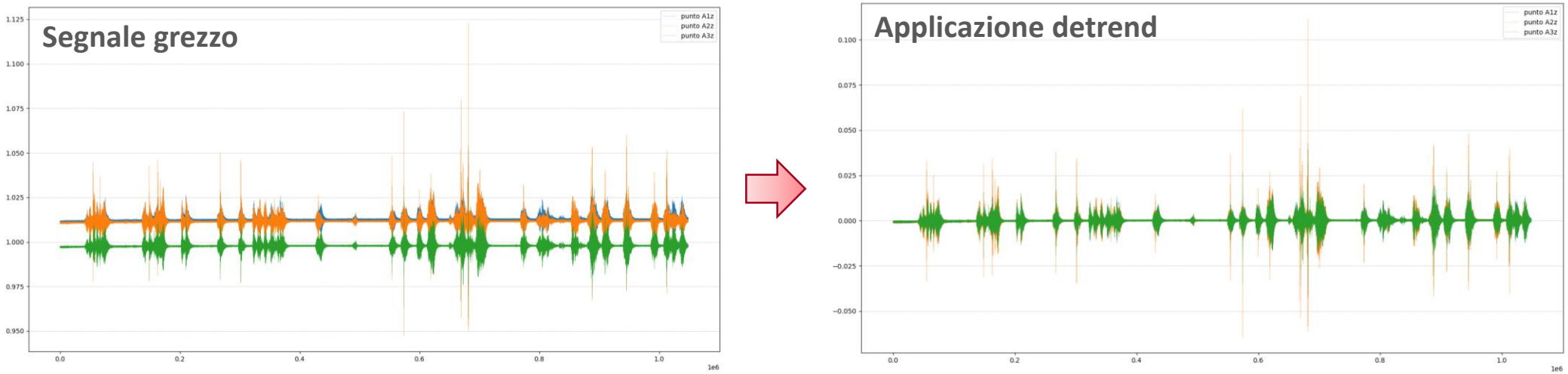
Monitoraggio strumentale di opere d'arte: il Software ANAS

FLUSSO DI LAVORO DEL SW

Nb: la fase «automatizzata» è subordinata ad una prima fase di analisi «manuale» che l'utente fa sui primi dati misurati dal sistema di monitoraggio. Tale fase «manuale» serve per settare i parametri di analisi ed il «pre-processing» dei segnali più appropriati, in ragione di ciascuna opera monitorata. Settati questi parametri e le operazioni di «pre-processing», il sw ne tiene memoria e ripete i le analisi automatizzate secondo i passi definiti nella fase «manuale».

4.1 PRE-PROCESSING:

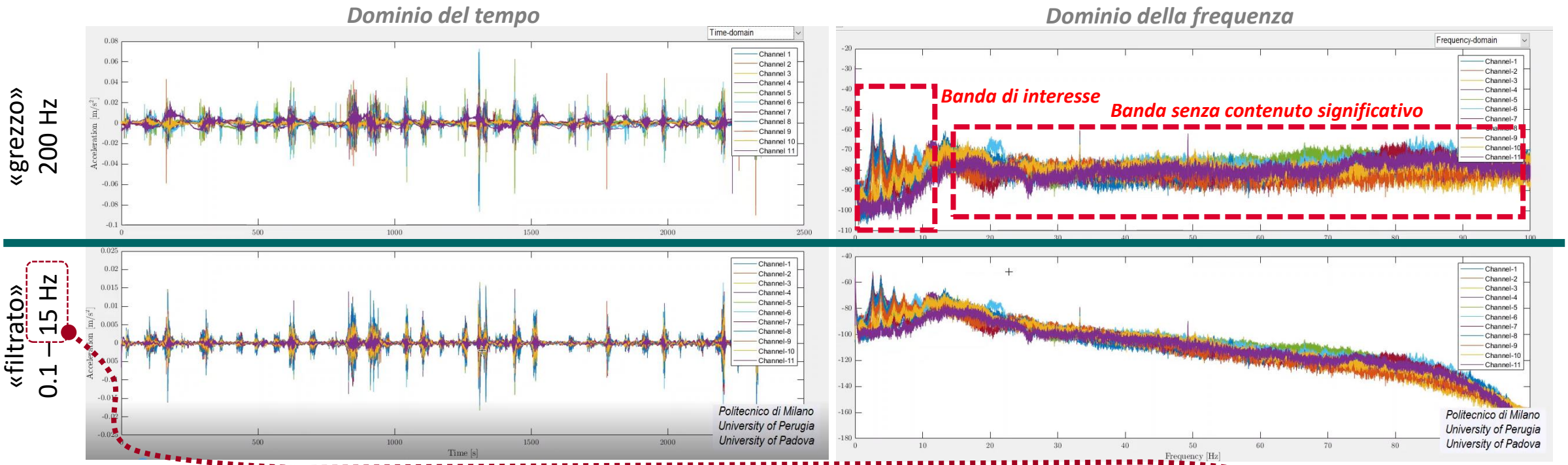
a) **Applicazione del «detrend», ossia rimozione della componente «costante» del segnale dovuto ad un sensore accelerometrico a tecnologia «mems».**



Monitoraggio strumentale di opere d'arte: il Software ANAS

FLUSSO DI LAVORO DEL SW

b) Filtraggio del segnale selezionando solo la banda di frequenza di interesse, tipicamente 0.2 – 15 Hz



c) Sottocampionamento del segnale con una frequenza di campionamento inferiore, $f_s >= 2\ f_{max}$ (*decimazione*)

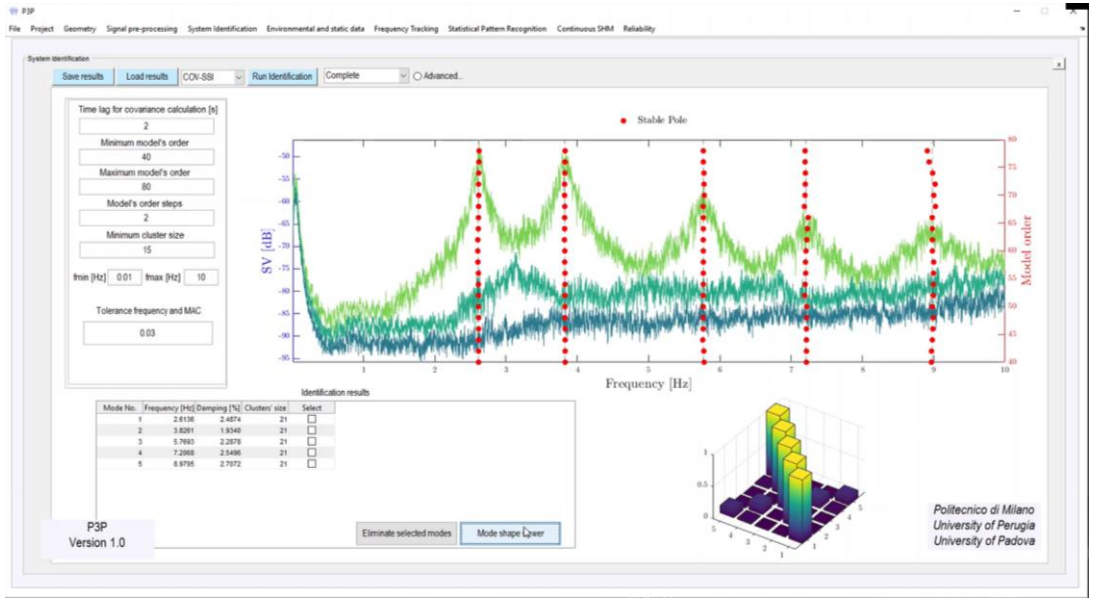
d) Salvataggio del file dati filtrato e «decimato» - sarà su questo file che verrà effettuata l'identificazione modale.

Monitoraggio strumentale di opere d'arte: il Software ANAS

FLUSSO DI LAVORO DEL SW

5. **IDENTIFICAZIONE AUTOMATICA DEI PARAMETRI MODALI MEDIANTE ALGORITMO DI ANALISI COV-SSI E SCRITTURA DEL FILE DI OUTPUT.**

Nb: per ciascuna opera, sarà prodotto n. 1 file di output per ciascuno dei parametri modali (frequenze e modi di vibrare) che si aggiorna ad ogni analisi effettuata collezionando via via i risultati delle analisi effettuate sui dati via via acquisiti nel tempo.



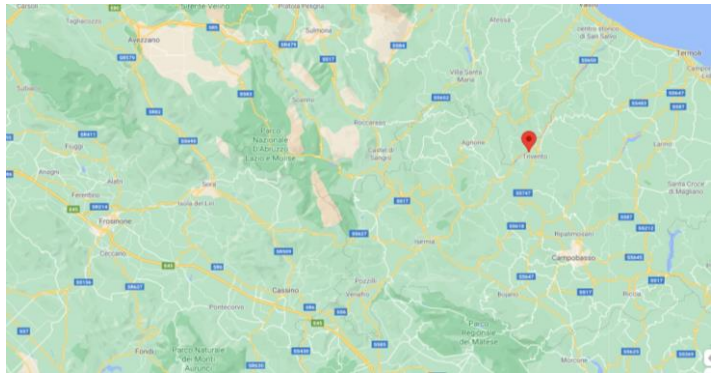
6. **IDENTIFICAZIONE DI VARIAZIONE SUI PARAMETRI MODALI IN RAPPORTO AL SET DI DATI DI RIFERIMENTO, VALUTATI NELL'ANALISI MANUALE A TEMPO «T0».**

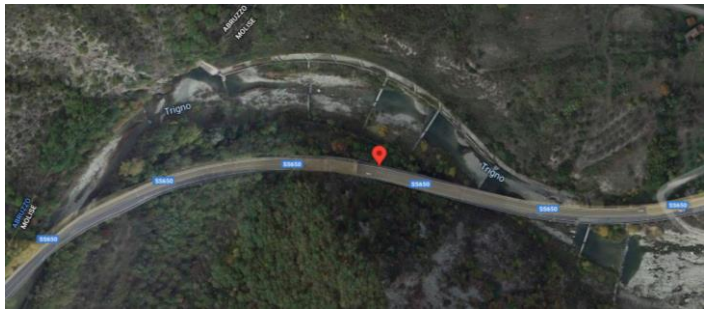
6 BIS: APPLICAZIONE DI UNA ANALISI DI REGRESSIONE SUI VALORI DELLE FREQUENZE PROPRIE IN RAPPORTO AI PARAMETRI AMBIENTALI (temperatura) AL FINE DI DECURTARE LE VARIAZIONI DOVUTE AGLI EFFETTI TERMICI. ANALISI CHE VERRA' EFFETTUATA SOLO DOPO UN PRIMO PERIODO DI OSSERVAZIONE, IN MODO DA DISPORRE DI SUFFICIENTI DATI DI TEMPERATURA RILEVATA IN CORRISPONDENZA DI CIASCUN INTERVALLO DI ACQUISIZIONE SU CUI VIENE CONDOTTA L'IDENTIFICAZIONE DINAMICA.

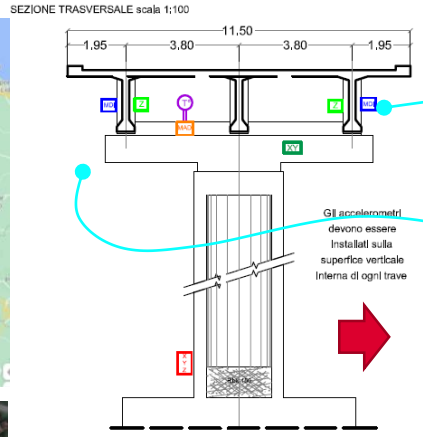
anas
GRUPPO FS ITALIANE

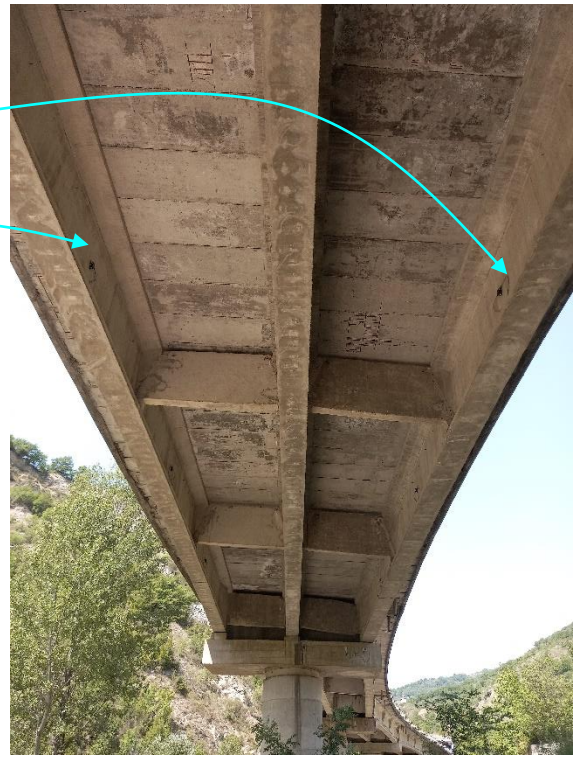
Prima installazione completata

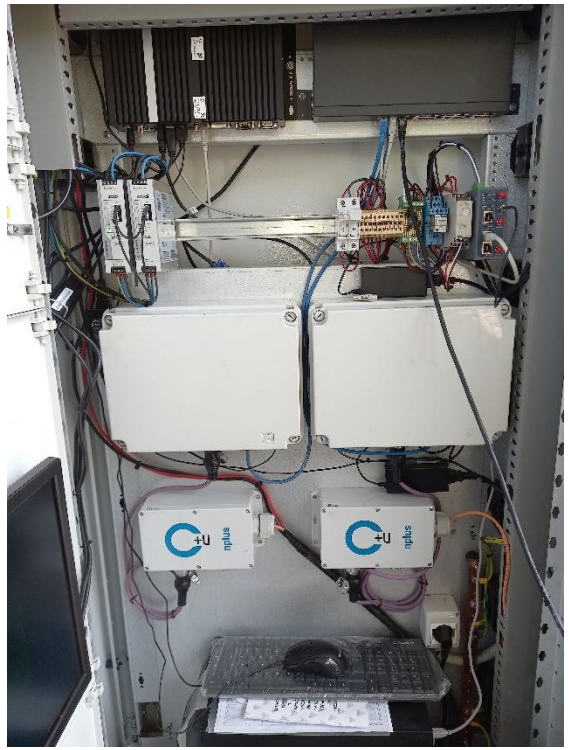
Ponte Trigno V – SS650 (AGR Molise)



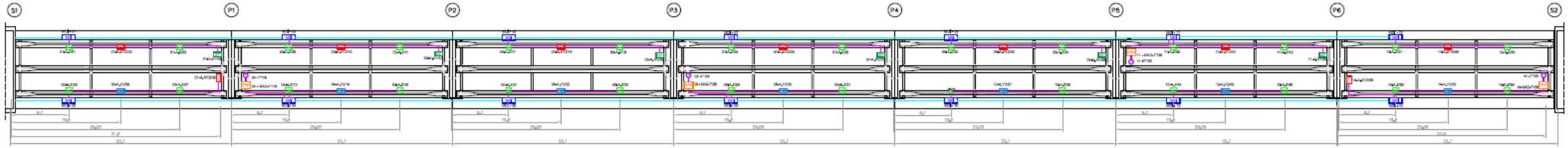








N.7 campate in cap con schema a travata appoggiata
N. 50 accelerometri mems per complessivi 81 canali di misura



LO STATO DELLA RICERCA SULLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO E LA VERIFICA DELLA SICUREZZA DEI PONTI E DEI VIADOTTI

Il monitoraggio dei ponti: aspetti applicativi

Ing. Paolo Mannella
ANAS / DOCT / AIR / PVG

Grazie per l'attenzione

Giornata di Studio
Padova, 2 settembre 2021

Settembre 2021

anas
GRUPPO FS ITALIANE

Informazione ad uso interno - Internal use information