Politecnica s.r.l

Parte "D" – Stabilità e sollecitazioni delle strutture ed Opere Civili

Programma:

– Fondamenti di scienza e tecnica delle costruzioni (4h)

– Linee in trincea, in rilevato, in galleria (2h)

– Gallerie, analisi del rischio e sistemi di protezione (2h)

Durata: 8 ore

Modalità di erogazione: FAD sincrona

Ing. Elena Di Mare, Ph.D

Aprile 2026

FONDAMENTI DI SCIENZA E TECNICA DELLE COSTRUZIONI

Aprile 2026

INDICE

1. **Analisi della tensione e Analisi della deformazione**
2. **Il comportamento dei materiali**
3. **Approfondimento sui criteri di resistenza**
4. **Progetto e verifica delle strutture**
5. **Monitoraggio dello stato di salute delle strutture (SHM)**

Obiettivi: ripercorrere i concetti della meccanica dal corpo rigido al corpo deformabile, passando per la *statica*, la *cinematica* ed i *legami costitutivi,* al fine di poter avere un quadro generale sui modelli e sugli strumenti ad oggi adoperati per studiare e valutare l'affidabilità e, dunque, la sicurezza strutturale.

MONITORAGGIO DELLO STATO DI SALUTE DELLE STRUTTURE

5

Il territorio italiano è inserito in un contesto complesso sia per l'elevata sismicità che per le diffuse problematiche idrogeologiche: tale scenario ha avuto un forte impatto nel campo dell'Ingegneria Civile e ha risvegliato l'interesse di molti del settore nell'ambito di una più consolidata conoscenza dell'**identificazione delle strutture** e dei mezzi atti a valutare quello che non a caso si definisce ***"lo stato di salute"*** della struttura.

Viadotto A19 Catania-Palermo, ***2015*** *Viadotto di Fassano, Cuneo,* ***2017*** *Ponte Morandi, Genova,* ***2018*** *Viadotto A6 Torino-Savona,* ***2019***






Da eventi che hanno comportato la perdita di vite e patrimonio, l'esigenza di approfondire le tecniche ad oggi conosciute e adoperate per studiare **come la struttura si comporta sia in casi di incipiente crisi sia in casi di apparente stabilità della stessa**.

MONITORAGGIO DELLO STATO DI SALUTE DELLE STRUTTURE

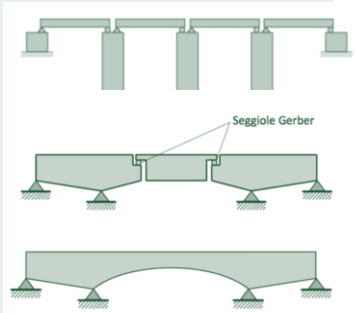
Viadotto SS16 fiume Trigno, ***2026***

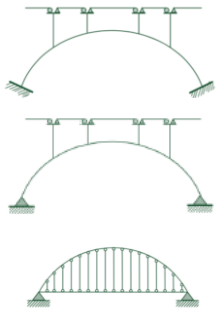


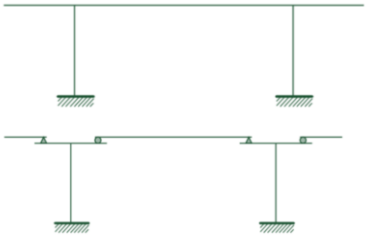
I PONTI

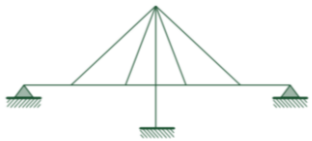
1. Classificazione in base al materiale da costruzione			
Impalcati in c.a.	Impalcati in c.a.p.	Ponti in acciaio e a struttura mista acciaio/cls	Ponti in muratura
2. Classificazione in base alla via servita			
Ponti stradali	Passerelle pedonali	Ponti ferroviari	Ponti canale
3. Classificazione in base all'ostacolo superato			
Ponti	Viadotti	Sovrappassi e sottopassi	Strade o ferrovie sopraelevate

4. Classificazione in base allo schema statico				
Ponti a travata: Semplicemente appoggiata Tipo Gerber Tipo continua	*Ponti ad arco:* Incastrato A due cerniere A tre cerniere A spinta eliminata	*Ponti a telaio:* Con piedritti verticali e/o con piedritti verticali e travi tampone	*Ponti strallati*	*Ponti sospesi*











DM 204 01.07.2022 – LLG PONTI STRADALI (1)

Tabella 4.6. – Classi di vulnerabilità in funzione di schema statico, luce e materiale (L = luce della campata più lunga).

**Con il termine "misto" si fa riferimento ad impalcati con struttura composta acciaio-c.a.*

Schema statico	Materiale	L ≤ 5 m	5 m < L < 15 m	15 m ≤ L < 25 m	L ≥ 25 m
Travate appoggiate	C.a.	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA	ALTA
	C.a.p.	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIA	MEDIO-ALTA
	Acciaio	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA
	Metallo (*Ponti storici*)	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA	ALTA
	Legno	MEDIA	MEDIO-ALTA	ALTA	ALTA
	Misto*	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA	ALTA
Travate continue / Telaio	C.a.	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA
	C.a.p.	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIA
	Acciaio	BASSA	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA
	Metallo (*Ponti storici*)	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA
	Misto*	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA
Arco massiccio	Muratura	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA
	C.a.	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIA
Arco sottile	C.a.	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIA	MEDIO-ALTA
Travate Gerber / Ponti a stampella con travi tampone	C.a.	MEDIO-ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
	C.a.p.	MEDIO-ALTA	MEDIO-ALTA	MEDIO-ALTA	ALTA
	Acciaio	MEDIA	MEDIO-ALTA	MEDIO-ALTA	ALTA
	Metallo (*Ponti storici*)	MEDIO-ALTA	MEDIO-ALTA	ALTA	ALTA
	Misto*	MEDIO-ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
Soletta appoggiata	C.a.	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA	ALTA
Soletta incastrata	C.a.	BASSA	MEDIO-BASSA	MEDIA	MEDIO-ALTA

DM 204 01.07.2022 – LLG PONTI STRADALI (2)

5

3.3 DEFINIZIONE DEGLI ELEMENTI CRITICI

L'ispezione visiva in situ e la compilazione delle schede di difettosità permette di individuare la presenza di "elementi critici", indicando con tale termine gli elementi particolarmente soggetti ai fenomeni di degrado e i cui eventuali malfunzionamenti possono incidere significativamente sul comportamento strutturale globale del ponte, ovvero gli elementi o le condizioni per i quali la presenza di uno stato di degrado avanzato è da segnalare immediatamente.

Gli elementi critici dipendono dalla tipologia strutturale del ponte in esame. A titolo di esempio, sono considerati elementi critici o condizioni critiche ai fini della determinazione della classe di attenzione strutturale e fondazionale (§ 4.2) le selle Gerber, i cavi da precompressione, quadri fessurativi molto estesi ed intensi, meccanismi di incipiente perdita di appoggio o cinematismi in atto, giunzioni di elementi chiave per la staticità del ponte, scalzamento delle fondazioni. In particolare, si sottolinea l'importanza di ispezionare visivamente gli elementi critici, laddove possibile, o altrimenti di segnalare l'impossibilità della loro ispezione diretta e quindi la mancata completa valutazione delle loro condizioni di conservazione.

Analogamente, ai fini della determinazione della classe di attenzione sismica (§ 4.3), si considerano elementi critici apparecchi di appoggio molto degradati o danneggiati, sottostrutture caratterizzate da difettosità estesa e rilevante ai fini del comportamento sismico e, ancora, meccanismi di incipiente perdita di appoggio o cinematismi in atto.

A quelli sovra citati, si aggiungono tutti gli elementi o le condizioni che, secondo il tecnico incaricato dell'ispezione, necessitano di particolare attenzione e richiedono provvedimenti immediati.

Ove l'ispezione possa non essere completa e non siano stati ispezionati elementi critici (selle Gerber, appoggi, cavi di precompressione, fondazioni scalzate, ecc.), questo va segnalato all'atto di classificazione dell'opera. Il gestore dovrà riclassificare l'opera a seguito di un'ispezione speciale tesa alla valutazione dello stato di conservazione di tali elementi.

DM 204 01.07.2022 – LLG PONTI STRADALI (3)

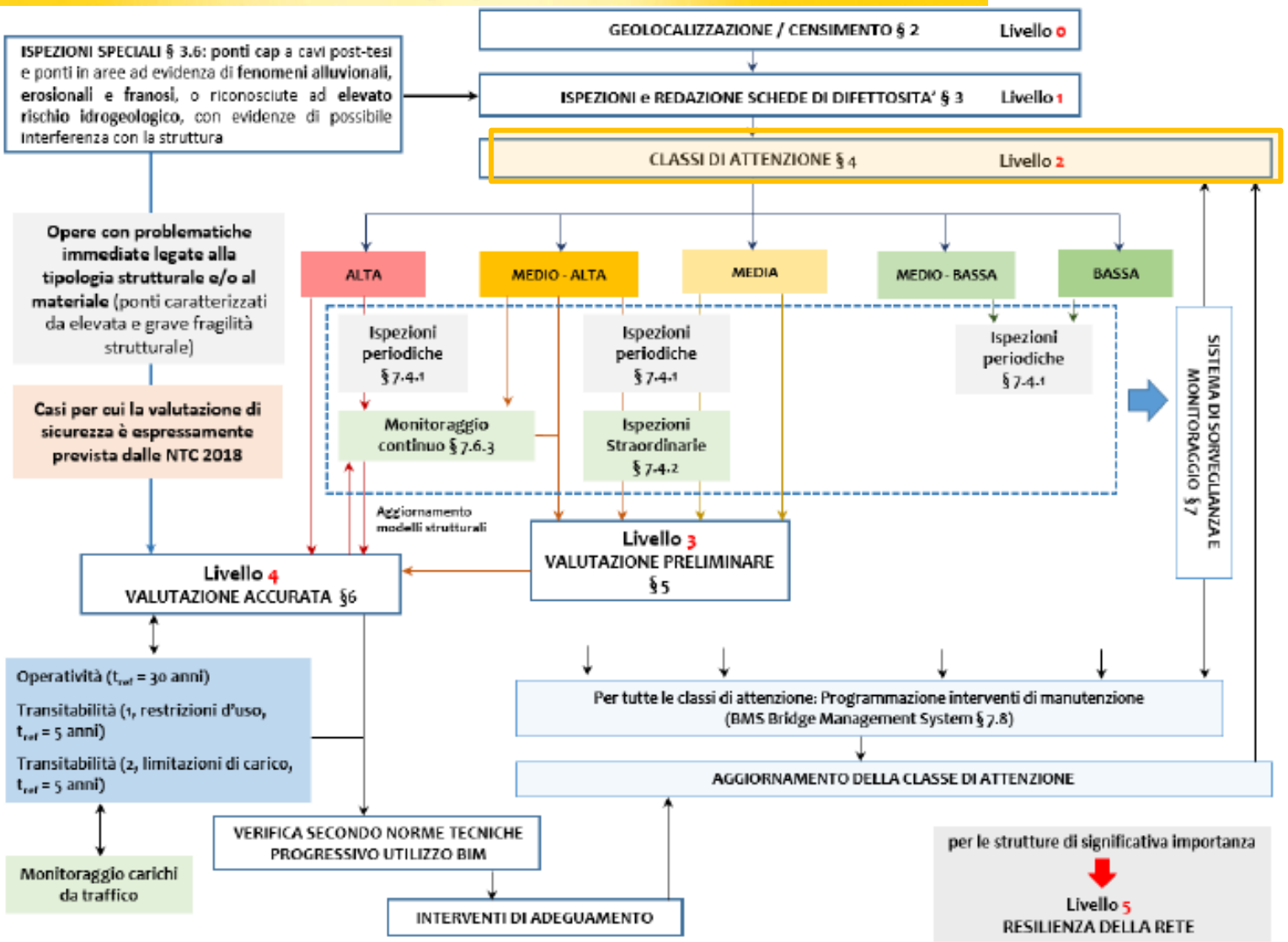


Figura 1.1 – Approccio multilivello e relazioni tra i livelli di analisi

DIFETTI NEI PONTI

I fenomeni di degrado da rilevare in sede di ispezione possono essere classificati in funzione del materiale che caratterizza l'elemento strutturale oggetto di interesse. Ad es., le **schede difettologiche** allegate alle LL.G. Ponti sono divise in macro-gruppi secondo la seguente suddivisione:

- **Acciaio o Metallo**
- **Muratura**
- **C.a./C.a.p.**
- **C.a.p.**
- **Legno**

In aggiunta si trovano schede riferite a:

- **Difetti generici**, riscontrabili su tutti i materiali sopra elencati
- **Apparecchi di appoggio**
- **Rilevati e Fondazioni**
- **Giunti**
- **Elementi accessori**

SOTTOPASSO SCATOLARE IN C.A. (1)



Fessurazione verticale e macchie umidità attiva





Fessurazione verticale e macchie umidità attiva



Vista dall'esterno: Rotazione di intera porzione di parete



Ossidazione armature ed efflorescenze

DIFETTI RISCONTRATI (1)



- Umidità attiva

Il difetto si presenta con **aree di colorazione diversa dal materiale integro**. In particolare, si tratta di tracce di calcio rilasciate sulla superficie dall'umidità penetrata attraverso il calcestruzzo. **A differenza delle macchie di <u>umidità passiva</u>, l'umidità attiva è legata a fenomeni di infiltrazione di acqua tutt'ora in corso** e si presenta con macchie di colore scuro dovuto al contatto continuo con l'acqua e l'umidità.

CAUSE	FENOMENI DI DEGRADO CORRELATI
La penetrazione di umidità e di acqua meteorica attraverso il materiale è favorita in presenza di: - materiali caratterizzati da *elevata porosità*; - mancanza o carenze nel *sistema di impermeabilizzazione*; - *sistemi di convogliamento delle acque* assenti, inadeguati o danneggiati; - *imperfetta tenuta dei giunti*; - *scossaline assenti o deteriorate*	Il progredire di tale fenomeno di degrado potrebbe comportare l'innescarsi di **fenomeni di dilavamento e di ammaloramento del calcestruzzo**, nonché **possibili distacchi di copriferro** con conseguente esposizione delle armature. Tale difetto è diverso da altri fenomeni, quali le tracce di scolo, dovuti a scorrimenti superficiali di acqua.

SOTTOPASSO A SOLETTA INCASTRATA IN C.A. (2)



Umidità attiva ed efflorescenze



Impalcato, cordolo: cls dilavato



Umidità attiva ed efflorescenze



Ossidazione armatura





Cls rigonfio, ossidazione armatura



Umidità e lesioni a ragnatela



DIFETTI RISCONTRATI (2)



- Calcestruzzo dilavato/ammalorato

Il dilavamento e/o l' ammaloramento del calcestruzzo sono dovuti alla percolazione di acque superficiali e si manifesta prevalentemente sulle superfici verticali o inclinate degli elementi. Per **dilavamento** si intende l'erosione dello strato superficiale di materiale dovuto al passaggio frequente di acqua, mentre con il termine **ammaloramento** ci si riferisce ai fenomeni di rigonfiamento superficiale del calcestruzzo, scagliamento, perdita di coesione.

CAUSE	FENOMENI DI DEGRADO CORRELATI
Sono generati o esaltati dalla presenza di ambiente umido e calcestruzzi particolarmente porosi. Generalmente il difetto è conseguente a mancanze/carenze nel sistema di convogliamento delle acque meteoriche (si rileva in corrispondenza di scarichi corti o danneggiati). Il degrado per ammaloramento è inoltre dovuto a fenomeni di carattere chimico sulle armature (**carbonatazione del copriferro o attacco di cloruri**) o fisici (**cicli di gelo e disgelo**).	I fenomeni di dilavamento e di ammaloramento del calcestruzzo **rappresentano l'evoluzione delle macchie di umidità e delle tracce di scolo**. Il loro progredire può portare ad una **riduzione della sezione resistente del calcestruzzo, pericolosa se si sviluppa su elementi strutturali primari**.

LA DURABILITÀ DEL CALCESTRUZZO



Il cls in condizioni standard ha PH 13 (basico >7)

↓

Film passivo

La passività viene distrutta da:

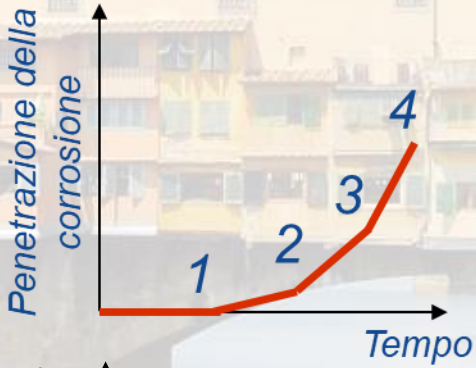
- Carbonatazione da cls → corrosione da carbonatazione

$$CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$$

1. Innesco
2. Fessurazione

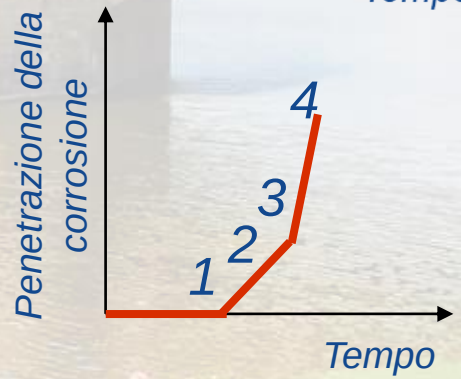
---

3. Distacco
4. Collasso



- Presenza di cloruri → corrosione da cloruri

Quando il tenore dei cloruri supera lo 0,4% rispetto al peso del cemento, rompono il film passivo dando luogo in presenza di O_2 e H_2O a corrosione in genere localizzata (*pitting*)



SOTTOPASSO A TRAVATE APPOGGIATE IN C.A./C.A.P. (3)



Ossidazione staffe trave in c.a.p. dell'impalcato



Impalcato, cordoli: Efflorescenze





Umidità attiva e venute d'acqua



Testate dei tiranti ossidate e venute d'acqua

DIFETTI RISCONTRATI (3)



- **Armatura scoperta/ossidata testate**

Il fenomeno si riferisce allo scoprimento delle armature, sia longitudinali che trasversali, in corrispondenza delle testate degli elementi in c.a.p e la loro conseguente ossidazione.

CAUSE	FENOMENI DI DEGRADO CORRELATI
Le cause del distacco dello strato di ricoprimento delle armature sono imputabili a fenomeni chimici e fisici, quali il deterioramento del calcestruzzo causato dall'azione dell'acqua e dell'umidità e la carbonatazione, favorita dalla presenza di calcestruzzi porosi in ambienti aggressivi, ma anche ad errori in fase di esecuzione, quali spessori di copriferro molto esigui o scarso interferro, o a cause accidentali, quali l'urto di automezzi.	Generalmente è associato a fenomeni di dilavamento/ ammaloramento del calcestruzzo che favoriscono il distacco di copriferro. Il difetto è specifico delle zone di estremità degli elementi.

DIFETTI RISCONTRATI (3)



- **Fili aderenti in vista ossidati**

Il difetto si riferisce all'esposizione dell'armatura di precompressione di elementi in c.a.p a cavi aderenti e alla loro conseguente ossidazione.

CAUSE	FENOMENI DI DEGRADO CORRELATI
L'ossidazione delle armature è evidente nel caso di distacco di calcestruzzo, laddove esso sia particolarmente ammalorato a causa dell'azione erosiva delle acque meteoriche. Il distacco di copriferro e la conseguente esposizione dell'armatura è più probabile nel caso di materiale di scarsa qualità.	Il fenomeno si concentra in corrispondenza di zone di cls dilavato/ammalorato. La sua evoluzione può causare la corrosione dei fili e quindi la riduzione dell'armatura di precompressione. Per le caratteristiche stesse della tecnologia di precompressione a cavi aderenti, tale difetto si manifesta raramente, salvo situazioni particolari.

VIADOTTO CON SELLE GERBER IN C.A. (4)

Il viadotto presenta un intervento di rinforzo strutturale mediante apposizione di staffe di acciaio inox





Scarichi danneggiati





Ammaloramento sella Gerber



Particolare ammaloramento sella Gerber





Armatura ossidata e/o corrosa (!!!)

PONTE AD ARCO-TELAIO (A CAVALLETTO) MISTO ACCIAO E C.A. (5)

Campata centrale, impalcato avvallamento predalles, probabilmente a causa del getto del cls dell'impalcato / Impalcato Campata 1 umidità







Particolare spalla e cerniere





Umidità attiva

Spalla 1/ Cerniere Pila 1





VIADOTTO A TRAVATA CONTINUA MISTO ACCIAO E C.A. (6)

Il viadotto è dotato di passerella pedonale all'intradosso





Giunto permeabile e rotto in estradosso



Particolare spalla: umidità attiva, vespaio ed espulsione del cls





Appoggio sx



Appoggio dx (multidirezionale) montato al contrario





Corrosione travi in acciaio

DIFETTI RISCONTRATI (6)



- **Corrosione**

Gli acciai comuni reagiscono con l'ambiente formando una superficie contenente ossido di ferro. Questa superficie è estremamente porosa e consente al processo elettrochimico di ossidazione di evolversi, penetrando nell'acciaio e corrodendone la superficie, riducendo progressivamente la sezione fino alla perforazione del metallo stesso. I tipi di corrosione più pericolosi sono solitamente quelli localizzati, in quanto possono creare cricche, fori, fessurazioni.

CAUSE	FENOMENI DI DEGRADO CORRELATI
Le principali sono: - deterioramento della protezione del metallo (verniciatura/zincatura) - presenza di umidità o ristagni d'acqua - scarsa manutenzione - presenza di correnti vaganti o soluzioni saline (ambiente marino, soluzioni antigelo, ambiente industriale)	La corrosione è dovuta al contatto del materiale con l'acqua e l'umidità, per cui è spesso correlata all'assenza di un adeguato sistema di convogliamento delle acque, alla presenza di **ristagni d'acqua** e all'esposizione del materiale a seguito di **sfogliamento** della vernice. Essa è la fase successiva del fenomeno di ossidazione, che si limita agli strati più superficiali degli elementi.

DIFETTI RISCONTRATI (6)



- **Ossidazione**

È un fenomeno elettrochimico in cui il ferro (Fe) contenuto nell'acciaio reagisce con l'ossigeno dell'atmosfera formando sulla superfice ossidi più o meno aderenti. A seconda dello stadio di evoluzione del fenomeno, esso si presenta come:

- ossidazione superficiale omogenea;
- rigonfiamento della superficie esterna;
- corrosione puntiforme (vaiolatura).

CAUSE	FENOMENI DI DEGRADO CORRELATI
L'ossidazione è essenzialmente causata dal contatto del materiale con l'ambiente esterno, per cui è favorita nel caso in cui la protezione del metallo sia mancante o deteriorata e in presenza di alte percentuali di umidità. Ulteriori cause possono essere la presenza di correnti vaganti o di soluzioni saline (ambiente marino, soluzioni antigelo, ambiente industriale).	L'ossidazione è dovuta al contatto del materiale con l'acqua e l'umidità, per cui è spesso correlata all'assenza di un adeguato sistema di convogliamento delle acque, alla presenza di **ristagni d'acqua** e all'esposizione del materiale a seguito di **sfogliamento** della vernice. Essa è la fase precedente del fenomeno di corrosione, il quale può manifestarsi nel caso in cui non si contrasti opportunamente la sua evoluzione.

DIFETTI RISCONTRATI (6)



- **Vespai**

I vespai o nidi di ghiaia sono difetti molto evidenti che compromettono la continuità superficiale del calcestruzzo. Possono interessare zone estese o essere localizzati in zone limitate della superficie degli elementi strutturali. Essi comportano la presenza di zone non omogenee sulle superfici degli elementi a causa dell'esposizione degli inerti più grossi di calcestruzzo, che, nei casi più gravi, sono asportabili manualmente.

CAUSE	FENOMENI DI DEGRADO CORRELATI
Generalmente le cause di tale fenomeno risalgono a problemi in fase di esecuzione sono infatti frequenti nel caso di calcestruzzi mal confezionati, con granulometria e/o mix design inadeguati, nel caso di getti male eseguiti, con insufficiente vibratura, o a causa della segregazione degli inerti dovuta ad insufficiente altezza di getto o per casseri mal sigillati.	In corrispondenza dei vespai c'è un notevole aumento di permeabilità del calcestruzzo dovuto alla presenza di vuoti tra gli inerti, che facilita la penetrazione di agenti aggressivi. Essi pertanto sono spesso associati ad altri fenomeni di degrado, quali **ossidazione e/o corrosione** delle armature e delle staffe. I vespai non devono essere confusi con i vuoti che spesso si trovano al di sotto delle barre di armature a causa di interferri troppo esigui che non permettono il passaggio degli inerti e quindi il completo ricoprimento delle barre con il calcestruzzo.

DIFETTI RISCONTRATI (6)



- **Preregolazione Sbagliata**

Il difetto si riferisce all'errato funzionamento o ad un funzionamento diverso da quello previsto degli apparecchi di appoggio, dovuto a regolazioni originarie non corrette. Non è facilmente individuabile, ma la sua presenza si può dedurre da altri fenomeni, quali una deformazione eccessiva dell'apparecchio di appoggio.

CAUSE	FENOMENI DI DEGRADO CORRELATI
L'origine del difetto è da ricercare nella fase di messa in opera, in quanto esso è dovuto o a posizionamenti originari non corretti o ad apparecchi posizionati senza considerare i fenomeni a lungo termine che ne possono condizionare il funzionamento, quali temperature troppo basse o troppo alte, la viscosità del calcestruzzo, ecc.	Una preregolazione sbagliata potrebbe far insorgere altri difetti tipici degli apparecchi quali **schiacciamento/fuoriuscita delle lastre di piombo**, **fuori piombo permanente dei rulli** o **fuori sede dei rulli**. Mal funzionamenti degli apparecchi possono essere causa di **danni causati dagli apparecchi di appoggio** sugli elementi che essi collegano.

DIFETTI RISCONTRATI (6)



- **Deformazione/rottura elementi di continuità**

Il difetto si riferisce alla presenza di irregolarità superficiali o, nei casi più gravi, di lesioni, rotture, distacchi o porzioni mancanti sugli elementi di continuità dei giunti, quali profilati in neoprene, mattonelle in neoprene armato, pettini metallici, ecc…

CAUSE	FENOMENI DI DEGRADO CORRELATI
La deformazione e/o la rottura degli elementi di continuità è dovuta al deterioramento dei materiali o alla non corretta posa degli elementi. Talvolta può essere indicativa di movimenti di fondazione.	Talvolta si trova in contemporanea con il dislivello giunto pavimentazione e con altri difetti tipici di tale elemento, quali distacchi massetti e dislivello tra elementi contigui. Inizialmente si presenta come deformazione degli elementi, ma la sua evoluzione può portare alla rottura degli stessi. Può essere indicativa di movimenti di fondazione

SCALZAMENTO FONDAZIONI (7)









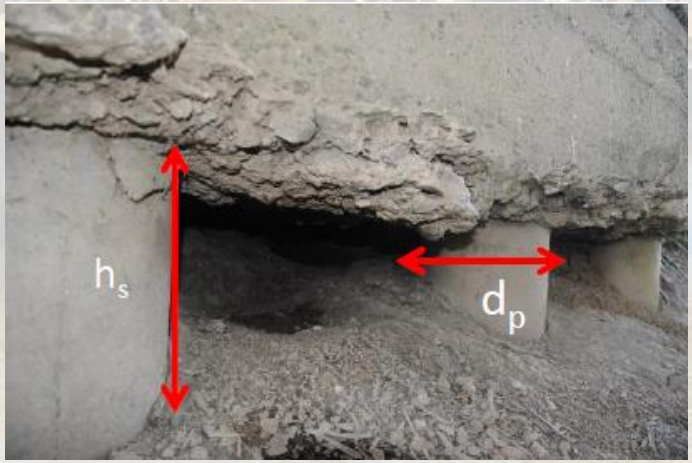


DIFETTI RISCONTRATI (7)



- **Scalzamento fondazioni**

Tale difetto deve essere indicato qualora siano visibili parti delle fondazioni, sia che esse siano dirette o indirette, a causa dell'abbassamento della quota del terreno che le circonda. Per quanto concerne le fondazioni dirette, se si verifica il fenomeno, sia l'estensione sia l'intensità sono pari ad 1. Per quanto riguarda le fondazioni su pali la valutazione del coefficiente di estensione è sempre pari ad 1 mentre l'intensità dello scalzamento può essere correlata all'altezza dello scalzamento (h_s) rispetto al nuovo piano di campagna e al diametro dei pali (d_p).





DIFETTI RISCONTRATI (7)



- **Scalzamento fondazioni**

CAUSE	FENOMENI DI DEGRADO CORRELATI
Lo scalzamento può derivare dall'erosione del letto e delle sponde dell'alveo o del rilevato di approccio, causata da fenomeni meteorologici o dal trasporto solido dei corsi d'acqua, dall'abbassamento dell'alveo per variazioni nella direzione della corrente, o da escavazioni artificiali. Tali fenomeni sono favoriti in assenza di una corretta progettazione degli elementi, in particolare di una quota di imposta della fondazione non abbastanza profonda, o in presenza di pile con forma e orientamento inadeguati.	Nel caso in cui lo scoprimento delle fondazioni non è uniforme, la presenza di scalzamento può essere indice di movimenti indesiderati della fondazione, quali rotazione longitudinale e rotazione trasversale.

PONTE AD ARCO MASSICCIO MISTO C.A./MURATURA (8)

Lesione verticale in dx e lesione longitudinale in volta / Fessurazione longitudinale dall'imposta













Estradosso del ponte: Assenza di dispositivi di ritenuta e presenza di parapetti ossidati

Chiavi a paletto



Sbalzo: vespai ed armatura esposta ed ossidata

DIFETTI RISCONTRATI (8)



- **Fessure verticali**

Ci si riferisce a fessure ad andamento prevalentemente verticale su pile, spalle e timpani. Esse possono seguire un andamento a zig zag lungo i giunti di malta delle murature a blocchi, oppure avere un andamento continuo, tagliando i blocchi stessi, siano essi in pietra o in laterizio. A volte possono presentarsi come un insieme di piccole fessure ravvicinate in questo caso deve esserne analizzata nel dettaglio la geometria.

CAUSE	FENOMENI DI DEGRADO CORRELATI
Le fessure verticali in generale si localizzano in presenza di discontinuità geometriche o del materiale e possono essere dovute a: - cedimenti differenziali delle fondazioni - cedimenti/rotazioni delle strutture di contenimento - collasso per schiacciamento della muratura in particolare su pile/spalle molto alte o molto caricate	La presenza di lesioni facilita le infiltrazioni di acqua e degli agenti aggressivi attraverso il materiale, per cui potrebbero favorire la presenza di **macchie di umidità e/o dilavamento** della muratura. Il difetto non deve essere confuso con altri tipi di stati fessurativi, quali **fessure orizzontali**, **diagonali** o **distacchi di interi elementi strutturali** (distacco del timpano nei ponti ad arco), né con la **polverizzazione** dei corsi di malta.

DIFETTI RISCONTRATI (8)



- **Fessure longitudinali**

Questo tipo di difetto è riferito a fessure ad andamento circonferenziale che si presentano all'intradosso dell'arco, che quindi seguono l'andamento longitudinale dell'asse stradale. Le fessure possono interessare sia i giunti di malta sia gli elementi lapidei o di laterizio, che costituiscono la tessitura muraria.

CAUSE	FENOMENI DI DEGRADO CORRELATI
Le fessure longitudinali trovano spesso origine per: - cedimenti differenziali delle fondazioni in direzione trasversale - condizioni di carico fortemente sbilanciate (tracciati curvilinei) - discontinuità del manufatto con volte realizzate a settori affiancati. In prossimità dei bordi dell'arco possono essere associate al distacco del timpano.	La presenza di lesioni facilita le infiltrazioni di acqua e degli agenti aggressivi attraverso il materiale, per cui potrebbe favorire la presenza di **macchie di umidità e/o dilavamento** della muratura. Il difetto non deve essere confuso con altri tipi di stati fessurativi, quali **fessure orizzontali, verticali** o **diagonali** che sono tipici di elementi verticali quali pile, spalle e timpani, e **fessure trasversali** che si sviluppano sull'arco ma lungo la direzione ortogonale.

DM 204 01.07.2022 – LLG PONTI STRADALI (3)

5

7.6.3 MONITORAGGIO PERMANENTE O CONTINUO

L'adozione di una strategia di monitoraggio permanente, in cui il sistema hardware/software è concepito per rimanere operativo per lunghi periodi sino a coprire tutta la vita di servizio di una struttura, realizza compiutamente gli scopi dello *Structural Health Monitoring* e dell'integrazione a scala completa con le attività di sorveglianza. Esso è tuttavia più complesso e richiede idonee e specifiche procedure operative di gestione e di qualificazione del personale coinvolto.

Il monitoraggio continuo, con sistemi installati permanentemente, è raccomandabile nei seguenti casi:

- Ponti strallati o sospesi e ponti di grande luce (> 200 m).
- Ponti con campate di luce superiore ai 50 m in c.a.p. realizzati da più di 40 anni.
- Ponti con difficoltà di ispezione (travate a cassone e pile non ispezionabili) in c.a.p. o acciaio.
- Ponti con soluzioni strutturali innovative.
- Ponti di rilevanza storica.
- Ponti in ambienti critici, caratterizzati da elevati carichi da traffico (ad esempio frequente transito di trasporti eccezionali), con problematiche di fatica, in zone ad alto rischio sismico o con situazioni al contorno critiche, quali rischio inondazioni e frane elevato o ponti per i quali possono avere grande rilevanza fenomeni accidentali, quali urti o simili (per i quali, evidentemente, la Classe di Attenzione è evoluta o può evolvere in senso negativo, sino alla CdA Medio-Alta o Alta).

Le applicazioni più tipiche sono: monitoraggio sismico, monitoraggio geotecnico, monitoraggio idraulico, monitoraggio dei versanti naturali e artificiali coinvolgenti ponti.

STRUCTURAL HEALTH MONITORING (SHM)

5

Il termine identifica **tecniche d'indagine** sullo "stato di salute" dei manufatti, ossia tecniche capaci di individuare in tempo reale eventuali **danni** e seguirne l'**evoluzione**.

- Determinare le **caratteristiche modali**
- Diagnosticare il **livello di danneggiamento** della struttura
- Prevedere la **risposta strutturale** di una struttura sottoposta a sollecitazioni

MONITORAGGIO

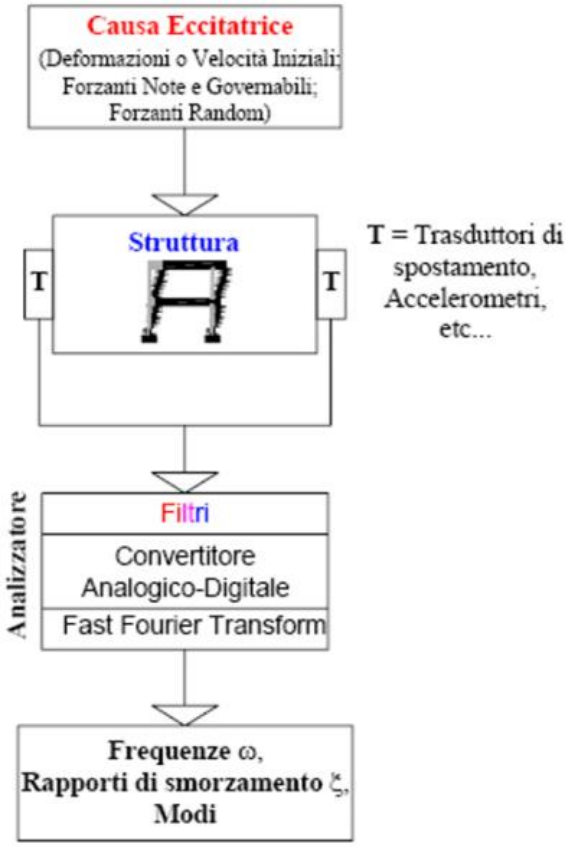


STRUCTURAL HEALTH MONITORING (SHM)

L'**identificazione dinamica** si presenta come una tecnica d'indagine **non distruttiva**, in grado di fornire informazioni a livello globale o locale del comportamento (**risposta**) o stato (**livello di danneggiamento**) della struttura.

- **Frequenze proprie**
- **Modi di vibrare**
- **Smorzamento**

RISPOSTA DINAMICA DI UNA STRUTTURA



MONITORAGGIO → **IDENTIFICAZIONE DINAMICA**

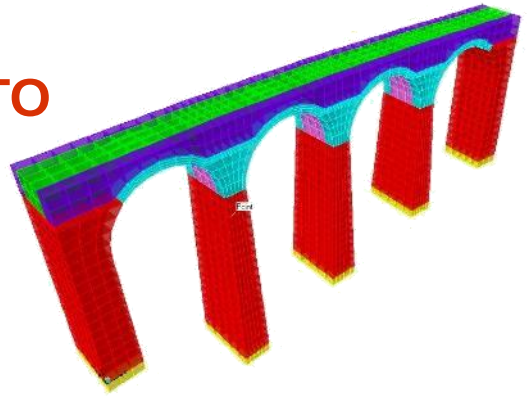
STRUCTURAL HEALTH MONITORING (SHM)

5

Monitoraggio, **Identificazione** e **Modellazione** costituiscono tre fasi tra loro interconnesse di un'analisi dinamica sviluppata su una generica struttura, al fine di individuare il suo comportamento dinamico.

- **Masse e rigidezze**
- **Geometria**
- **Condizioni al contorno**

COMPORTAMENTO DINAMICO



MONITORAGGIO → **IDENTIFICAZIONE DINAMICA** → **MODELLAZIONE**

LE TECNICHE PER IL MONITORAGGIO DELLE STRUTTURE

5

Per determinare il comportamento dinamico delle strutture due sono i possibili approcci:

1) L'**approccio analitico** (**problema diretto**): partendo dalla conoscenza della geometria della struttura, delle condizioni al contorno e delle caratteristiche dei materiali, la distribuzione di massa, rigidezza e smorzamento della struttura è espressa tramite matrici di massa, rigidezza e smorzamento; da qui è possibile, risolvendo un problema agli autovalori, pervenire alla determinazione dei parametri modali del sistema (frequenze naturali, fattori di smorzamento e forme modali)

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}$$

2) L'**approccio sperimentale** (**problema inverso**): partendo dalla misura dell'input dinamico sulla struttura e della risposta strutturale, si calcolano le funzioni di risposta in frequenza e si stimano, a partire da esse, i parametri dinamici della struttura.

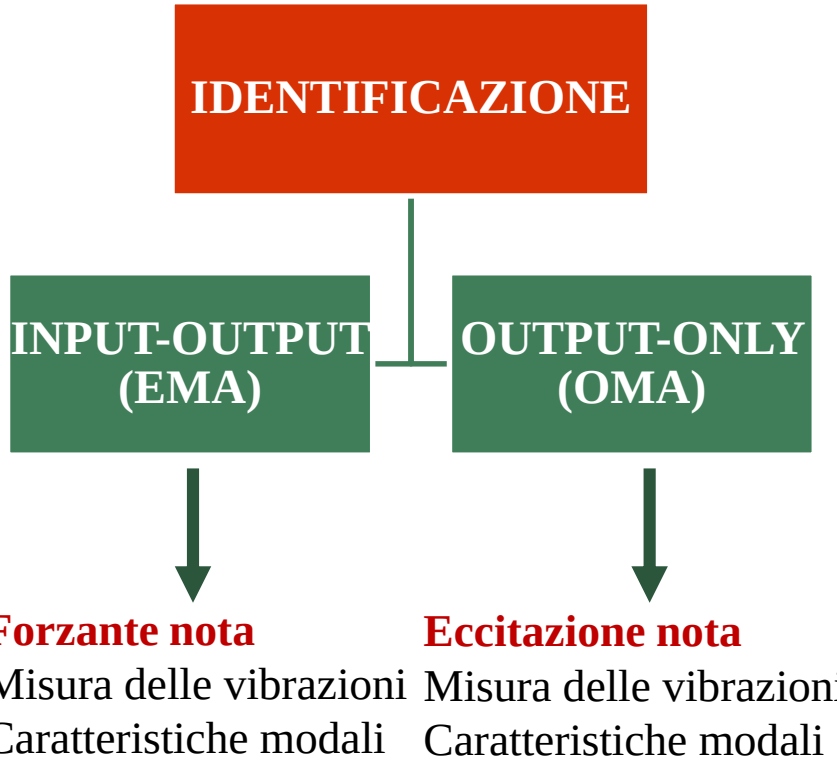
LE TECNICHE PER IL MONITORAGGIO DELLE STRUTTURE

5

Possiamo individuare tipologie differenti di identificazione in base alla conoscenza dell'**input** e dell'**output**:

L'**Analisi Modale Operazionale** (**OMA**) rappresenta un importante metodo che consente di determinare le proprietà dinamiche della struttura nelle condizioni reali di esercizio anche nel caso di input incognito;

La determinazione del comportamento dinamico di sistemi lineari mediante prove sperimentali è detta **Analisi Modale Sperimentale** (**EMA**): si tratta dunque di procedure di identificazione da cui si ottengono le proprietà dinamiche della struttura. Le procedure di analisi modale sperimentale, tuttavia, sono basate su un input noto: le strutture, infatti, vengono solitamente eccitate sfruttando una o più sorgenti di eccitazione; si procede, poi, a misurare la risposta strutturale in uno o più punti.

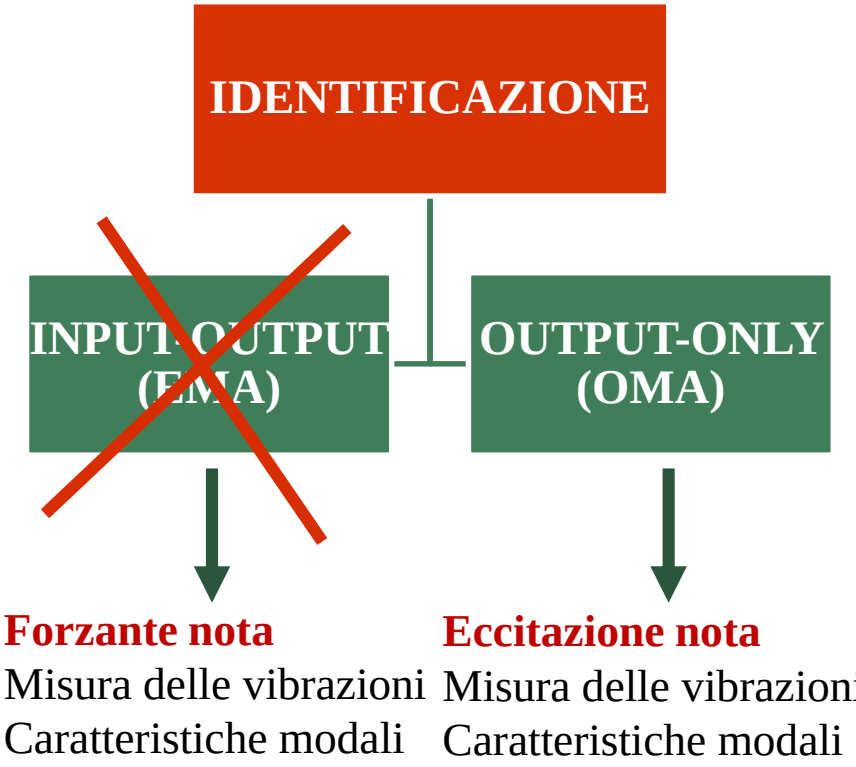


LE TECNICHE PER IL MONITORAGGIO DELLE STRUTTURE

5

Si evidenziano in una serie di **vantaggi dell'OMA sull'EMA**:

1) La prova è veloce ed economica;
2) Le misure vengono effettuate nelle reali condizioni operative della struttura;
3) Si acquisiscono così i parametri indicativi del comportamento dinamico del manufatto nelle sue reali condizioni di esercizio;
4) La prova non interferisce con l'accessibilità della struttura.



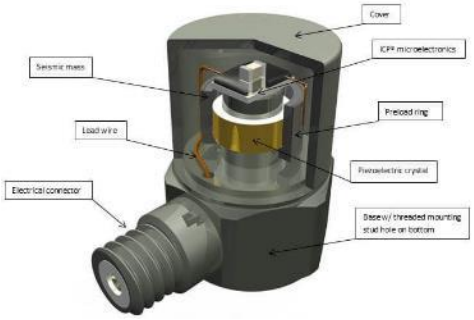
LE TECNICHE PER IL MONITORAGGIO DELLE STRUTTURE

Tradizionali: in genere, si usano gli accelerometri sia per le loro ridotte dimensioni sia perché le altre grandezze possono essere ottenute con semplici procedimenti di integrazione dall'accelerazione.

*Installazione di **numerosi sensori** + **cablaggio**;*
*Tecnica **da contatto**.*

Innovative: interferometria radar con l'utilizzo del sistema IBIS permette di misurare lo spostamento.

***Rapidità** di installazione ed acquisizione dei dati;*
***Elevata risoluzione** spaziale e temporale di campionamento;*
*Tecnica **a distanza**.*



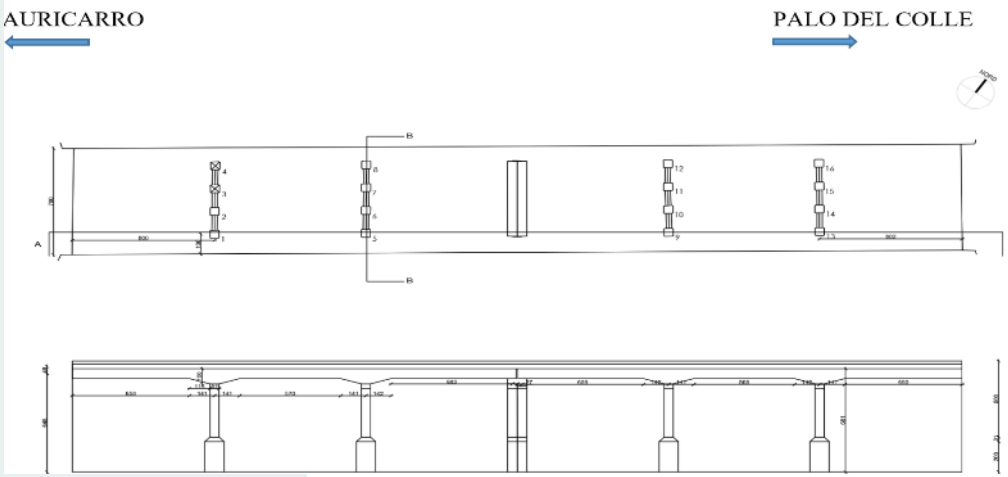
Accelerometro piezoelettrico



Interferometria radar terrestre

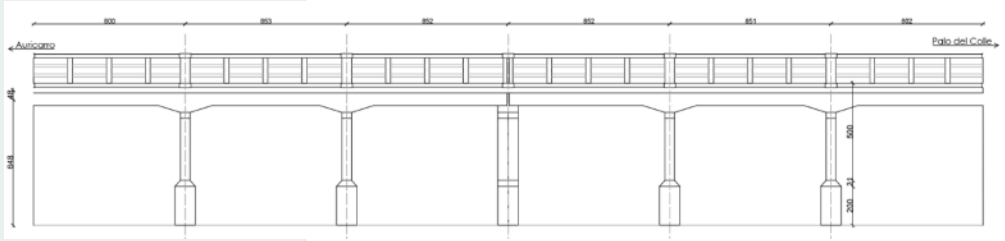
CASO DI STUDIO

5



Rilievo del ponte: Pianta e sezione A-A



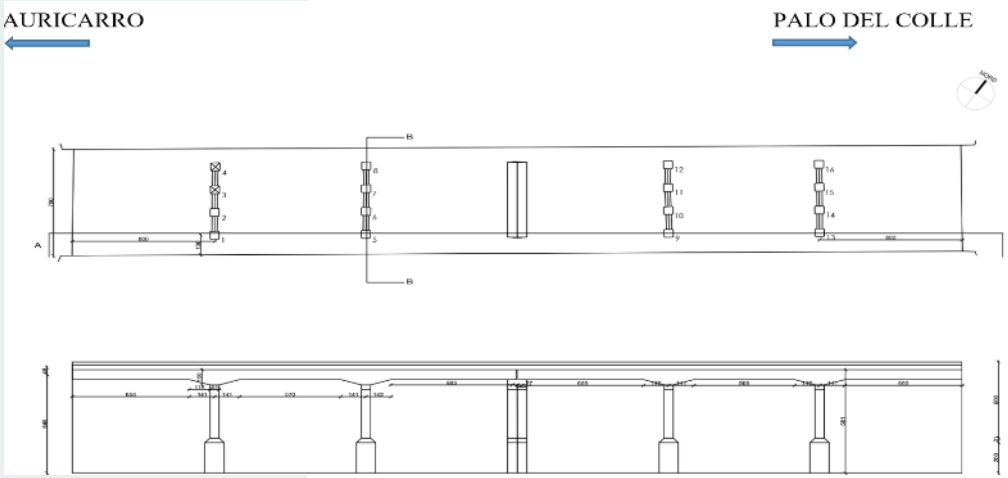


Prospetto quotato del ponte

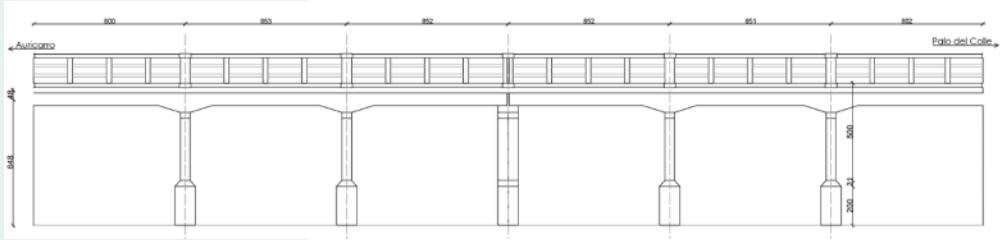


CASO DI STUDIO

5



Rilievo del ponte: Pianta e sezione A-A



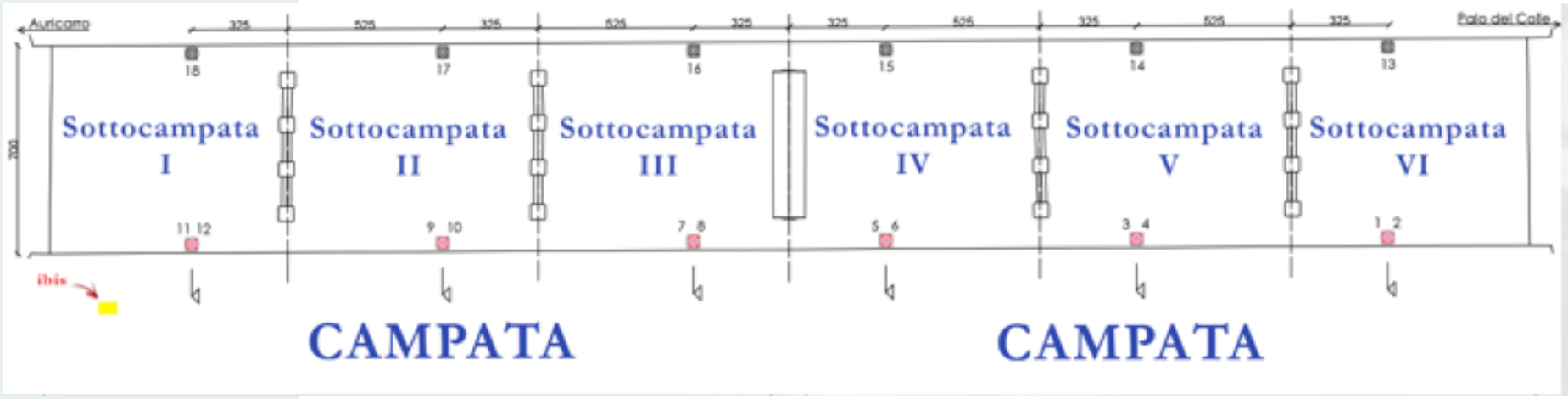
Prospetto quotato del ponte





SETUP SPERIMENTALE

5







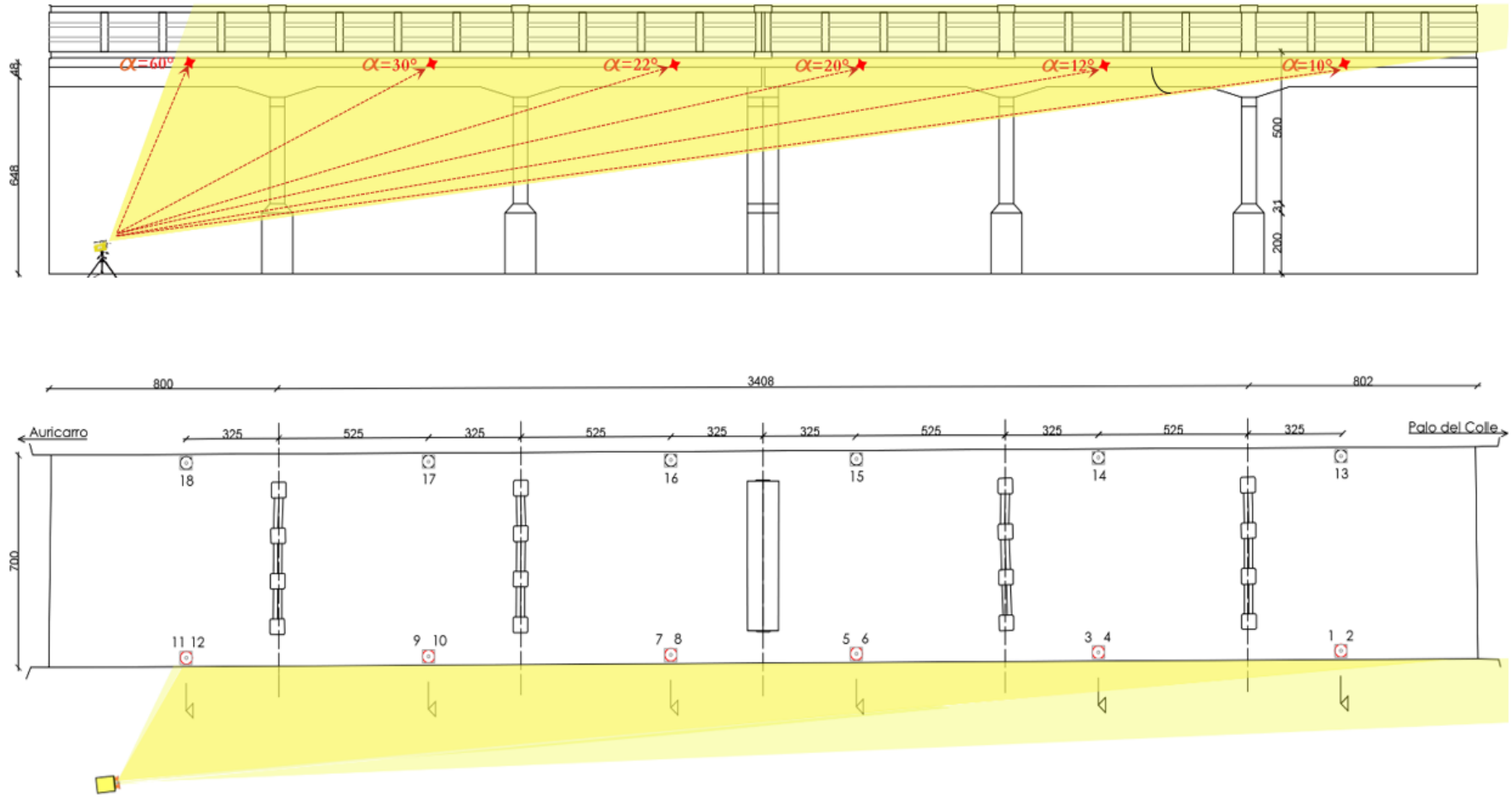






SETUP SPERIMENTALE

5



MONITORAGGIO DINAMICO DEL PONTE

5

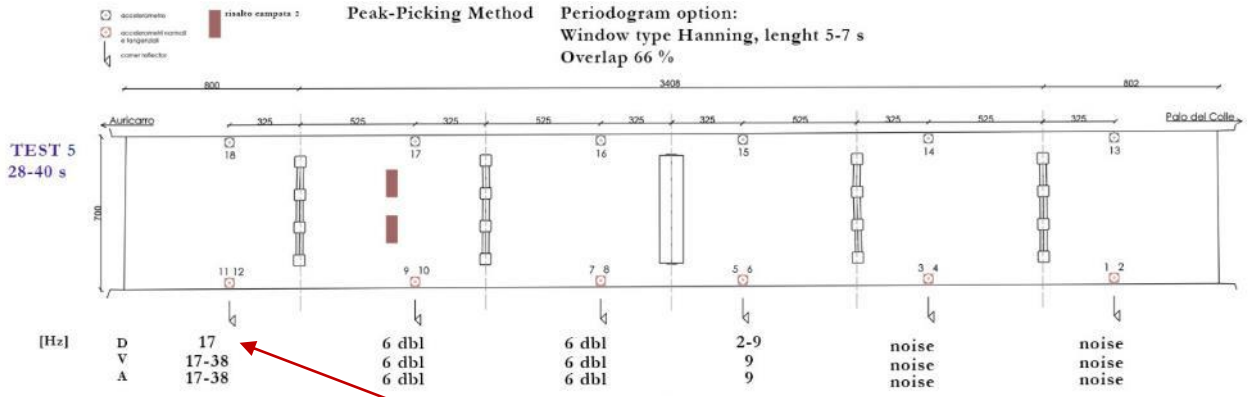


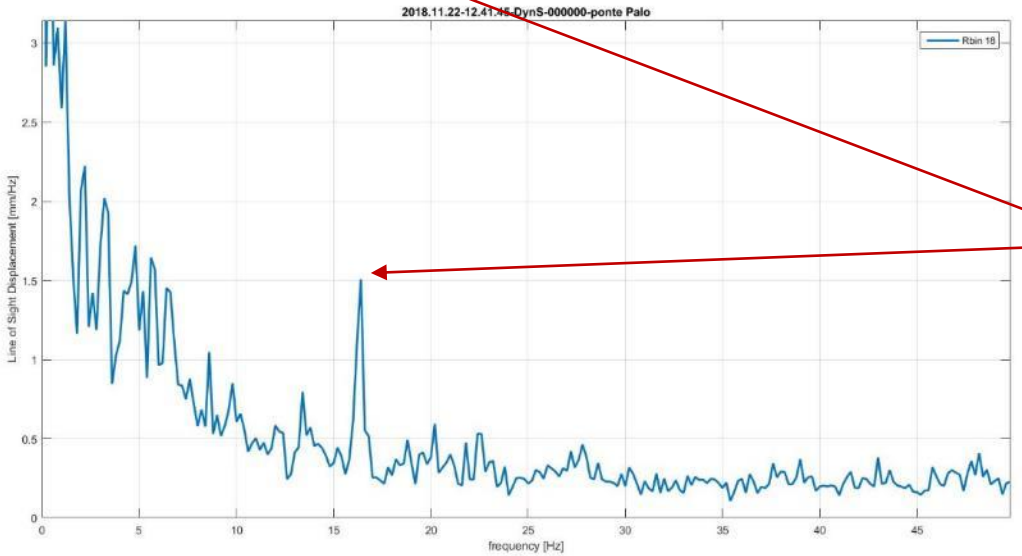
Posizionamento risalto	Prima misura	Seconda misura
Campata 1	Test 2, ore 12:10	Test 3, ore 12:20
Campata 2	Test 5, ore 12:38	Test 5bis, ore 12.41
Campata 3	Test 6, ore 14:16	Test 7, ore 14:20
Campata 4	Test 8, ore 14:26	Test 9, ore 14:29
Campata 5	Test 10, ore 14:33	Test 11, ore 14:35
Campata 6	Test 12, ore 14:39	Test 13, ore 14:41

MONITORAGGIO DINAMICO DEL PONTE

5

TECNICA INTERFEROMETRICA

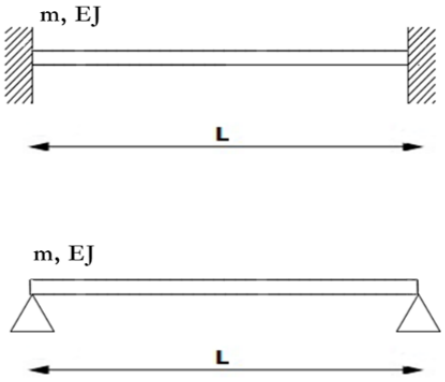


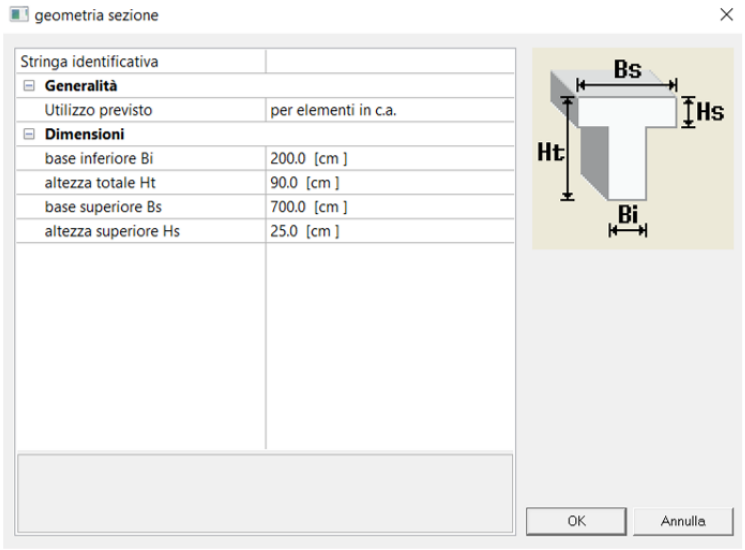


17 Hz

RIELABORAZIONE DEI DATI

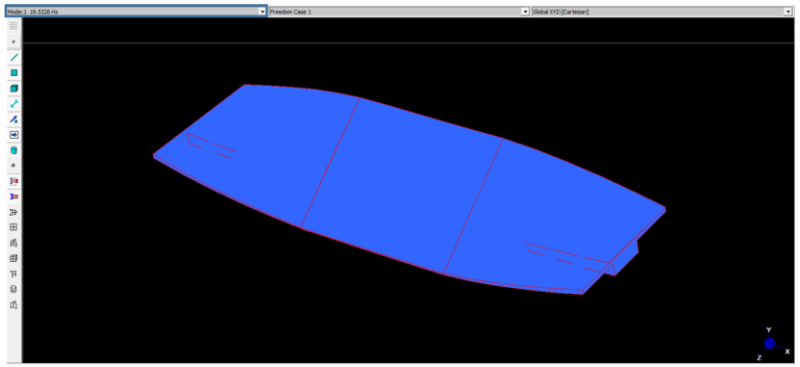
STUDIO DI UN MODELLO SEMPLIFICATO





$$\omega_k = \left(\frac{k\pi}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EJ}{m}}$$

CAMP.	Frequenza [Hz]
I	21.13585
II	18.59095
III	19.92256
IV	19.8262
V	18.67844
VI	21.03056
Media	19.86409

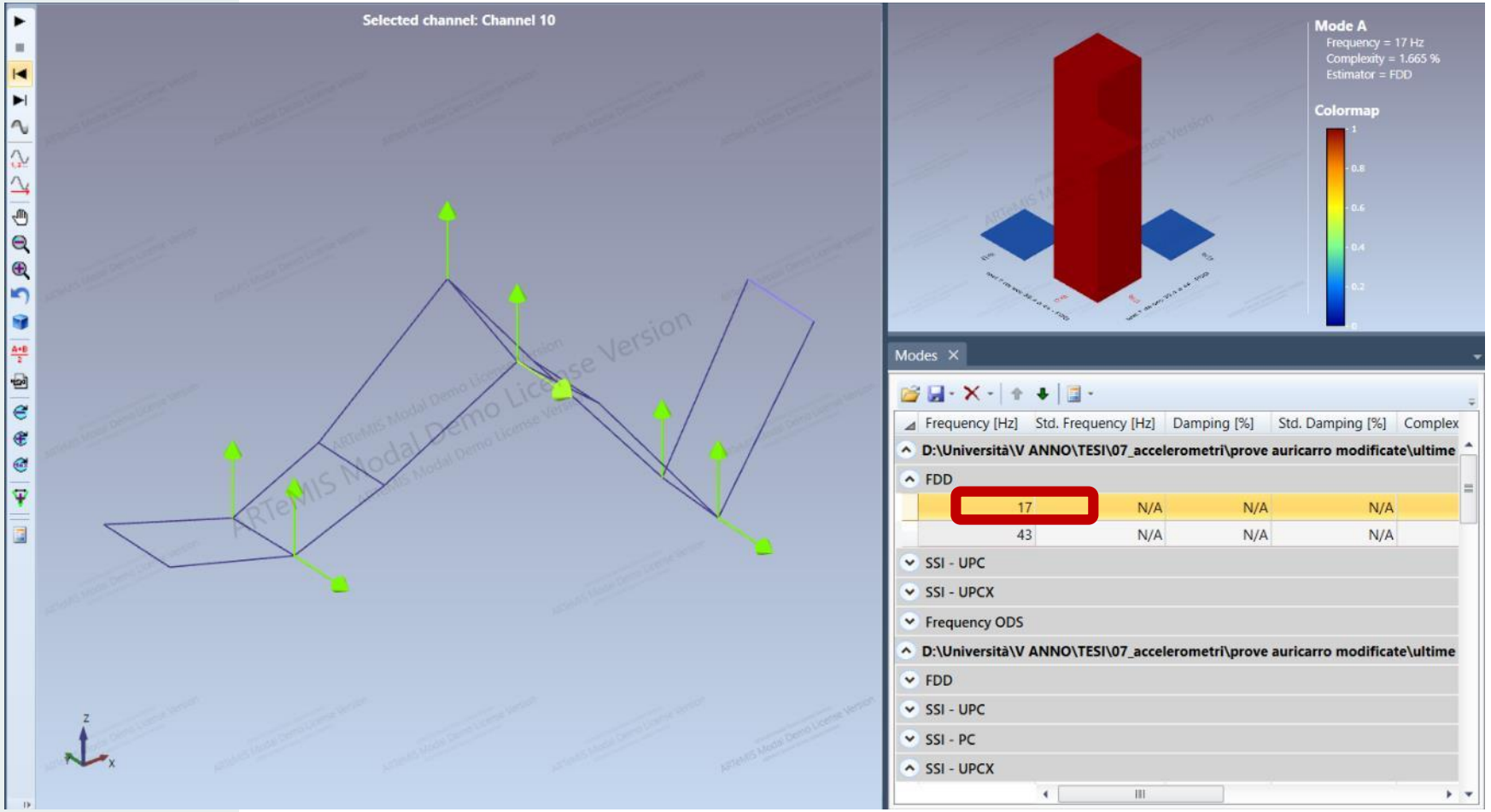


Sia dalle formule analitiche che dalla modellazione con software FEM si perviene a 19 Hz, motivo per il quale si considera il valore di **17 Hz** tra quelli ottenuti in precedenza come frequenza fondamentale.

ELABORAZIONE DEI DATI

5

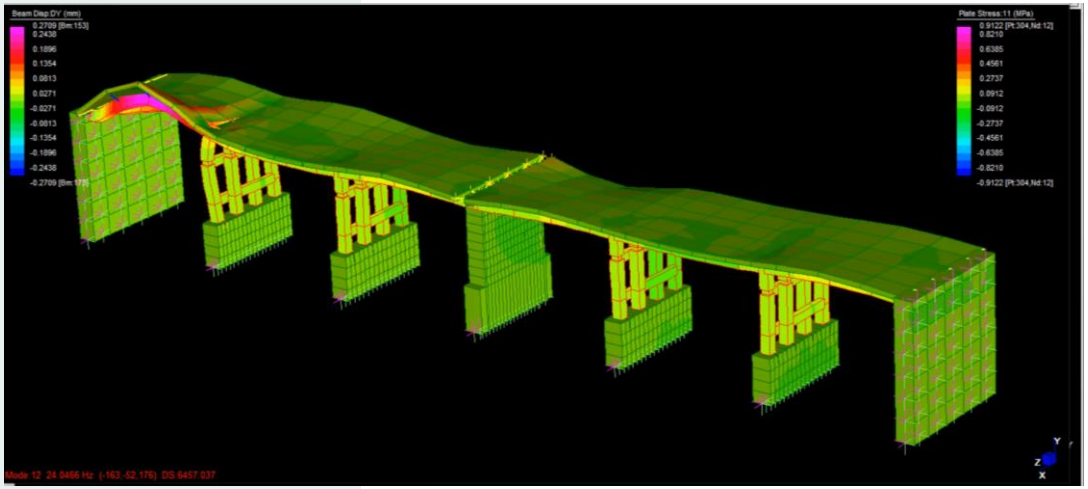
TECNICA ACCELEROMETRICA



MODELLAZIONE NUMERICA

5





MODE PARTICIPATION

Mode	Frequency (Hz)	Modal Mass (Engineering)	PF-X (%)	PF-Y (%)	PF-Z (%)
1	1.712E+01	8.582E+01	73.765	0.000	0.000
2	1.836E+01	1.674E+01	3.024	1.539	0.003
3	1.935E+01	2.220E+01	0.589	2.644	0.013
4	1.974E+01	1.824E+01	0.013	6.260	0.025
5	2.010E+01	1.621E+01	2.356	0.229	0.023
6	2.154E+01	1.852E+01	0.363	0.073	0.075
7	2.187E+01	1.236E+01	0.386	0.500	0.037
8	2.227E+01	8.036E+00	0.569	6.866	0.111
9	2.285E+01	1.450E+01	0.023	0.751	0.264
10	2.363E+01	2.104E+01	0.002	0.513	0.009
11	2.379E+01	1.289E+01	0.047	4.760	0.000
12	2.405E+01	7.355E+00	0.082	10.190	0.000
13	2.413E+01	8.798E+00	0.059	6.199	0.052
14	2.497E+01	8.498E+00	0.006	27.769	0.008
15	2.902E+01	1.270E+01	0.018	2.555	0.003
16	2.987E+01	1.055E+01	0.012	2.185	0.014
17	3.054E+01	1.665E+01	0.039	0.433	0.095
18	3.107E+01	1.903E+01	0.076	1.220	0.170
19	3.125E+01	1.260E+01	0.078	0.125	0.755
20	3.153E+01	1.328E+01	0.184	1.931	0.228
21	3.276E+01	1.227E+02	0.007	0.003	78.854
22	3.309E+01	1.279E+01	1.405	0.025	0.229
23	3.516E+01	1.690E+01	0.941	0.004	0.061
24	3.618E+01	1.089E+01	0.001	0.004	0.017
25	3.848E+01	1.432E+01	0.221	0.002	0.042
26	3.872E+01	9.774E+00	0.003	0.000	0.117
27	4.057E+01	9.904E+00	0.014	0.103	0.006
28	4.091E+01	1.562E+01	0.001	0.008	0.038
29	4.175E+01	1.887E+01	0.000	0.001	0.030
30	4.268E+01	6.228E+00	0.035	0.002	0.163
TOTAL MASS PARTICIPATION FACTORS			84.320	76.893	81.442

CONCLUSIONI

… Ma, quindi, la struttura è sicura?



Questo lavoro insieme agli studi presenti nella letteratura scientifica sottolinea fortemente la necessità di approfondimento delle tecniche diagnostiche nell'ambito del **monitoraggio delle strutture** (contemplato nelle valutazioni di sicurezza delle *Linee Guida Ponti e Gallerie*).

Tuttavia questo è solo un tassello di quello che è l'architettura di un sistema più complesso che permetterebbe di avere una visione completa della **sicurezza strutturale** dell'opera, sia nell'esercizio ordinario della stessa sia in caso di evento grave/calamitoso.

L'implementazione di sistemi di questo tipo nell'ottica di un **monitoraggio in continuo** consentirebbe di potere essere preventivamente e «predittivamente» informati sulla eventuale realizzazione di opportuni interventi di **mitigazione del rischio** e/o **rinforzo delle strutture**.