



Controlli in opera sulle strutture

CIAS, Ordine degli Ingegneri della Provincia di Trento, 26 febbraio, 2014

Collaudo statico-dinamico e monitoraggio di passerelle ciclopedonali

Oreste S. Bursi

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica,
Universita' degli Studi di Trento, Via Mesiano 77, 38123, Trento, Italia.

Oreste S. Bursi, Ph.D., P.E., MASME, MASCE

Professore di Dinamica Strutturale e Controllo

email: oreste.bursi@ing.unitn.it

<http://www.ing.unitn.it/~bursi/>



Ringraziamenti

1. Centro Internazionale di Aggiornamento Sperimentale-Scientifico (CIAS)
2. Fondazione Luigi Negrelli **dell'Ordine** degli Ingegneri della provincia di Trento
3. I Progettisti, Direttori Lavori e collaudatori delle opere in oggetto.
4. Il Servizio Conservazione della Natura e Valorizzazione Ambientale, Ufficio Piste Ciclabili della Provincia Autonoma di Trento
5. Il supporto finanziario **dell'Unione Europea** tramite il progetto **HITUBES*** (Grant number: RFSR-CT—2009-00022).
6. Il Politecnico di Torino, i collaboratori, lo Start-up I³ e il Laboratorio Prove Materiali e Strutture **dell'Università** di Trento

Contenuti

- Problematiche generali di ponti ciclopedonali: [il Ponte del Mare di Pescara](#)
- **Il ponte ciclopedonale di San Michele all'Adige** – Prove di collaudo statiche. Prove di identificazione dinamica.
- **Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano**: problematiche

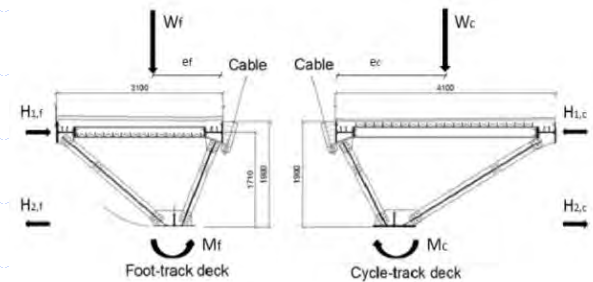
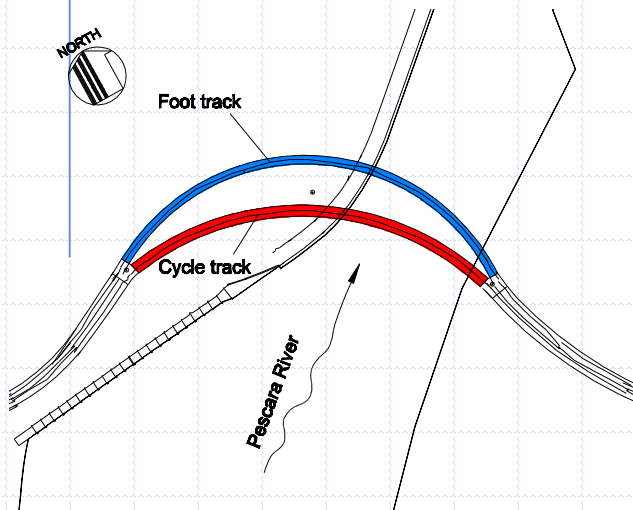
Il Ponte del Mare/Problematiche

- **Complessita' dell'opera**
- Processo concettuale di updating
- Modellazione degli effetti del vento
- Identificazione della struttura
- Progetto/identificazione degli smorzatori
- Sistema di monitoraggio
- Stime probabilistiche di riparazione degli impalcati

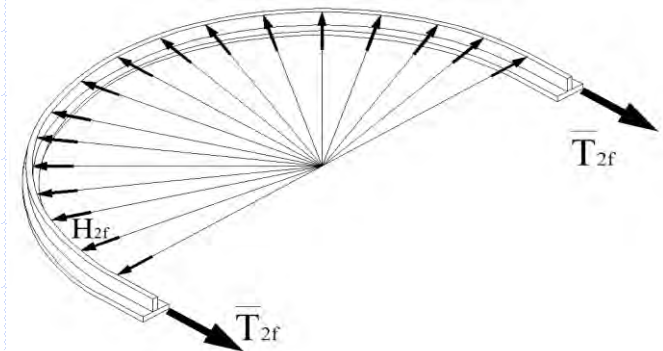
Il Ponte del Mare/Problematiche

"Ponte del mare" Pescara, Italia

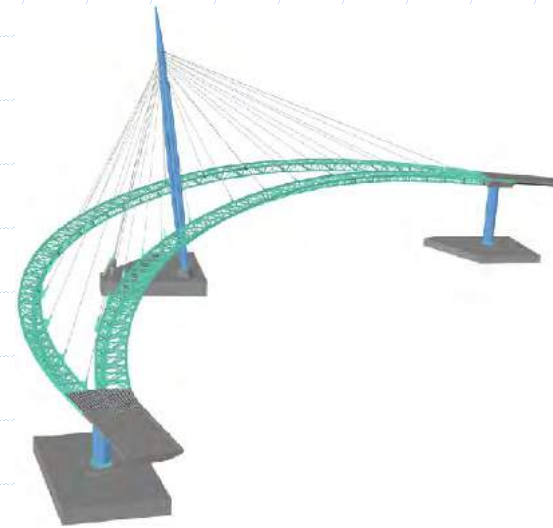
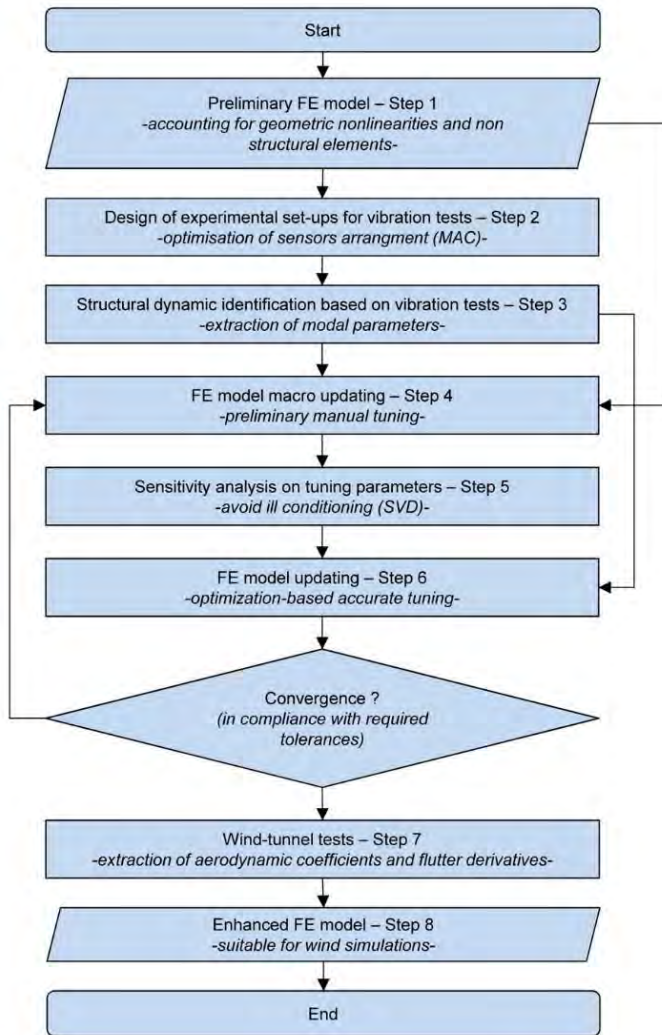
- Impalcato esterno per pedoni – luce circa 173 m –
- Impalcato interno per ciclisti – luce 148 m–



Diagrammi di corpo libero ed effetti di forma sulla corda inferiore dell'impalcato pedonale



Il Ponte del Mare/Cnt

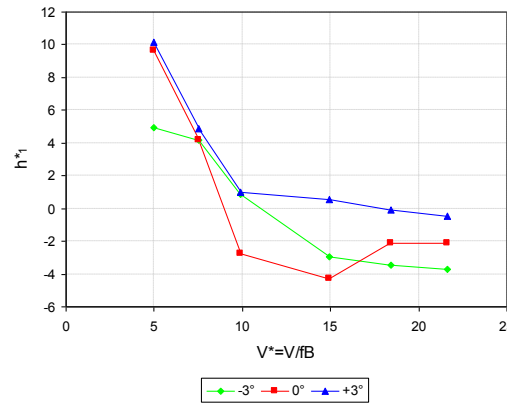
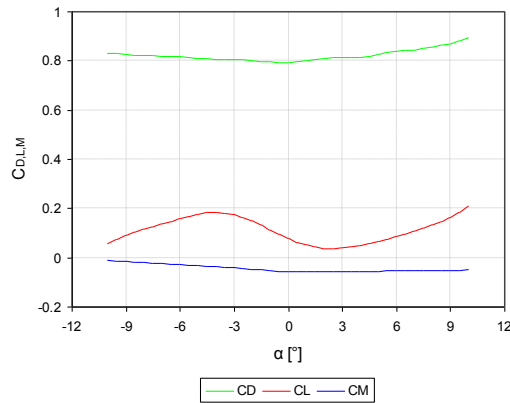
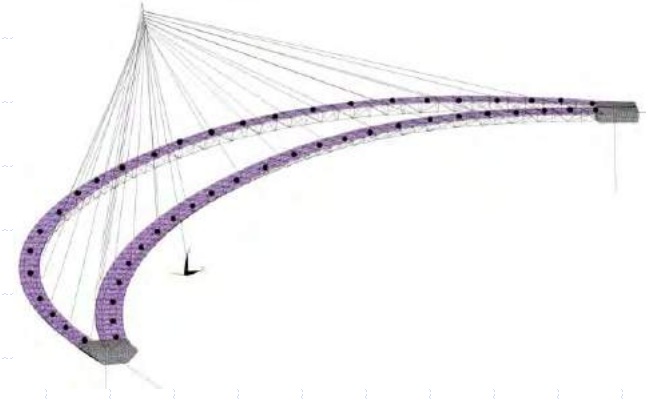
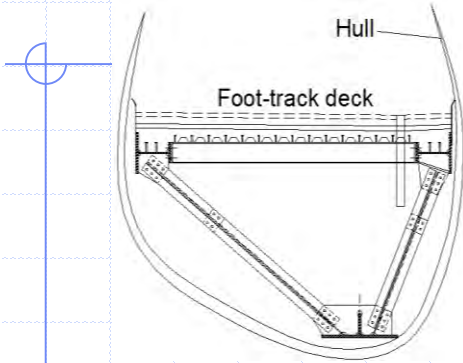


BURSI, O. S. , Kumar A. et al., "Design and Integrity Assessment of High Strength Tubular Structures for Extreme Loading Conditions", Final Report, HITUBES Project, Contr. No: RFSR-CT-2008-00035, Research Fund for Coal and Steel , 2011.

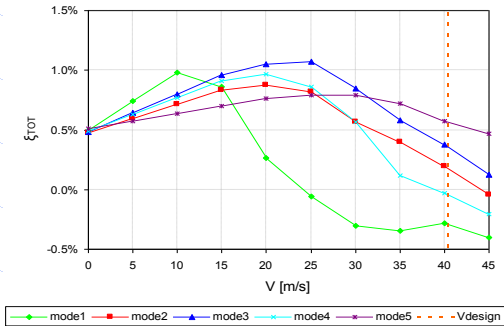
BURSI, O.S. Ceravolo, R., Kumar, A. and Abbiati, G., "Identification, model updating and validation of a steel twin deck curved cable-stayed footbridge", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2014, (in stampa).

Sequenza concettuale di updating di un modello basato sugli EF opportuno per simulazioni statiche e dinamiche

Il Ponte del Mare/Cnt



● nodo "aerodinamico"



$L_s(t) = \frac{1}{2} \rho V^2 B L C_L(\alpha)$	(7)
$D_s(t) = \frac{1}{2} \rho V^2 B L C_D(\alpha)$	
$M_s(t) = \frac{1}{2} \rho V^2 B L C_M(\alpha)$	

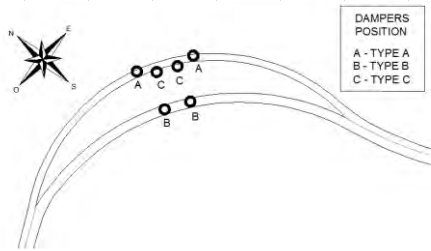
$$L_{se}(t) = \frac{1}{2} \rho V^2 B L$$

$$\left(-h_1^* \frac{i\omega z}{V} - h_2^* \frac{i\omega B \alpha}{V} + h_3^* \alpha + \right.$$

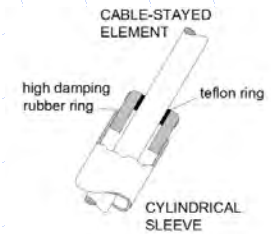
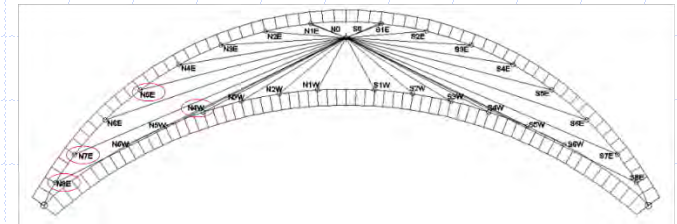
$$\left. + h_4^* \frac{\pi}{2V^{*2}} \frac{z}{B} - h_5^* \frac{i\omega y}{V} + h_6^* \frac{\pi}{2V^{*2}} \frac{y}{B} \right)$$

$\xi_{struc} = 0.5\%$
 $\xi_{tot} = \xi_{struc} + \xi_{aero}$ negativo per primo modo a $v(z) = 24$ m/s

Il Ponte del Mare/Cnt



DAMPERS POSITION
A - TYPE A
B - TYPE B
C - TYPE C



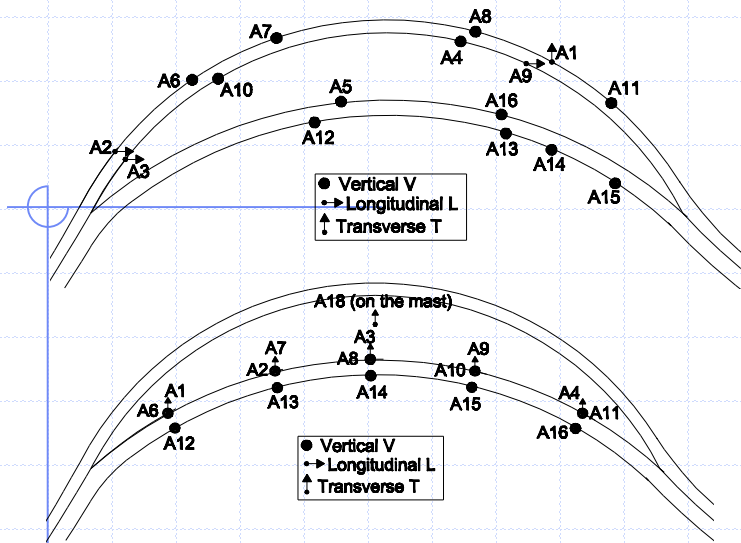
	Damper A	Damper B	Damper C
Type	Elastic-viscous	Elastic-viscous	Viscous
Units	2	2	2+2
Damping constant	128.0 kNs/m	349.0 kNs/m	794.2 kNs/m
Spring stiffness	127.6 ($\pm 5\%$) kN/m	127.6 ($\pm 5\%$) kN/m	-

Smorzatori elastoviscosi e viscosi

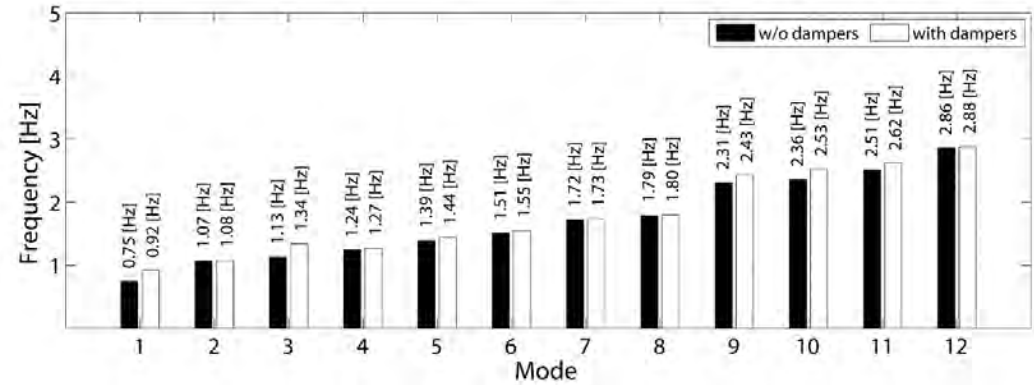
(a) Case w/o anti-vandalism sleeves and rubber pad							
Cab.	L [m]	Frequency [Hz]					ξ [%.]
NE8	80.00	0.84	1.52	2.30	3.05	3.81	0.460
NE7	73.73	1.06	2.08	3.11	4.16	5.19	0.597
NE5	55.70	1.66	3.30	4.95	6.61	8.28	0.301
(a) Case with anti-vandalism sleeves and rubber pad							
Cab.	L [m]	Frequency [Hz]					ξ [%.]
NE8	80.00	0.86	1.56	2.30	3.02	3.78	0.871
NE7	73.73	1.13	2.21	3.31	4.41	5.52	0.966
NE5	55.70	1.72	3.45	5.15	6.89	8.59	0.253

Smorzatori e State-switched inducers

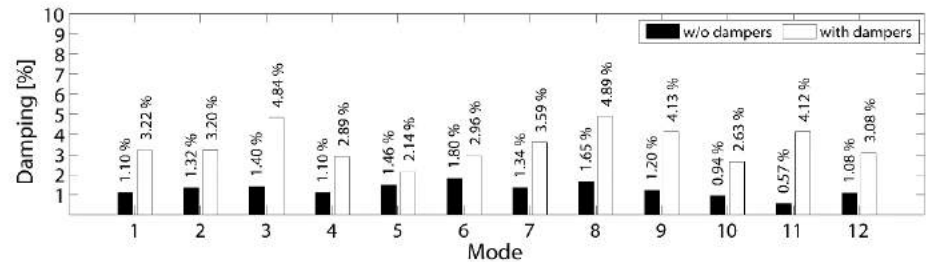
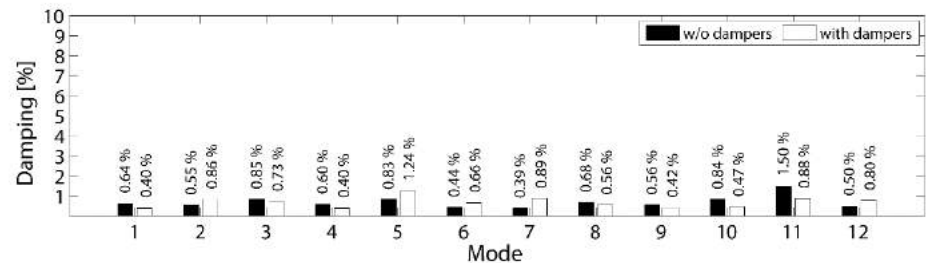
Il Ponte del Mare/Cnt



Set-up DC1 e Set-up CP2

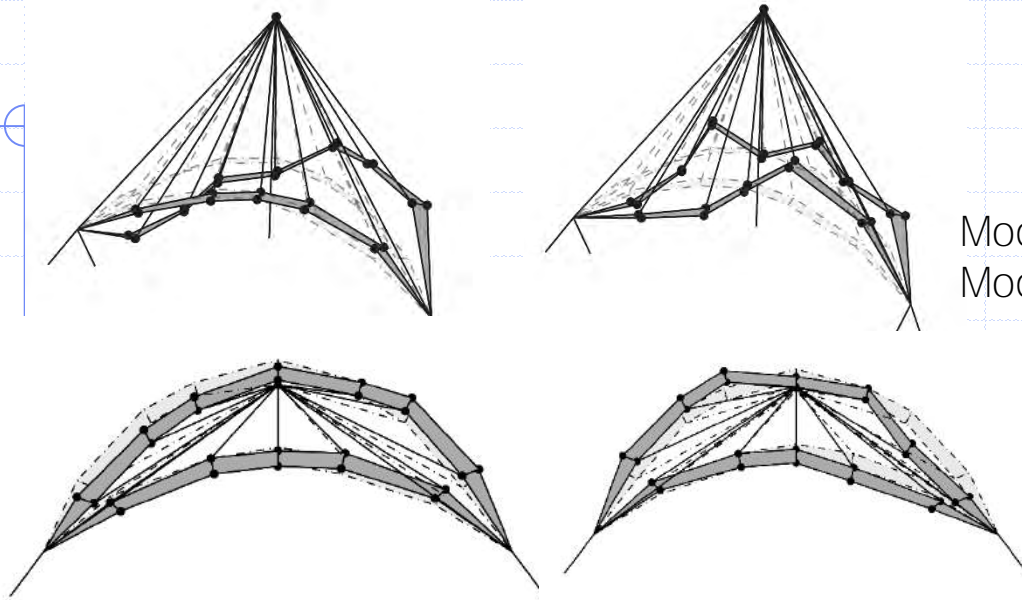


Frequenze ottenute tramite la tecnica output-only Stochastic Subspace Identification (SSI)

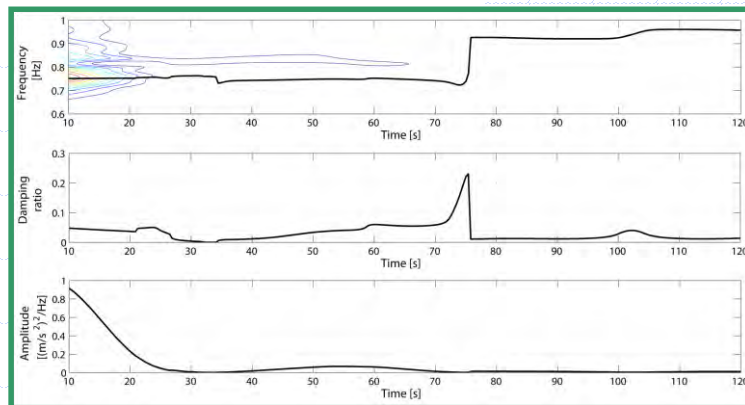


Stime di smorzamento modale tramite la tecnica SSI e la tecnica ERA basata su free decay

Il Ponte del Mare/Cnt



Modo 1 con damper, frequenza = 0.92 Hz
Modo 2 con damper, frequenza = 1.08 Hz



Ad ampiezze superiori ai 4 mm, frequenza del Modo 1 = 0.75 Hz

Ad ampiezze inferiori, la frequenza del Modo 1 aumenta a 0.92 Hz. Incremento del 23 %

Ergo, il system di smorzamento opera come se avesse uno switcher

Ceravolo R., Tondini N., Abblati G. Kumar A., Dynamic characterization of complex bridge structures with passive control systems, Structural Control and Health Monitoring, 19, 4, 511–534, 2012

Il Ponte del Mare/Cnt

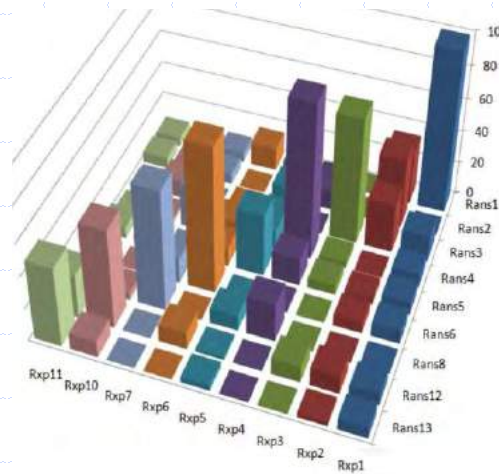
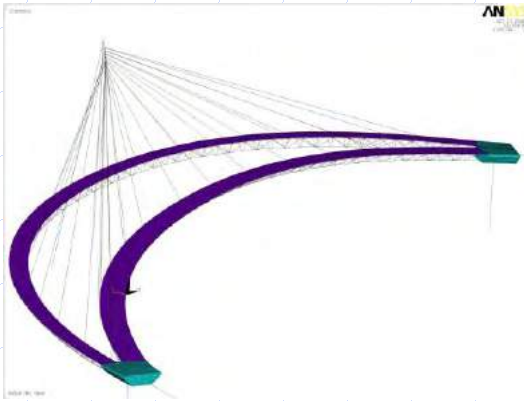
Updating del modello basato su EF tramite minimizzazione

$$F(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \Delta(\mathbf{p})^T \cdot \Delta(\mathbf{p})$$

$$MAC(\phi_a, \phi_e) = \frac{(\phi_a^T \phi_e)^2}{(\phi_a^T \phi_a) \cdot (\phi_e^T \phi_e)}$$

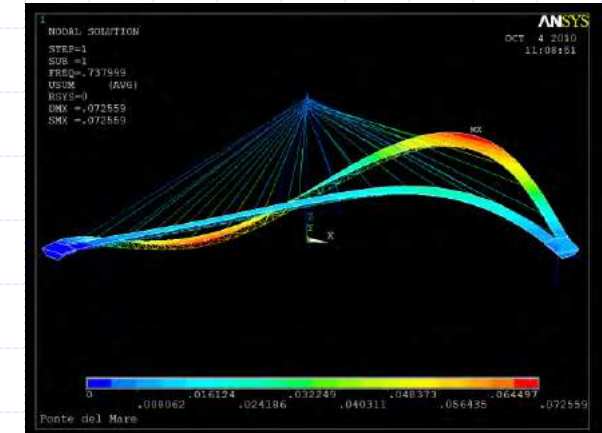
In conclusion, the initial FE model comprises:

- 7226 nodes;
- 3037 BEAM44 elements;
- 30 LINK8 elements;
- 496 SHELL43 elements;
- 3920 SOLID45 elements;
- 630 MASS21 elements.



N	Par.	Initial Value	Final value	Δp [%]
1	E_{c1}	35000 MPa	38350 MPa	+9.57
2	E_{c2}	16000 MPa	13600 MPa	-15.00
3	E_s	210000 MPa	220500 MPa	+5.00
4	$E_{s \text{ stay } 44}$	165000 MPa	156750 MPa	-5.00
5	ρ_1	1500 kg/m ³	1140 kg/m ³	-23.87
6	ρ_2	2500 kg/m ³	1750 kg/m ³	-30.00
7	C_c	25.40	27.91	+9.90
8	C_{pB}	5.06	5.27	+4.13
9	C_{pD}	1.15	1.15	-0.43

Mode	f_x [Hz]	f_N [Hz]	Error [%]
1X - 1N	0.748	0.738	-1.28
2X - 2N	1.065	1.048	-1.67
3X - 3N	1.126	1.099	-2.33
4X - 4N	1.243	1.179	-5.12
5X - 5N	1.394	1.437	+3.10
6X - 6N	1.510	1.608	+6.51
7X - 8N	1.716	1.761	+2.58
10X - 12N	2.364	2.435	+2.98
11X - 13N	2.512	2.502	-0.38



Primo modo di vibrare

Il Ponte del Mare/Cnt

Caratteristiche del sistema di monitoraggio

Il Ponte del Mare è stato dotato di un sistema di monitoraggio integrato con la struttura con lo scopo di verificarne la risposta reale, con particolare riferimento al comportamento dinamico (fenomeni vibratori) legati all'effetto eolico e dei pedoni.

Sono stati installati i seguenti sensori:

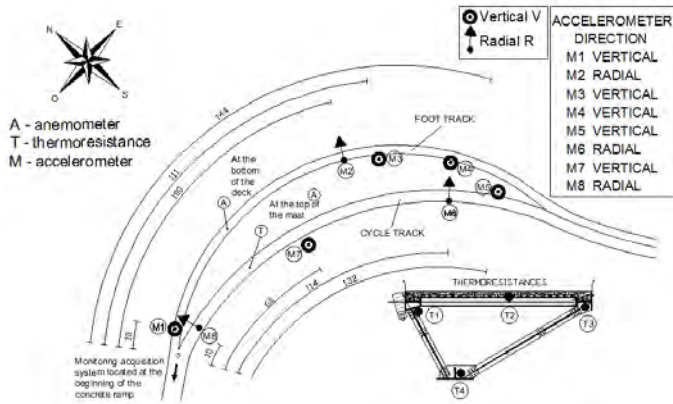
- **Num. 2 Sensori integrati per velocità (a coppe) e direzione del vento (banderuola)** (campi di misura: 0-60m/s, 0-360° ;uscita analogica 2x4-20mA; alimentazione: 12VDC)
- **Num. 4 Sensori di temperatura a contatto PT100 4 fili** (campi di misura: -150...+450° C; precisione classe B (+0.3° C); uscita analogica 4-20mA; alimentazione: 24VDC)
- **Num. 6 Accelerometri piezoelettrici 393B12** (high sensitivity 10V/g; Frequenza da 0.15 a 1000Hz; 2-pin MIL C-5015 connector)
- **Num. 2 Accelerometri piezoelettrici 393A03** (Sensitivity 1V/g; Frequenza da 0.5 a 2000Hz; 2-pin MIL C-5015 connector)

Il Ponte del Mare/Cnt

Tecniche di acquisizione

1. *Monitoraggio statico*: i 4 segnali di temperatura e i segnali di velocità e direzione del vento sono acquisiti in modo continuo. In particolare al fine di caratterizzare il segnale del vento la frequenza di acquisizione è pari a 1 Hz.
2. *monitoraggio dinamico giornaliero*: al fine di analizzare lo stato del ponte con cadenza giornaliera si effettua **un'acquisizione**, con frequenza pari a 100 Hz per una durata di 328 s ca., degli 8 accelerometri.
3. *monitoraggio dinamico a soglia*: con lo scopo di verificare la correttezza del sistema di smorzamento installato sul ponte e **l'eventuale** necessità di integrazione dello stesso, si effettua **un'acquisizione** a soglia sugli accelerometri e sugli anemometri a 100 Hz

Il Ponte del Mare/Cnt



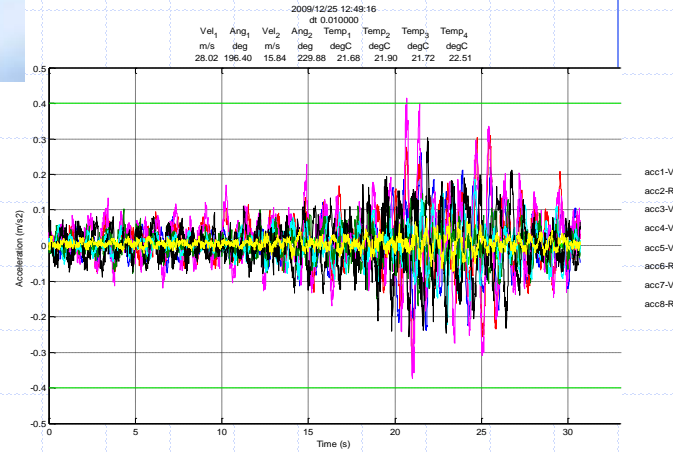
Monitoraggio permanente

Monitoraggio nel periodo Dic. 2009- Dic. 2010)

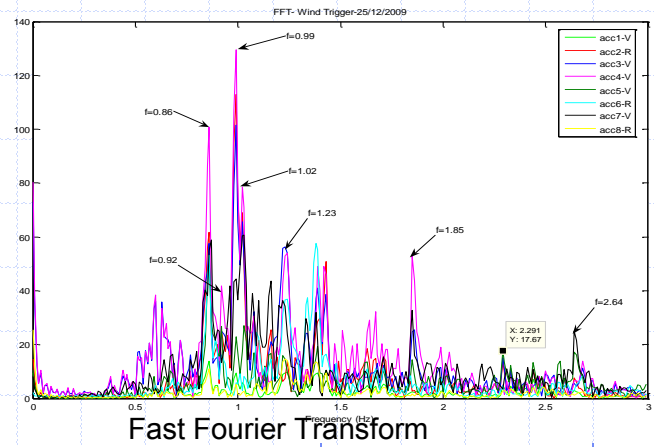
Giorno di Natale (25/12/2009): Il trigger si attiva per il vento con una velocità pari a **28.02 m/s**.

Il 17 Ott. 2010 a causa di una competizione sportiva, la mass. accelerazione raggiunse il valore di **0.703 m/s²**.

Il ponte risulta essere piu' sensibile alle eccitazioni indotte dai pedoni che a quelle dovute al vento.



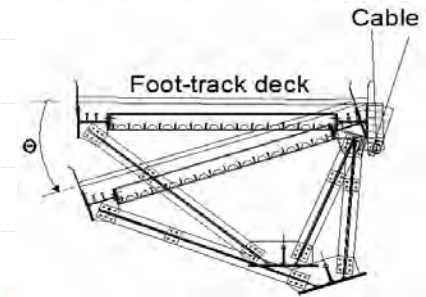
Wind triggers accelerometers in both cases



Fast Fourier Transform

Il Ponte del Mare/Cnt

Riparazione degli impalcati



Serviceability Limit State

Deck Deflection: $\delta \leq L/500$

Deck Rotation: $\theta \leq 3.5\%$,

Safety margin: $SM = C - D \geq 0$,

where: C defines the serviceability limit stress and D defines the stress demand;

δ is the maximum vertical deck deflection;

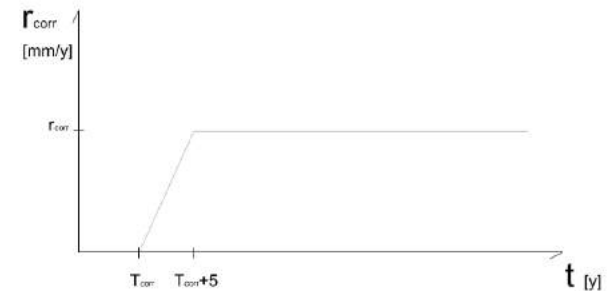
θ defines the deck rotation



Modello di corrosione uniforme

$$A(t) = \frac{\pi}{4} \cdot [[D_0 - 2 \cdot r_{\text{corr}} \cdot (t - T_{\text{corr}})]^2 - D_i^2]$$

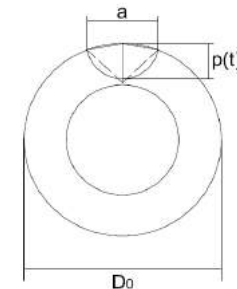
Steel grade	Environment	Gas bubble	r_{corr} (mm/year) base metal
TS590LH	3.5 wt % NaCl	Air bubble	0.140
TS590LH	3.5 wt % NaCl	N ₂ bubble	0.105
TS590LH	1 wt % NaCl	N ₂ bubble	0.058
S355LH	3.5 wt % NaCl	Air bubble	0.168
S355LH	3.5 wt % NaCl	N ₂ bubble	0.114
S355LH	1 wt % NaCl	N ₂ bubble	0.086



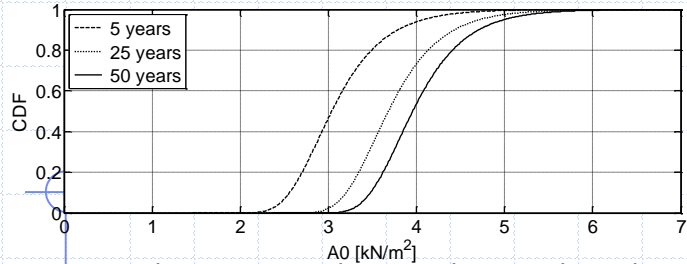
Modello di corrosione localizzata

$$p(t) = r_{\text{corr}} \cdot R \cdot t \quad a = 2 \cdot p(t) \sqrt{1 - \left(\frac{p(t)}{D_0} \right)^2}$$

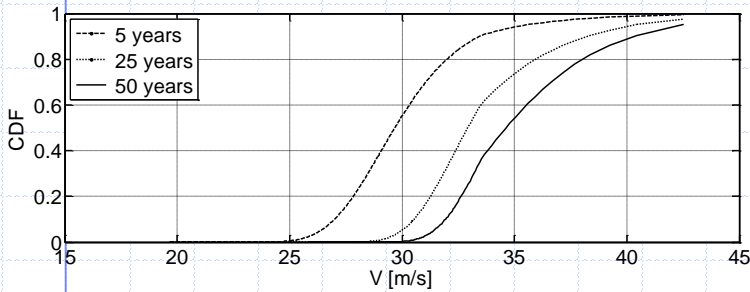
$$V_{\text{pit_actual}} = f_x(x|\alpha, \beta, x_{\text{min}}, x_{\text{max}}) \cdot V_{\text{max-pits}}$$



Il Ponte del Mare/Cnt



Distribuzione cumulata per il carico da pedoni

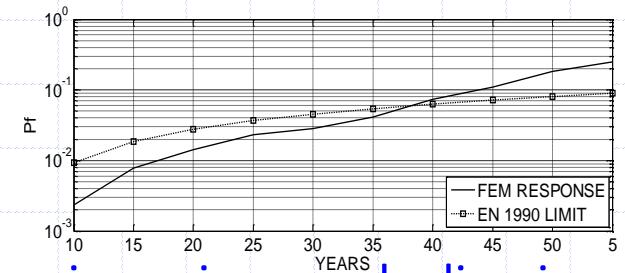
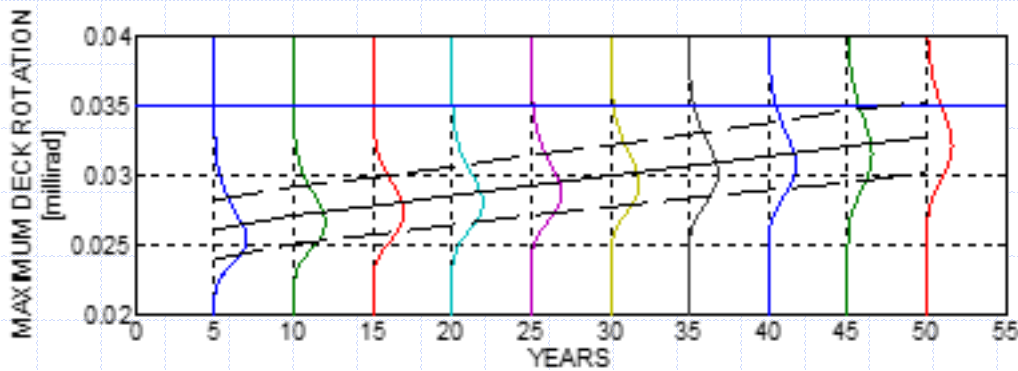


Distribuzione cumulata per il carico vento da mare

-Vertical deflection	deck	-Log-normal; -Gaussian; -Weibull;
-Rotation		-Esponential; -Beta; -Generalized Extreme Value.
-Stress		-Gaussian; -Generalized Extreme Value.

Combinazioni delle azioni

CASE	GENERAL CORROSION	PITTING CORROSION	GROUND WIND	SEA WIND	PEDESTRIAN
1.1	X				X
1.2		X			X
2.1	X		X		X (0.4)
2.2		X	X		X (0.4)
3.1	X			X	X (0.4)
3.2		X		X	X (0.4)
4.1	X		X (0.3)		X
4.2		X	X (0.3)		X
5.1	X			X (0.3)	X
5.2		X		X (0.3)	X



La riparazione degli impalcati dovrebbe essere effettuata a circa 40 anni della vita di progetto

Bursi, O.S., Cazzador, E. e Ussia A., Probability analysis of a twin deck curved cable-stayed footbridge subjected to multiple inputs and corrosion. Reliability Engineering and System Safety, 2014, (submitted).

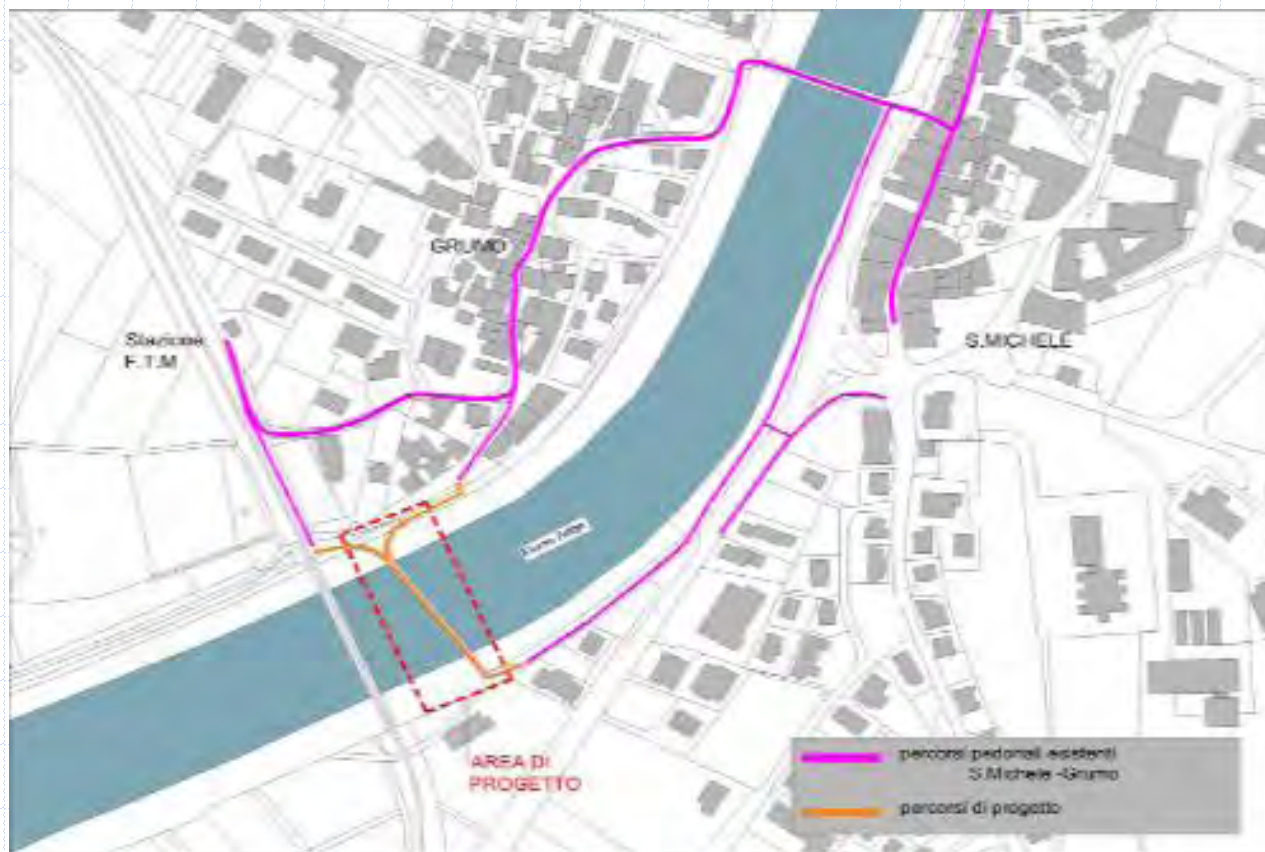
La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige

- **Descrizione dell'opera**
- Prescrizioni per il collaudo statico/dinamico
- Prescrizioni progettuali di comfort
- Predimensionamento di opportuni dispositivi a massa accordata (TMD) per la riduzione delle vibrazioni
- Prove statiche
- Identificazione delle caratteristiche dinamiche della passerella
- Valutazione della efficacia dei sistemi TMD
- Verifica a fatica per effetto dei pedoni

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Collegamento tra San Michele e Grumo:

importante per risolvere e migliorare il collegamento pedonale/ciclabile



La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt



La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt



L'impalcato ha sezione simmetrica:

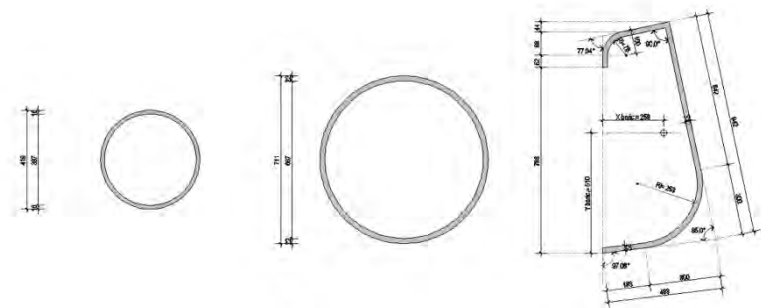
- sviluppo longitudinale di 107 m
- longheroni longitudinali a profilo composito a G
- trasversi a doppio T variabili in altezza
- controvento orizzontale di piano

Gli archi:

- sezione circolare cava 0,712 m ($t=22$ mm)
- raggio di curvatura di 816 m

I pendini:

- diametro 0,03 m
- barre in acciaio
- passo 2,5 m



La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

- Progettista e DL ing. Alfonso Dalla Torre
- Collaudatore prof. ing. Rosario Ceravolo
- Prove di carico statiche: dott. ing. Marco Molinari, Laboratorio Prove Materiali e Strutture **dell'Università** degli Studi di Trento
- Prove di carico dinamiche: Dipartimento Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica **dell'Università** di Trento
- Prova di carico statica: marzo 2011
- Prova vibrazionale: marzo 2011, in assenza di TMD; ripetuta in agosto in presenza di TMD

- Le prove statiche hanno preceduto le prove vibrazionali in modo da garantire **l'assestamento** della struttura. In tal modo la struttura in prova è rappresentativa delle condizioni di lungo termine.

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt Certificato di Collaudo Statico

Provincia Autonoma di Trento



Servizi Conservazione della Natura e Valorizzazione Ambientale

PERCORSO CICLOPEDONALE VALLE DELL'ADIGE: PASSERELLA CICLOPEDONALE SUL FIUME ADIGE IN COMUNE DI S. MICHELE ALL'ADIGE (TN)

- CODICE CUP: C41B08000300000, CODICE CIG: 0431901FF6 -

ENTE COMMITTENTE:

PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO, PIAZZA DANTE N. 15 IN TRENTO, C.F. E PARTITA I.V.A. 00337460224, RAPPRESENTATA DAL DR. INNOCENZO COPPOLA, NATO A TREMOSINE (BS) IL 30.09.1956, NELLA QUALITÀ DI DIRIGENTE DEL SERVIZIO CONSERVAZIONE DELLA NATURA E VALORIZZAZIONE AMBIENTALE.

IMPRESA ESECUTRICE:

ASSOCIAZIONE TEMPORANEA FRA LE IMPRESE:

- "C.M.M. FRATELLI RIZZI S.R.L." (CAPOGRUPPO), CON SEDE LEGALE IN VEZZA D'OGGIO (BS), VIA VAIANA N. 8, C.F. N. 01101950176 E P. I.V.A. N. 00602010985.
- "SOFIA EDIL SONICO DI OMODEI ALBINO & CO. S.N.C." (MANDANTE), CON SEDE LEGALE IN SONICO (BS), FRAZIONE RINO, VIA DANE N. 1/c, C.F. N. 01278680176 E PARTITA I.V.A. N. 00616670980.

RAPPRESENTATA DA RIZZI GIACOMO GIOVANMARIA, NATO A VEZZA D'OGGIO (BS) IL 24.1.1953, QUALE PRESIDENTE DEL C.D.A. E LEGALE RAPPRESENTANTE DELLA SOCIETÀ "C.M.M. FRATELLI RIZZI S.R.L." CITATA.

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt Certificato di Collaudo Statico

I.V.A. n. 00602010985, e "SOFIA EDIL SONICO DI OMODEI ALBINO & CO. S.N.C." (Mandante), con sede legale in Sonico (Bs), Frazione Rino, via Dante n. 1/c, C.F. n. 01278680176 e Partita I.V.A. n. 00616670980, rappresentata da Rizzi Giacomo Giovanmaria, nato a Vezza d'Oglio (Bs) il 24.1.1953, quale presidente del C.d.A. e Legale rappresentante della società "C.M.M. Fratelli RIZZI S.R.L." citata, in base al contratto d'appalto stipulato in data 22.4.2010, N. di Racc. 39584 della Provincia Autonoma di Trento, Servizio Contratti e Gestioni Generali, Piazza Dante, 15-Trento, in base ai successivi atti di sottomissione n° 1, del 10.2.2011 e n° 2, del 29.4.2011,

SONO STATICAMENTE COLLAUDABILI

come in effetti, con il presente atto,

COLLAUDA

le opere stesse, per l'uso in base al quale sono state progettate e realizzate, a norma delle vigenti leggi circa l'esecuzione di opere in conglomerato cementizio armato ed a struttura metallica, anche in zona sismica.

Torino, li 30 marzo 2012.

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

D.M. 14 gennaio 2008 PROVE DI CARICO - 1/2

§ 9.2 PROVE DI CARICO

- “Le prove di carico ... dovranno identificare la corrispondenza del comportamento teorico e quello sperimentale.”
- “Il programma delle prove, stabilito dal Collaudatore, con **l’indicazione** delle procedure di carico e delle prestazioni attese deve essere sottoposto al Direttore dei lavori per **l’attuazione** e reso noto al Progettista e al Costruttore.”
- “Le prove di carico si devono svolgere con le modalità indicate dal Collaudatore che se ne assume la piena responsabilità, mentre, per quanto riguarda la loro materiale attuazione, è responsabile il Direttore dei lavori.”
- “Le prove di carico sono prove di comportamento delle opere sotto le azioni di esercizio. Queste devono essere, in generale, tali da indurre le sollecitazioni massime di esercizio per combinazioni caratteristiche (rare).”
- “In relazione al tipo della struttura ed alla natura dei carichi le prove possono essere convenientemente protratte nel tempo, ovvero ripetute su più cicli.”
- “Il giudizio **sull’esito** della prova è responsabilità del Collaudatore.”

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

D.M. 14 gennaio 2008 PROVE DI CARICO - 2/2

§ 9.2 PROVE DI CARICO

“L'esito della prova va valutato sulla base dei seguenti elementi:

1. le deformazioni si accrescano **all'incirca** proporzionalmente ai carichi;
2. nel corso della prova non si siano prodotte fratture, fessurazioni, deformazioni o dissesti che compromettono la sicurezza o la conservazione **dell'opera**;
3. la deformazione residua dopo la prima applicazione del carico massimo non superi una quota parte di quella totale (ad es. 15 %) commisurata ai prevedibili assestamenti iniziali di tipo anelastico della struttura oggetto della prova.
4. Nel caso invece che tale limite venga superato, prove di carico successive devono indicare che la struttura tenda ad un comportamento elastico.
5. la deformazione elastica risulti non maggiore di quella calcolata.

Le prove statiche, a giudizio del Collaudatore e in relazione **all'importanza dell'opera**, possono essere integrate da prove dinamiche e prove a rottura su elementi **strutturali**”

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

D.M. 14 gennaio 2008

§ 9.2.2 PONTI STRADALI

1. "... si dovrà controllare che le deformazioni sotto i carichi di prova, in termini di abbassamenti, rotazioni ecc, siano comparabili con quelle previste in **progetto**"
2. "... che le eventuali deformazioni residue dopo il primo ciclo di carico, ... non risultino superiori al 15% di quelle massime misurate,..."
3. "... ovvero successive prove di carico dimostrino che le deformazioni residue tendano ad esaurirsi."
4. " Per le opere di significativa rilevanza, le prove statiche andranno completate da prove dinamiche, che misurino la rispondenza del ponte **all'eccitazione** dinamica, controllando che il periodo fondamentale sperimentale sia confrontabile con quello previsto in progetto."

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

PASSEGGIATA

AZIONE VERTICALE

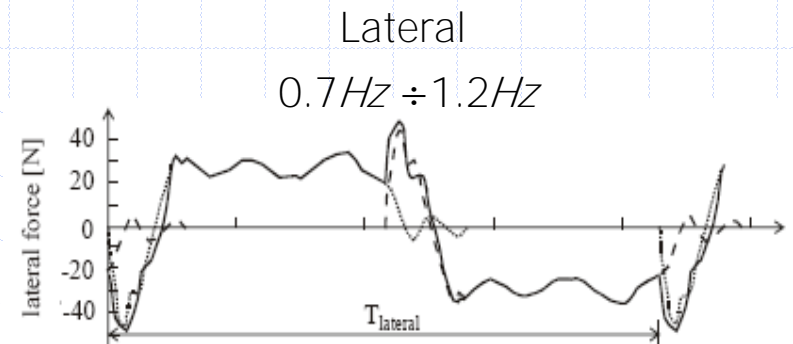
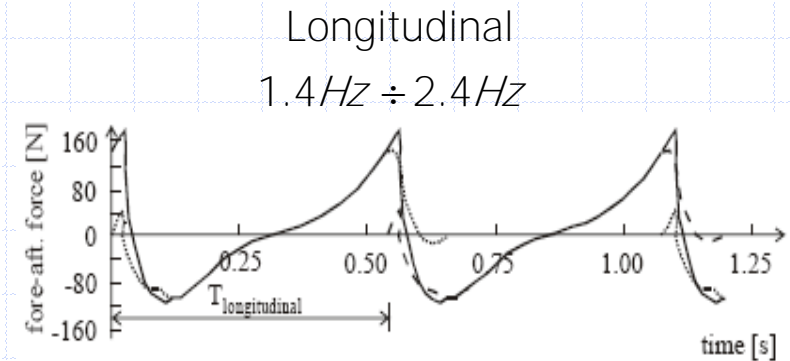
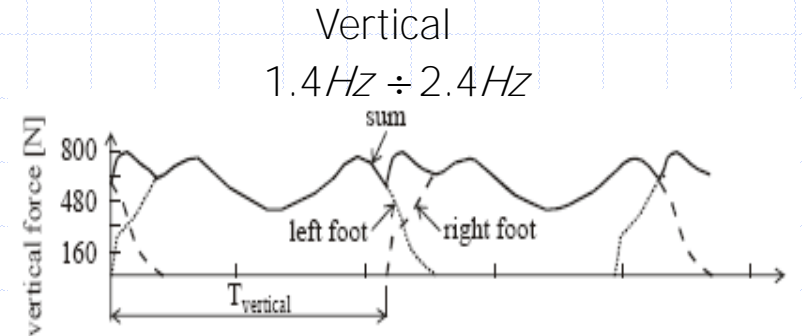
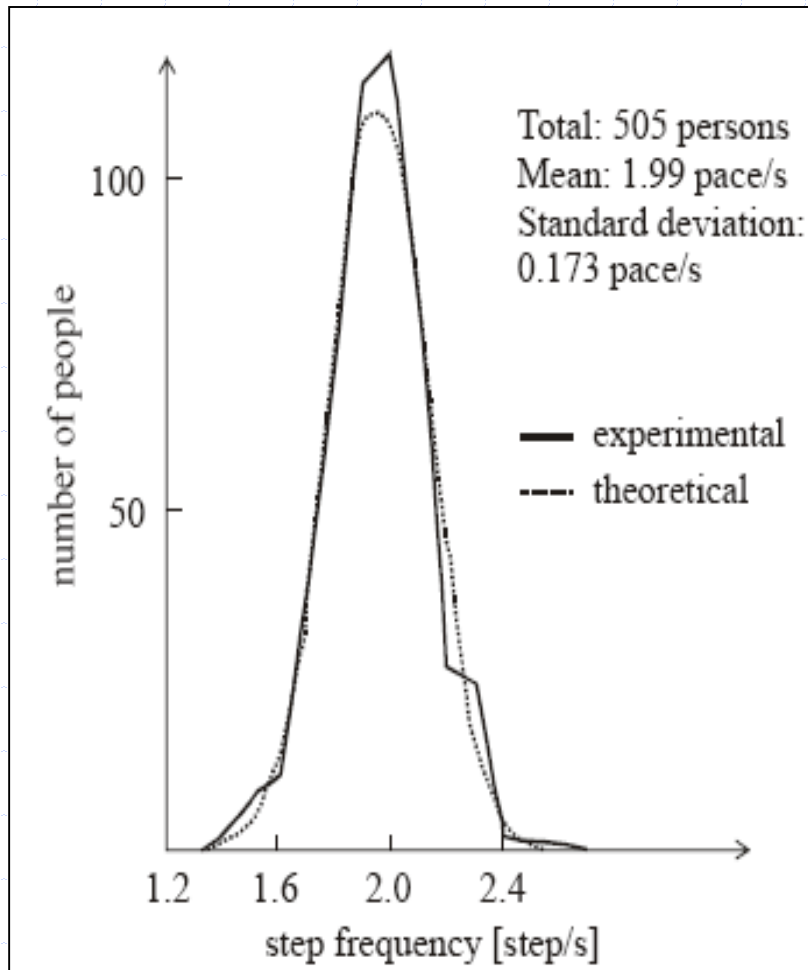
AZIONE LONGITUDINALE

AZIONE LATERALE



La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Componenti in frequenza



La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Aspetti progettuali

D.M. Infrastrutture del 14 gennaio 2008 § 2.2.2 - SLE.

d) vibrazioni che possono compromettere l'uso della costruzione

e) danni per fatica ... f) corrosione e/o eccessivo degrado

UNI EN 1990 A.2.4.3.2 : Criteri di comfort

	Accelerazione massima [m/s ²]
Vibrazioni verticali	0.7
Vibrazioni orizzontali, flusso normale	0.2
Vibrazioni orizzontali, folla	0.4

(2) A verification of the comfort criteria should be performed if the fundamental frequency of the deck is less than:

- 5 Hz for vertical vibrations,
- 2.5 Hz for horizontal (lateral) and torsional vibrations.

Carenza nelle normative italiane ed europee per quanto riguarda i modelli di carico dinamico pedonale

SETRA Footbridges : Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading, October 2006

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

INDICAZIONI SETRA

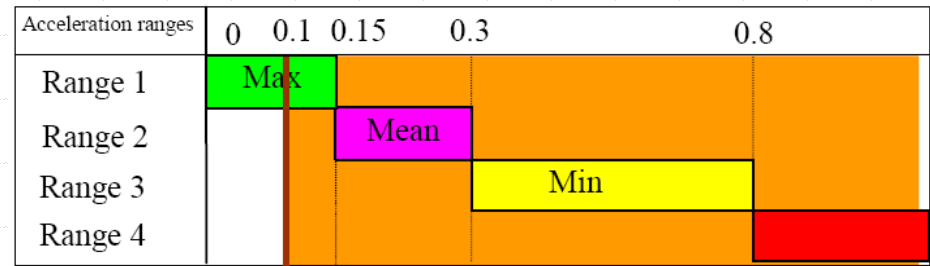
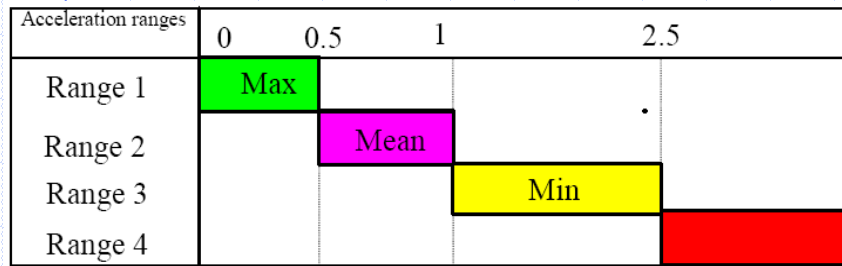
Prestazioni richieste:

- *Range 2: passerelle urbane*
- *Livello di comfort: medio*

Tabella 16: accelerazioni medie limite definite dal livello di comfort.

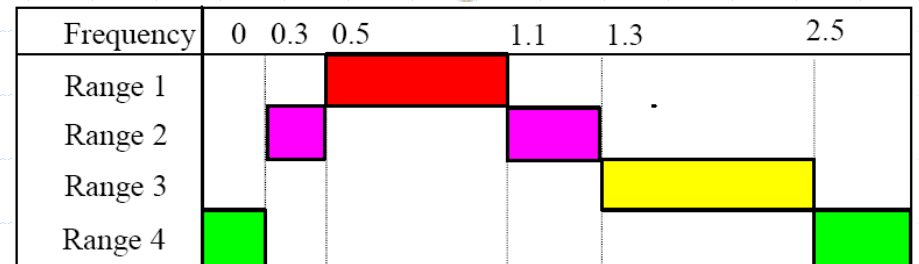
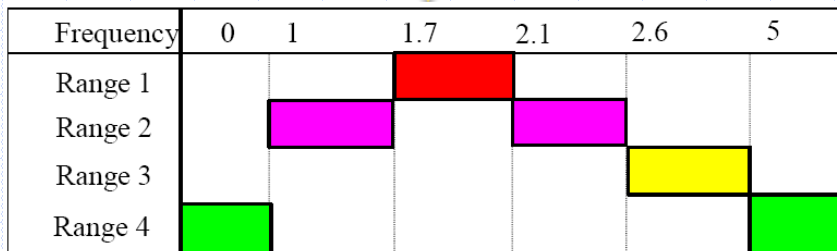
Accelerazioni	Limiti
verticali	0,50 m/s ² - 1 m/s ²
lateralì	0,10 m/s ²

Per le accelerazioni laterali il limite assunto tiene in considerazione il fenomeno di sincronizzazione di lock-in.



Limiti per le accelerazioni verticali [m/s²]

Limiti per le accelerazioni orizzontali [m/s²]



Range di frequenze per vibrazioni verticali e longitudinali [Hz]

Range di frequenze per vibrazioni orizzontali [Hz]

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Considerazioni sulle tipologie di prova

PROVE DI CARICO STATICHE

- realizzazione di corsie di carico con autocarri o zavorra
- per le passerelle il sovraccarico accidentale è uniforme e conviene utilizzare cassoni con acqua: prove particolarmente onerose perché richiedono la stesa ed il riempimento dei cassoni (4 kN/m^2)

PROVE DINAMICHE VIBRAZIONALI

- eccitazione dovuta al rumore ambientale (Ambient Vibration Test, AVT)
- eccitazione forzata con mazza strumentata (Shock Hammer Test, SHT)
- eccitazione forzata con vibrodina (Stepped Sine Test, SST)
- prove di rilascio (Snap Off Test, SOT)

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

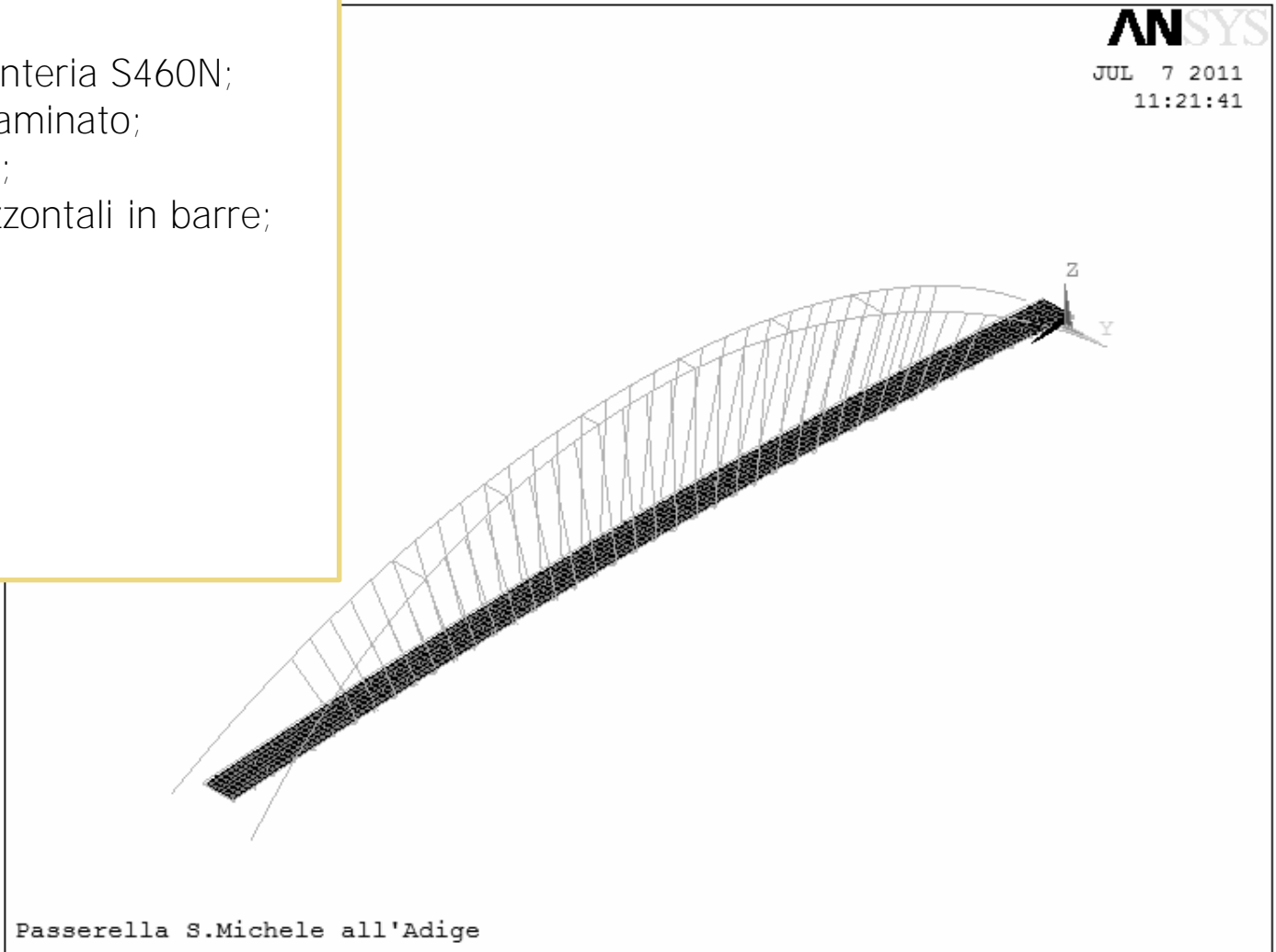
Modello basato sugli EF

Struttura reale:

- Acciaio di carpenteria S460N;
- Arco in profilo laminato;
- Pendini in barre;
- Controventi orizzontali in barre;

Modello ANSYS®:

- 2000 NODES;
- 1008 SHELL43;
- 1163 BEAM44;
- 154 LINK8;
- 3 MASS21;
- 3 COMBIN14;



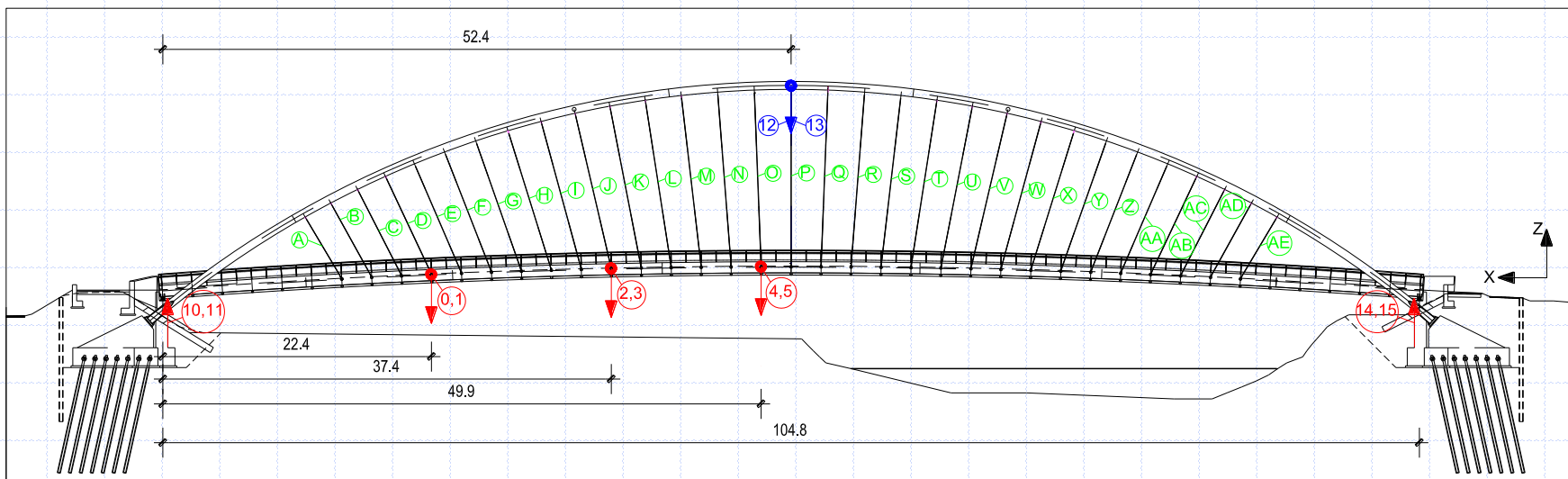
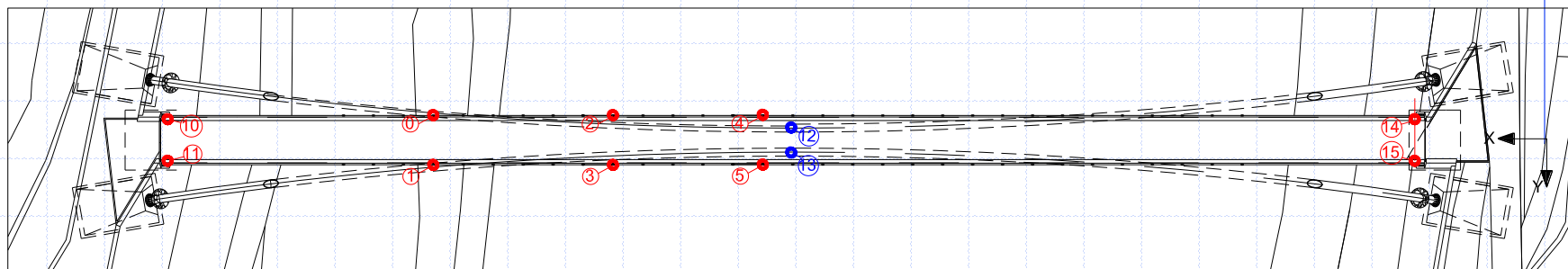
La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Certificato di prova n° 13438/72 Trento (29 marzo 2011)

- Per la costruzione era stata realizzata **un'isola** artificiale che consentiva il posizionamento di trasduttori di spostamento su metà impalcato
- I trasduttori sono caratterizzati da un errore strumentale di circa 1/100 mm, valore nettamente inferiore a quello delle livellazioni ottiche
- Trasduttori collocati ai lati di monte e valle **dell'impalcato** hanno consentito di determinare **l'abbassamento** e la **rotazione** della linea **d'asse dell'impalcato**
 - Appoggio est (ch 14 e 15) ed ovest (ch 10 e 11): trasduttori estensimetrici AEP da 25 mm
 - Abbassamento relativo della chiave **dell'arco** rispetto **all'impalcato** (ch 12 e 13): trasduttori estensimetrici AEP da 50 mm con fili invar di lunghezza circa 18 m e molle di tensionamento
 - Abbassamento **dell'impalcato** ai sestri lato ovest (ch 0 – 5) rilevato con trasduttori potenziometrici a filo MicroEpsilon con corsa 500 mm circa

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Schema strumenti prova statica



La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Certificato di prova n° 13438/72 Trento, 24 maggio 2011



Tabella 1: masse impiegate nelle prove sostitutive dei TMD e dell'assito.

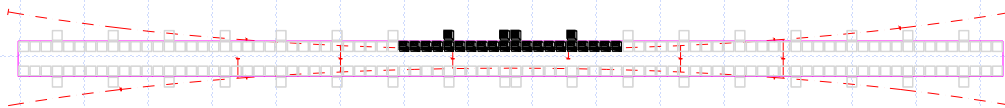
	Massa [t]
Blocco calcestruzzo TMD orizzontale 1 (figura 2)	2.45
Blocco calcestruzzo TMD orizzontale 2 (figura 2)	2.45
Assito Bangkari TMD verticale (figura 2)	2.75

- Area calpestabile impalcato $104 \times 3.14 \text{ m} = 327 \text{ m}^2$
- Peso cassone vuoto 0.32 kN ; peso di 208 cassoni 66.6 kN (0.2 kN/m^2)
- Peso acqua contenuta 6.52 kN , per 208 cassoni 1356 kN (4.1 kN/m^2)
- Variazione di carico corrispondente al riempimento dei cassoni: 1356 kN (4.1 kN/m^2)
- Era inoltre presente del materiale accatastato (legname e blocchi di calcestruzzo) a simulare la massa dei TMD e **dell'assito**; inoltre erano stati realizzati i parapetti
- **E'** stato applicato il sovraccarico permanente e variabile di progetto (comb. rara)

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Combinazioni di carico 1/2

Schema di carico 1 (22 cassoni)



Schema di carico 2 (44 cassoni)



Schema di carico 3 - parziale (50 cassoni)



Schema di carico 3 - parziale (80 cassoni)



Schema di carico 3 - parziale (100 cassoni)



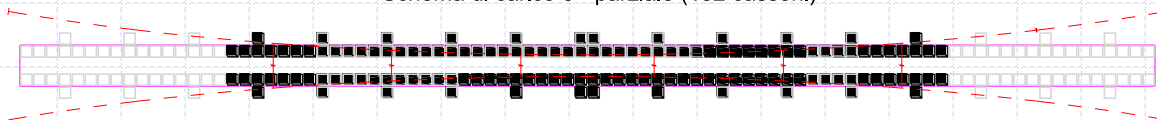
Schema di carico 3 - parziale (100 cassoni)



La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Combinazioni di carico 2/2

Schema di carico 3 - parziale (132 cassoni)



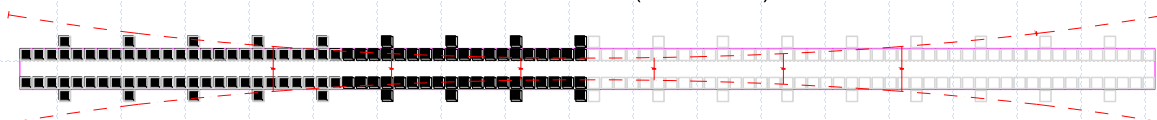
Schema di carico 3 (208 cassoni)



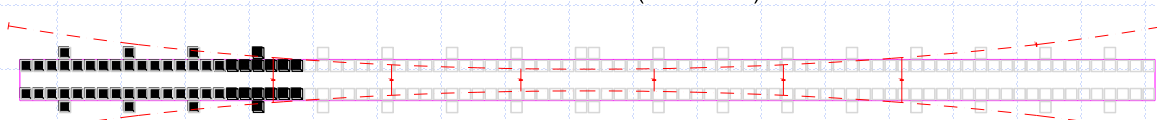
Schema di carico 4 - parziale (156 cassoni)



Schema di carico 4 (104 cassoni)



Schema di carico 5 (52 cassoni)



La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Risultati

Tabella 1. Valori di spostamento acquisiti dagli strumenti nelle varie combinazioni di carico. La posizione degli strumenti è indicata nella Figura 1.

posizione		monte						valle					
cassoni n.	carico [kN]	10 [mm]	0 [mm]	2 [mm]	4 [mm]	14 [mm]	12 [mm]	11 [mm]	1 [mm]	3 [mm]	5 [mm]	15 [mm]	13 [mm]
22	143	-0.55	11.25	-4.56	-16.75	-0.56	-0.21	-0.54	-1.04	-1.84	-11.45	-0.51	-1.37
44	287	-1.17	22.59	-9.24	-32.72	-1.13	-1.15	-1.23	5.52	-5.88	-28.69	-1.09	-1.56
50	326	-1.29	18.69	-15.56	-34.84	-1.36	-1.28	-1.45	5.49	-10.26	-29.51	-1.31	-1.89
80	522	-1.12	4.86	-35.81	-43.16	-1.94	-1.56	-1.29	4.36	-30.40	-37.82	-1.85	-2.26
100	652	-1.53	18.10	-20.91	-38.78	-1.54	-1.56	-1.80	-0.16	-14.96	-32.64	-1.52	-2.44
132	861	-1.45	14.98	-9.20	-22.51	-0.83	-1.63	-1.72	0.24	-2.80	-16.09	-0.94	-2.68
208	1356	-0.07	-3.21	4.72	4.38	1.18	-1.63	-0.17	-11.89	10.32	11.53	0.88	-2.53
156	1017	2.51	-101.23	-90.00	-32.12	-2.21	-1.60	2.64	-100.95	-87.29	-27.69	-2.95	-1.89
104	678	4.56	-173.97	-141.65	-25.85	-3.07	-1.17	4.92	-175.30	-139.65	-21.45	-3.62	-1.21
52	339	4.79	-180.46	-145.61	-24.49	-3.50	-1.14	5.21	-180.82	-144.13	-20.17	-3.66	-1.05
0	0	-0.22	-3.06	1.75	2.59	0.34	0.58	-0.06	-3.08	2.40	6.56	0.27	0.48

Tabella 2. Valori massimi e minimi di freccia e freccia residua percentuale.

strumento	10 [mm]	0 [mm]	2 [mm]	4 [mm]	14 [mm]	11 [mm]	1 [mm]	3 [mm]	5 [mm]	15 [mm]
freccia massima	4.79	22.59	4.72	4.38	1.18	5.21	5.52	10.32	11.53	0.88
freccia minima	-1.53	-180.46	-145.61	-43.16	-3.50	-1.80	-180.82	-144.13	-37.82	-3.66
f. residua/f. massima [%]	14.4%	1.7%	1.2%	6.0%	9.6%	1.2%	1.7%	1.7%	17.4%	7.4%

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Abbassamento degli archi

- I dati sono stati acquisiti con centraline HBM Spider 8

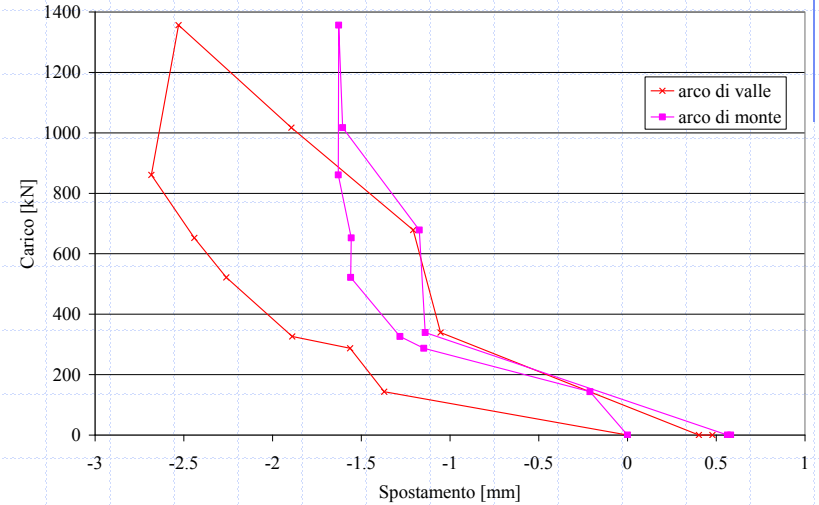


Diagramma carico – spostamento per la deformazione relativa impalcato - archi.

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Spostamenti dell' impalcato

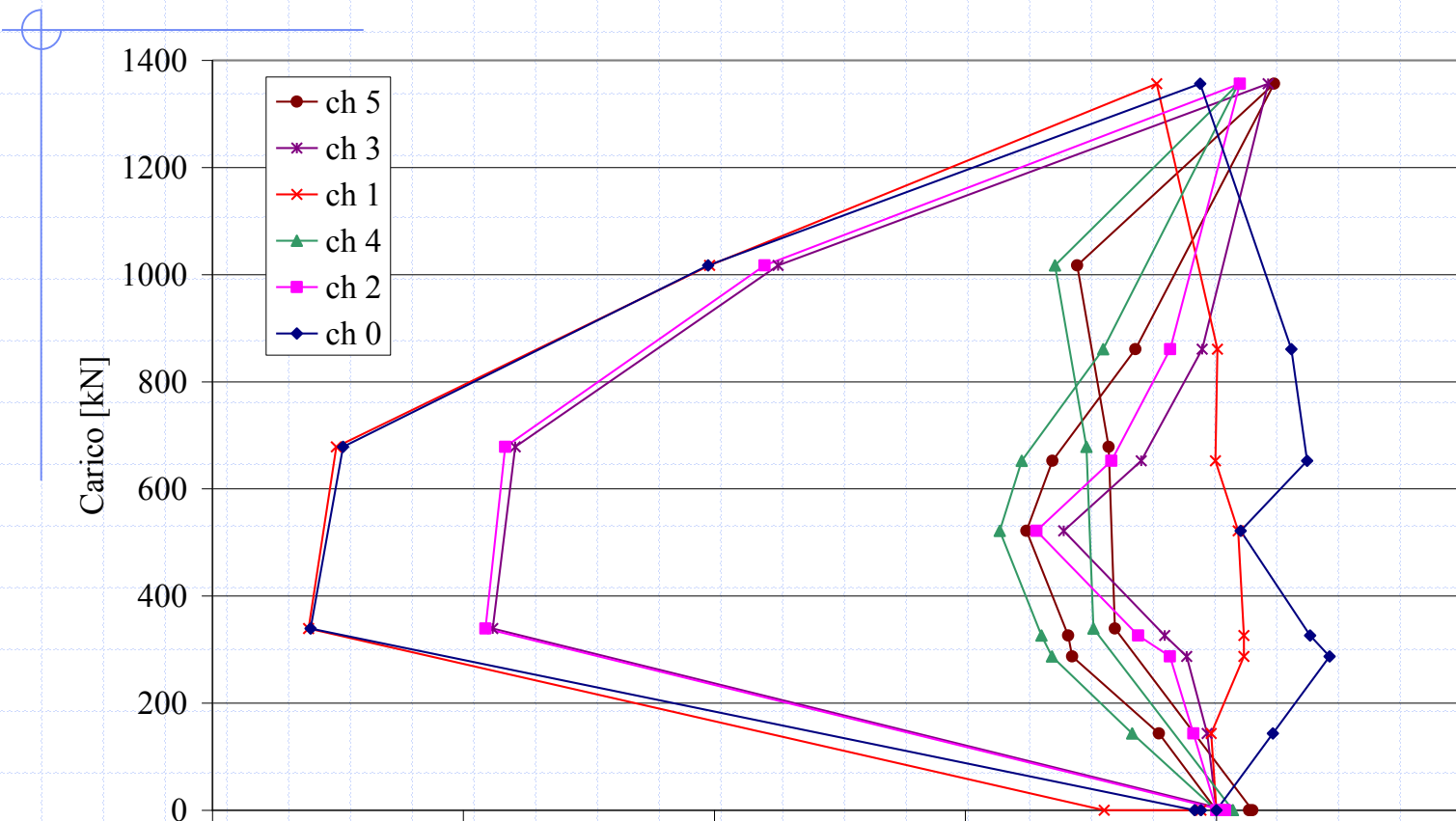


Diagramma carico – spostamento dell'impalcato.

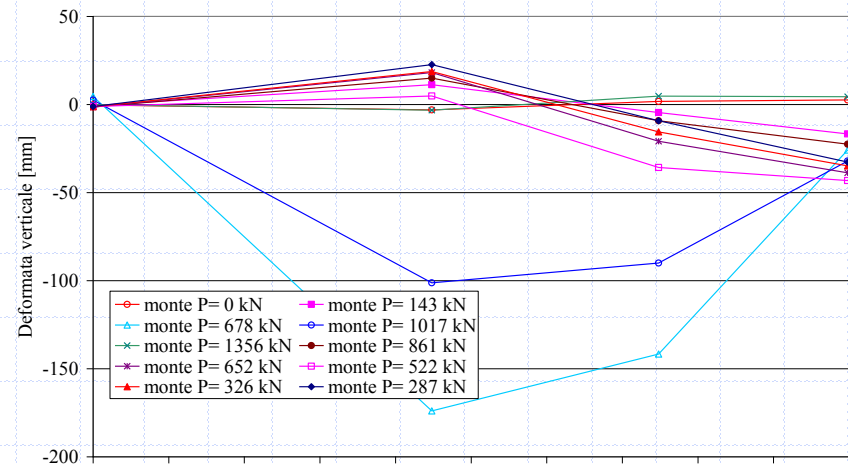
La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Spostamenti dell' impalcato

Vista dell'opera dall'argine nord-ovest (da monte)



Deformata dell'impalcato di monte:
porzione ovest.



La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Spostamenti degli appoggi

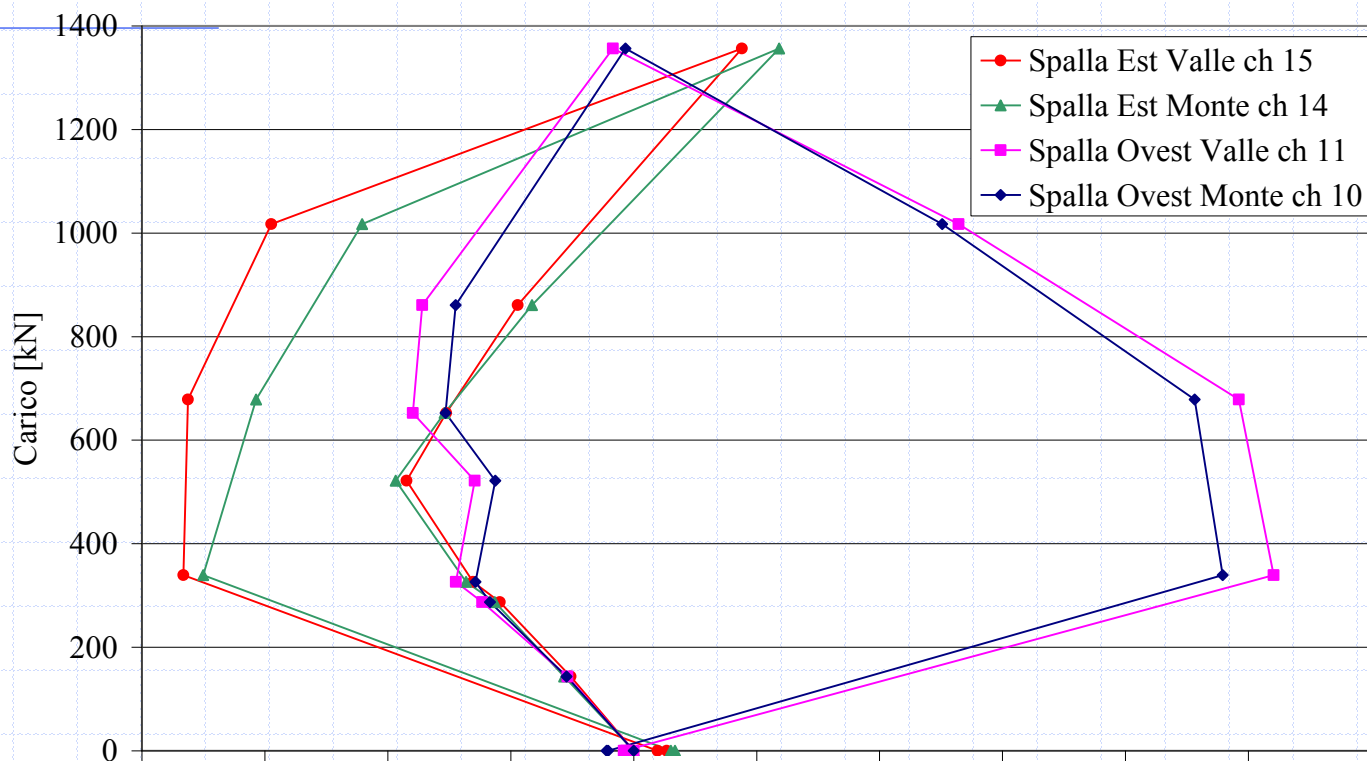


Diagramma carico – spostamento relativo al cedimento degli appoggi.

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Spostamenti dei parapetti

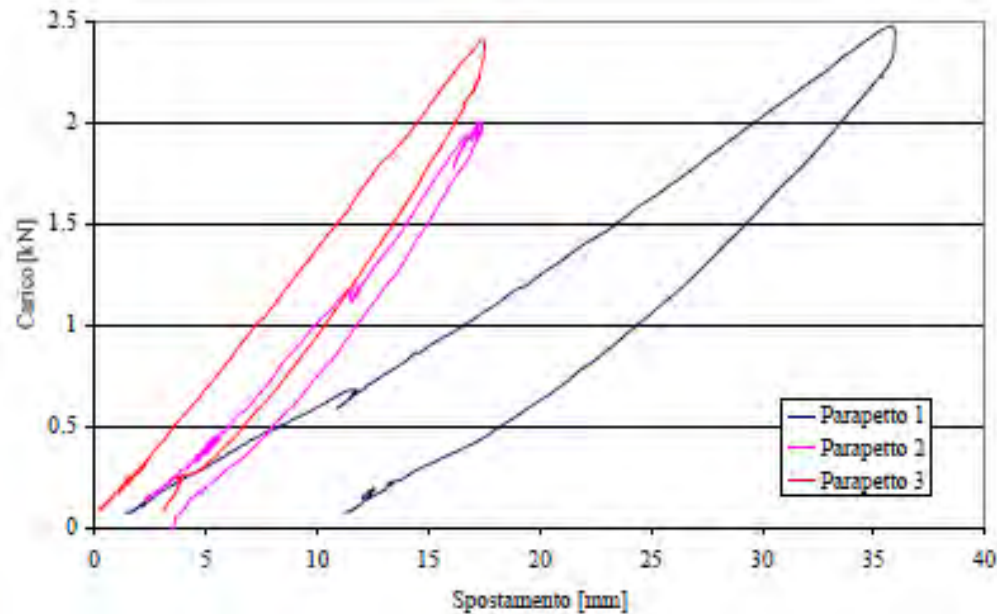


Diagramma carico – spostamento relativo ai parapetti

Tabella 3. Valori del carico massimo applicato e dello spostamento di un parapetto.

Parapetto	Carico massimo [kN]	Spostamento corrispondente [mm]
1	35.77	2.48
2	17.27	2.00
3	17.3	2.40

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Analisi dinamiche

Analisi modale:
sono stati considerati gli
effetti delle tensioni e delle
deformazioni precaricando la
struttura

- Struttura leggera
- Elevata snellezza
- Ridotto smorzamento

Frequenze proprie basse

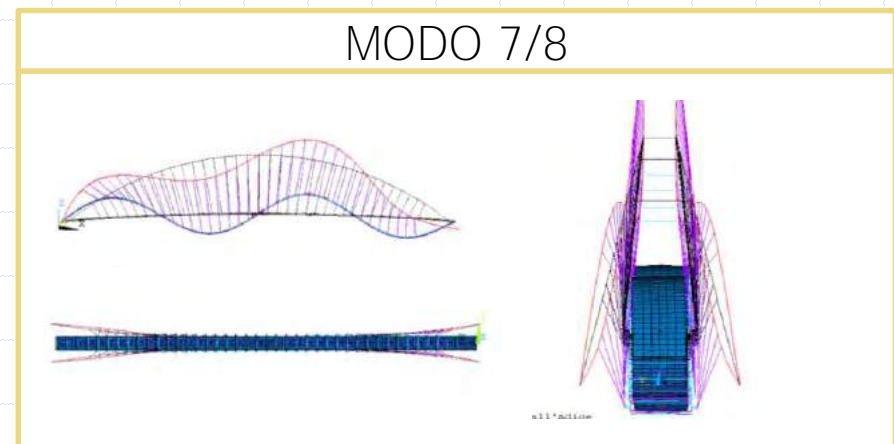
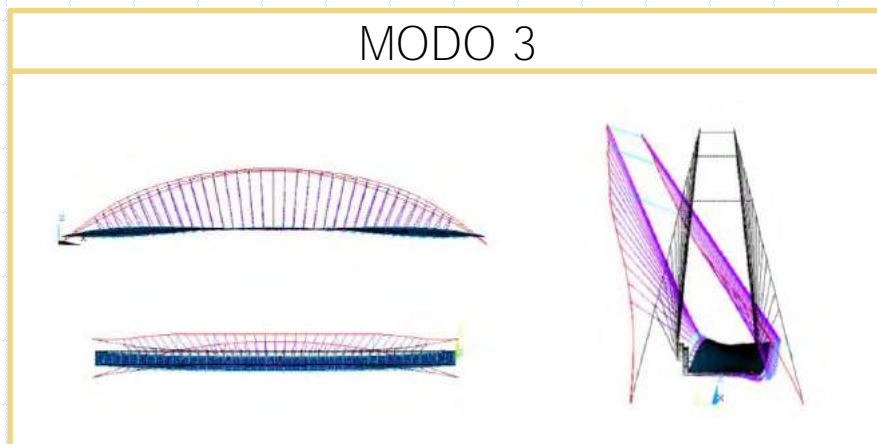
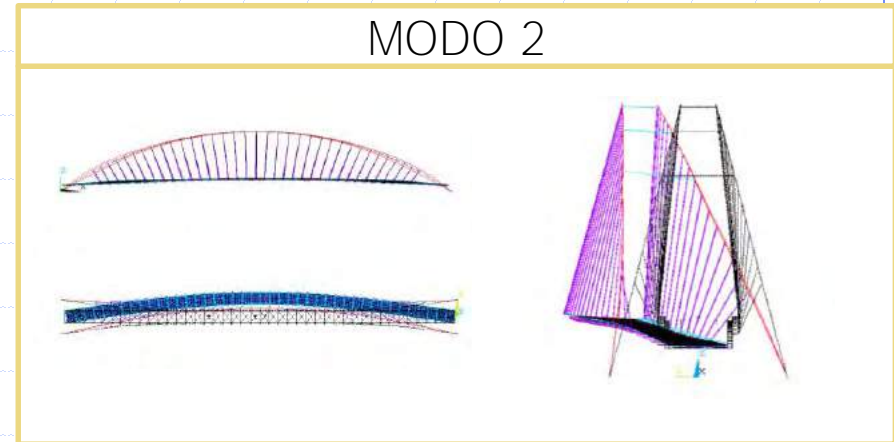
Modo	Frequenza [Hz]	
	Soletta non collaborante	Soletta collaborante
1	0.49732	0.49809
2	0.69768	0.81867
3	0.80824	0.85089
4	1.0362	1.0586
5	1.1487	1.1511
6	1.4921	1.4917
7	1.88	2.1626
8	2.1574	2.6843
9	2.7312	2.7288
10	2.8358	2.8704

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Analisi dinamiche

Tre forme modali potenzialmente suscettibili ai fini dell'eccitazione dinamica dovuta all'azione dei pedoni

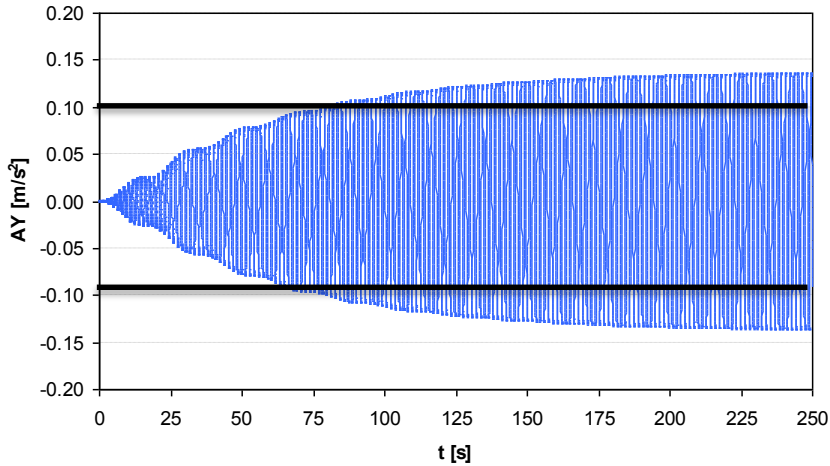
Modo	Frequenza [Hz]	
	Soletta non collaborante	Soletta collaborante
2	0.69768	0.81867
3	0.80824	0.85089
7	1.88	2.1626
8	2.1574	2.6843



La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

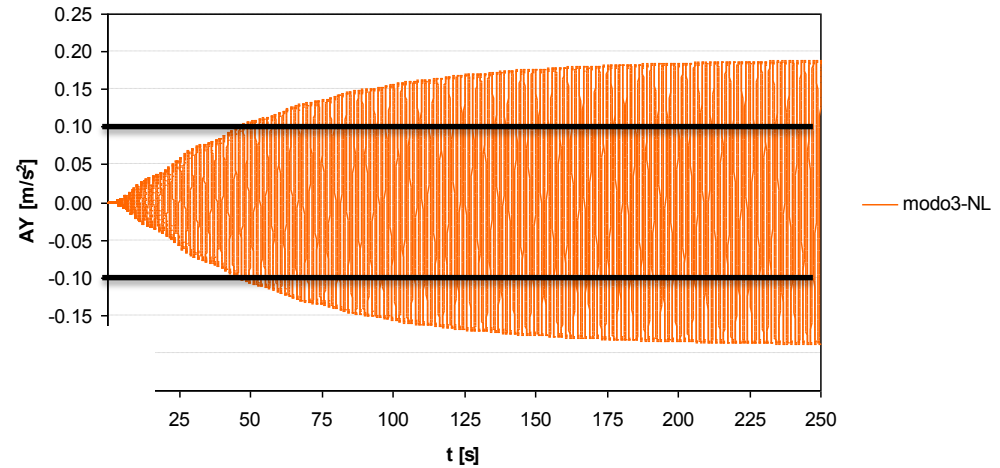
ANALISI DINAMICA PER CARICO PEDONALE
Passerella di S.Michele all'Adige

Analisi dinamiche



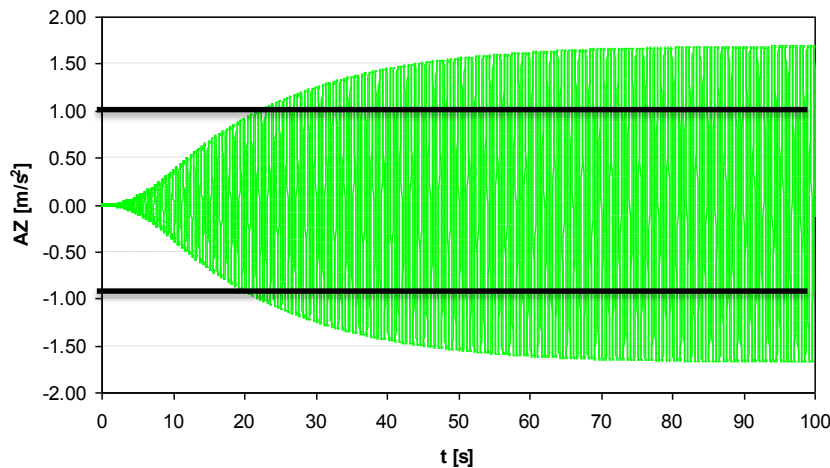
← MODO 2

ANALISI DINAMICA PER CARICO PEDONALE
Passerella di S.Michele all'Adige



MODO 3 →

ANALISI DINAMICA PER CARICO PEDONALE
Passerella di S.Michele all'Adige



← MODO 7

February 24, 2014

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Progetto degli Smorzatori a Massa Accordata (TMD)

Formula di den Hartog:

$$\mu = \frac{M_{TMD}}{M_S} \quad M_S = \left(\frac{1}{\psi_k^j} \right)^2$$

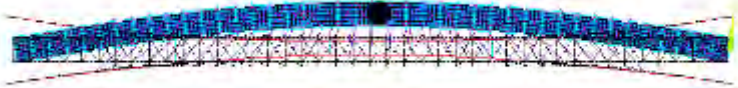
$$\omega_{TMDOPT} = \frac{1}{1 + \mu} \omega_S$$

$$k_{TMD} = M_{TMD} \omega_{TMD}^2$$

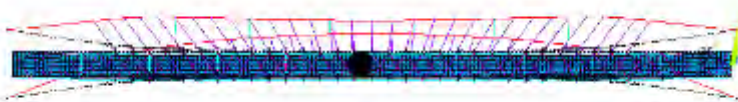
$$\xi_{TMDOPT} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}}$$



Modo 2



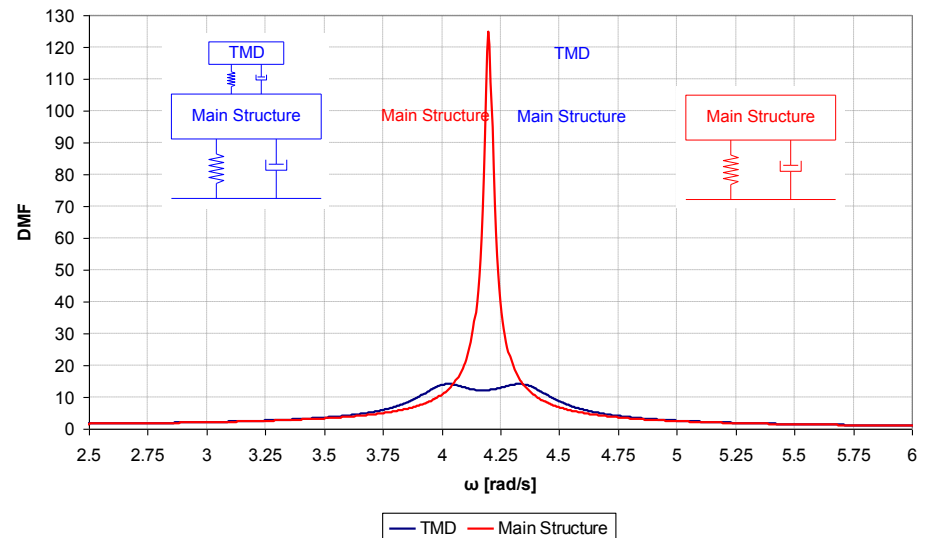
Modo 3



Modo 7/8



Frequency Response Function
Main Structure $\xi = 0.4 \%$; TMD $\xi_{opt} = 6.08 \%$



La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Caratteristiche di progetto dei TMD

MODO 2 laterale

m_s	f_s	w_{modal}	m_{TMD}	m_{eff}	a_{opt}	k_{TMD}	x_{opt}	C_{TMD}	w_{TMD}
196.80	0.669	4.20	2.00	1.0%	0.9899	34.58	0.0608	1.01	4.1583

MODO 3 laterale

184.56	0.721	4.53	2.00	1.1%	0.9892	40.21	0.0627	1.12	4.4838
--------	-------	------	------	------	--------	-------	--------	------	--------

MODO 7 verticale

143.34	2.001	12.57	2.00	1.4%	0.9862	307.48	0.0708	3.51	12.399
--------	-------	-------	------	------	--------	--------	--------	------	--------

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Fase di pre-test

Verifica delle bontà della configurazione scelta:

Controllo basato **sulla sola correlazione geometrica**:
matrice di *AutoMAC*, calcolata sugli autovettori numerici ridotti ai soli DOF misurati

Verifica di auto-ortogonalità:
verificare che i modi di vibrare 'veri' ortogonalizzino la matrice di massa ridotta ai soli punti di misura

$$AutoMAC(A, X) = \frac{|\{\psi_X\}^T \{\psi_X\}|^2}{\{\psi_X\}^T \{\psi_X\} \cdot \{\psi_X\}^T \{\psi_X\}};$$

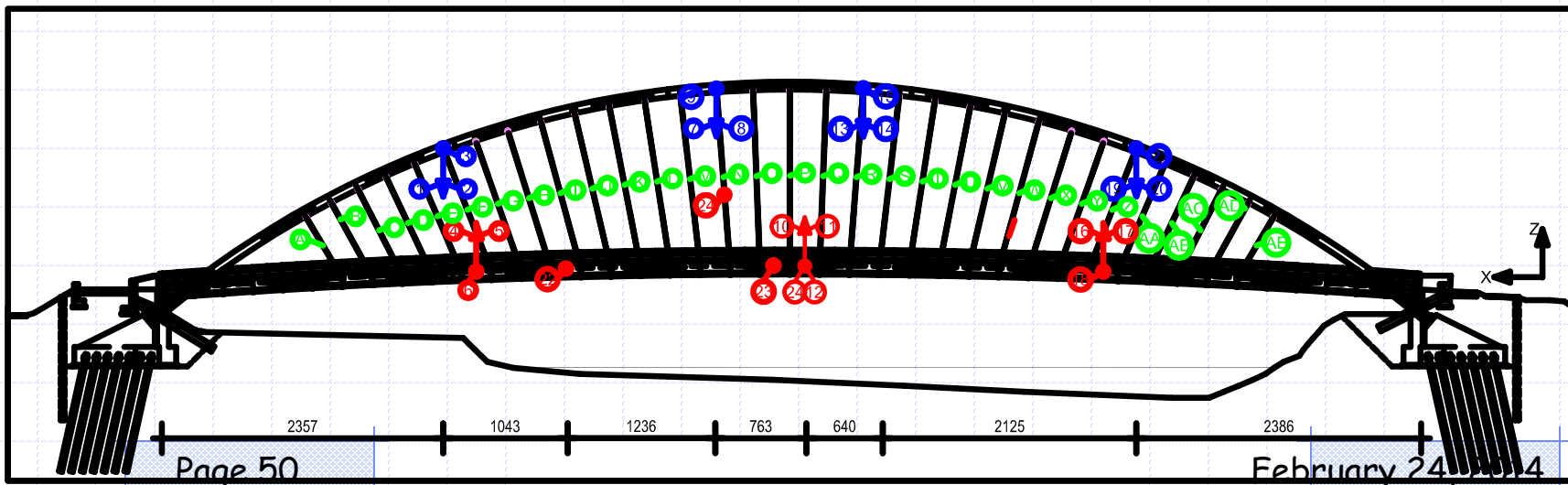
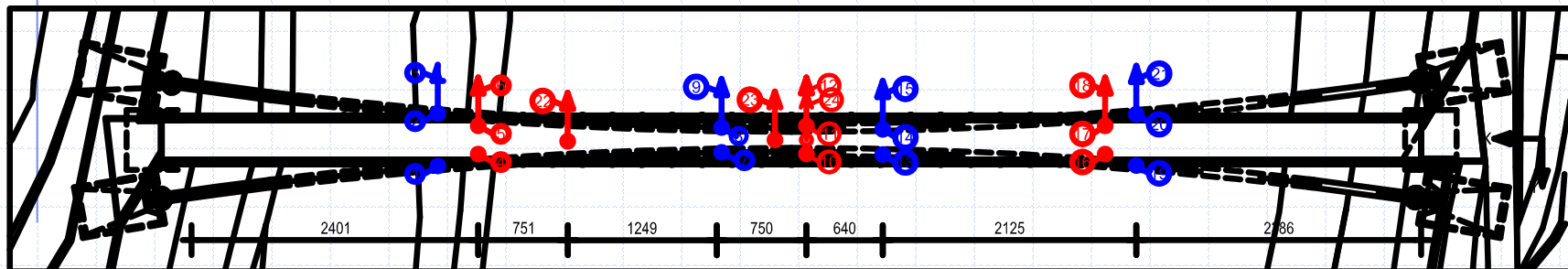
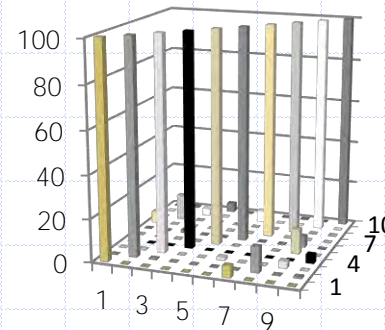
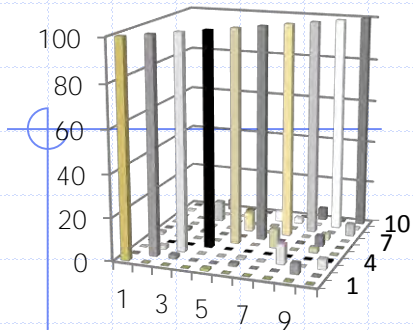
$$\{\psi_a\}^T [M_{aa}] \{\psi_X\}$$

$$[M_{aa}] = [T_{ga}]^T [M_{gg}] [T_{ga}]$$

$$[K_{aa}] = [T_{ga}]^T [M_{gg}] [T_{ga}]$$

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Fase di pre-test



La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Fase di test (Marzo, 2011)

Le prove di identificazione sono state effettuate a manufatto non ancora completato:

- **assenza dell'assito Bangkari di calpestio della passerella**
- assenza dei TMD
- parapetti della passerella fissati solo nei primi 20 metri di manufatto lato destra Adige

In attesa della costruzione dei TMD durante le prove sono state impiegate delle masse sostitutive

	Massa [t]
Blocco cls TMD orizzontale 1	2.45
Blocco cls TMD orizzontale 2	2.45
Assito Bangkari TMD verticale 3	2.75

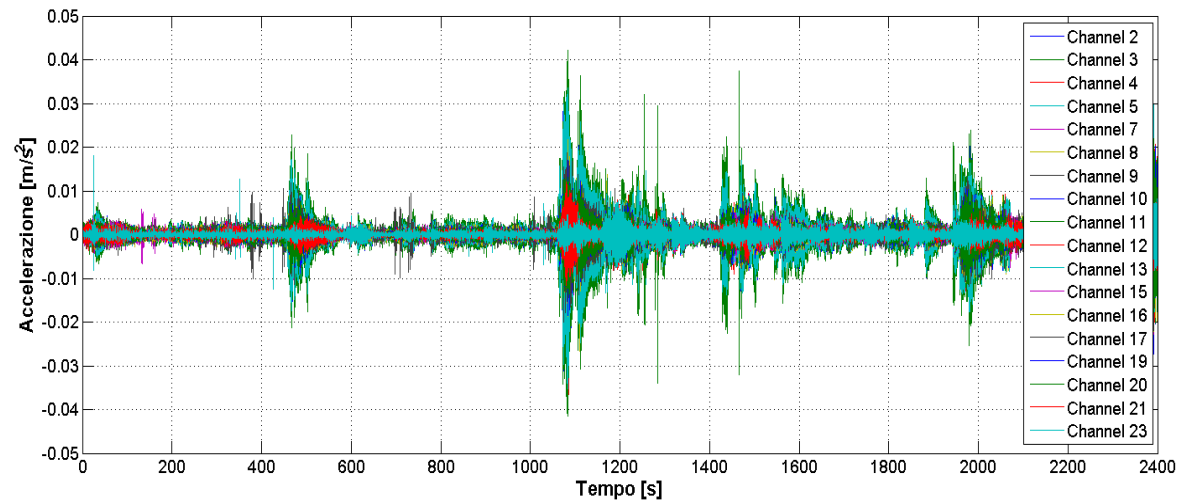


La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Fase di test

Tipi di forzanti:

- Eccitazione ambientale



Tipi di forzanti:

- Rilascio di massa

$$\begin{cases} M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0 \\ x(0) = x_0 \\ \dot{x}(0) = 0 \end{cases}$$

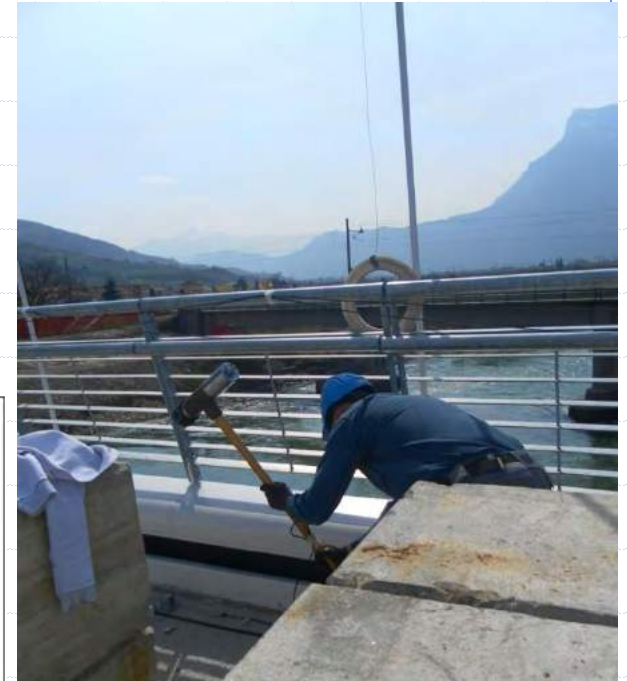
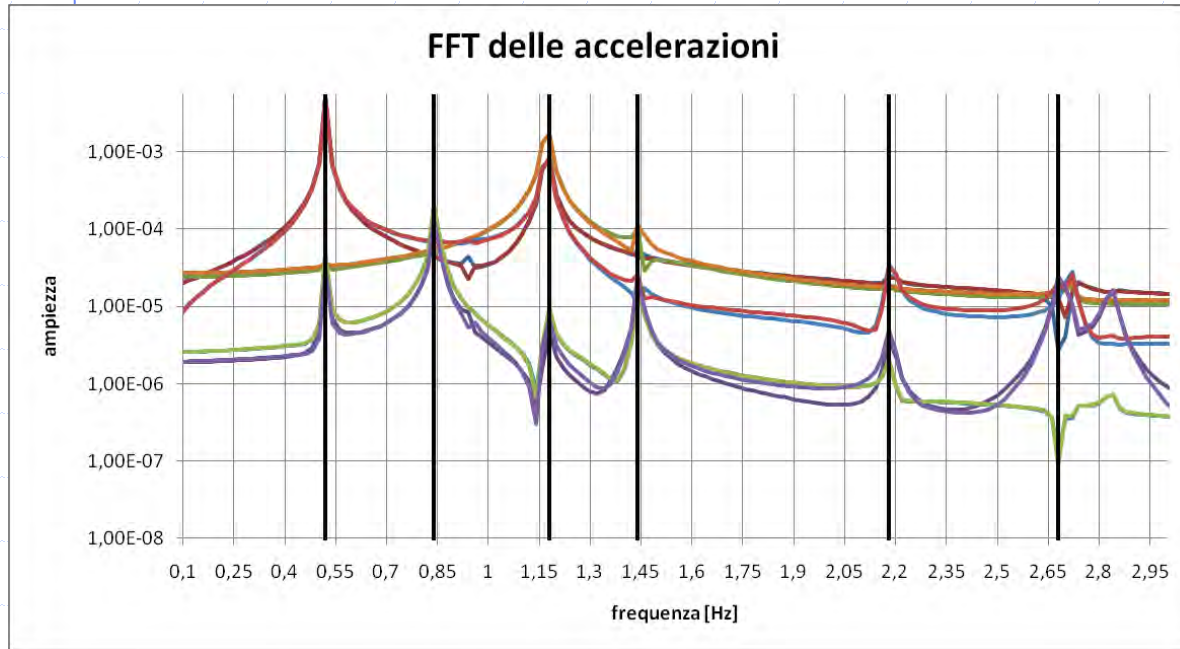


La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Fase di test

Tipi di forzanti:

- Impatto



La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Fase di test (31/03/2011)

Modo	Sperimentale	Soletta non collaborante	Errore	Soletta collaborante	Errore
1	0.6564	0.4973	24.2%	0.4981	24.1%
2	0.8925	0.8029	10.0%	0.8187	8.3%
3	1.1308	0.8426	25.5%	0.8509	24.8%
4	1.3710	1.0601	22.7%	1.0586	22.8%
5	1.4081	1.1264	20.0%	1.1511	18.3%
6	1.8938	1.4963	21.0%	1.4917	21.2%
7	2.4598	2.1482	12.7%	2.1626	12.1%
8	2.7050	2.6698	1.3%	2.6843	0.8%
			17.2%		16.5%

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Fase di updating

Scelta dei parametri e loro sensitività:

- visto il carattere statistico e relativa dispersione si è fatto variare il modulo elastico dei materiali impiegati (acciaio e calcestruzzo), nonché la densità ρ del calcestruzzo
- date le tolleranze di produzione si è fatto variare anche lo spessore del tubo
- momento d'inerzia del longherone per i primi 20 m



Parametero	Valore iniziale	Range
Modulo elastico acciaio	210 000 MPa	$\pm 5\%$
Modulo Elastico Calcestruzzo	31 447 MPa	$\pm 15\%$
Densità calcestruzzo	2500 kg/m ³	$\pm 20\%$
Spessore tubi	22 mm	+2.5%
Spessore equivalente soletta	0.0295 m	$\pm 15\%$
Momento di inerzia asse principale longherone nei primi di ponte	0.004294 m ⁴	+20%

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Fase di updating

Funzione obiettivo:

$$f_{obj}(x) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{ident,i} - f_{FEM,i}}{f_{ident,i}} \right)^2$$

L'inversione dei modi 4 e 5 è stata tenuta in conto

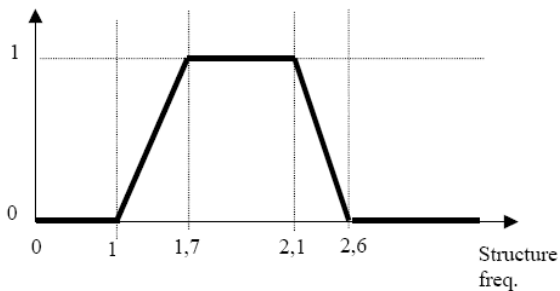
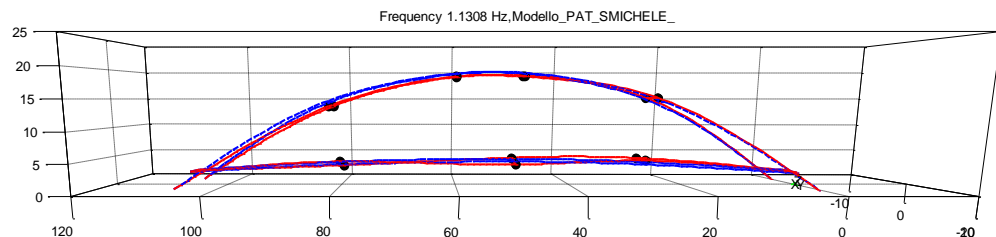
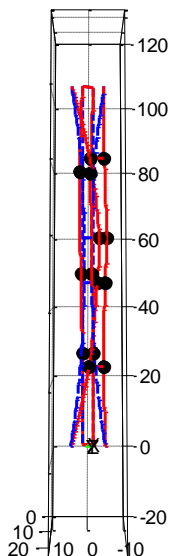
$$f_{obj}(x) = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{f_{ident,i} - f_{FEM,i}}{f_{ident,i}} \right)^2 + \left(\frac{f_{ident,4} - f_{FEM,5}}{f_{ident,4}} \right)^2 + \left(\frac{f_{ident,4} - f_{FEM,5}}{f_{ident,4}} \right)^2 + \sum_{i=6}^7 \left(\frac{f_{ident,5} - f_{FEM,4}}{f_{ident,5}} \right)^2$$

Modo	Sperimentale	Numerico	Errore
1	0.656437	0.66453	-1.23%
2	0.892488	0.84137	5.73%
3	1.130757	1.03852	8.16%
4	1.371038	1.27462	7.03%
5	1.408119	1.30709	7.17%
6	1.893809	1.98398	-4.76%
7	2.459779	2.39737	2.54%
8	2.705046	2.91036	-7.59%

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Fase di updating

Frequency 1.1308 Hz, Modello_PAT_SMICHELE_



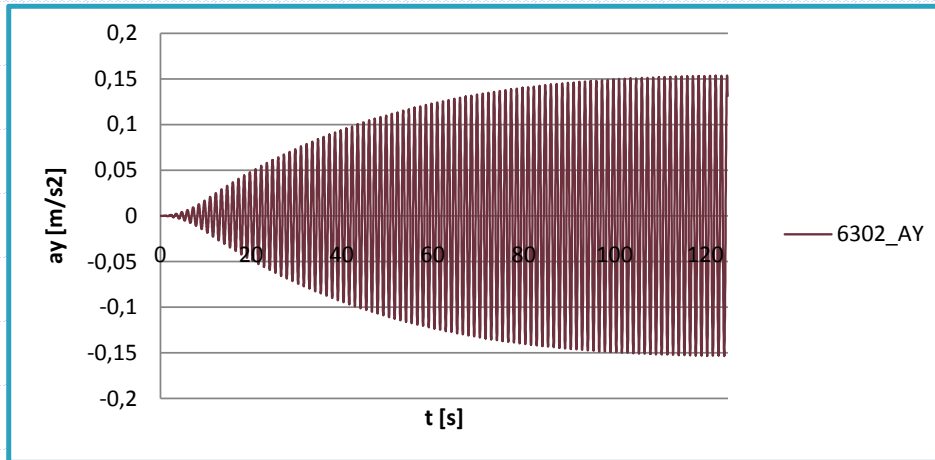
Modo	Frequenza [Hz]		Variazione	Y
	Vecchie stime	Nuove stime		
2	0.819	0.883	8 %	1.000
3	0.851	1.131	33 %	0.845
7	2.163	2.410	11 %	0.380

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

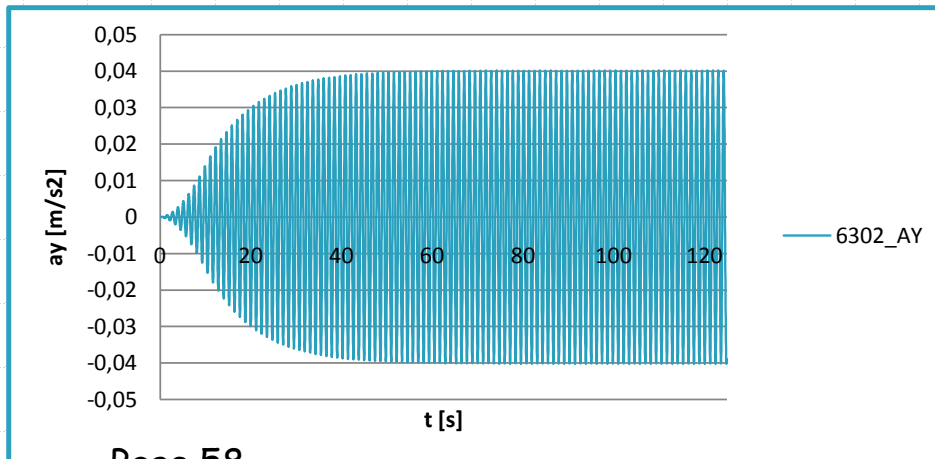
Previsione del modello basato su EF

MODO 2 laterale

m_s	f_s	w_{modal}	m_{TMD}	m_{eff}	a_{opt}	k_{TMD}	x_{opt}	C_{TMD}	w_{TMD}
100.85	0.883	5.55	2.000	2.0	0.98055	59.13	0.08373	1.82	5.43720



Accelerazioni
senza TMD



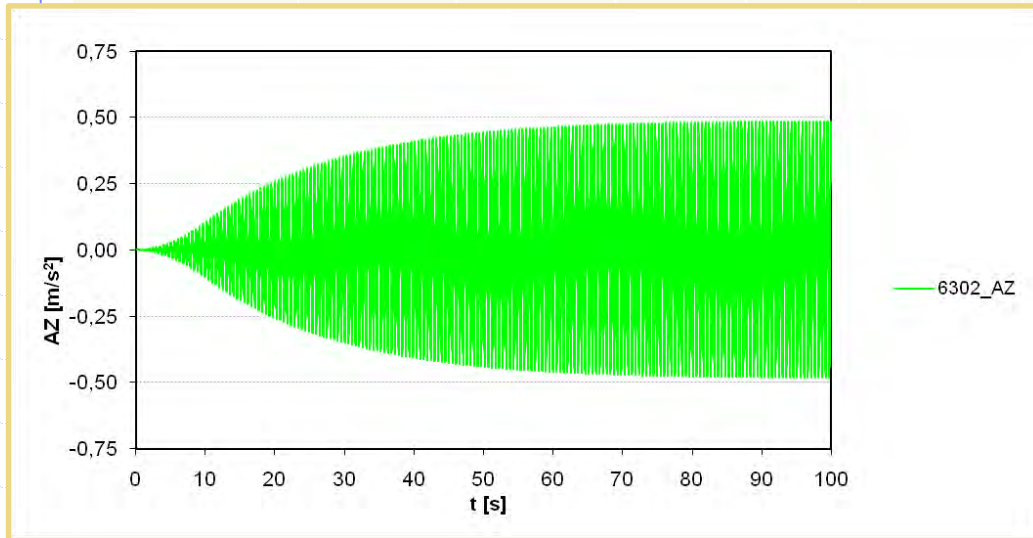
Accelerazioni con
TMD

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

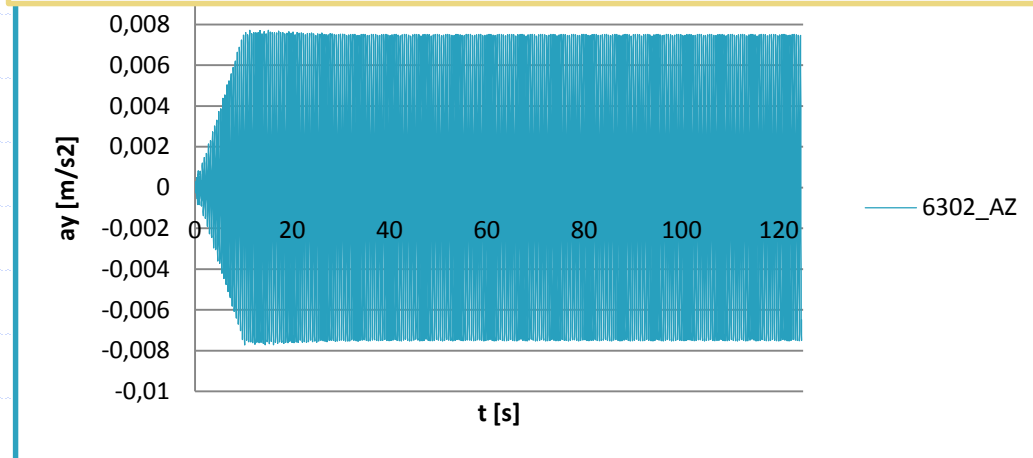
Previsione del modello basato su EF

MODO 7 verticale

m_s	f_s	w_{modal}	m_{TMD}	m_{eff}	a_{opt}	k_{TMD}	x_{opt}	C_{TMD}	w_{TMD}
167.05	2.410	15.14	2.000	1.2	0.98817	447.85	0.06582	3.94	14.9641



Accelerazioni
senza TMD



Accelerazioni con
TMD

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt Confronti

Tabella 22: confronto periodi propri modelli F.E./analisi sperimentali.

		Modello struttura provata il 31 marzo 2011					Modello struttura provata il 4 agosto 2011		
Modo	Periodo SDIT 3[s]		Periodo ANSYS[s]	Errore Periodo[%]	Modo	Periodo SDIT3 [s]		Periodo ANSYS [s]	Errore periodo [%]
1	1,515	1	1,471	2,97%	1	1,493	1	1,400	6,64%
2	1,136	3	1,175	-3,32%	2	1,111	3	1,188	-6,4%
3	0,885	2	0,988	-10,4%	3	0,826	2	0,978	-15,5%
4	0,730	4	0,802	-8,97%	4	0,725	4	0,765	-5,23%
5	0,709	5	0,750	-5,49%	5	0,671	5	0,725	-7,45%
6	0,532	6	0,514	3,55%	6	0,503	6	0,489	2,86%
7	0,407	7	0,408	-0,25%	7	0,410	7	0,400	2,50%
8	0,369	8	0,343	7,59%	8	0,350	8	0,346	1,16%

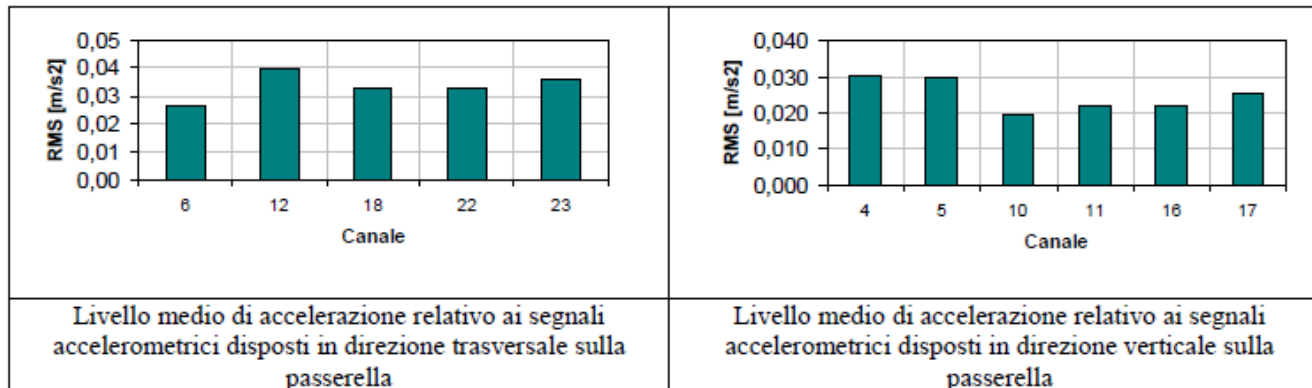


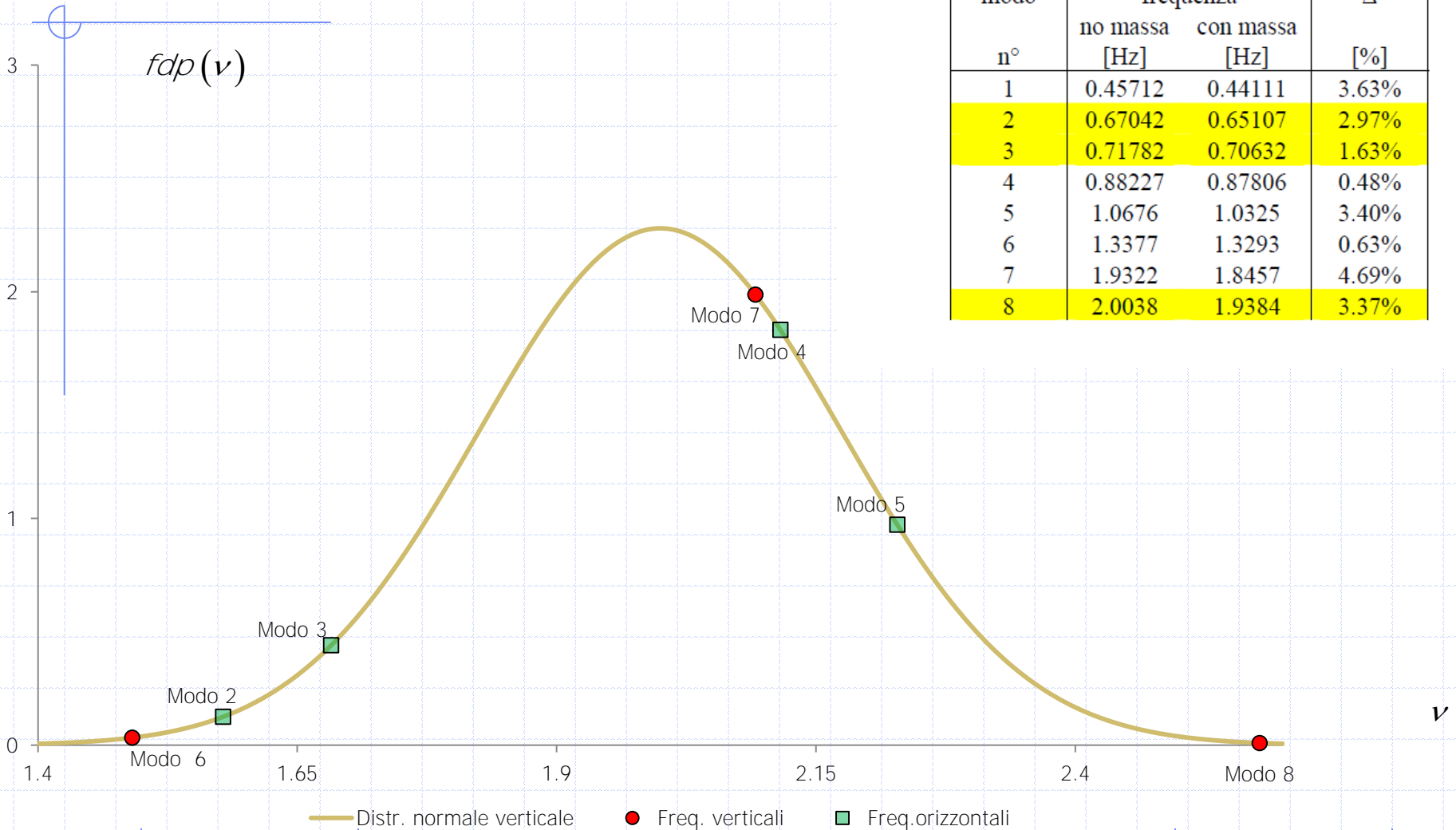
Figura 27: livelli medi di accelerazione sui canali appartenenti alla passerella con TMD.

Massima accelerazione acquisita durante le prove e' risultata < 0.1 m/s²

La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Distribuzione in frequenza

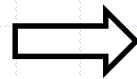
$\mu=2\text{Hz}$ $\sigma=0,175$



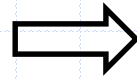
La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

IPOSTESI BASATE SU GUIDELINES SETRA (Ottobre, 2006)

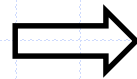
$d = 0,8 \text{ people/m}^2$
 $\xi = 0,4\%$
 $T^* = 2 \text{ h/day}$
 $N^{\circ}_{\text{years}} = 50$
 $V_{\text{pedestrian}} = 1,5 \text{ m/s}$



$$N_{EQ} = 10,8 \cdot \sqrt{A_{\text{deck}} \cdot d \cdot \xi} = 12 \text{ people}$$

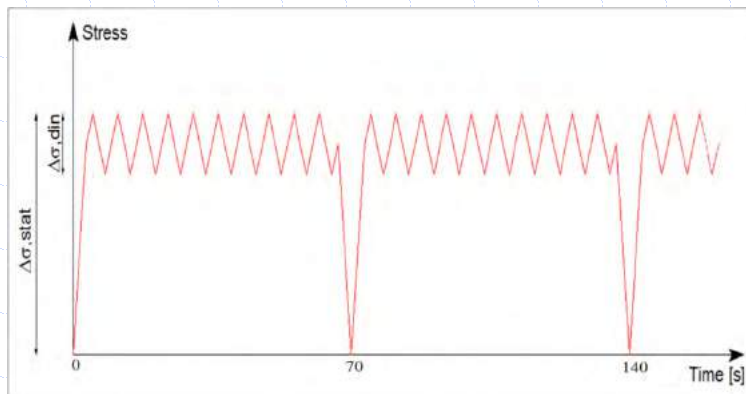


$$n_{\text{static cycles}} = \frac{N^{\circ}_{\text{years}} \cdot 365 \cdot T^* \cdot 60 \cdot 60}{L_{\text{deck}} / V_{\text{pedestrian}}} = 1878395$$



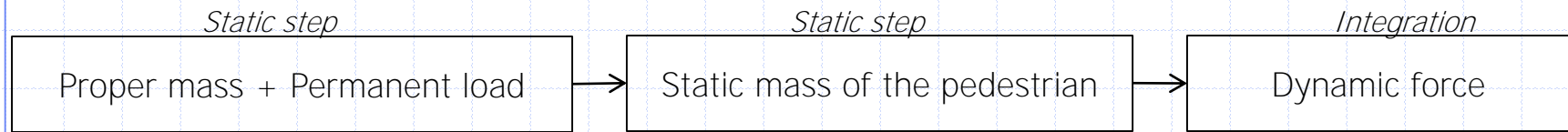
$$n_{\text{dynamic cycles, Mode } i} = N_{\text{years}} \cdot 365 \cdot T^* \cdot 60 \cdot 60 \cdot \int_{\frac{v_i - v_{i-1}}{2}}^{\frac{v_{i+1} - v_i}{2}} f_{dp} \, dv \cdot v_i$$

Mode	$n_{\text{dyn},i}$
6	768626
2	2797963
3	53562252
7	127478574
4	31682460
5	44498332
8	3545846



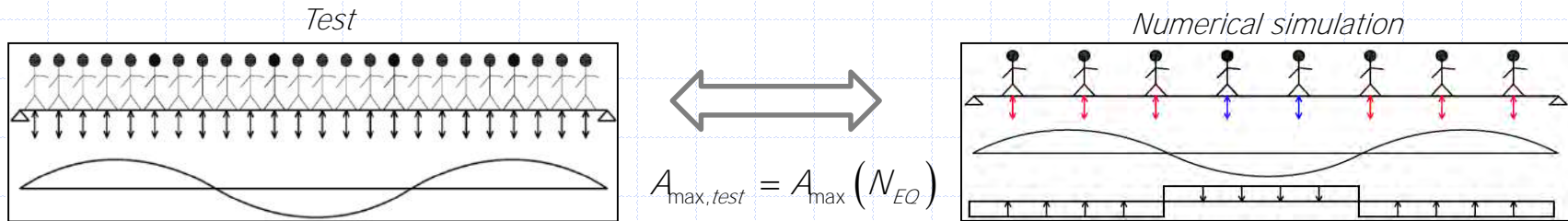
La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Storie temporali



$$\underline{\underline{M}}\underline{\underline{\ddot{d}}}_{i+1} + \underline{\underline{C}}\underline{\underline{\dot{d}}}_{i+1} + \underline{\underline{K}}(\underline{\underline{d}})\underline{\underline{d}}_{i+1} = \underline{\underline{f}}_{i+1}$$

Resonance force in the same direction with the real part of each complex eigenvector



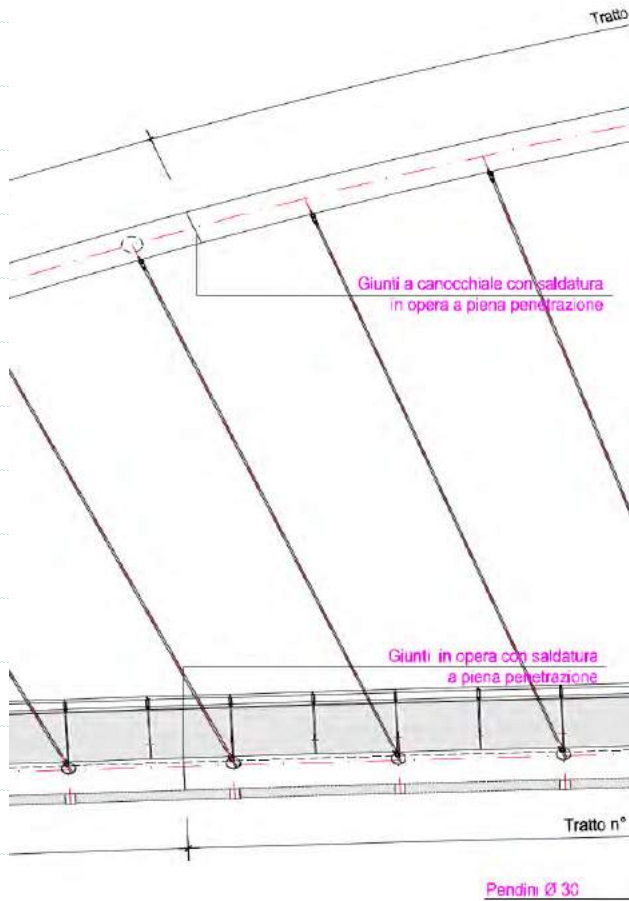
$$F_v(t) = NG_0 + N_{EO} \left[G_1 \sin(2\pi f_m t) + G_2 \sin(2\pi 2f_m t) \right] \psi$$

$$F_L(t) = N_{EO} \left[G_1 \sin(2\pi f_m t) + G_2 \sin(2\pi 2f_m t) \right] \psi$$

$$F_T(t) = N_{EO} \left[G_{1/2} \sin\left(2\pi \frac{f_m}{2} t\right) + G_1 \sin(2\pi f_m t) \right] \psi$$

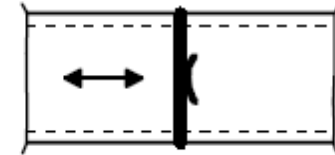
La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Dettagli con saldatura a completa penetrazione



EN 245 – ARCH

71



EN 346 – LATERAL CHORD

63



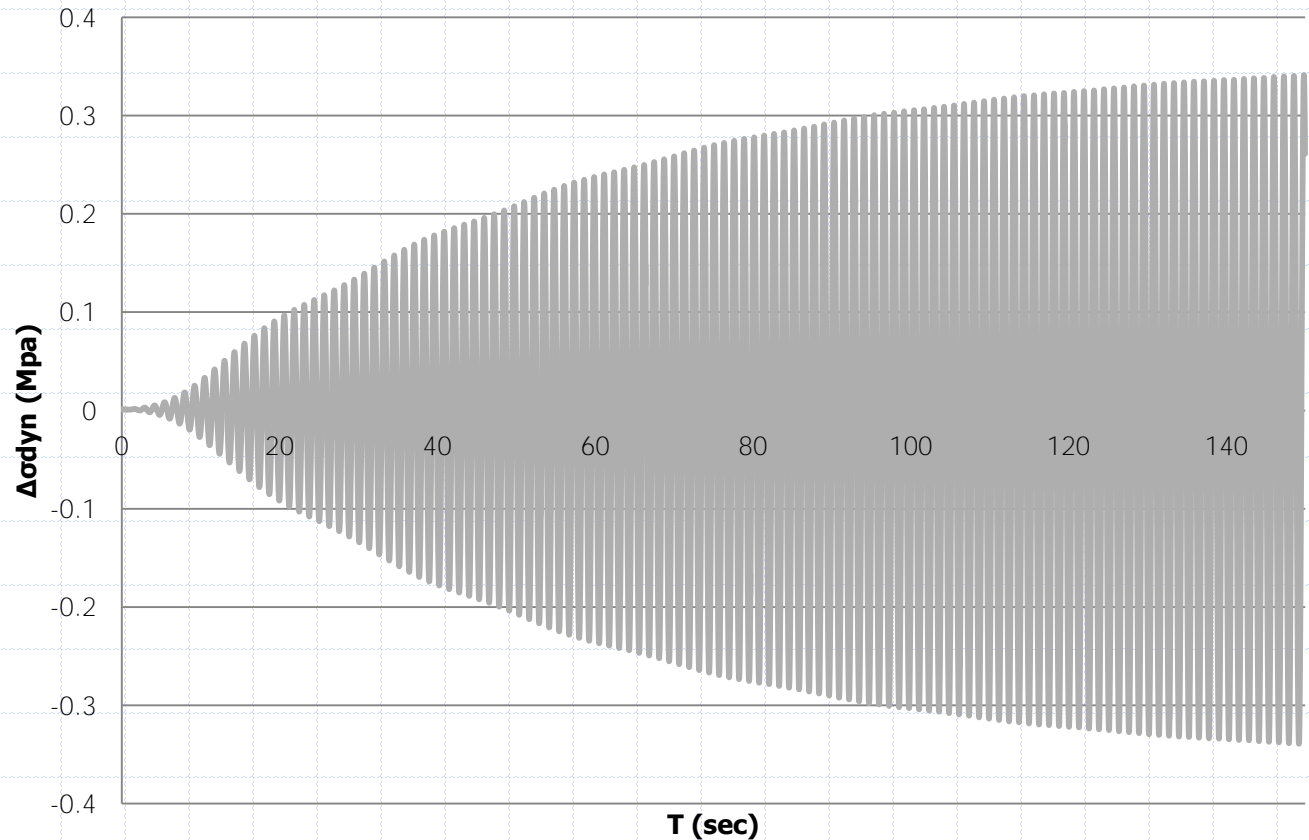
La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

Esempio: Giunto arco-arco saldato per il modo 2.

Elemento N. 245

$$\Delta\sigma_{\text{dyn}} = 0,41 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{\text{stat}} = 1,32 \text{ MPa}$$



La passerella ciclopedonale di San Michele all'Adige/Cnt

$$\Delta\sigma_C = 71,0 \text{ MPa}$$

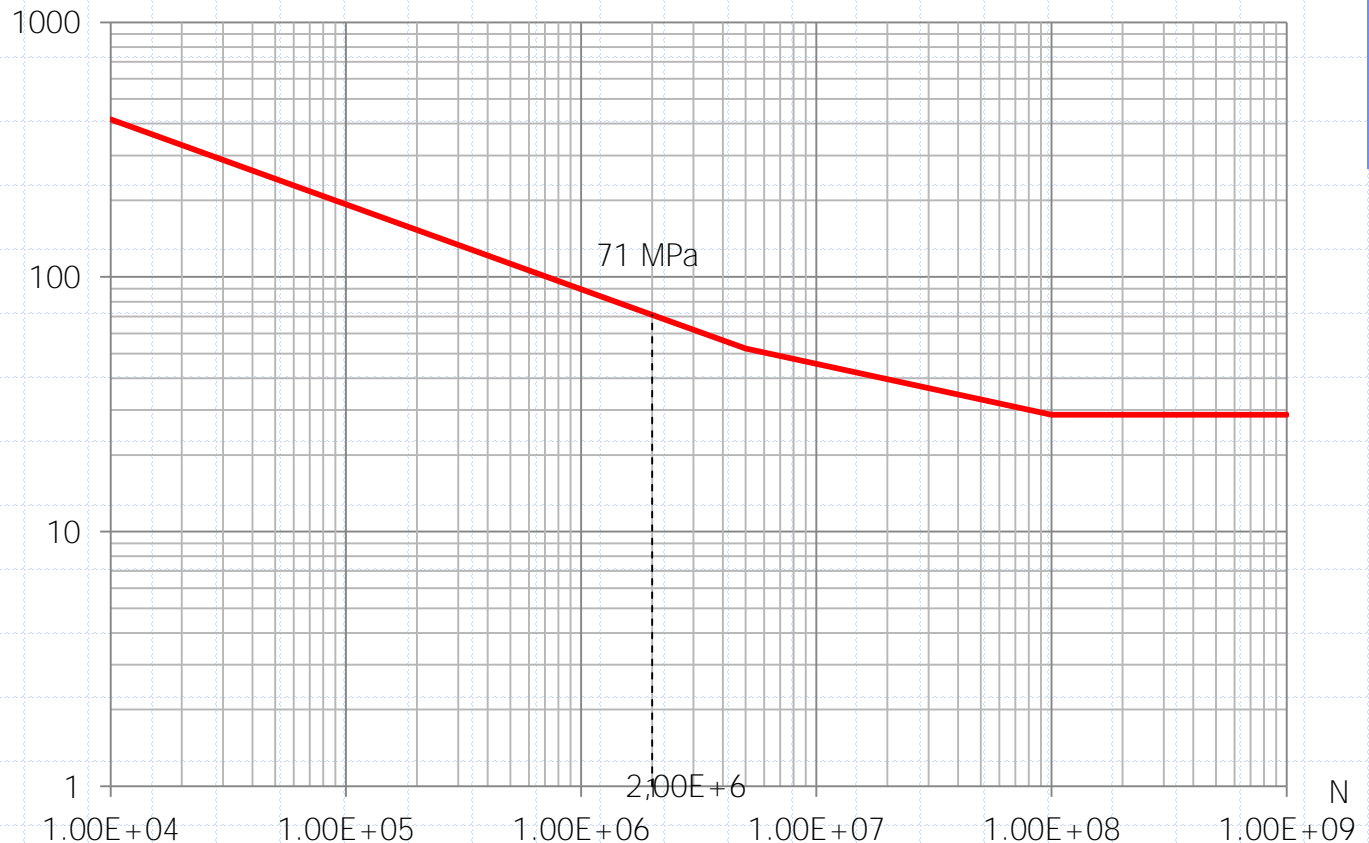
$$\Delta\sigma_D = 52,3 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_L = 28,7 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{\text{dyn}} < \Delta\sigma_L$$

$$\Delta\sigma_{\text{stat}} < \Delta\sigma_L$$

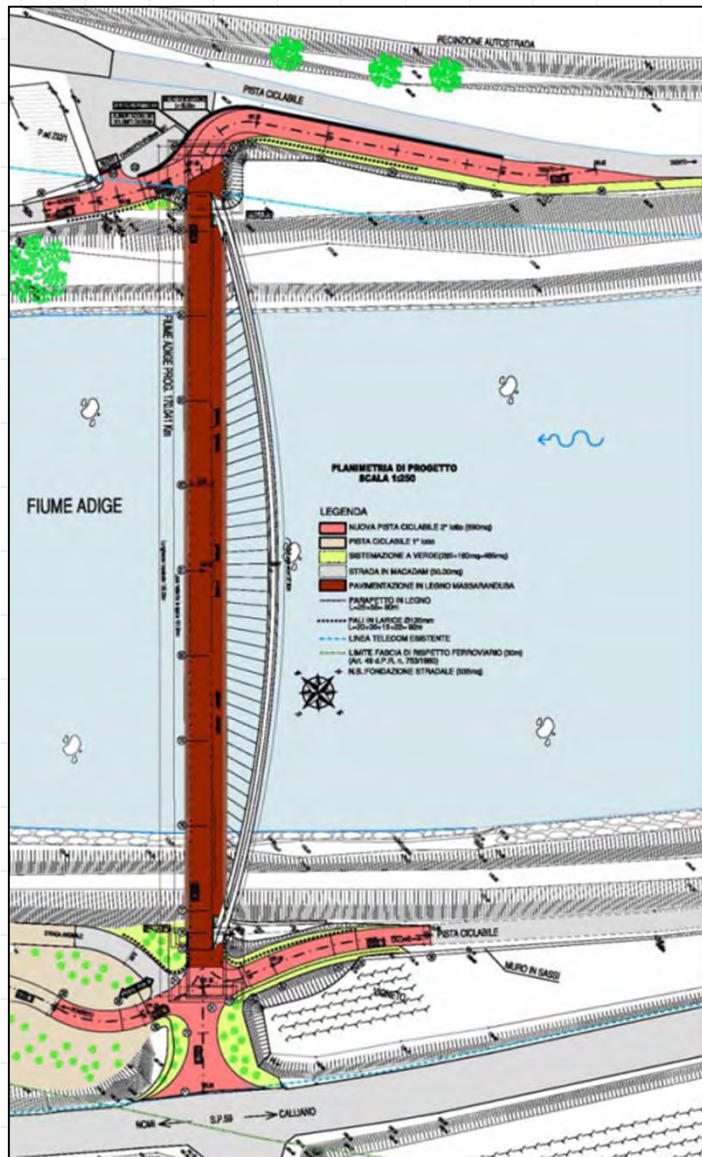
➔ $N = 10^{20}$



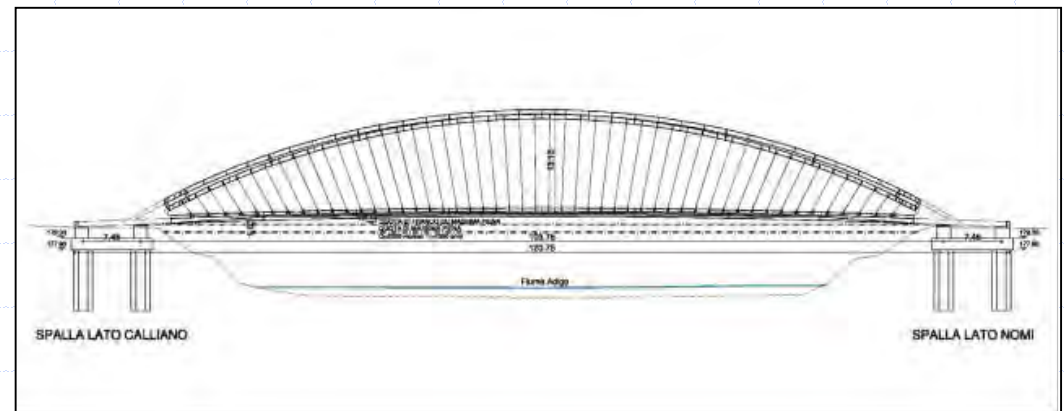
Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano

- Descrizione sommaria dell'opera
- Problematiche relative alle fondazioni
- Identificazione delle caratteristiche dinamiche del ponte
- Predimensionamento di opportuni dispositivi a massa accordata (TMD) per la riduzione delle vibrazioni
- Risultati del monitoraggio

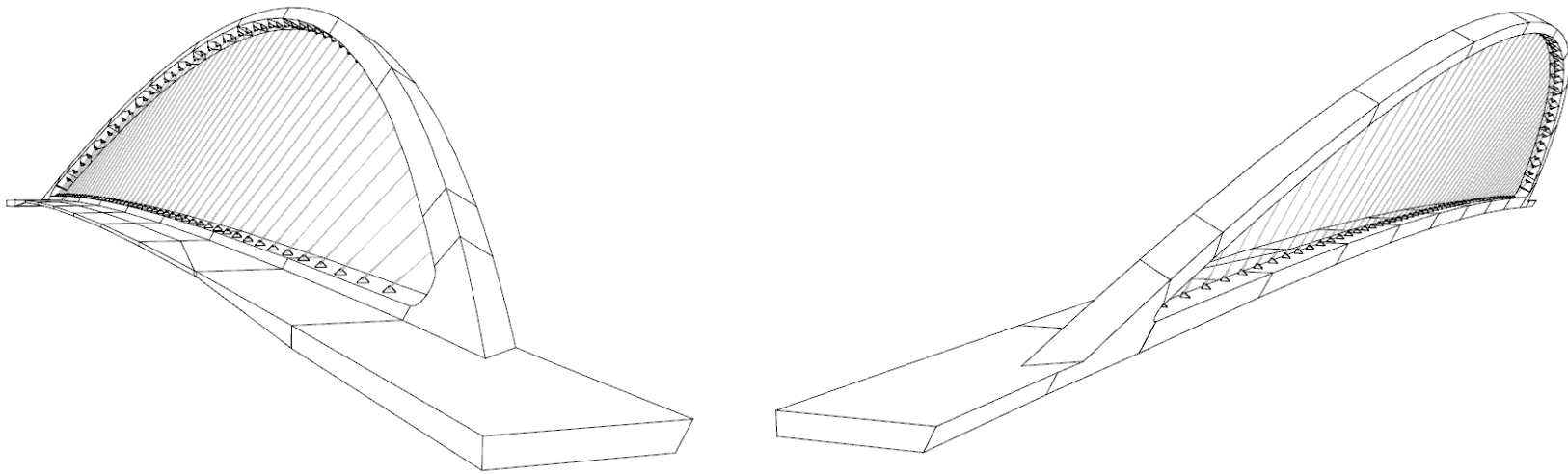
Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano



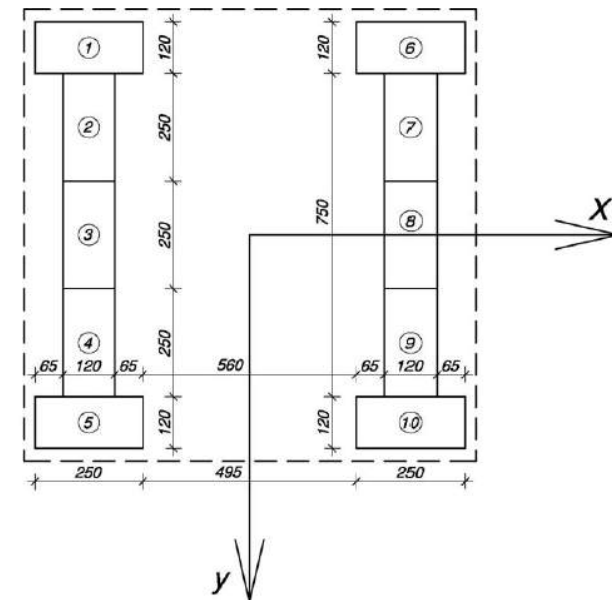
- Superamento del fiume Adige
- Altezza massima dell'opera: 14 m
- Pile non permesse
- Luce: 100 m
- Sovrastruttura ad arco inclinato



Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt



- Costruzione in acciaio CORTEN S355
- Struttura fortemente iperstatica
- Arco inclinato
- Impalcato: piastra ortotropa inflessa nel piano forte
- Assenza di bullonature
- Fondazioni molto rigide, sollecitate a torsione
- Struttura leggera, snella e poco dissipativa



Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

Analisi delle fondazioni

- Incertezza nei parametri meccanici del terreno – correlazioni con prove SPT
- Analisi non lineare in ANSYS del complesso diaframmi di fondazione - terreno
- Definite rigidezza massima e minima per la fondazione
- La rigidezza della fondazione influisce sulle frequenze naturali dell'opera

Sondaggio S1/2007 (spalla SP1, sx orografica)

Quota di imposta della fondazione: 178,80 [m]
 Quota di riferimento sondaggio (circa): 180,50 [m]

$\gamma = 18$ [kN/m³] peso per unità di volume
 $z_w = 7,00$ [m] profondità della falda da pvc. durante le prove
 ER = 60% rendimento medio della strumentazione utilizzata
 n = 0,50 esponente espressione di C_v

correzione per tener conto che la prova è effettuata con punta chiusa

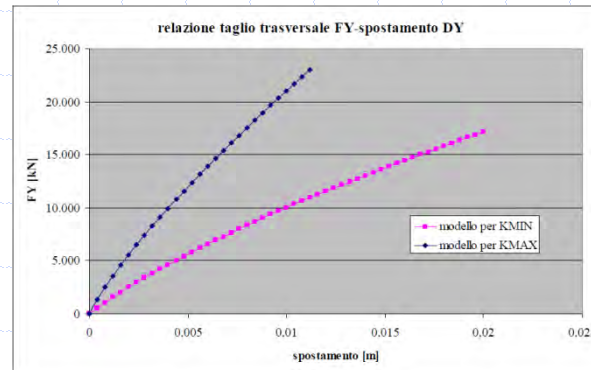
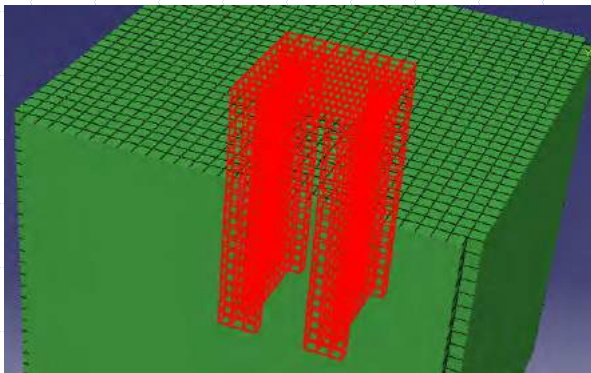
correzione per tener conto del rendimento dello strumento

correzione verticale efficace alla tensione verticale efficace alla profondità di prova

correzione per tener conto della tensione verticale alla profondità di prova

SPT n.	z [m]	litologia	N' [colpi 0-15]	N'' [colpi 15-30]	N''' [colpi 30-45]	punta chiusa	N _{avr}	N _{avr} ^C	N _{avr} ^S	$\sigma'_{v(z)}$ [kPa]	C_v	(N1) ₆₀
1	3,00	ghiaia + sabbia	19	25	20	*	45	32	32	54	1,36	43
2	6,00	sabbia limosa	7	6	5	*	11	8	8	108	0,96	7
3	9,00	ghiaia + sabbia	21	20	24	*	44	31	31	147	0,82	25
4	12,00	ghiaia	30	R	-	*	R	R	R	171	0,76	R
5	15,00	ghiaia	26	35	39	*	74	52	52	195	0,72	37
6	18,00	ghiaia	28	R	-	*	R	R	R	219	0,68	R

Sabbia normalmente consolidata	Sabbia satura	Sabbia sovracconsolidata	Sabbia ghiaiosa e ghiaia	Sabbia argillosa	Sabbia limosa	Schmertmann (sabbia fine)	Schmertmann (sabbia media)	Schmertmann (sabbia grossolana)	Terzaghi, valido per sabbia più ghiaia, inalterabile per valori di N in troppo alti o troppo bassi	D'Appolonia (ghiaia più sabbia)	Drizinovskii (sabbie sovracconsolidate)	Schulze e Merzenbach (sabbia sotto falda)	Webb (sabbia sotto falda)
Es [kPa]	Es [kPa]	Es [kPa]	Es [kPa]	Es [kPa]	Es [kPa]	Es [kPa]	Es [kPa]	Es [kPa]	Es [kPa]	Es [kPa]	Es [kPa]	Es [kPa]	Es [kPa]
23.250	11.625	41.625	45.000	24.500	14.880	11.250	25.200	37.800	63.000	39.287	43.387	70.985	24.201
11.350	5.675	23.775	16.440	8.220	7.264	4.110	6.160	9.240	15.400	19.424	25.037	45.685	11.658
22.900	11.450	41.100	44.160	24.080	14.656	13.040	24.640	36.960	61.600	38.848	42.847	70.240	23.832
33.400	16.700	56.850	69.360	36.680	21.376	17.340	41.440	62.160	103.600	50.381	59.038	92.583	34.896



De Melis (1971), valida per sabbie moderatamente compressibili a qualsiasi profondità (> 2 m da pc), sovrastima per $\sigma'_v < 10$ kPa e per $\psi > 38^\circ$	Road Bridge Specification, valido per sabbie fini o limose ($\sigma'_v > 150/200$ kPa)	Japanese National Railway, valido per sabbie medio-grosse e sabbie ghiaiose ($\sigma'_v > 150/200$ kPa)	Sowers (1961), valido per sabbie in genere ($\sigma'_v < 80$ kPa)	Peck-Hansen e Thierburn, valido per sabbie in genere ($\sigma'_v < 60$ kPa)	Owazaki e Iwasaki, valido per sabbie da medie a grossolane fino a debolmente ghiaiose ($\sigma'_v > 150/200$ kPa)
σ'_v [kPa]	σ'_v [kPa]	σ'_v [kPa]	σ'_v [kPa]	σ'_v [kPa]	σ'_v [kPa]
31,9	36,7	36,5	36,8	36,0	40,1
26,3	25,7	29,3	30,2	29,4	27,4
31,4	30,5	36,2	36,6	35,8	39,8
33,2	42,9	42,5	42,5	41,7	47,2

Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

Analisi dinamica delle fondazioni

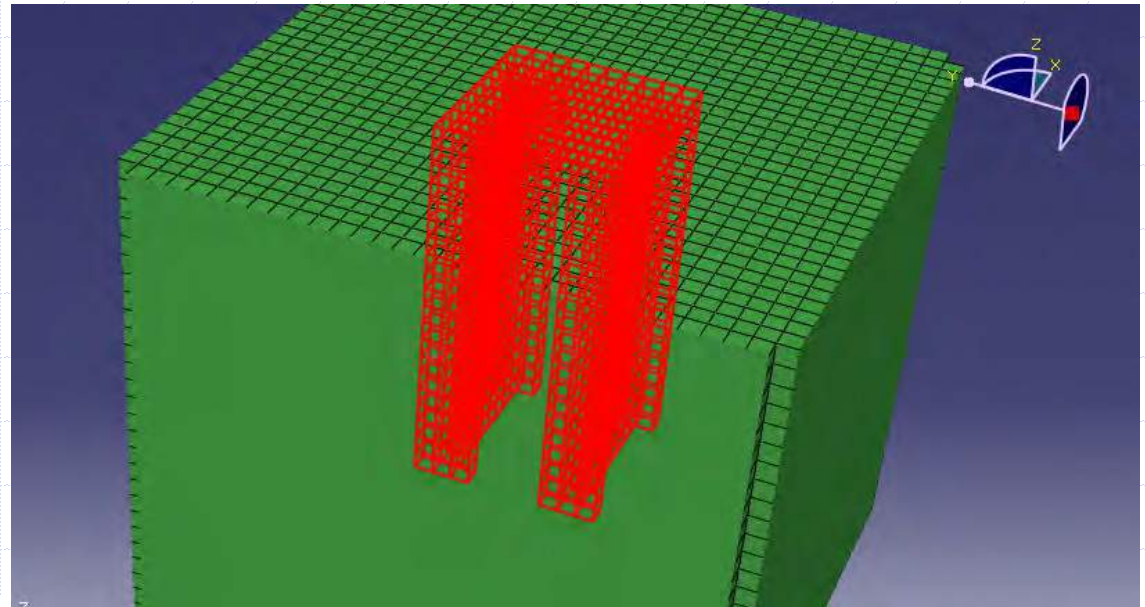
Al fine di una accurata rappresentazione delle onde di tensione, le dimensioni degli elementi finiti non devono superare certi valori.

Data la velocità di propagazione dell'onda di taglio,

$$v_s = (G / \rho)^{0.5}$$

la lunghezza d'onda delle onde di taglio per una forzante sinusoidale di frequenza ω risulta pari a

$$\lambda = 2 \pi v_s / \omega ;$$



Il modello EF in ABAQUS ha dimensioni 35x35x30 [m] e maglia quadrata. Ogni elemento finito è cubico, di dimensioni 1x1x1 [m].

Per l'interno del dominio sono stati utilizzati elementi C3D8, lineari ad 8 nodi.

Sul contorno (le quattro facce verticali, e la faccia inferiore) sono stati disposti elementi finiti CIN3D8 lineari ad 8 nodi, infiniti in una direzione.

Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

Analisi dinamica delle fondazioni

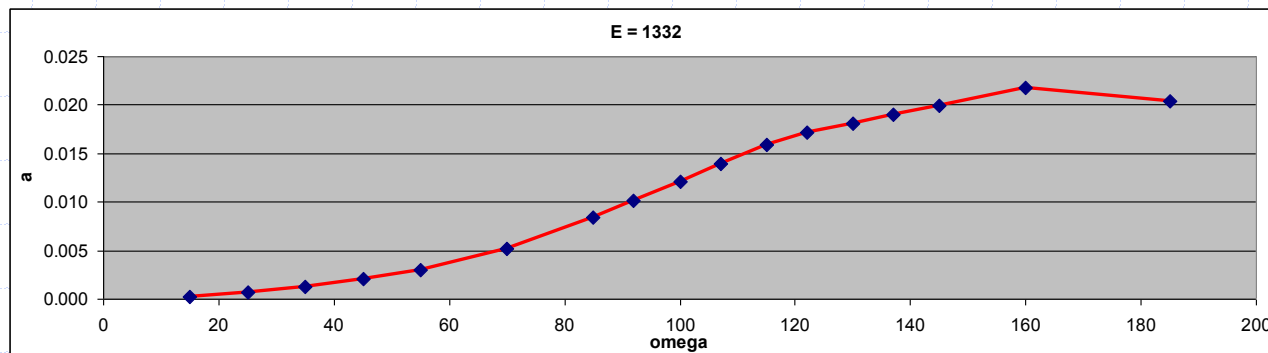
Set considerati:

1. $\omega = 15[\text{Hz}]$, E_{TERR} variabile

E	$u \cdot 10^{-6} [\text{m}]$	$a [\text{m/s}^2]$
100	8.25	0.002
400	2.63	0.001
700	2.06	0.000
1000	1.28	0.000
1332	1.13	0.000
1600	1.20	0.000

2. ω variabile, $E_{\text{TERR}} = 1332 [\text{MPa}]$

f	2	4	6	7	9	11	14	15	16	17	18	19	21	22	23	25
w	15	25	35	45	55	70	85	92	100	107	115	122	130	137	145	160
$u \cdot 10^{-6} [\text{m}]$	1.13	1.03	1.00	1.03	0.98	1.06	1.16	1.20	1.22	1.22	1.20	1.15	1.07	1.01	0.95	0.85
$a [\text{m/s}^2]$	0.000	0.001	0.001	0.002	0.003	0.005	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.017	0.018	0.019	0.020	0.022

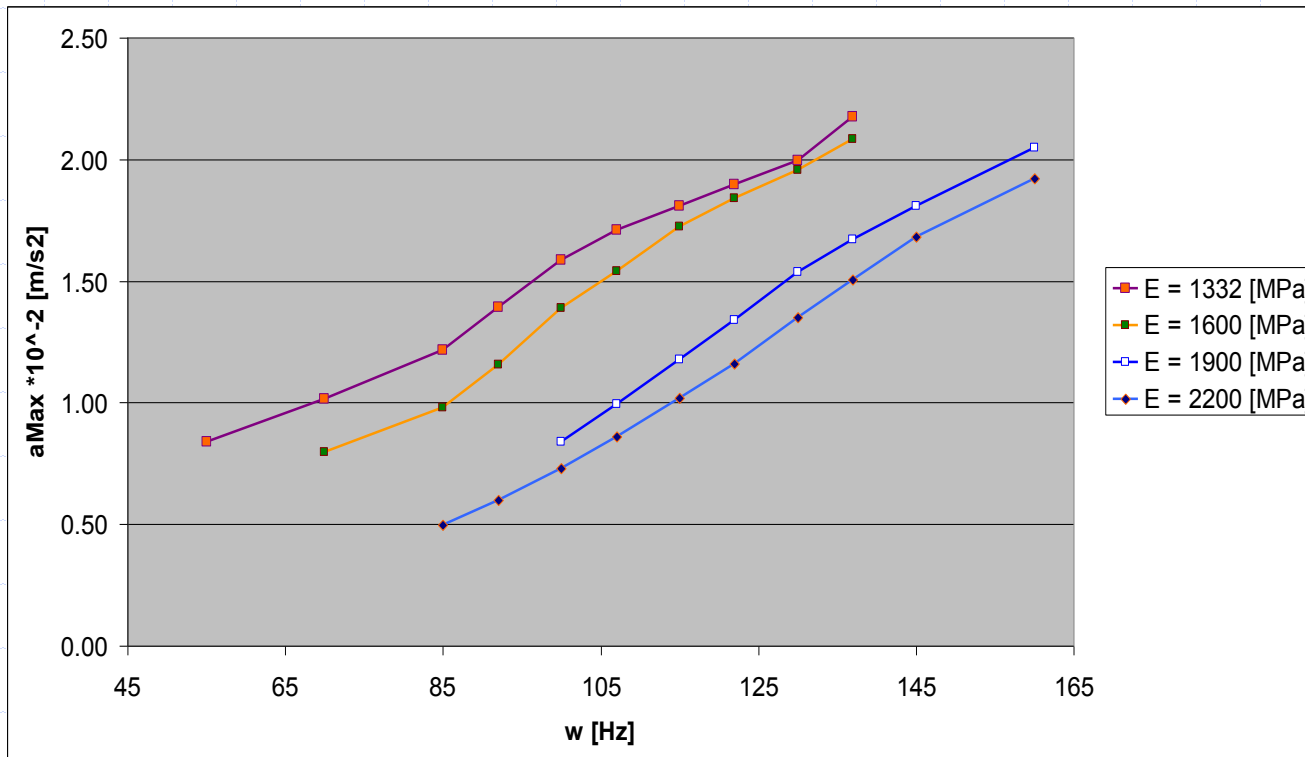


Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

Analisi dinamica delle fondazioni

3. ω variabile fra 100 e 160 [Hz], E_{TERR} variabile fra 1332 e 220 [MPa]

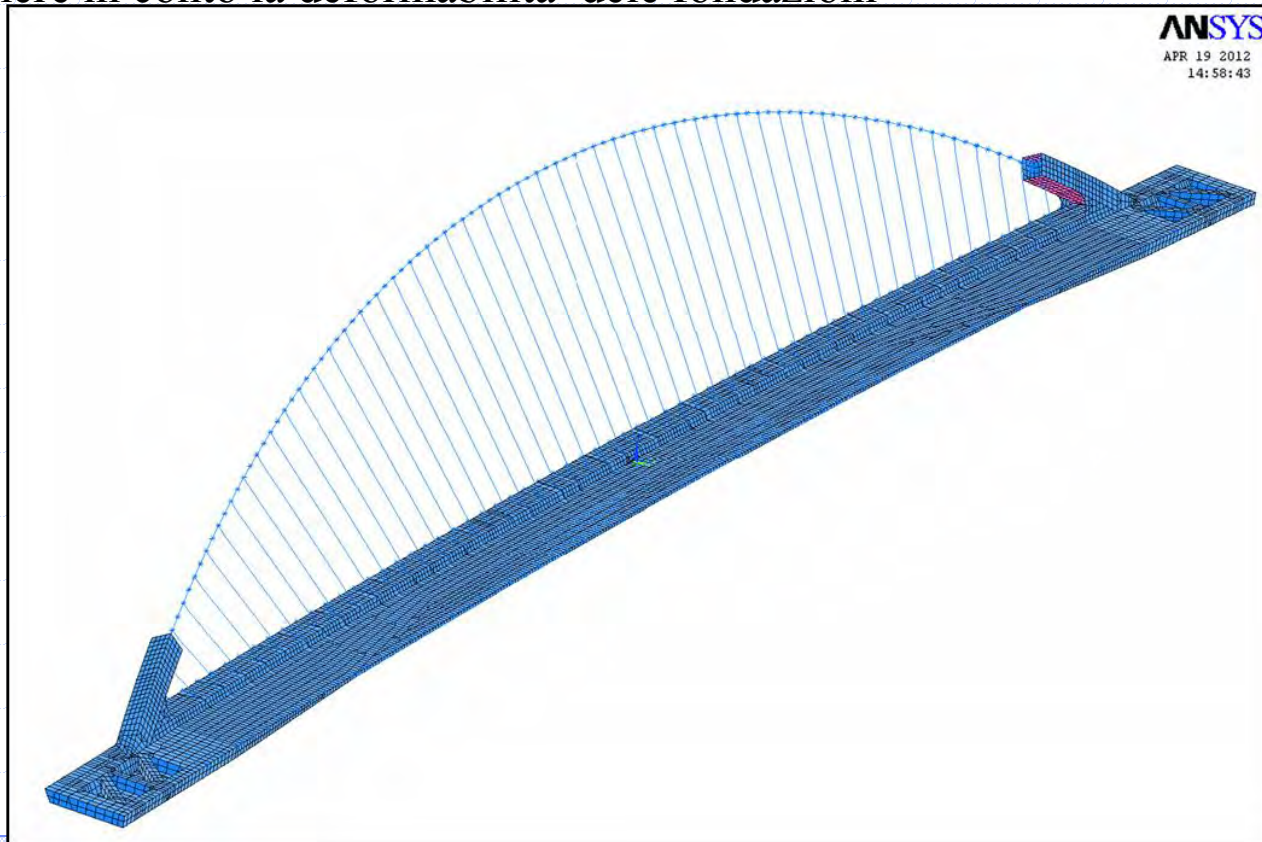
$a \cdot 10^{-2}$ [m/s ²]		f	14	15	16	17	18	19	21	22	23	25
E	omega		85	92	100	107	115	122	130	137	145	160
1332			0.84	1.02	1.22	1.39	1.59	1.71	1.81	1.90	2.00	2.18
1600				0.80	0.98	1.16	1.39	1.54	1.72	1.84	1.96	2.12
1900					0.84	1.00	1.18	1.34	1.54	1.67	1.81	2.05
2200			0.50	0.60	0.73	0.86	1.02	1.16	1.35	1.51	1.68	1.92



Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

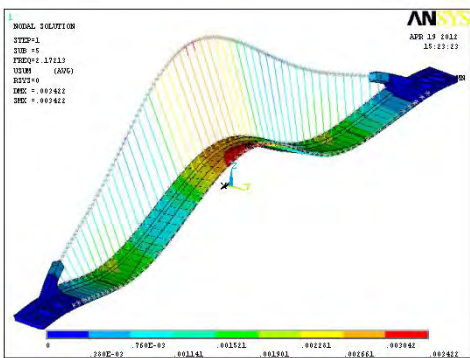
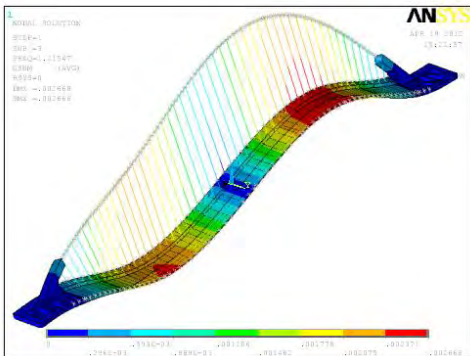
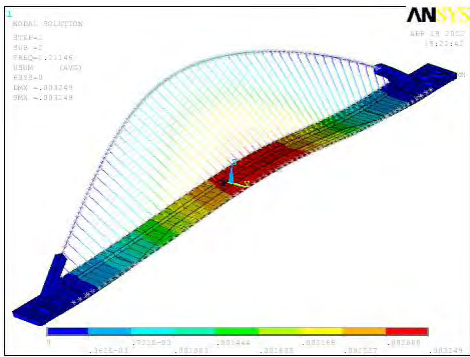
Modello basato sugli EF

- Modellazione in ANSYS
- 17300 nodi, 19700 elementi per oltre 103000 gradi di libertà
- Analisi modale al termine di un'analisi statica non lineare
- Elementi di trave per arco e pendini, elementi di piastra per l'impalcato, vincoli elastici per tenere in conto la deformabilità delle fondazioni

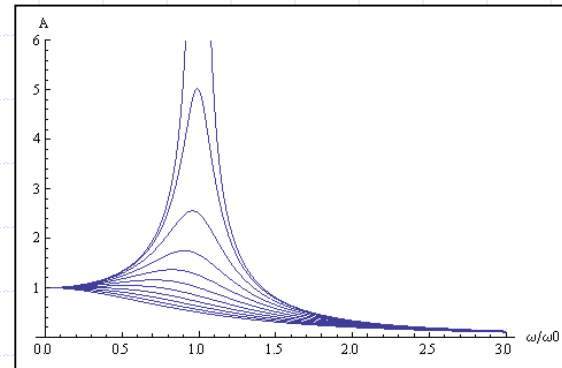


Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

Verifica agli SLE della struttura sprovvista di dispositivi



- Analisi modale non smorzata
- Fattori di smorzamento assunti: $\xi = 0.2 \%$ per ogni modo
- Definizione del carico: 270 pedoni di cui 8 sincronizzati
- Fattore di amplificazione dinamica massimo:
$$A = X_{DIN} / X_{STAT} = 1 / (2 \xi) = 250$$
- Sovrapposizione modale

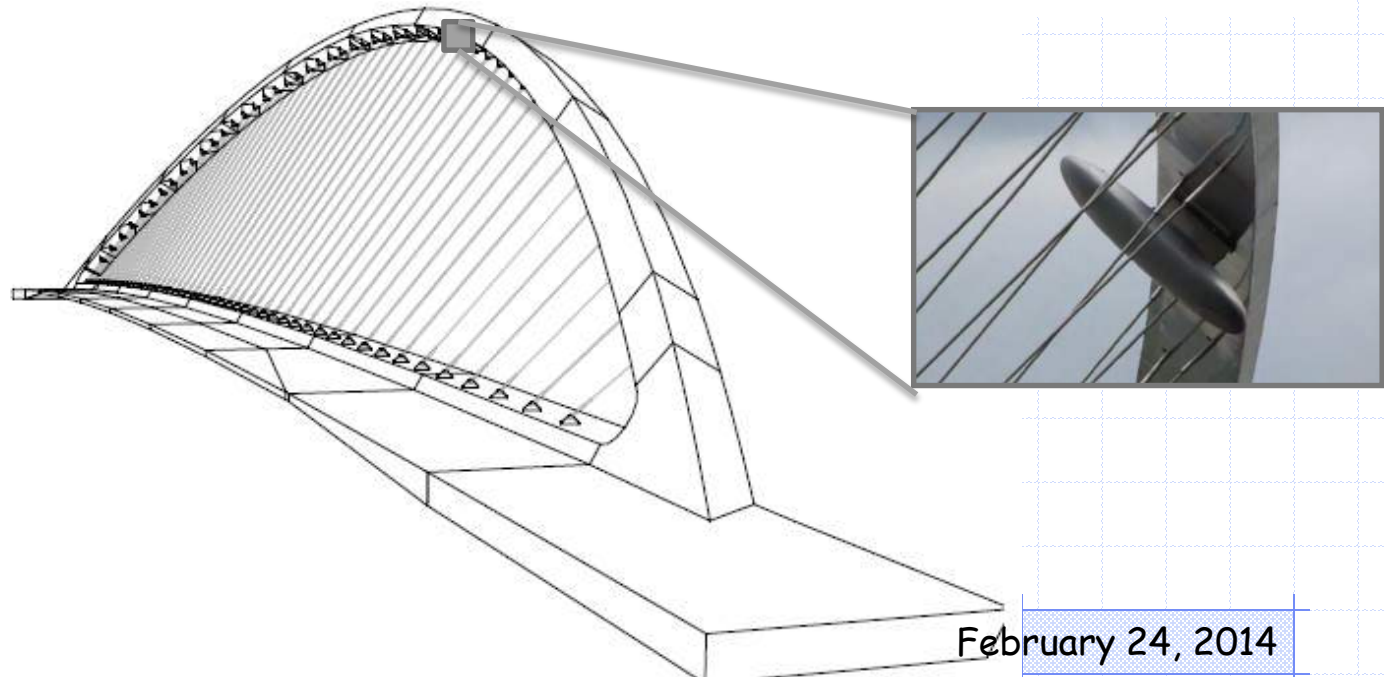
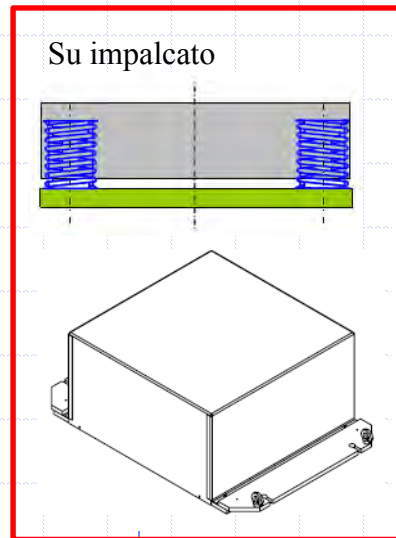
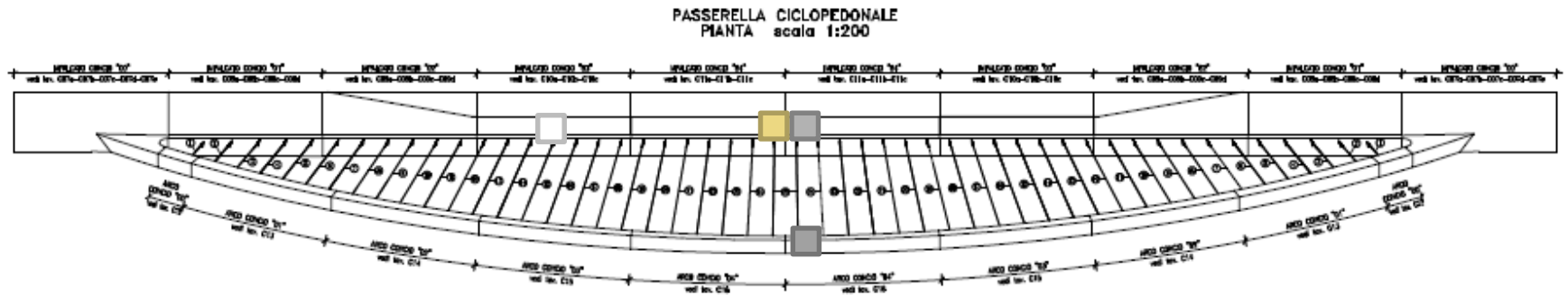


Fattore di amplificazione dinamica dell'oscillatore 1-GDL

- Accelerazioni massime $\approx 1.7 \text{ m/s}^2 > a_{MAX}$
- Il criterio di comfort non risulta soddisfatto
- Impiego di dispositivi di smorzamento

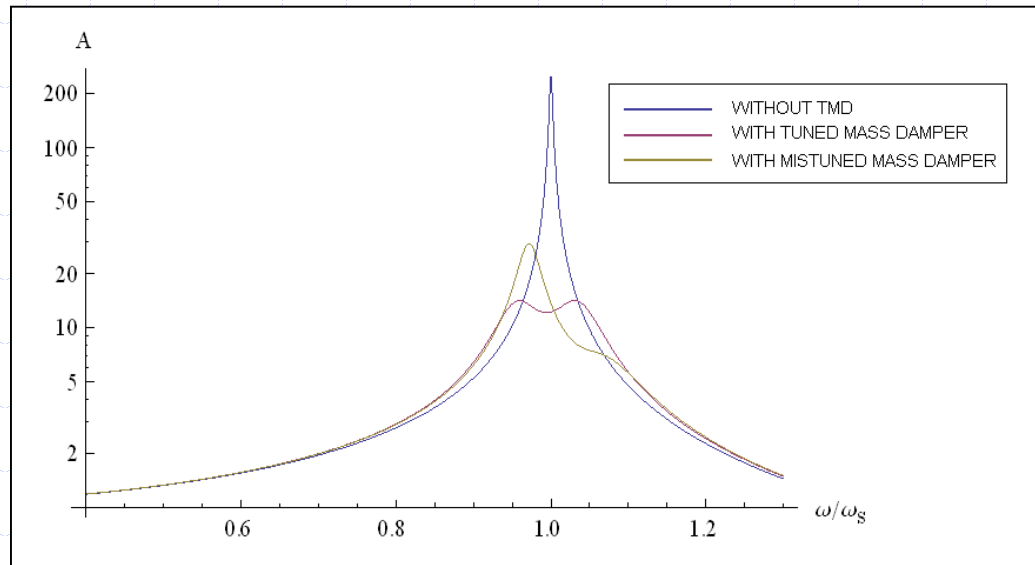
Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

- TMD 1 verticale semiattivo su impalcato – f 1,43 Hz; sotto pendino n° 24
- TMD 2 verticale passivo su impalcato – f 2,13 Hz; sotto pendino n° 25
- TMD 3 verticale passivo su impalcato – f 1,16 Hz; sotto pendino n° 14
- TMD 4 orizzontale passivo su arco – f 0,74 Hz; in chiave



Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

- Guida Sètra raccomanda: pedoni solidali e pedoni non solidali all'impalcato per la determinazione della matrice di massa
- Inoltre, marcate escursioni termiche influiscono sulla rigidità della stessa
- Rapporto di massa $\approx 1\%$



Dynamic magnification factor: 5% mistuned mass damper – mass ratio 1%

- Le frequenze naturali possono variare, riducendo le performances dei TMD
- In alcuni casi, le verifiche non risultano soddisfatte
- Previsto un dispositivo evoluto rispetto al TMD
- Necessaria l'identificazione sperimentale delle frequenze naturali dell'opera

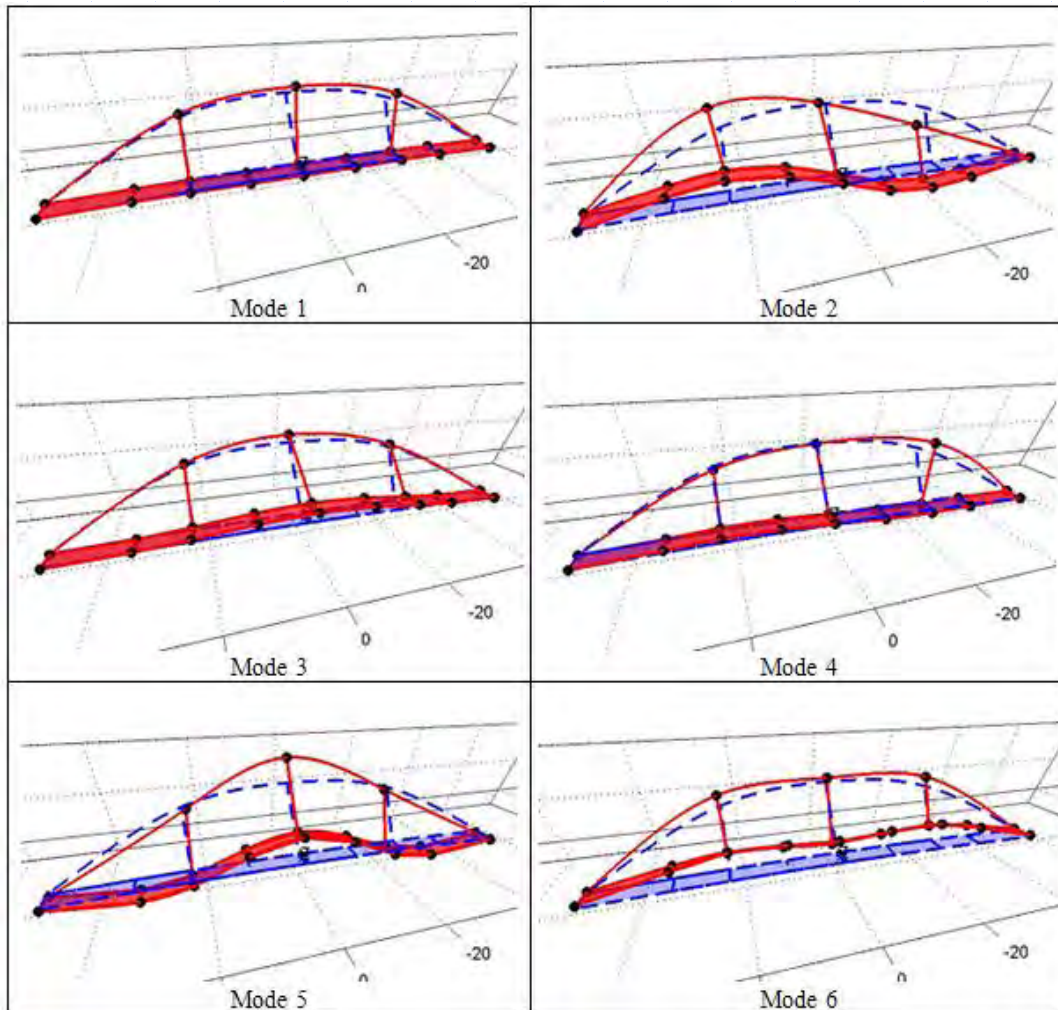
Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

Identificazione sperimentale del Ponte di Nomi (12 luglio 2012)



Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

Identificazione sperimentale del Ponte di Nomi



Mode	FE Model frequency f [Hz]	Identified frequency f [Hz]	Frequency error e [%]
1	0.77	0.8	-4
2	1.23	1.39	-13
3	1.43	1.64	-15
4	1.93	2.02	-5
5	2.21	2.4	-9
6	3.27	3.63	-11
7	3.71	3.93	-6
8	3.72	4.21	-13
9	4.36	5.03	-15
10	4.79	5.14	-7

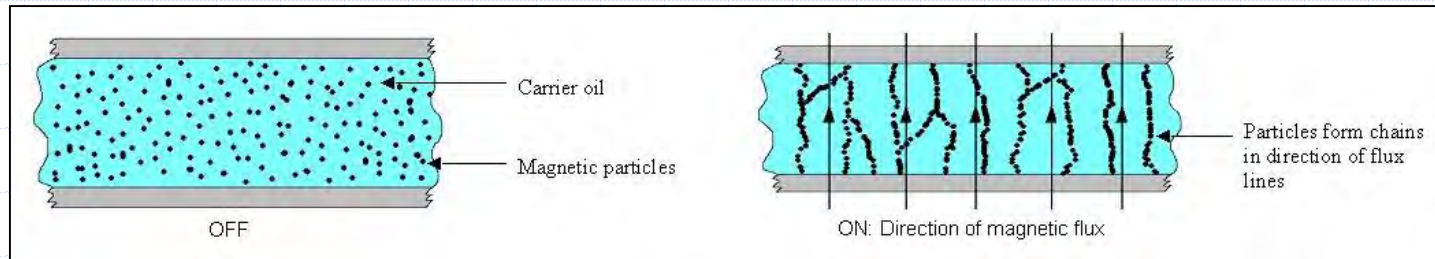
Confronto fra frequenze del modello ad elementi finiti e frequenze identificate sperimentalmente

Forme modali identificate mediante il software SDIT, Politecnico di Torino (Ceravolo, & Abbiati 2009)

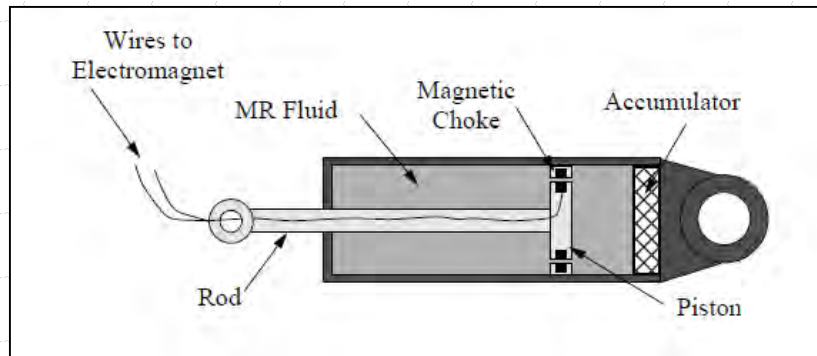
Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

Tuned Mass Damper con fluido magnetoreologico (TMD MR)

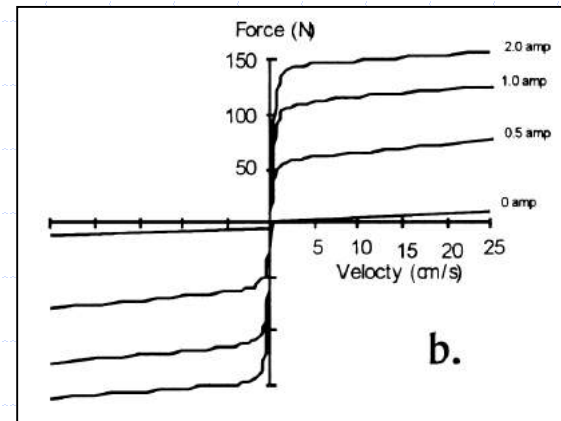
- Fluido magnetoreologico: comportamento dipendente dal campo magnetico



- Smorzatore controllato in tempo reale



Magnetorheological damper

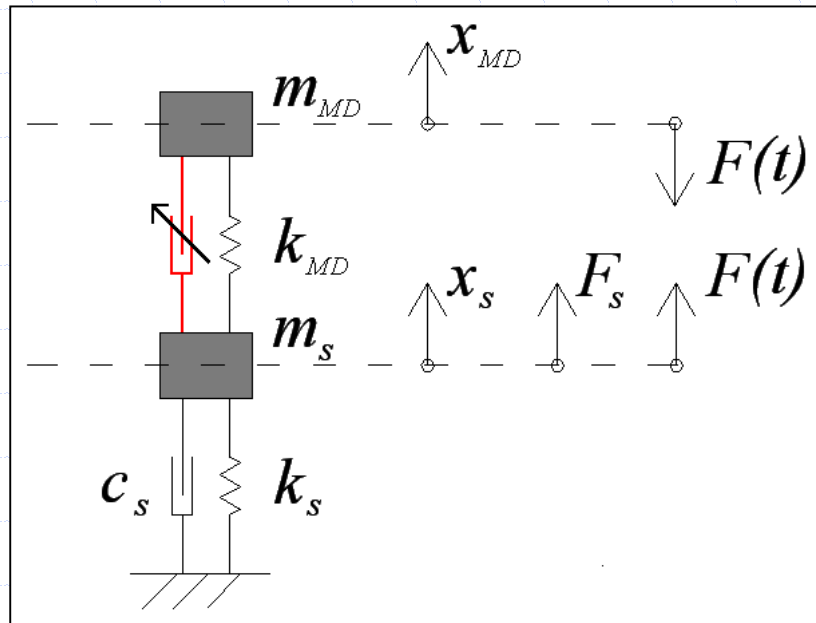


Damping force versus speed and applied current

- Tuned Mass Damper semiattivo

Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

Tuned Mass Damper con fluido magnetoreologico (TMD MR)



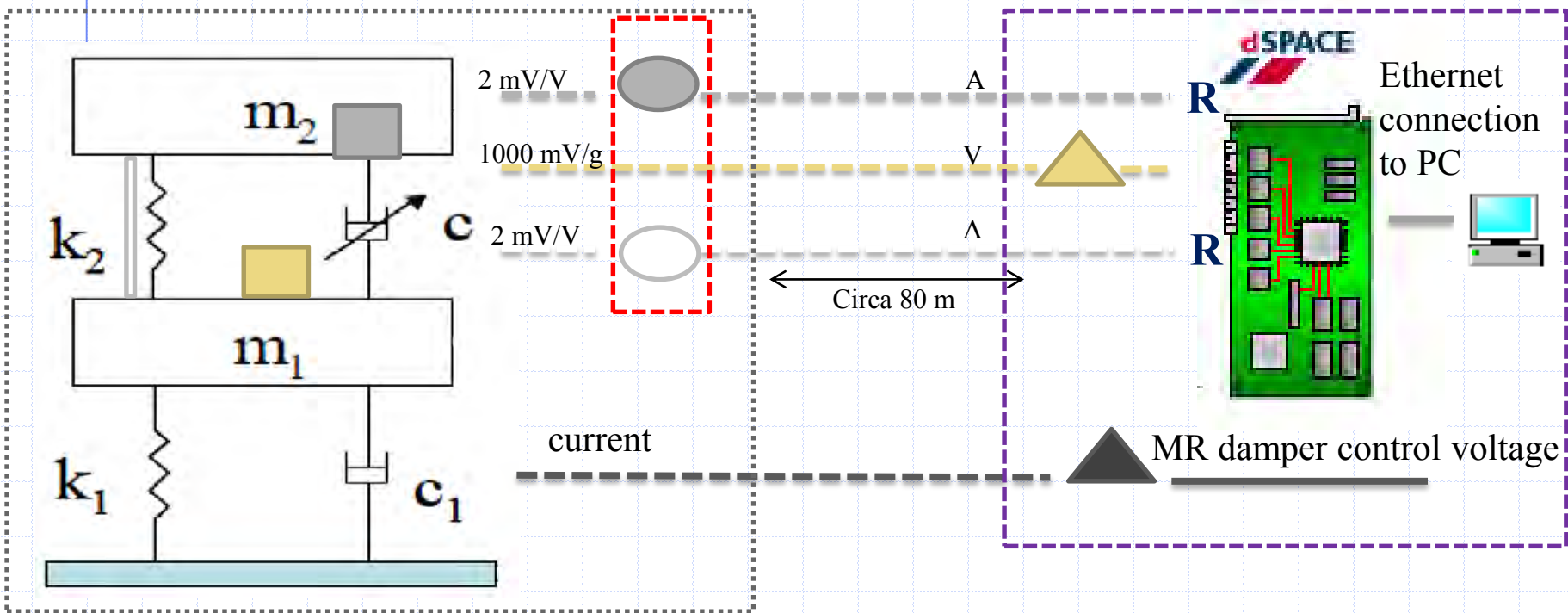
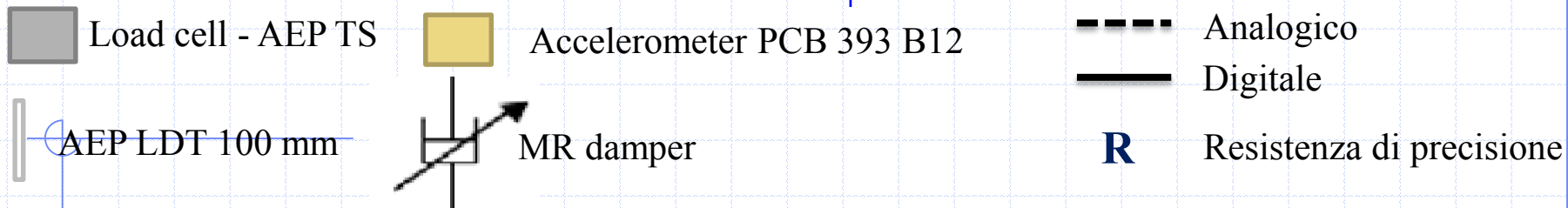
Struttura (s), provvista di TMD MR (MD)

- Problema di controllo: determinare il segnale $i(t)$ (e quindi influenzare la forza esplicata dal damper, $F(t)$) per minimizzare $\ddot{x}_s(t)$
- Problema di implementazione: implementare e testare il controller su scheda elettronica per il funzionamento in tempo reale
- Inoltre, sarà necessario identificare le caratteristiche del damper MR

Bursi, O.S., Casciati F., Casciati S., Del Grosso A., Domaneschi M., Faravelli L., Holnicki-Szulc J., Irschik H., Krommer M., Lepidi M., Martelli A., Ozturk B., Pozo F., Pujol G., Rakicevic Z., and Rodellar J., "An EACS joint perspective. Recent studies in civil structural control across Europe". *Structural Control and Health Monitoring*, 2014, (in press).

Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

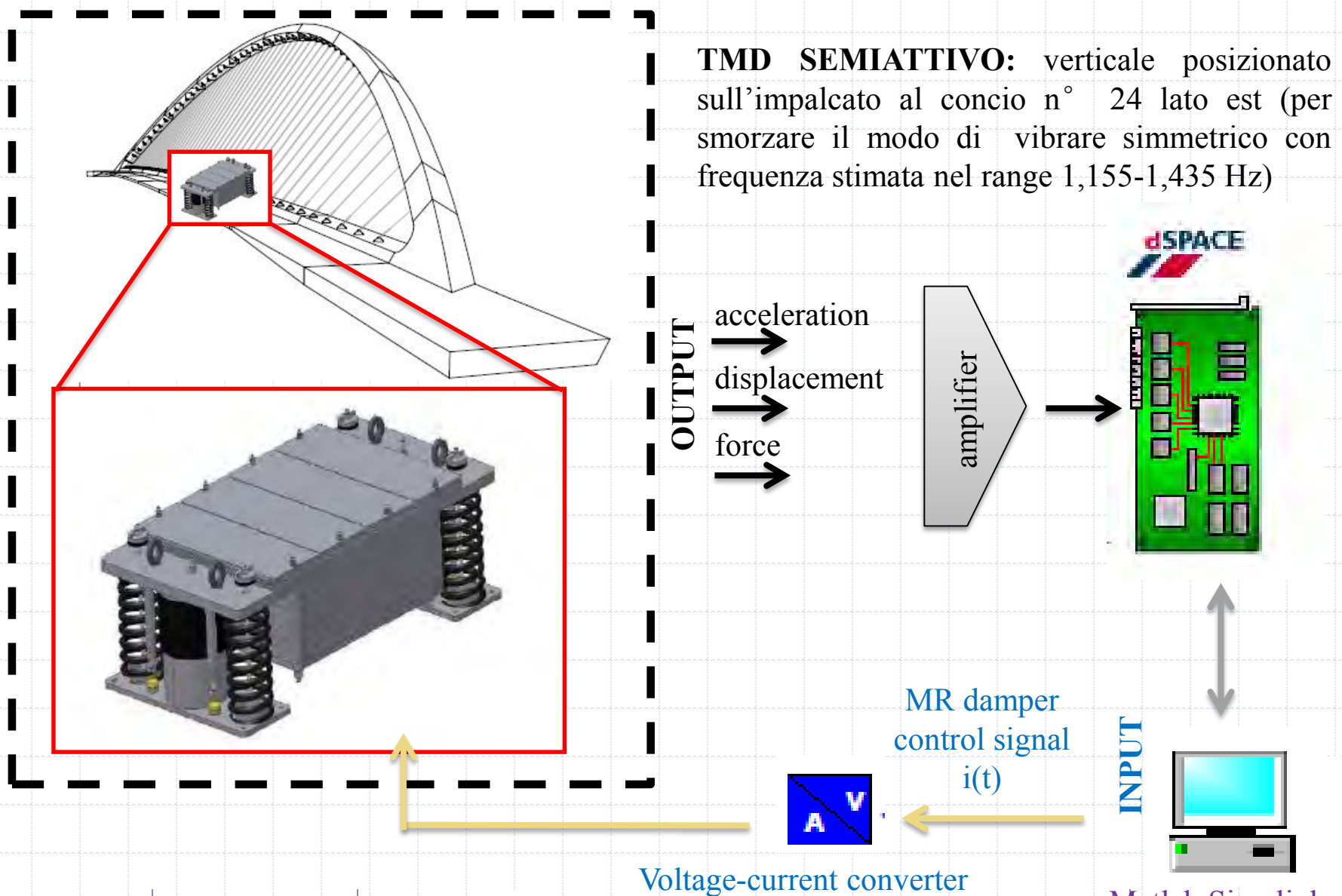
Schema strumentazione per TMD semiattivo



- AEP TA 5/2- trasmettitore analogico per LC
- AEP TA 5/2- trasmettitore analogico per LDT
- PCB 482 A 21 - Alimentatore accelerometro
- Quadro elettrico a lato del TMD MR
- Cabina sulla destra orografica del ponte
- TMD

Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

Schema generale del sistema di controllo semiattivo



Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

Sistema di monitoraggio

Il ponte ciclopedonale di Nomi è dotato di un sistema di monitoraggio integrato con la struttura al fine di verificarne la risposta; con particolare riferimento al comportamento dinamico (fenomeni vibratori) legati all'effetto eolico e dei pedoni.

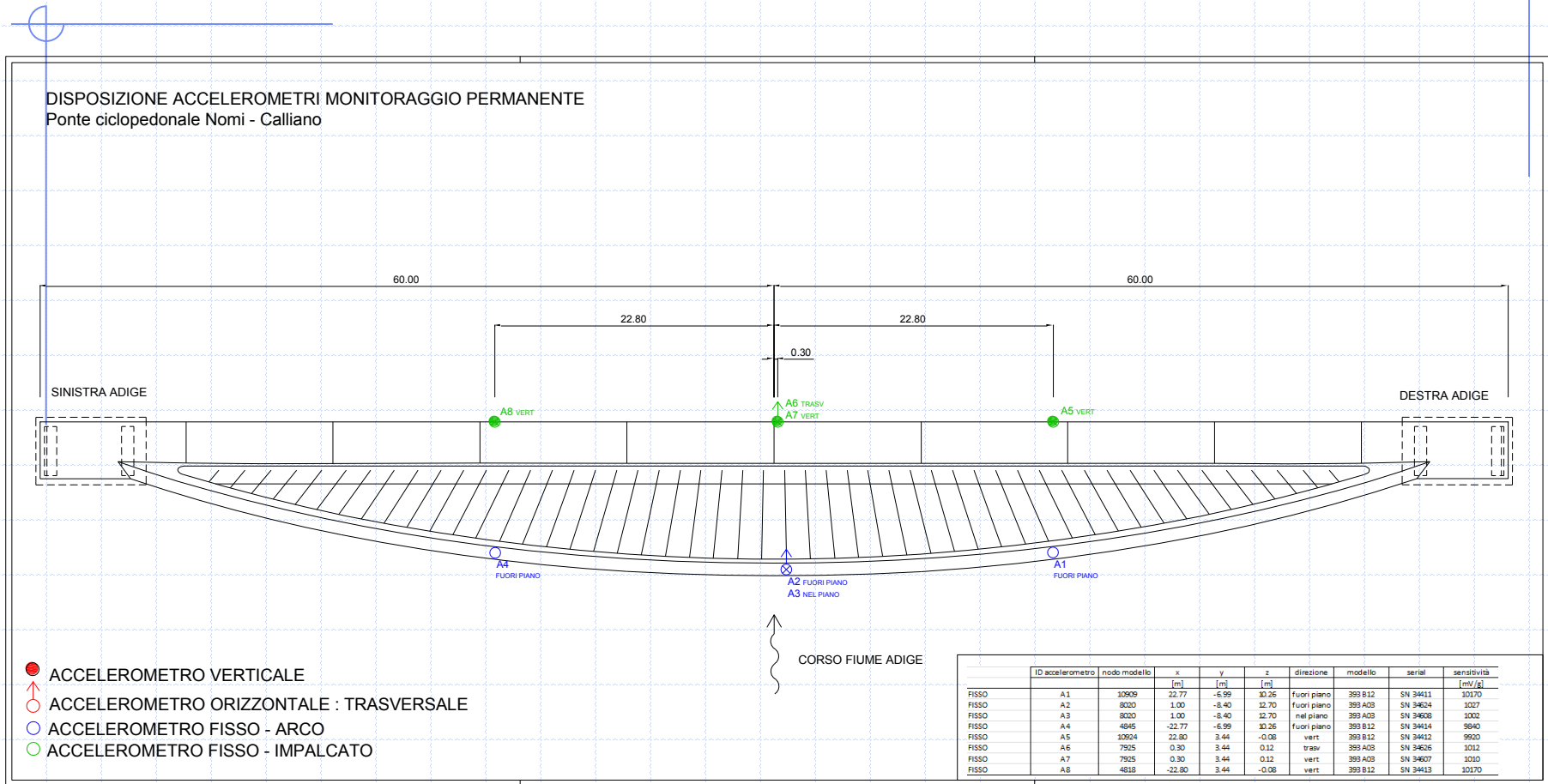
Sono stati installati i seguenti sensori:

- **Num. 2 Sensori integrati per velocità (a coppe) e direzione del vento (banderuola)** (campi di misura: 0-60m/s, 0-360° ;uscita analogica 2x4-20mA; alimentazione: 12VDC)
- **Num. 2 Sensori di temperatura a contatto PT100 4 fili** (campi di misura: -150...+450° C; precisione classe B (+0.3° C); uscita analogica 4-20mA; alimentazione: 24VDC)
- **Num. 4 Accelerometri piezoelettrici 393B12** (high sensitivity 10V/g; Frequenza da 0.15 a 1000Hz; 2-pin MIL C-5015 connector)
- **Num. 4 Accelerometri piezoelettrici 393A03** (Sensitivity 1V/g; Frequenza da 0.5 a 2000Hz; 2-pin MIL C-5015 connector)

Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

Monitoraggio

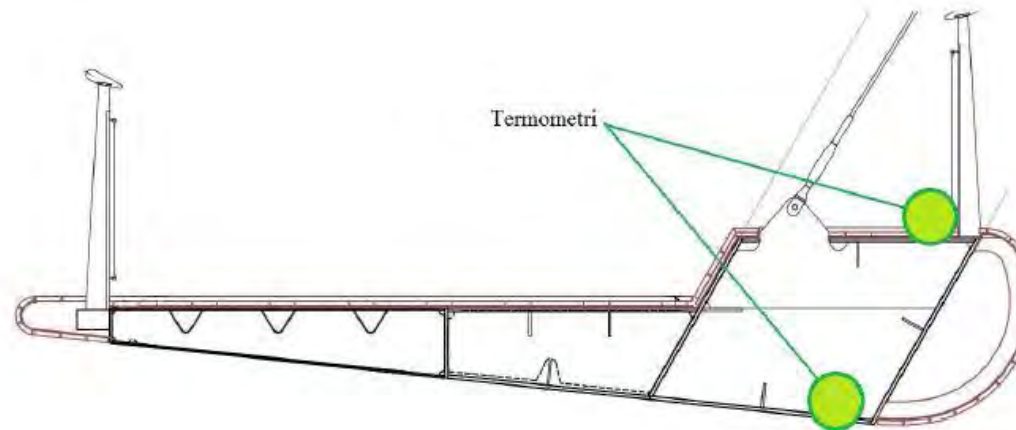
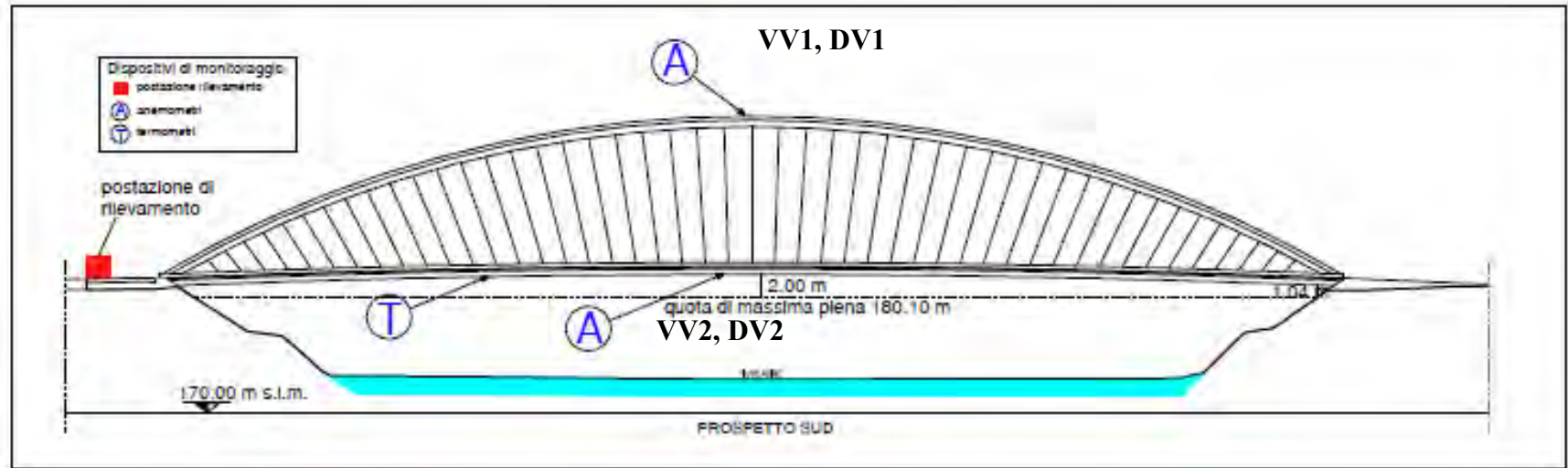
- Disposizione degli accelerometri



Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

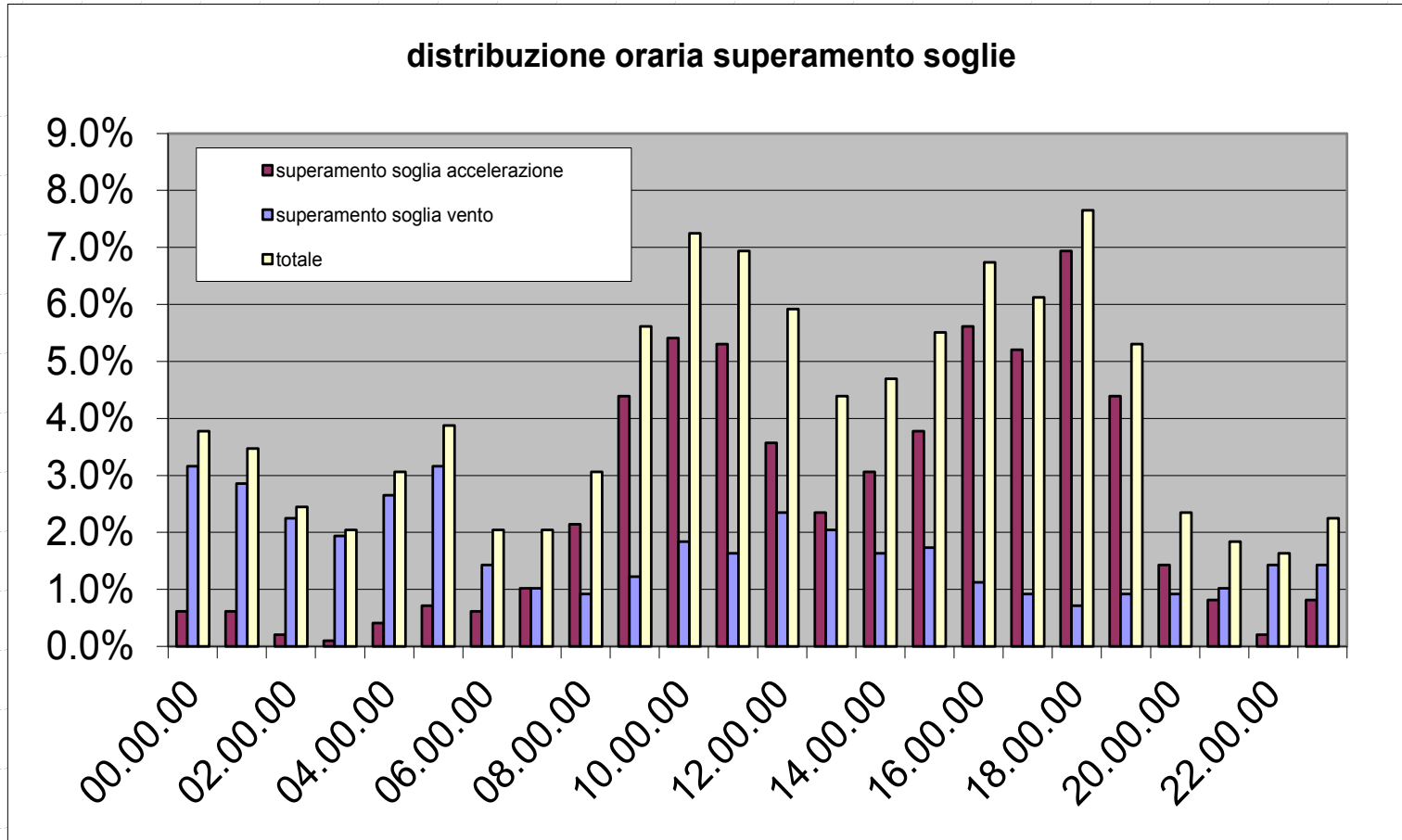
Monitoraggio

- Disposizione degli anemometri e termometri



Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

Monitoraggio - Risultati



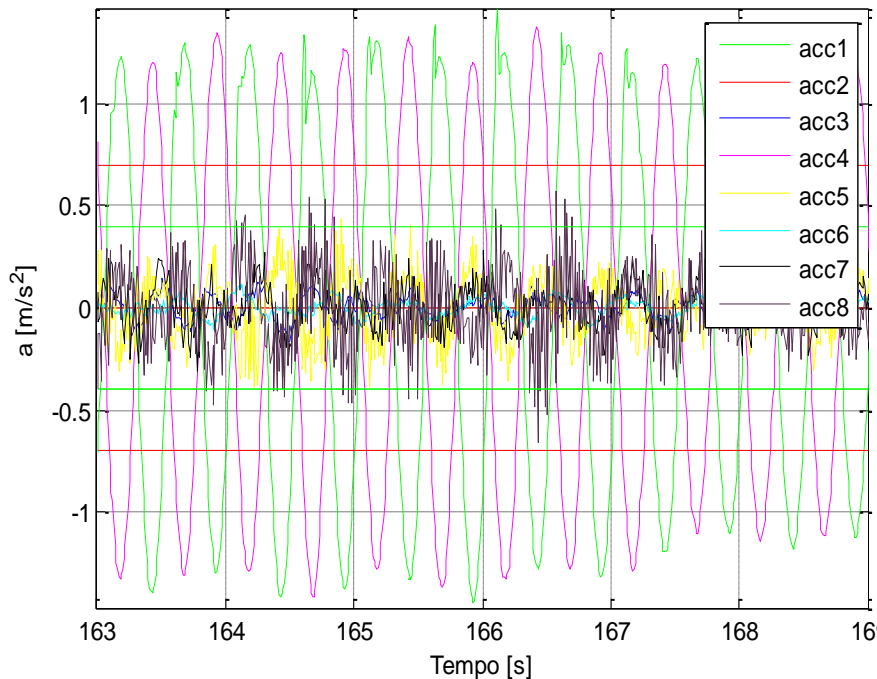
Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

Monitoraggio - Risultati

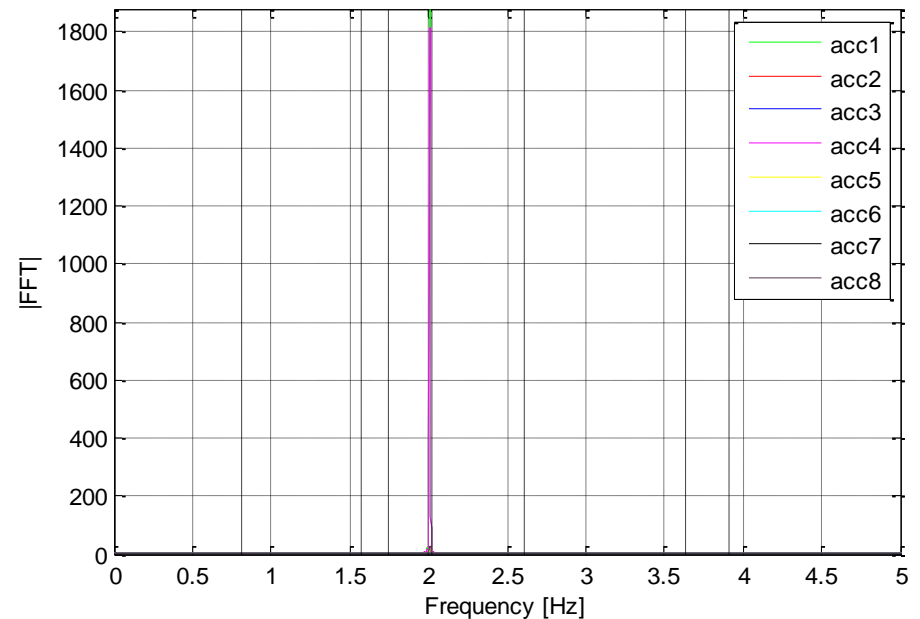
Vibrazioni indotte dal vento

In presenza di fenomeni eolici rilevanti, la struttura vibra prevalentemente sul 4° modo, coinvolgente l'arco in maniera antisimmetrica (modo non smorzato da smorzatori)

12.49 29.23 12.49 29.38 28.05 168.54 19.67 164.42



12.49 29.23 12.49 29.38 28.05 168.54 19.67 164.42



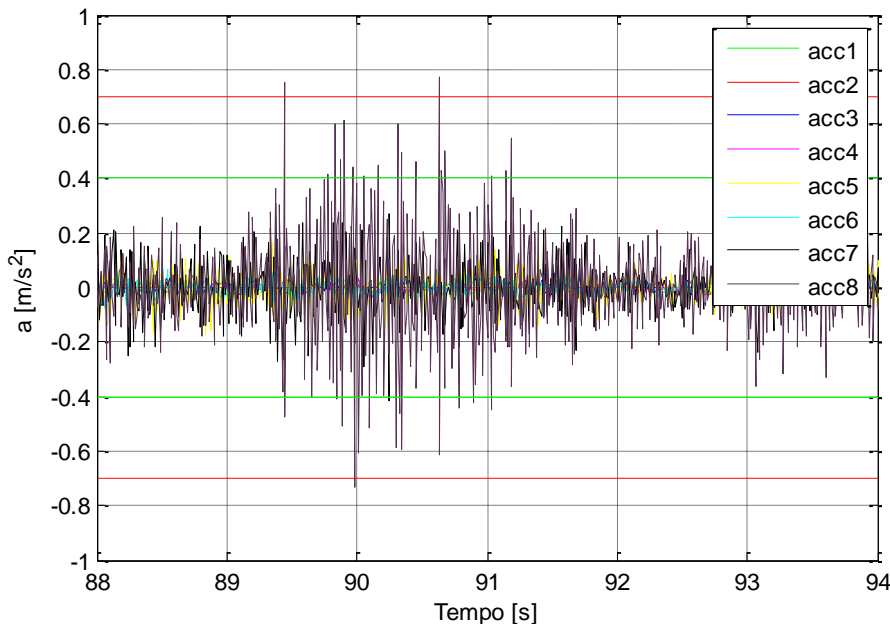
Il ponte ciclopedonale di Nomi-Calliano/Cnt

Monitoraggio - Risultati

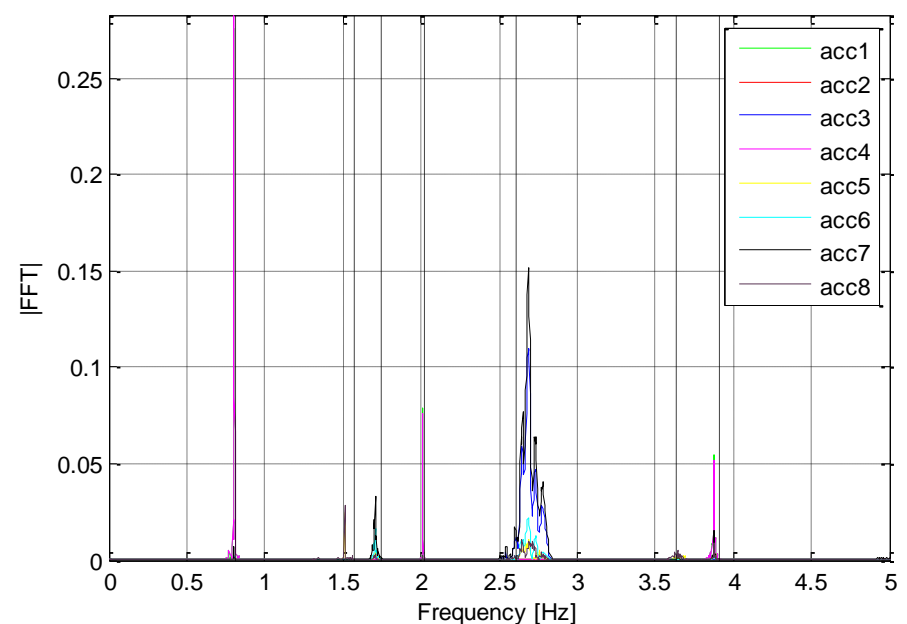
Vibrazioni indotte dal traffico ciclopedonale:

Si rilevano picchi di elevata entità dovuti principalmente all'impatto delle ruote dei mezzi contro le assi non connesse rigidamente all'impalcato. Essi sono caratterizzati da alta frequenza (superiore a 30 Hz, la quale non rientra nel range di interesse del fenomeno vibratorio relativo ai pedoni) che si smorza molto rapidamente.

14.98 65.58 14.96 65.82 4.96 206.91 3.63 -148.14



14.98 65.58 14.96 65.82 4.96 206.91 3.63 -148.14

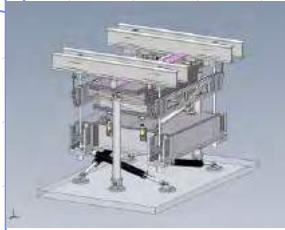


CONOSCENZA ? START UP DI UNITN



INTELLIGENT
INFRASTRUCTURE
INNOVATION

Background knowledge



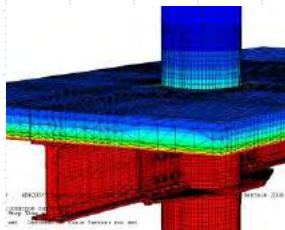
controllo

Dispositivi e materiali avanzati per il controllo dinamico di strutture (NOMI-PAT, Paramassi SpA)



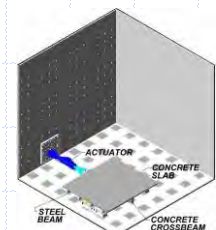
identificazione

Identificazione dinamica e monitoraggio di ponti (Ponte del Mare, HITUBES)



analisi

Analisi e progettazione sismica avanzata di strutture in acciaio (EU ATTEL, EU INDUSE)



test

Modern dynamic testing techniques per la caratterizzazione di sottostrutture e dispositivi non lineari (EU SERIES, RELUIS)

START UP DI UNITN



INTELLIGENT
INFRASTRUCTURE
INNOVATION

Background knowledge



network

Sistemi di gestione (BMS- PAT; Reluis RFI);
Decision Support Systems (EU Memsccon, EU Monico);
competenze nell'analisi di rischio



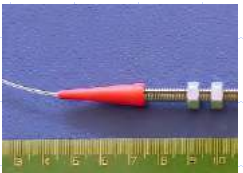
project

monitoraggio di ponti (Adige, Colle Iarco, Nomi), edifici
(Area, Memsccon) e strutture storiche (Torre Portogruaro,
Torre Aquila, Basilica di Santa Maria)



element

sviluppo di prototipi di elementi intelligenti per
l'ingegneria civile (es: Rivoli, Reluis 10);
competenze nell'integrazione dei sensori



sensor

sviluppo e implementazione di sensori MEMS, a fibra
ottica, elasto magnetici;
competenze nella sensoristica tradizionale



material

cristalli fotonici per diagnosi di elementi in acciaio;
sensori ottici distribuiti



Grazie per l'attenzione!

Domande?

Oreste S. Bursi, Ph.D., P.E., MASME, MASCE

Professore di Dinamica Strutturale e Controllo

email: oreste.bursi@ing.unitn.it

<http://www.ing.unitn.it/~bursi/>

