

Provincia di Udine
CISM - International Centre of Mechanical Sciences

**MONITORAGGIO DINAMICO PER LA VALUTAZIONE DELLA
SICUREZZA SISMICA DI PONTI**

**Ottimizzazione del modello di calcolo a seguito di prove
dinamiche del nuovo ponte sul fiume Fella a Dogna (UD)**

Francesco Alessandrini - Dario Fedrigo

Udine, 18 Aprile 2008



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

0. Sommario

- *Descrizione del progetto*
- *Caratteristiche dell'opera*
- *Prove dinamiche*
- *Analisi dei risultati*
- *Modello di calcolo post-indagine*
- *Osservazioni sui risultati*
- *Conclusioni*



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

1. Descrizione del progetto

In seguito all'evento alluvionale del 29 agosto 2003, il ponte sul fiume Fella in corrispondenza all'abitato di Dogna (UD) ha mostrato una situazione di insufficienza idraulica, con ostruzione delle luci e principi di deflusso sul piano dell'impalcato. La situazione di criticità venutasi a determinare è dovuta in larga misura alla presenza di tre pile in alveo attivo, che hanno costituito un sensibile ostacolo al deflusso della piena.



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

1. Descrizione del progetto



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

1 Descrizione del progetto

OBIETTIVI GENERALI DEL PROGETTO

eliminazione del problema idraulico



- ponte ad una sola pila
- spalle esterne alle difese spondali

inserimento non invasivo nell'ambiente



- utilizzo di strutture in c.a. anche precomprese, al fine di ridurre le sezioni dell'impalcato

resistenza adeguata agli eventi sismici



- progettazione sismica condotta agli Stati Limite in conformità a quanto prescritto dall'allora vigente OPCM 3274/03;
- utilizzo di isolatori sismici per ridurre le forze sismiche orizzontali



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

2 Caratteristiche dell'opera

Dati geometrici:

- lunghezza impalcato 77.0m
- lunghezza campate 37.50m (asse appoggi)
- larghezza impalcato 10.50m
- altezza trave d'impalcato 1.30m in campata
2.20m in asse pila
- altezza di calcolo della pila 10.0m

L'impalcato del ponte in c.a.p. presenta schema statico di trave su tre appoggi (spalle e pila centrale), simmetrico rispetto la mezzeria;

è calcolato come ponte di 1ª categoria (ai sensi della vigente normativa);

la sezione trasversale è post-tesa mediante l'utilizzo di 12 cavi da 25 trefoli;

l'impalcato poggia su tre coppie di isolatori elastomerici circolari (diametro 1200mm) a comportamento elastoplastico inelastico;

la struttura di fondazione della pila è costituita da 6 pali da 1.50m, lunghi 15.5m;

la struttura di fondazione delle spalle è costituita da una serie di 36 micropali $\Phi 300$ verticali e un insieme di micropali e tiranti inclinati nel lato verso monte



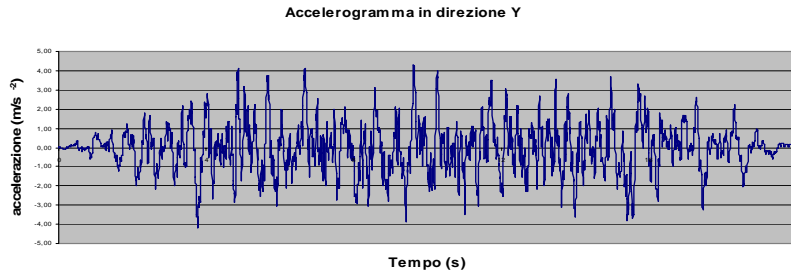
alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

2. Caratteristiche dell'opera

Al fine di poter debitamente considerare la funzione degli appoggi è stata condotta un'analisi sismica dinamica non lineare, mediante l'utilizzo di tre gruppi di accelerogrammi naturali resi spettrocompatibili.

Gli accelerogrammi base utilizzati fanno riferimento alle registrazioni presso le stazioni di Tolmezzo, Barcis e Codroipo in occasione del terremoto del 1976: ognuna di queste fornisce un accelerogramma nelle due direzioni orizzontali N-S ed E-O, ed uno in direzione verticale.

Esempio di accelerogramma:



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

1. Descrizione del progetto

ed infine alcune immagini dell'opera realizzata



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

3. Prove dinamiche

Il ponte è stato prima sottoposto a collaudo statico, come richiesto dalle vigenti Norme, e successivamente, grazie alla sensibilità dimostrata dalla Direzione Regionale della Protezione Civile, sono state condotte delle prove di eccitazione meccanica sulla struttura, in modo da poter comprendere l'effettivo comportamento dinamico della stessa, e poi validare il modello di calcolo.

Dalle analisi svolte è emerso un comportamento dinamico regolare, privo di anomalie, e caratterizzato da una sostanziale linearità di risposta alle vibrazioni forzate impresse.

I dati acquisiti costituiscono una utile "lettura di zero" delle caratteristiche dinamiche dell'opera, da utilizzarsi come dato di riferimento per successive analisi di degrado nel tempo della stessa, ad esempio a seguito di un evento sismico.

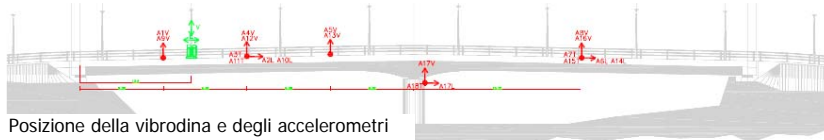
Queste prove, non utilizzate normalmente nella pratica progettuale, costituiscono una sorta di "esempio pilota" finalizzato alla taratura di una metodologia operativa mirante alla verifica sismica del patrimonio infrastrutturale regionale.



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

3. Prove dinamiche

Fasi delle prove di identificazione dinamica



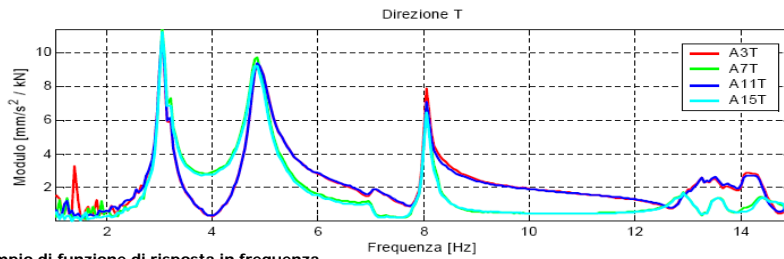
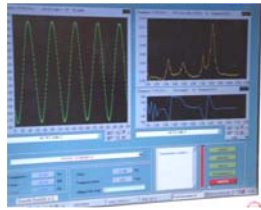
Posizione della vibrodina e degli accelerometri



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

3. Prove dinamiche

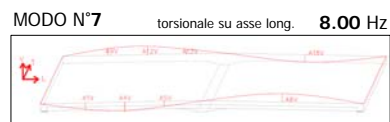
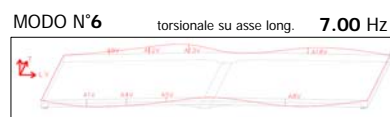
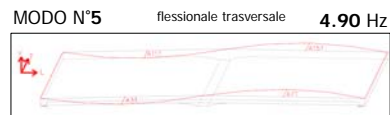
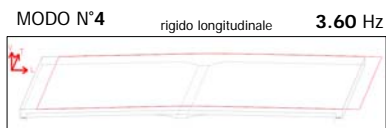
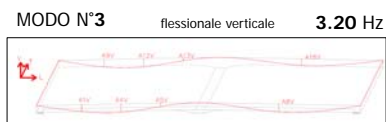
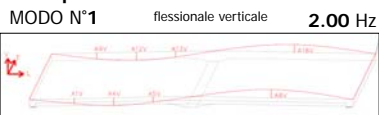
Fasi delle prove di identificazione dinamica



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

3. Prove dinamiche

Risultati delle prove di identificazione dinamica



Deformate modali dell'impalcato



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

4. Analisi dei risultati

I risultati ottenuti dalle prove dinamiche sono stati confrontati con quanto previsto dal modello di calcolo di progetto.

MODELLO DI CALCOLO DI PROGETTO

- l'impalcato è descritto con elementi monodimensionali tipo "beam";
- gli appoggi sulle spalle sono assimilati a molle elastiche fissate a vincoli fissi;
- gli appoggi sulla pila sono assimilati a molle elastiche fissate all'estremità superiore dell'asta rappresentante la pila;
- è stata trascurata la rigidità rotazionale degli appoggi (ipotesi di trave su tre appoggi).

Frequenze proprie modello di calcolo			
n.	T (s)	F Hz	tipo (L),(V),(T),(TOR)
1	0,7	1,44	V
2	0,47	2,15	T
3	0,45	2,25	L
4	0,41	2,47	V
5	0,32	3,11	T
6	0,17	5,75	V
7	0,16	6,25	T
8	0,13	7,63	V

Legenda
V modo flessionale verticale
T modo traslazionale trasversale
L modo traslazionale longitudinale
TOR modo torsionale



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

4. Analisi dei risultati

I diversi valori delle frequenze proprie emerse dalle prove in sito hanno spinto ad approfondire il problema per capire, anche se solo in termini qualitativi, il perchè di queste diverse risposte dinamiche.

POSSIBILI PARAMETRI INFLUENTI NELLE DIVERSA RISPOSTA DINAMICA:

- differente modulo elastico dei materiali;
- diversa rigidità degli appoggi;
- deformabilità dell'insieme (pila) + (terreno di ricoprimento laterale);
- precompressione dell'impalcato;
- presenza di cordoli e marciapiede ai lati dell'impalcato;
- giunti di dilatazione d'estremità;
- possibile variazione dell'altezza effettiva dell'impalcato rispetto quella nominale;
- carenze del modello di calcolo agli elementi finiti.



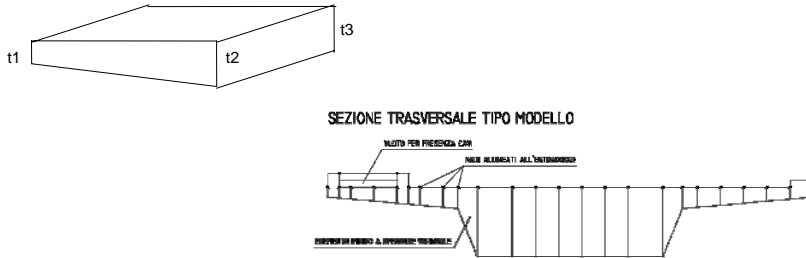
**CREAZIONE DI UN NUOVO MODELLO DI CALCOLO FINALIZZATO
ALL'ANALISI MODALE, E STUDIO DELL'INFLUENZA DI ALCUNI DEI
PARAMETRI SOPRA ELENCATI**



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

5. Modello di calcolo post-indagine

La struttura del ponte è stata rappresentata con un modello agli elementi finiti ottenuto con elementi bidimensionali (shell) a 4 nodi a spessore variabile:



In questo modo è stato possibile descrivere l'esatta geometria della trave d'impalcato, che si caratterizza per avere un'altezza della nervatura variabile ($H=1.3\text{m}$ in campata ed $H=2.2\text{m}$ in asse pila) ed uno spessore variabile in senso trasversale.

Le facce degli elementi sono poi state allineate all'estradosso.

Ai lati dell'impalcato sono stati modellati i cordoli (mediante elementi finiti di adeguato spessore) ed il marciapiede.

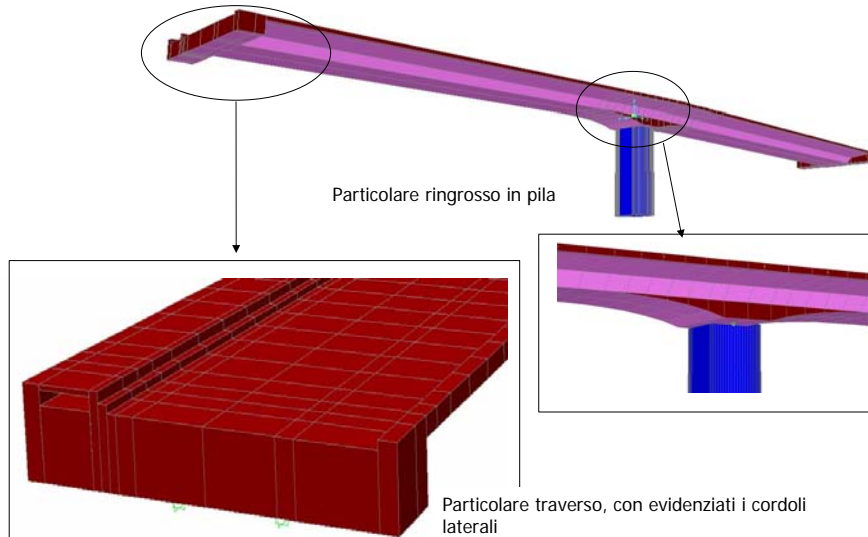
In asse pila si è tenuto conto del taglio delle ali separando gli elementi che concorrono lungo quell'allineamento (solo quelli sugli sbalzi esterni).



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

5. Modello di calcolo post-indagine

Vista 3D del modello f.e.m.



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

5 Modello di calcolo post-indagine

I parametri meccanici e geometrici adottati nel modello di partenza sono:

$E_{cls,imp} = 43200 \text{ MPa}$

$E_{cls,pila} = 43200 \text{ MPa}$

Mod. Poisson = 0.15

$K_{trasl,app} = 134700 \text{ kN/m}$

$K_{vert,app} = 6448000 \text{ kN/m}$

$K_{rot,app} = 656326 \text{ kNm/rad}$

Altezza efficace pila = 10 m

Sono state quindi eseguite una serie di analisi modali agli autovettori, facendo variare di volta in volta uno solo dei parametri sopra elencati.

I risultati principali sono riportati nelle tabelle e grafici successivi.



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

5 Modello di calcolo post-indagine

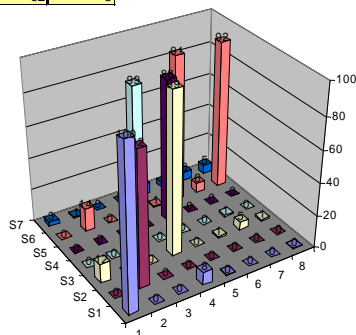
Confronto forme modali derivanti dall'analisi (FEA) e sperimentali (EMA) relativamente al modello descritto con i dati meccanici e geometrici "base"

MAC	EMA						
	1	2	3	4	5	6	7
FEA 00	1	100	0	12	0	0	3
	2	0	82	0	0	14	1
	3	0	0	0	99	0	0
	4	8	0	99	0	1	0
	5	0	0	0	0	88	1
	6	0	0	1	0	0	91
	7	0	0	5	1	0	6
	8	0	0	1	0	0	92

Riepilogo risultati

n.	Mod. 00		attesi	
	F Hz	tipo (L),(V),(T)	F Hz	tipo (L),(V),(T)
1	2.03	V	2.0	V
2	2.65	T	3.1	T
3	3.06	L	3.2	V
4	3.24	V	3.6	L
5	4.22	T	4.9	T
6	6.73	TOR	7.0	TOR
7	7.17	V	8.0	TOR

L= modo di vibrare in senso longitudinale
T= modo di vibrare in senso trasversale
V= modo di vibrare in senso verticale



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

5 Modello di calcolo post-indagine

Variazione del **modulo di Poisson degli elementi strutturali:**

Mod. 1.1: $\nu = 0.100$

Mod. 1.2: $\nu = 0.015$

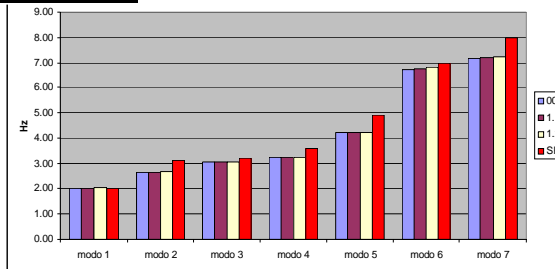
Riepilogo risultati

n.	Mod. 1.1		Mod. 1.2		attesi	
	F Hz	tipo (L),(V),(T)	F Hz	tipo (L),(V),(T)	F Hz	tipo (L),(V),(T)
1	2.03	V	2.03	V	2.0	V
2	2.66	T	2.66	T	3.1	T
3	3.06	L	3.06	L	3.2	V
4	3.24	V	3.25	V	3.6	L
5	4.22	T	4.23	T	4.9	T
6	6.77	TOR	6.84	TOR	7.0	TOR
7	7.20	V	7.23	V	8.0	TOR

L= modo di vibrare in senso longitudinale
 T= modo di vibrare in senso trasversale
 V= modo di vibrare in senso verticale

La variazione del modulo di Poisson non modifica in modo sostanziale alcuna frequenza, e anche le forme modali non risentono di tale modifica.

Influenza del modulo di Poisson



alpe progetti srl
 società di ingegneria
 via s. fermo, 11 - udine

5 Modello di calcolo post-indagine

Variazione del **modulo elastico degli elementi strutturali:**

Mod. 2.1: $E_{cls,pila} = E_{cls,impalc} = 38237 \text{ MPa}$

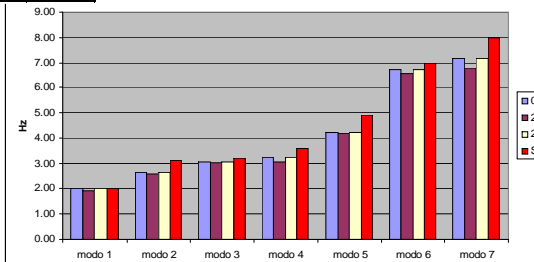
Mod. 2.2: $E_{cls,pila} = 38237 \text{ Mpa} - E_{cls,impalc} = 43200 \text{ MPa}$

Riepilogo risultati

n.	Mod. 2.1		Mod. 2.2		attesi	
	F Hz	tipo (L),(V),(T)	F Hz	tipo (L),(V),(T)	F Hz	tipo (L),(V),(T)
1	1.93	V	2.02	V	2.0	V
2	2.59	T	2.63	T	3.1	T
3	3.03	L	3.04	L	3.2	V
4	3.07	V	3.24	V	3.6	L
5	4.18	T	4.22	T	4.9	T
6	6.54	TOR	6.72	TOR	7.0	TOR
7	6.78	V	7.17	V	8.0	TOR

L= modo di vibrare in senso longitudinale
 T= modo di vibrare in senso trasversale
 V= modo di vibrare in senso verticale

Influenza del modulo elastico

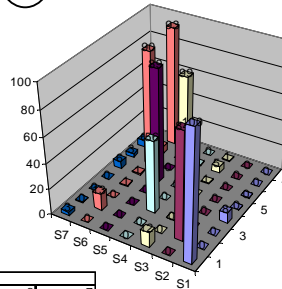


alpe progetti srl
 società di ingegneria
 via s. fermo, 11 - udine

5. Modello di calcolo post-indagine

Confronto forme modali derivanti dall'analisi (FEA) e sperimentali (EMA)

MAC		EMA						
		1	2	3	4	5	6	7
FEA 1.1	1	100	0	12	0	0	0	3
	2	0	83	0	0	0	14	1
	3	0	0	0	56	0	0	0
	4	8	0	99	0	0	1	0
	5	0	0	0	0	88	1	6
	6	0	0	1	0	0	91	3
	7	0	0	5	1	0	6	6
	8	0	0	1	0	0	92	5



MAC		EMA						
		1	2	3	4	5	6	7
FEA 1.2	1	100	0	12	0	0	0	3
	2	0	84	0	0	0	13	0
	3	0	0	0	56	0	0	0
	4	8	0	99	0	0	1	0
	5	0	0	0	0	89	1	6
	6	0	0	1	0	0	90	3
	7	0	0	5	1	0	6	6
	8	0	0	1	0	0	93	5



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

5. Modello di calcolo post-indagine

Variazione della rigidità rotazionale e verticale degli appoggi:

- Mod. 3.1: $K_x=K_y=134700$ kN/m $K_z=3224000$ kN/m $K_{rot}=328163$ kNm/rad
- Mod. 3.2: $K_x=K_y=134700$ kN/m $K_z=12896000$ kN/m $K_{rot}=1312653$ kNm/rad
- Mod. 3.3: $K_x=K_y=134700$ kN/m $K_z=6448000$ kN/m $K_{rot}=0$ kNm/rad

Riepilogo risultati

n.	Mod. 3.1		Mod. 3.2		Mod. 3.3		attesi	
	F _n Hz	tipo (L),(V),(T)	F _n Hz	tipo (L),(V),(T)	F _n Hz	tipo (L),(V),(T)	F _n Hz	tipo (L),(V),(T)
1	1.93	V	2.18	V	1.83	V	2.0	V
2	2.60	T	2.68	T	2.65	T	3.1	T
3	3.05	L	3.06	L	3.05	L	3.2	V
4	3.15	V	3.36	V	3.10	V	3.6	L
5	4.19	T	4.24	T	4.22	T	4.9	T
6	5.98	TOR	7.00	TOR	6.62	TOR	7.0	TOR
7	7.02	T-TOR	7.36	V	6.98	V	8.0	TOR

L= modo di vibrare in senso longitudinale
T= modo di vibrare in senso trasversale
V= modo di vibrare in senso verticale

Assumere l'appoggio come vincolo di cerniera perfetta causa una variazione percentuale della frequenza del primo modo flessionale verticale di circa il 10% rispetto quella determinata nel modello base



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

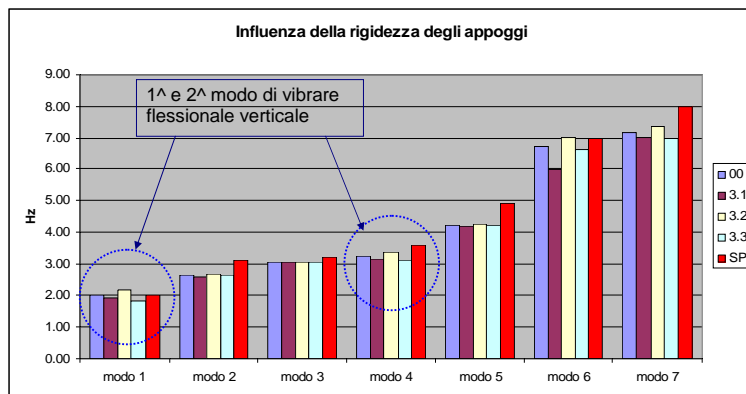
5. Modello di calcolo post-indagine

Variazione della rigidezza rotazionale e verticale degli appoggi:

Mod. 3.1: $K_x=K_y=134000$ kN/m $K_z=3224000$ kN/m $K_{rot}=328163$ kNm/rad

Mod. 3.2: $K_x=K_y=134000$ kN/m $K_z=12896000$ kN/m $K_{rot}=1312653$ kNm/rad

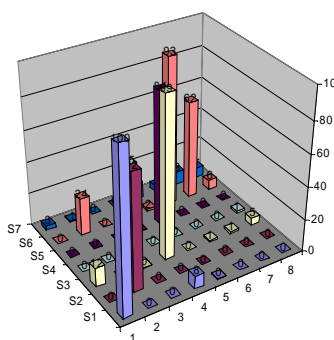
Mod. 3.3: $K_x=K_y=134000$ kN/m $K_z=6448000$ kN/m $K_{rot}=0$ kNm/rad



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

5. Modello di calcolo post-indagine

Confronto forme modali derivanti dall'analisi (FEA) e sperimentali (EMA)



MAC		EMA						
		1	2	3	4	5	6	7
FEA 31	1	100	0	12	0	0	0	3
	2	0	72	0	0	0	24	1
	3	0	0	0	55	0	0	0
	4	8	0	99	0	0	1	0
	5	0	0	0	0	84	2	10
	6	0	0	1	0	0	93	4
	7	0	0	1	0	0	62	8
	8	0	0	5	1	0	6	7

MAC		EMA						
		1	2	3	4	5	6	7
FEA 32	1	100	0	11	0	0	0	3
	2	0	88	0	0	0	10	0
	3	0	0	0	56	0	0	0
	4	8	0	99	0	0	1	0
	5	0	0	0	0	89	1	5
	6	0	0	0	0	0	75	2
	7	0	0	5	1	0	6	5
	8	0	0	1	0	0	94	5

MAC		EMA						
		1	2	3	4	5	6	7
FEA 33	1	100	0	12	0	0	0	3
	2	0	81	0	0	0	15	1
	3	0	0	0	54	0	0	0
	4	8	0	99	0	0	1	0
	5	0	0	0	0	88	1	7
	6	0	0	1	0	0	92	4
	7	0	0	5	1	0	6	6
	8	0	0	1	0	0	90	6



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

5 Modello di calcolo post-indagine

Variazione dell'altezza efficace della pila:

Mod. 4.1: $H_{eff} = 5.00m$

Mod. 4.2: $H_{eff} = 2.50m$

Mod. 4.3: $H_{eff} = 0.00m$

Riepilogo risultati

n.	Mod. 4.1		Mod. 4.2		Mod. 4.3		attesi	
	F Hz	tipo (L),(V),(T)	F Hz	tipo (L),(V),(T)	F Hz	tipo (L),(V),(T)	F Hz	tipo (L),(V),(T)
1	2.03	V	2.03	V	2.03	V	2.0	V
2	2.78	T	2.84	T	2.87	T	3.1	T
3	3.19	L	3.24	V	3.24	V	3.2	V
4	3.24	V	3.25	L	3.27	L	3.6	L
5	4.22	T	4.22	T	4.22	T	4.9	T
6	6.75	TOR	6.77	TOR	6.80	TOR	7.0	TOR
7	7.18	V	7.19	V	7.18	V	8.0	TOR

L= modo di vibrare in senso longitudinale
 T= modo di vibrare in senso trasversale
 V= modo di vibrare in senso verticale

Si riordinano le forme modali



alpe progetti srl
 società di ingegneria
 via s. fermo, 11 - udine

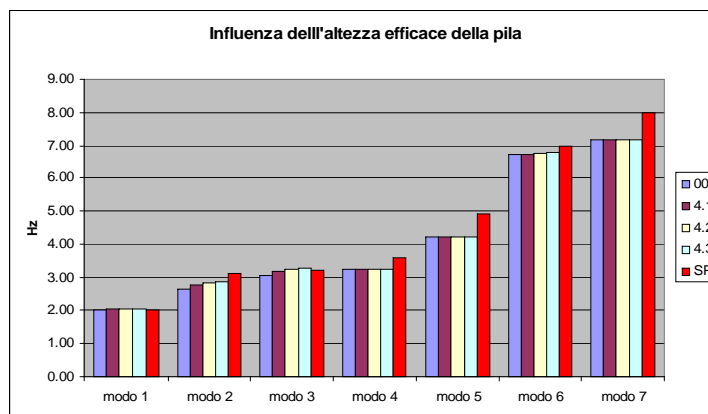
5 Modello di calcolo post-indagine

Variazione dell'altezza efficace della pila:

Mod. 4.1: $H_{eff} = 5.00m$

Mod. 4.2: $H_{eff} = 2.50m$

Mod. 4.3: $H_{eff} = 0.00m$



alpe progetti srl
 società di ingegneria
 via s. fermo, 11 - udine

5. Modello di calcolo post-indagine

Confronto forme modali derivanti dall'analisi (FEA) e sperimentali (EMA)

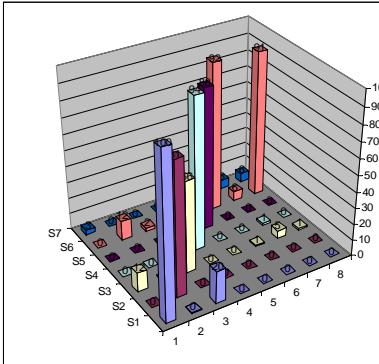


Grafico relativo al modello 4.3

MAC		EMA						
		1	2	3	4	5	6	7
FEA 41	1	100	0	12	0	0	0	3
	2	0	81	0	0	0	14	1
	3	0	0	0	50	0	0	0
	4	8	0	99	0	0	1	0
	5	0	0	0	0	88	1	7
	6	0	0	1	0	0	92	4
	7	0	0	5	1	0	6	6
	8	0	0	1	0	0	91	6

MAC		EMA						
		1	2	3	4	5	6	7
FEA 42	1	100	0	12	0	0	0	3
	2	0	81	1	0	0	13	1
	3	20	0	56	0	0	2	0
	4	0	0	0	95	0	0	0
	5	0	0	0	0	88	1	7
	6	0	0	1	0	0	92	4
	7	0	0	5	1	0	6	6
	8	0	0	1	0	0	91	6

MAC		EMA						
		1	2	3	4	5	6	7
FEA 43	1	100	0	12	0	0	0	3
	2	0	81	1	0	0	12	0
	3	20	0	56	0	0	2	0
	4	0	0	0	94	0	0	0
	5	0	0	0	0	88	1	7
	6	0	0	1	0	0	92	4
	7	0	0	5	1	0	6	6
	8	0	0	1	0	0	91	6



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

6. Osservazioni sui risultati

La disponibilità dei risultati delle prove sperimentali di vibrazione hanno permesso di validare il modello di calcolo di progetto, ed hanno fornito una utile serie di informazioni per tarare un modello di calcolo maggiormente aderente alla realtà.

Il modello di calcolo utilizzato in sede di progetto ha permesso di cogliere il comportamento globale della struttura, anche se non perfettamente.

La corrispondenza in termini di forme modali è soddisfacente, un po' meno quella in termini di frequenze di vibrazione.



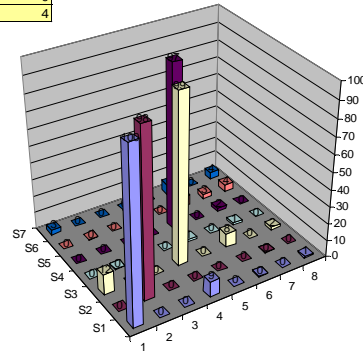
alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

6 Osservazioni sui risultati

Grafico MAC relativo alle forme modali (FEA DSG) di progetto e quelle rilevate (EMA)

MAC		EMA						
		1	2	3	4	5	6	7
FEA DSG	1	100	0	12	0	0	0	3
	2	0	98	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	54	0	0	0
	4	9	0	99	0	0	1	0
	5	0	0	0	1	97	0	0
	6	0	0	8	0	0	6	6
	7	0	0	0	1	2	3	0
	8	1	0	2	0	0	4	4

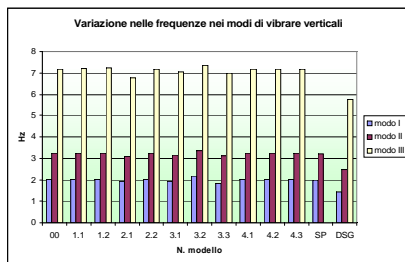
Le prime forme modali di progetto (quelle più semplici) manifestano una corrispondenza ottima con quelle rilevate.



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

6 Osservazioni sui risultati

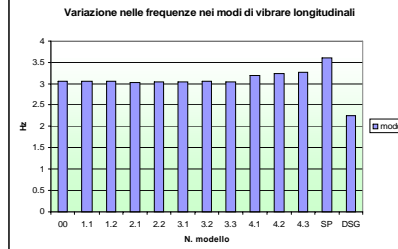
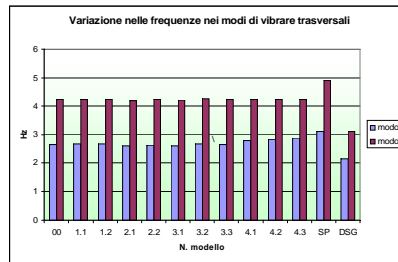
Riepilogo dei risultati ottenuti in termini di frequenze di vibrazione, e confrontati con quelli previsti in fase di progetto e quelli rilevati in sito



La struttura rilevata si presenta, rispetto ai risultati dei modelli studiati, abbastanza aderente per quel che riguarda le frequenze di vibrazione flessionali verticali.

In generale è più rigida per quel che riguarda le forme di vibrare traslazionale.

Il modello di progetto si presenta in generale più flessibile.



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

6 Osservazioni sui risultati

Alla luce di quanto determinato, si possono definire quali sono i parametri meccanici e geometrici che, per il caso in esame, "ottimizzano" la risposta dinamica del modello nei confronti di quanto rilevato in sito.

Modulo elastico del calcestruzzo dell'impalcato:	$E_{CLS,IMP} = 43200 \text{ Mpa}$
Modulo elastico del calcestruzzo della pila:	$E_{CLS,PILA} = 43200 \text{ Mpa}$
Modulo di Poisson:	$\nu = 0.15$
Rigidezza traslazionale appoggi	$K_{TRASL} = 134700 \text{ kN/m}$
Rigidezza rotazionale appoggi	$K_{ROT} = 787592 \text{ kNm/rad}$
Rigidezza verticale appoggi	$K_z = 7737600 \text{ kN/m}$
Altezza efficace pila	$H_{eff} = 5.00\text{m}$



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

6 Osservazioni sui risultati

Nella tabella si riepilogano i risultati in termini di frequenze (del modello ed attese) ed errori percentuale; questi sono calcolati tra frequenze aventi modi di vibrare "simili".

Riepilogo risultati					Errore %	
n.	F Hz	tipo (L),(V),(T)	attesi			Errore %
			F Hz	tipo (L),(V),(T)		
1	2.06	V	2.0	V	ε_{1F}	3.22%
2	2.79	T	3.1	T	ε_{2F}	-9.98%
3	3.19	L	3.2	V	ε_{43F}	2.12%
4	3.27	V	3.6	L	ε_{34F}	-11.26%
5	4.23	T	4.9	T	ε_{5F}	-13.77%
6	6.88	TOR	7.0	TOR	ε_{6F}	-1.65%
7	7.22	V	8.0	TOR		

L= modo di vibrare in senso longitudinale
T= modo di vibrare in senso trasversale
V= modo di vibrare in senso verticale

La scelta dei parametri è stata fatta nell'ottica di ridurre l'errore percentuale nelle frequenze dei primi modi di vibrare: ε_1 cresce al crescere di Krot, mentre ε_2 , ε_{43} , ε_{34} si riducono.

L'altezza efficace della pila è ragionevole sia fissata non oltre H/2, in base allo stato dell'alveo all'atto delle prove.



alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

6 Osservazioni sui risultati

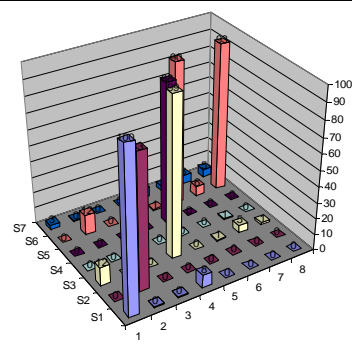
Riepilogo risultati

n.	F		attesi	
	Hz	tipo (L),(V),(T)	Hz	tipo (L),(V),(T)
1	2.06	V	2.0	V
2	2.79	T	3.1	T
3	3.19	L	3.2	V
4	3.27	V	3.6	L
5	4.23	T	4.9	T
6	6.88	TOR	7.0	TOR
7	7.22	V	8.0	TOR

Errore %	
ϵ_{1F}	3.22%
ϵ_{2F}	-9.98%
ϵ_{3F}	2.12%
ϵ_{34F}	-11.26%
ϵ_{5F}	-13.77%
ϵ_{6F}	-1.65%

L= modo di vibrare in senso longitudinale
T= modo di vibrare in senso trasversale
V= modo di vibrare in senso verticale

MAC	EMA						
	1	2	3	4	5	6	7
FEA VLD	100	0	12	0	0	0	3
	0	83	0	0	0	12	0
	0	0	0	50	0	0	0
	8	0	99	0	0	1	0
	0	0	0	0	88	1	6
	0	0	1	0	0	90	3
	0	0	5	1	0	6	6
	0	0	1	0	0	93	5



ALPE
PROGETTI S.R.L.

alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

6 Conclusioni

Il modello di calcolo realizzato a seguito delle indagini sperimentali ha permesso di cogliere in modo migliore il comportamento messo in evidenza durante le prove, sia in termini di forme di vibrare che in termini di frequenze proprie.

Sono peraltro emerse alcune "differenze" tra quanto atteso e quanto rilevato, tra cui:

1 - Presenza di un terzo modo di vibrare flessionale verticale, non osservato durante le prove

Influenza del posizionamento della vibrodina e degli apparati di misura rispetto le forme modali attese

2 – Forte influenza dell'altezza efficace della pila

È un parametro che può modificarsi fortemente nel tempo (effetti di piene, mancata manutenzione alveo,...)

ALPE
PROGETTI S.R.L.

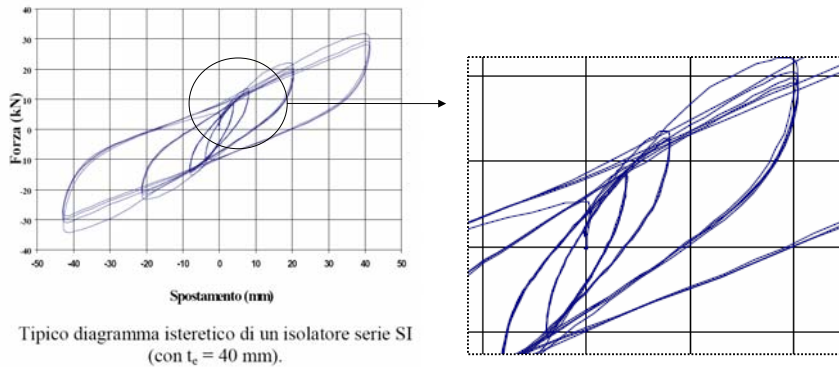
alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

6 Conclusioni

3 – Diverse frequenze dei primi modi di vibrare traslazionale (trasversale e longitudinale)

Differenze imputabili a:

- Altezza efficace della pila diversa da quella adottata nei modelli di calcolo;
- Rigidezze traslazionali degli appoggi diverse da quelle assunte



ALPE
S.p.A.

alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

6 Conclusioni

3 – Diverse frequenze dei primi modi di vibrare traslazionale (trasversale e longitudinale)

Differenze imputabili a:

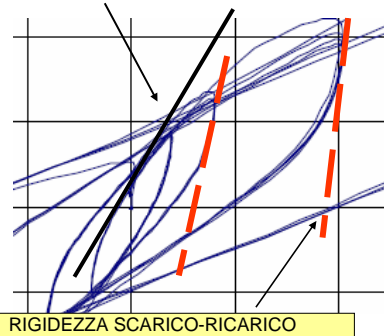
- Altezza efficace della pila diversa da quella adottata nei modelli di calcolo;
- Rigidezze traslazionali degli appoggi diverse da quelle assunte

Gli appoggi, al momento delle prove dinamiche, potrebbero aver subito una deformazione superiore al limite elastico ($\delta_v = 2$ mm).

→ Il materiale si trova oltre il limite elastico

→ La rigidezza di scarico-ricarico è maggiore di quella elastica (per piccoli spostamenti quali quelli indotti dalla vibrodina usata nel caso presente, che ha forzante di circa 20 kN)

RIGIDEZZA ELASTICA



RIGIDEZZA SCARICO-RICARICO

ALPE
S.p.A.

alpe progetti srl
società di ingegneria
via s. fermo, 11 - udine

6 Conclusioni

Da quanto analizzato nel caso in esame emerge come già in fase progettuale sia bene considerare almeno (ai fini della risposta dinamica della struttura):

- la rigidità rotazionale degli appoggi (ipotesi di cerniera ideale poco aderente alla realtà);
- presenza di "piccoli" particolari costruttivi, quali cordoli, marciapiedi...
- un modello f.e.m. ad elementi bidimensionali, che è in grado di cogliere con più facilità modi di vibrare complessi (flesso torsionali p.e.).

I risultati sperimentali ottenuti dall'indagine in sito sono una buona fotografia dello stato della struttura, ma come tale rappresentano la struttura in quel dato "istante" (rinterro pila, stato degli appoggi, masse presenti all'atto della prova,...).

È possibile tarare un modello di calcolo affinché soddisfi i risultati di tale indagine sperimentale, nei limiti comunque dei risultati a disposizione (numero limitato di punti di misura) e con le incertezze legate alle scelte su quali parametri "ottimizzare".

Può essere utile avere più "fotografie" in vari momenti della vita, in modo da avere più vincoli per la taratura del modello stesso, considerato il potenziale uso "diagnostico" che lo stesso può assumere nella vita della struttura.