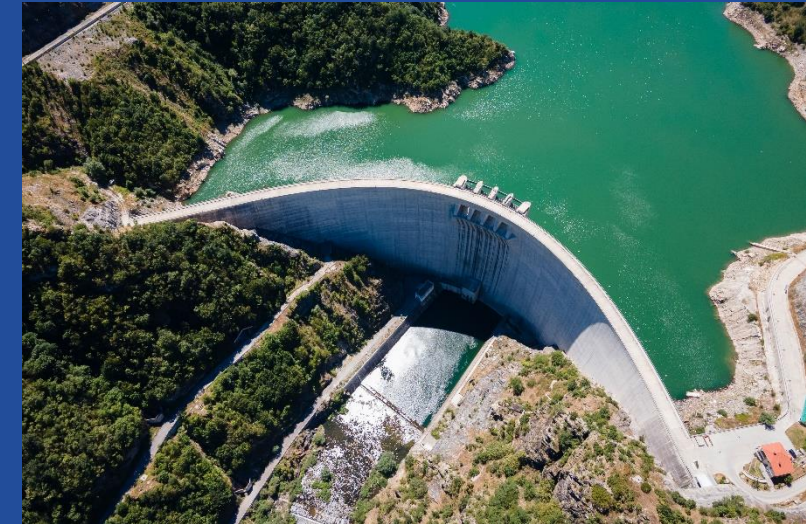


FORMAZIONE DIGHE A VOLTA

ANALISI STRUTTURALE

La modellazione numerica applicata alle dighe a volta



Guido Mazzà

Vice Presidente ITCOLD

Chairman Comitato ICOLD

«Computational Aspects of Analysis and Design of Dams»



ANALISI STRUTTURALE

LA MODELLAZIONE NUMERICA APPLICATA ALLE DIGHE A VOLTA

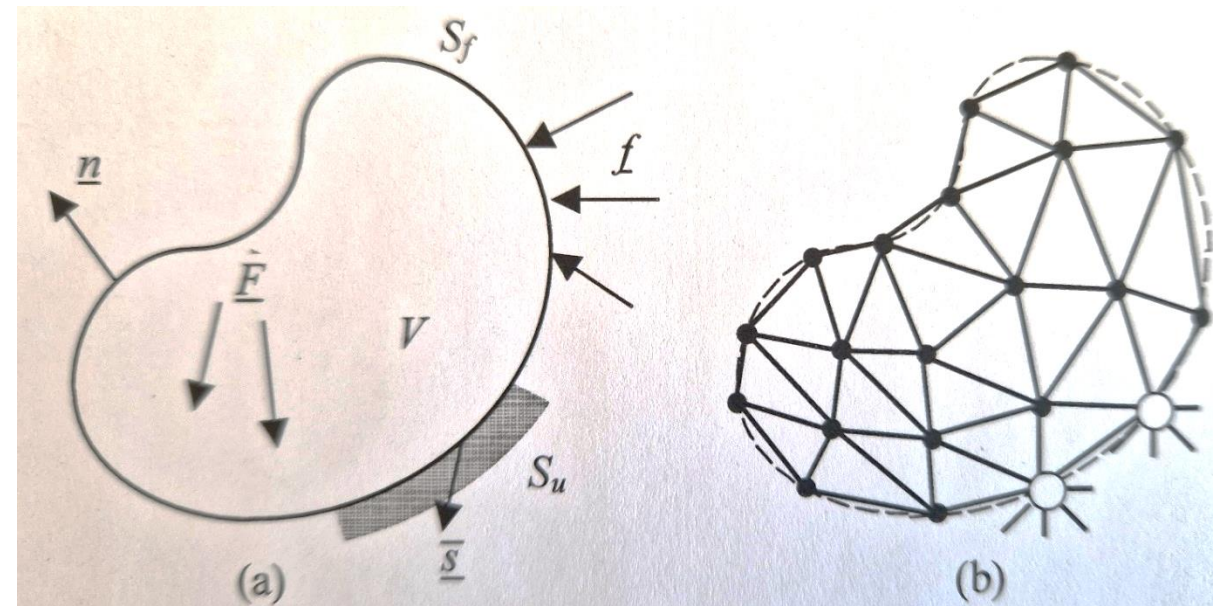
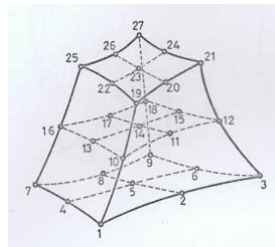
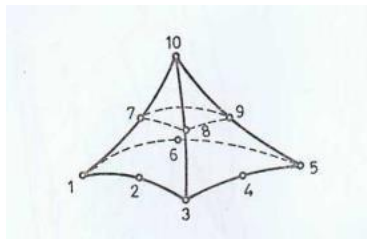
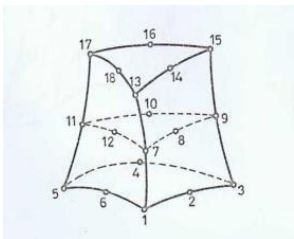
- ☐ Introduzione
- ☐ Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali
- ☐ Benchmark Workshop
- ☐ Bibliografia e Bollettini ICOLD
- ☐ Impiego di modellazione FEM per un caso reale

Introduzione

L'uso di strumenti numerici è diventata una pratica standard nell'ingegneria delle dighe grazie in particolare agli enormi progressi nella **tecnologia software e hardware** che consente di eseguire una vasta gamma di analisi numeriche per la progettazione, costruzione ed esercizio delle dighe.

Il **Metodo degli Elementi Finiti** è una tecnica numerica che individua **soluzioni approssimate** di problemi descritti da **equazioni differenziali alle derivate parziali (lineari e non)** riducendo queste ultime a un sistema di equazioni algebriche.

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



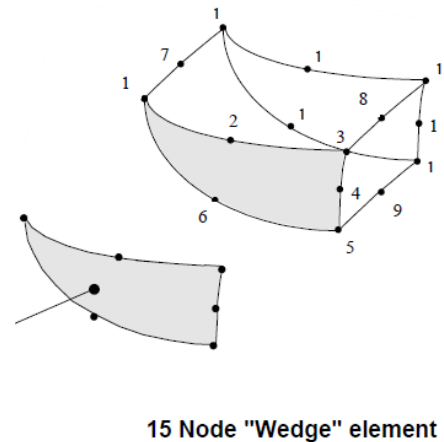
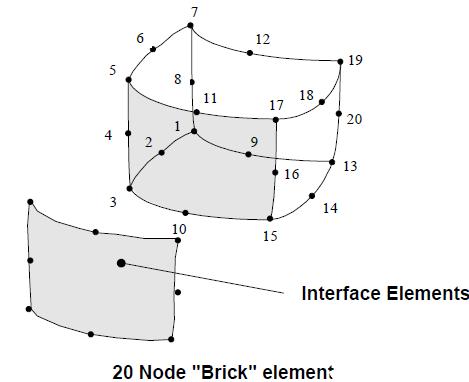
Introduzione

Il metodo **FEM** prevede la **discretizzazione del continuo** attraverso la creazione di una griglia (*mesh*) di elementi (1D, 2D o 3D).

Su ciascun elemento, la soluzione del problema è espressa dalla combinazione lineare di **funzioni di forma** (*shape functions*).

Le fasi del metodo FEM prevedono:

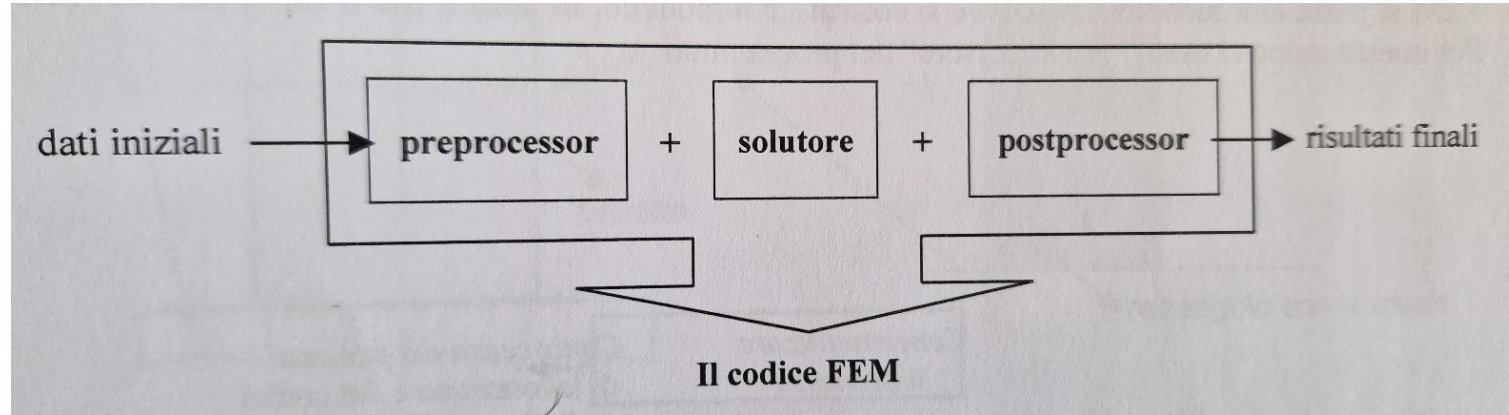
- ✓ **Idealizzazione**: scelta del modello matematico (1D, 2D, 3D, statico o dinamico, piccole o grandi deformazioni).
- ✓ **Discretizzazione**: suddivisione della struttura in «elementi finiti» (*mesh*).
- ✓ **Modellazione**: definizione del modello di spostamento di ogni elemento (matrice di rigidezza e vettore dei carichi) a livello locale.
- ✓ **Assemblaggio**: assemblaggio dei contributi di rigidezza dei vari elementi finiti nella matrice di rigidezza globale; analogo assemblaggio per il vettore dei carichi.
- ✓ **Soluzione**: risoluzione del sistema assemblato delle equazioni di equilibrio per ricavare gli spostamenti nodali e da questi, attraverso le funzioni di forma (*shape functions*), lo stato di sforzo in ciascun elemento.



Introduzione

Pre-processing:

- scelta del tipo di analisi (analisi statica/dinamica/termica, lineare o non lineare/dipendente o meno dal tempo, ecc.)
- scelta del tipo di elementi finiti (per problemi piani o tridimensionali, trave/guscio/tridimensionale, ecc.)
- definizione dei parametri che caratterizzano il comportamento costitutivo dei materiali
- costruzione della discretizzazione a elementi finiti (mesh)
- applicazione delle condizioni di vincolo e di carico



Post-processing:

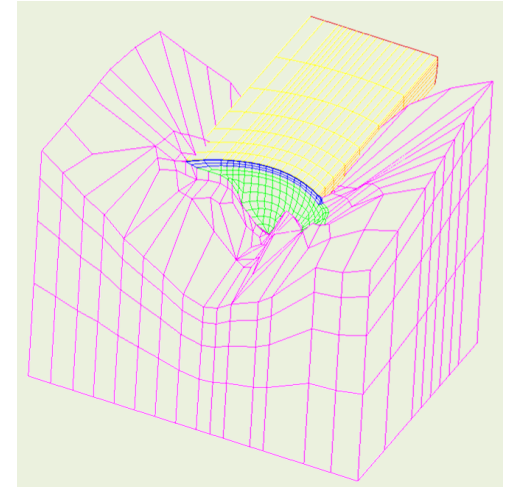
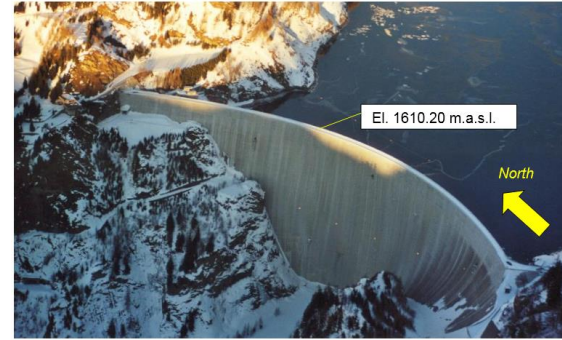
- elaborazione e rappresentazione della soluzione sia nelle quantità fondamentali (gli spostamenti in ambito strutturale) sia delle quantità da esse derivate (deformazioni, sforzi nei problemi strutturali).

Pre-processing ed il **post-processing** fanno sempre uso di una interfaccia grafica per agevolare l'interazione con l'utilizzatore.

Introduzione

L'**applicazione** di modelli numerici nella pratica dell'**ingegneria delle dighe** ha subito per molti anni un divario tra gli specialisti della modellazione numerica e gli ingegneri delle dighe.

Il Comitato Tecnico ICOLD TC «A» **“Computational Aspects of Analysis and Design of Dams”**, già negli anni '90, ha fortemente contribuito a creare un ponte tra gli specialisti della modellazione numerica e gli ingegneri delle dighe e alla diffusione delle conoscenze nel campo della modellazione numerica.



Olgierd
Zienkiewicz



Michele Fanelli

Introduzione

I modelli FEM del sistema diga-fondazione-invaso possono essere impiegati per la:

- a) **Progettazione e ottimizzazione** di nuove dighe in diverse fasi del progetto.
- b) **Interpretazione del comportamento** in esercizio mediante confronto dei risultati del sistema di monitoraggio con valori calcolati con **modelli previsionali**.
- c) **Valutazione della stabilità strutturale** e simulazione di eventuali possibili **meccanismi di rottura** per diversi scenari di carico (tipicamente esercizio o condizioni eccezionali: piene e sismi).
- d) **Progettazione e ottimizzazione di interventi per il miglioramento** della sicurezza statica e sismica.

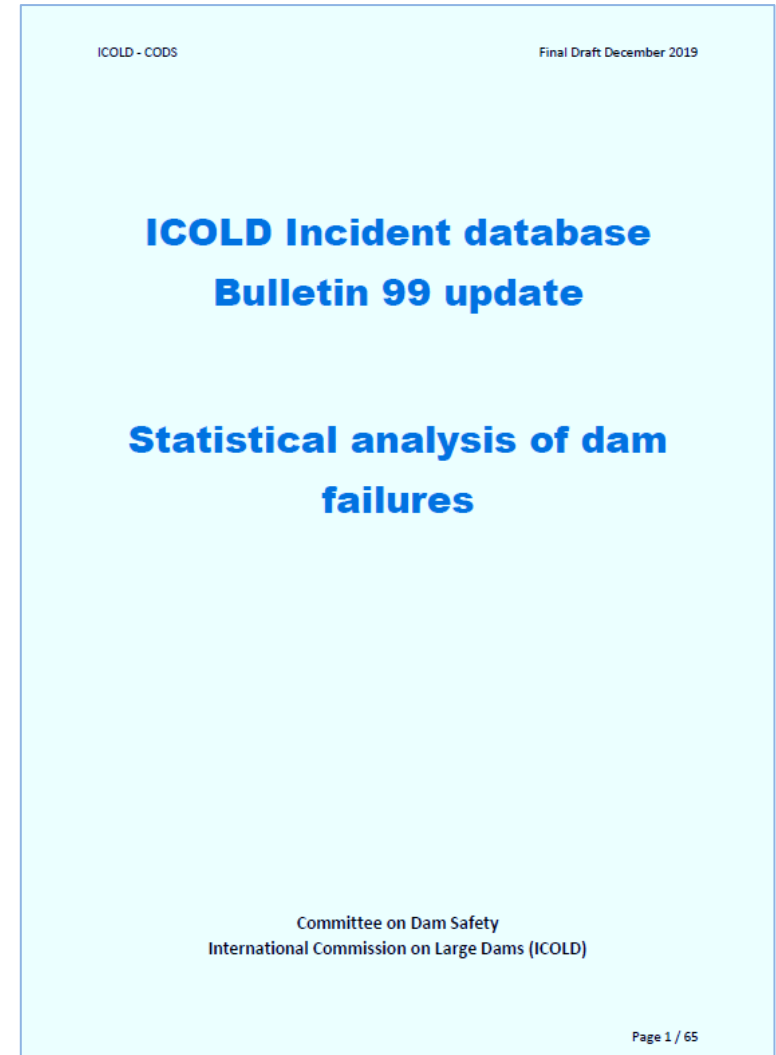
Introduzione

L'obiettivo fondamentale dell'analisi numerica è fornire risposte adeguate a una serie di domande rilevanti relative alle prestazioni (previste per le dighe in fase di progettazione od osservate per le strutture esistenti) di una diga.

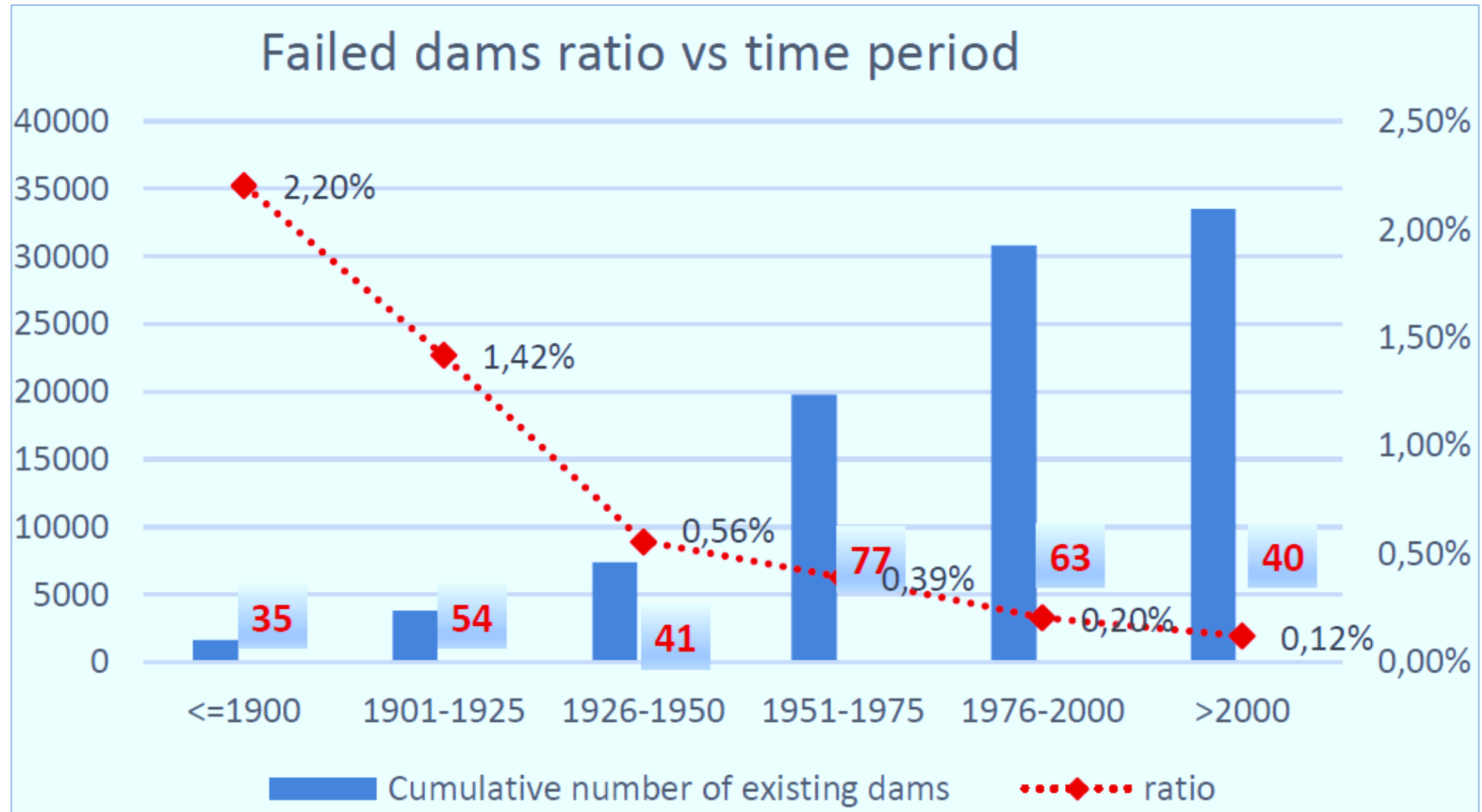
I principali **incidenti e rotture** in tutto il mondo hanno confermato la necessità di studiare i possibili meccanismi di rottura in una varietà di scenari di carico, che vanno dai carichi normali a quelli estremi, e che possono anche derivare da debolezze insite nel progetto o dalla mancanza di controllo di qualità durante il periodo di costruzione.

A failure is a catastrophic incident characterized by:

- an uncontrolled release of impounded water
and/or by*
- a total loss of integrity of the dam structure, its foundation or abutments.*

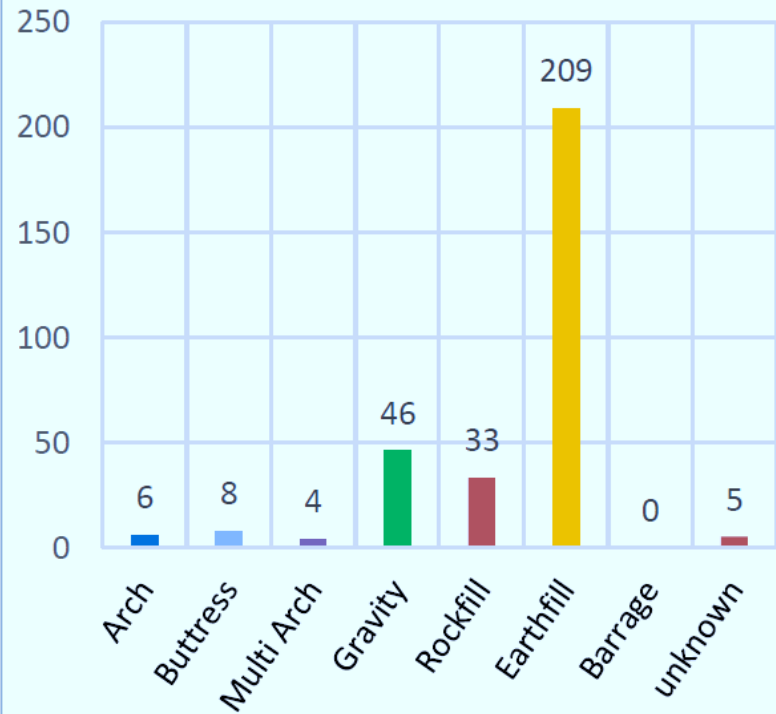


Introduzione

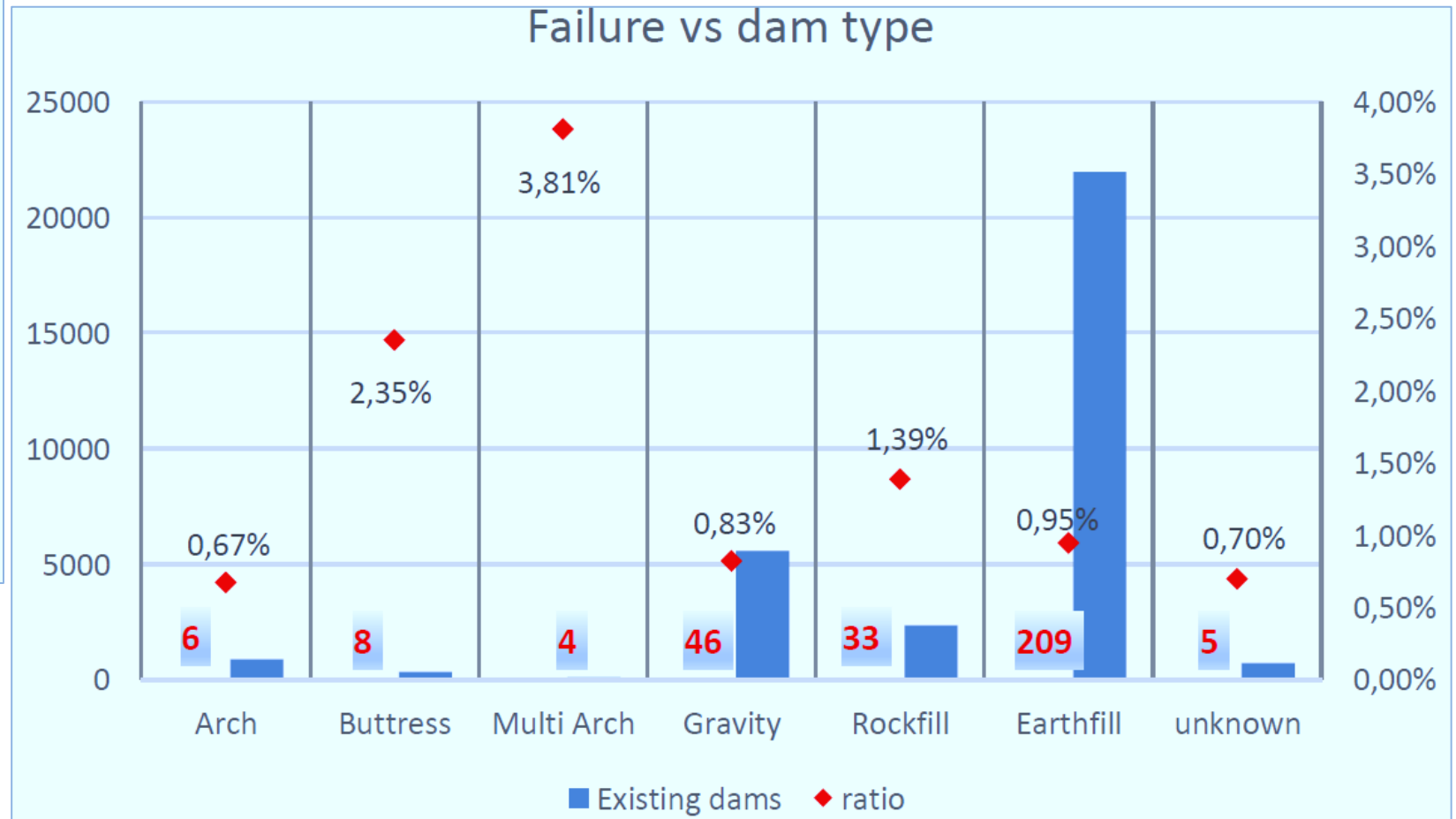


Introduzione

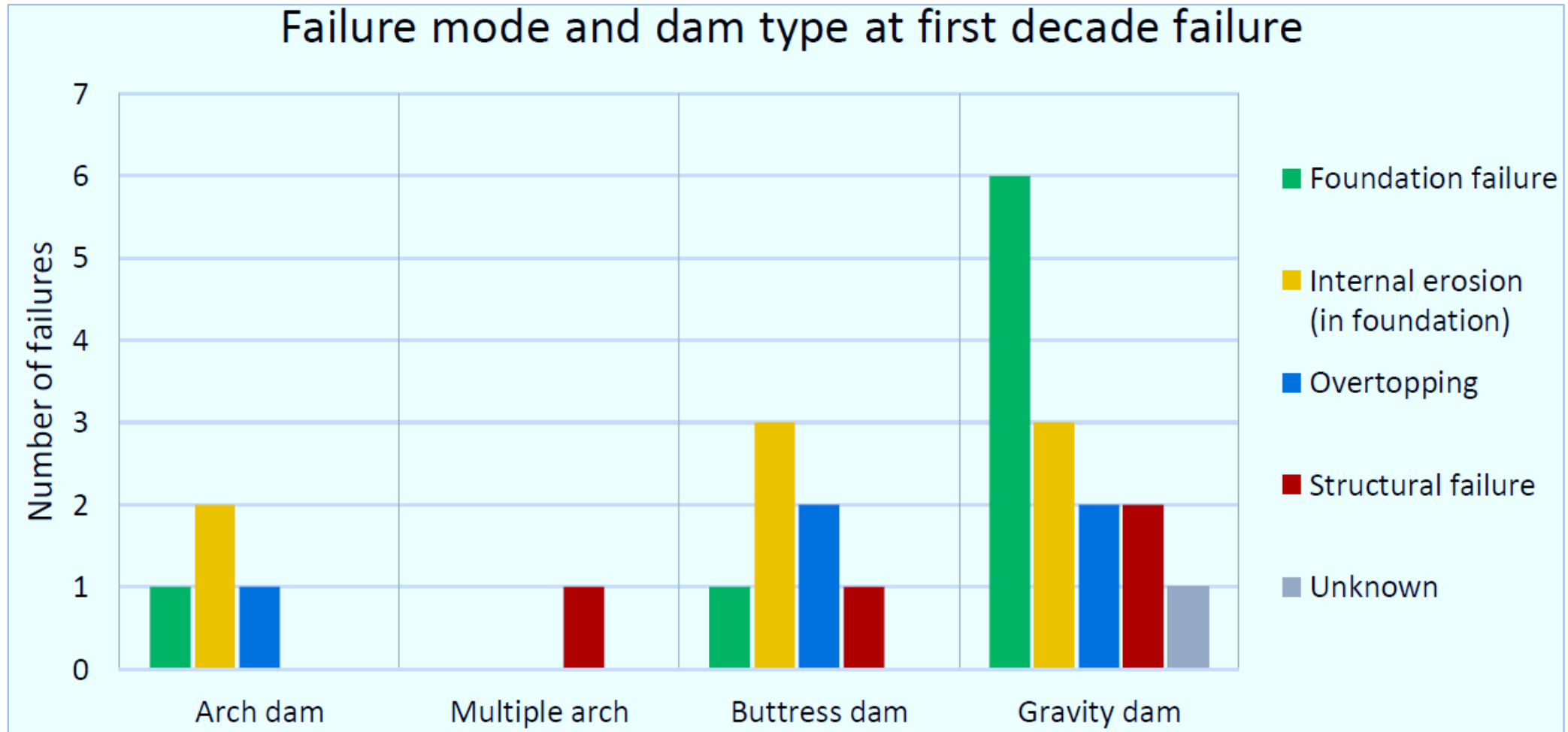
Failure vs dam type



Failure vs dam type



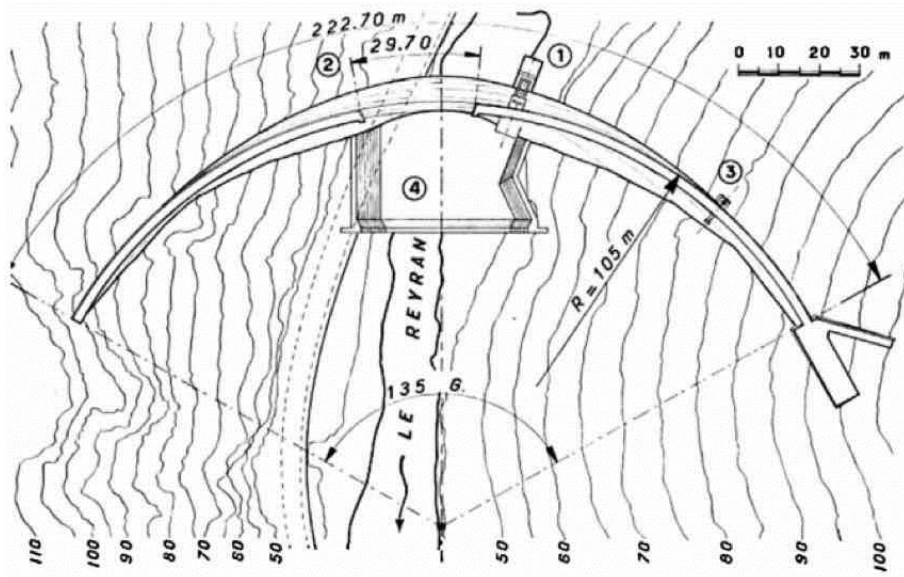
Introduzione



Introduzione

Storicamente, la causa principale delle rotture delle dighe a volta è stata correlata allo scivolamento su piani di debolezza all'interno della fondazione.

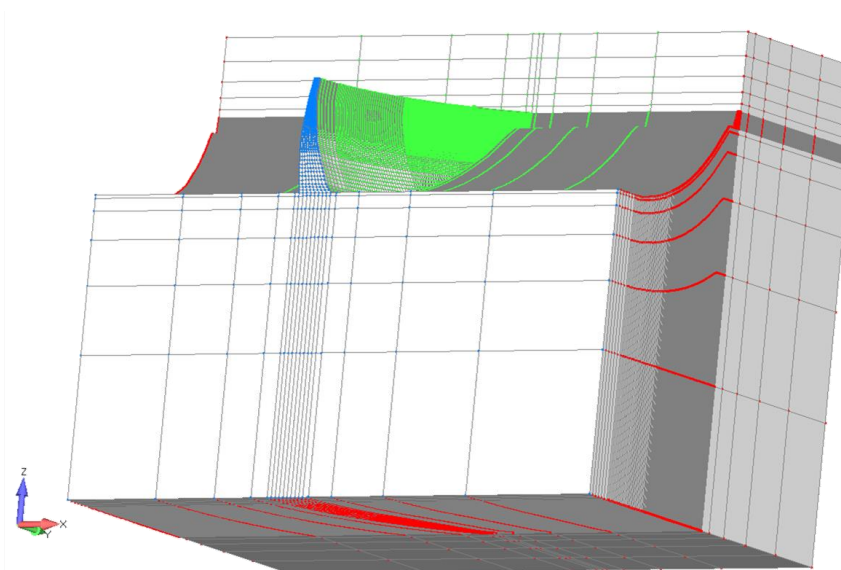
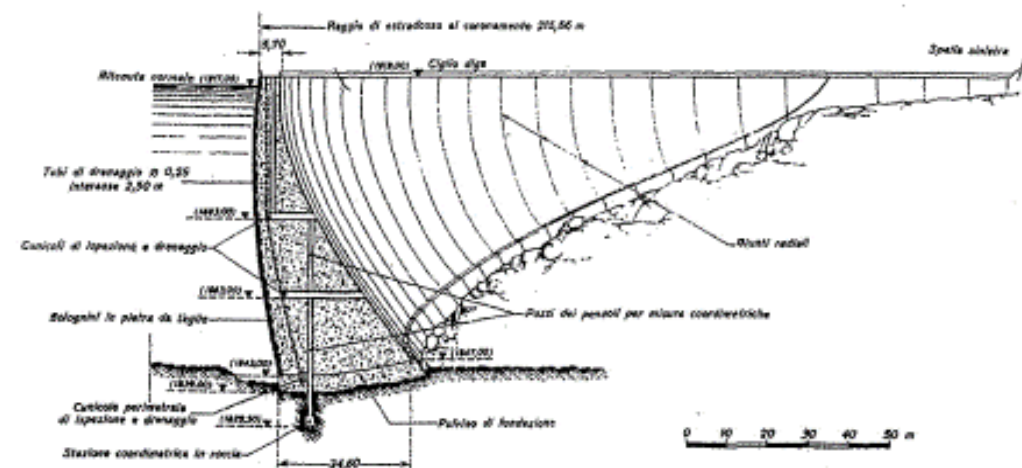
Non sono noti cedimenti di dighe a volta dovuti al superamento della resistenza dei materiali o all'azione sismica.



Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali

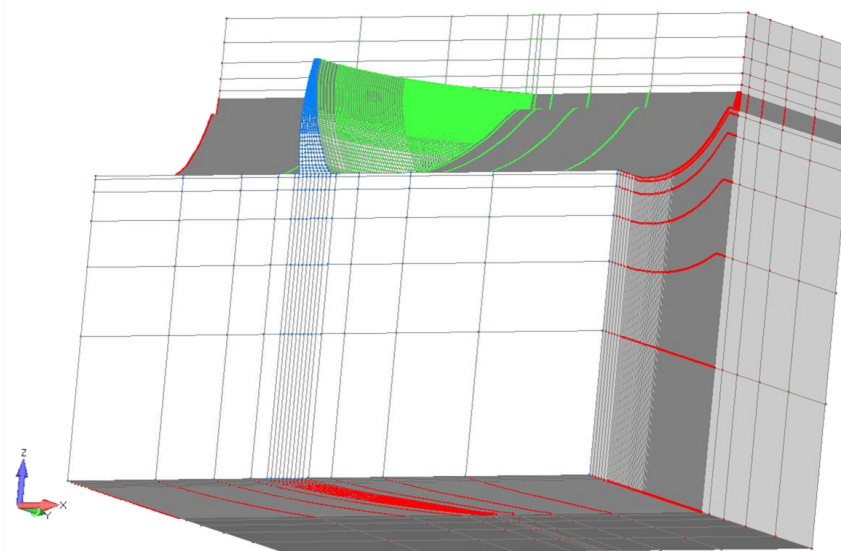
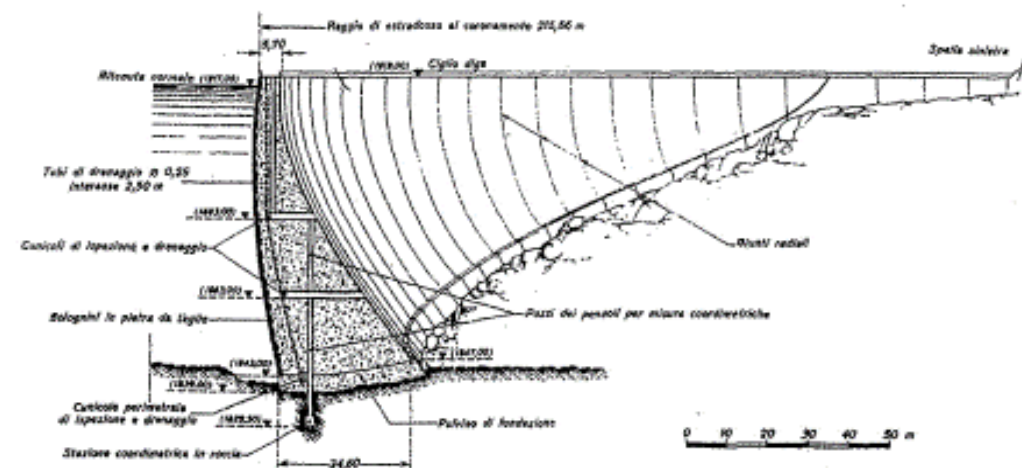
Mentre per le **dighe di materiali sciolti** e per le **dighe a gravità** vengono in genere adottati **modelli bidimensionali** (salvo i casi di opere realizzate in valli strette dove il ricorso a modelli 3-D è auspicabile e talvolta necessario), per le **dighe a volta** il ricorso a **modelli 3-D** è indispensabile.

Un primo aspetto da considerare è la **dimensione** e la **raffinatezza della griglia** degli elementi finiti (geometria del modello).



Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali

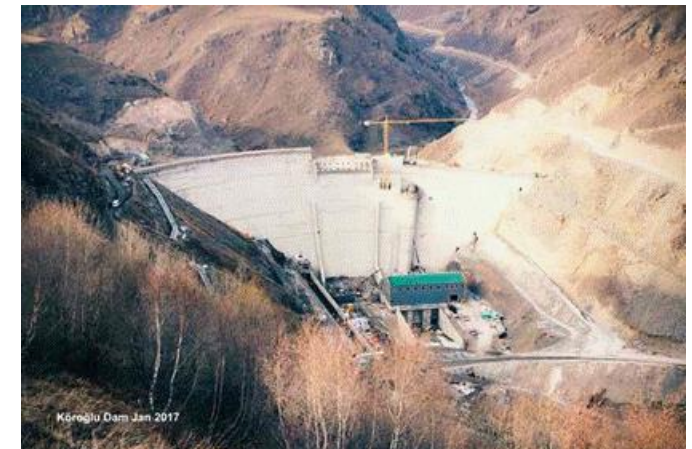
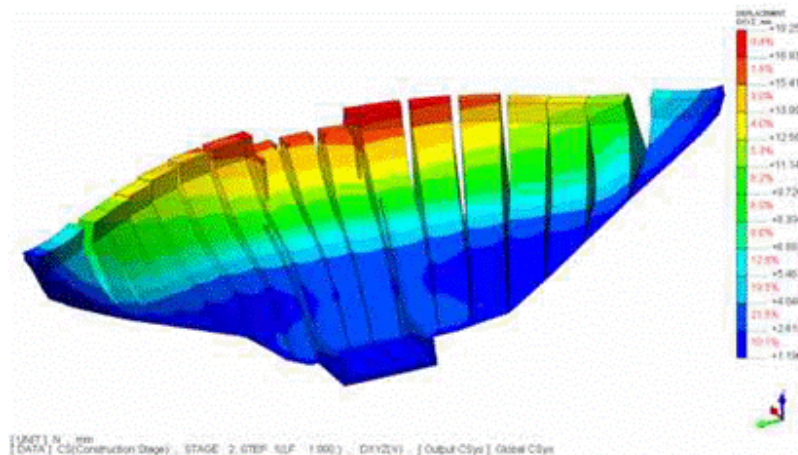
Una **maggiore densità** di elementi finiti - e corrispondentemente elementi di dimensioni minori - è necessaria **dove sono previsti gradienti più elevati**, ad es. per le analisi elastiche lineari in cui sono presenti **singolarità geometriche** così come in relazione alle condizioni di carico (ad es. quando si considera un **carico termico giornaliero**, la dimensione degli elementi finiti deve essere sufficientemente piccola da consentire la rappresentazione della propagazione dell'onda termica in prossimità del paramento della diga).



Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali

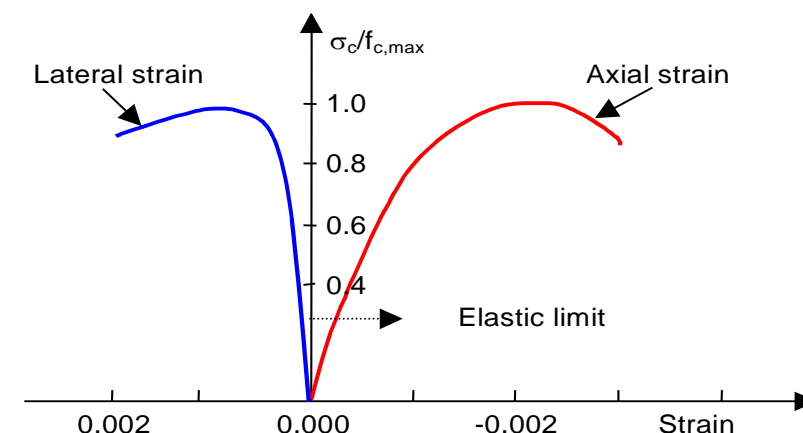
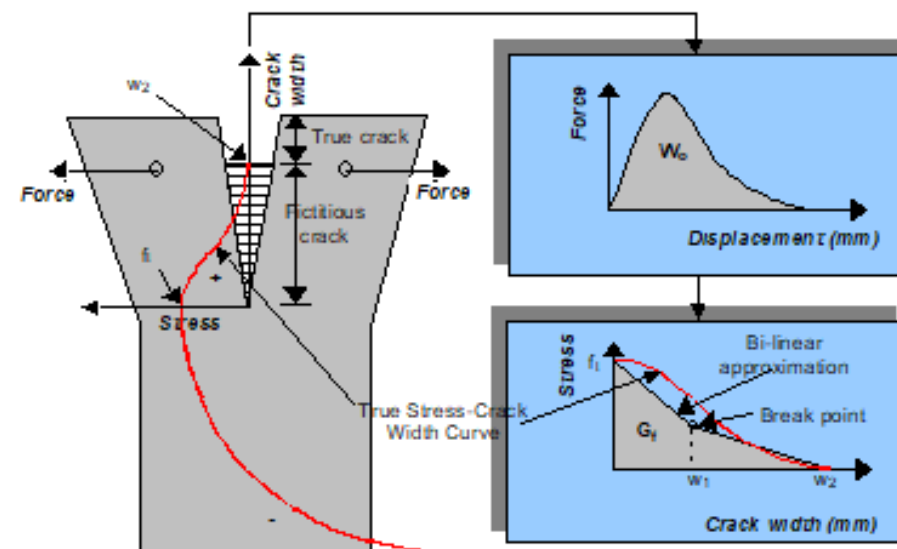
Nella modellazione numerica più tradizionale, il **peso proprio** della struttura viene spesso simulato come un carico applicato istantaneamente che agisce sulla struttura completa. In pratica, però, il **peso proprio** e la **rigidezza delle strutture agiscono progressivamente** al variare dell'avanzamento realizzativo e delle caratteristiche meccaniche.

Per le **dighe ad arco e ad arco-gravità**, trascurare gli **effetti** delle **fasi di costruzione** sullo stato tensio-deformativo finale dovuto al peso della struttura introduce approssimazioni che possono essere di natura importante e che **vanno tenute in conto**.



Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali

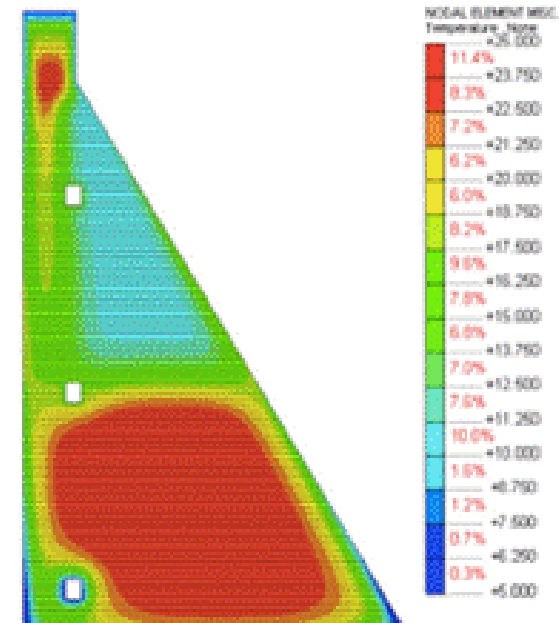
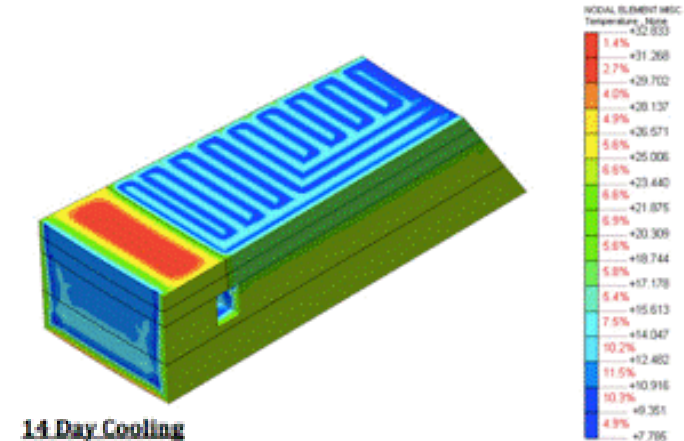
La **definizione dello stato tensio-deformativo iniziale della struttura** è uno dei problemi più complessi da risolvere per le strutture esistenti in parte a causa della difficoltà ad ottenere **informazioni sulla costruzione** (sequenza di posa del calcestruzzo, condizioni termiche di getto e dell'ambiente, ecc.), ma anche per le incertezze relative alla **conoscenza dei parametri termo-visco-meccanici** che governano i fenomeni.



Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali

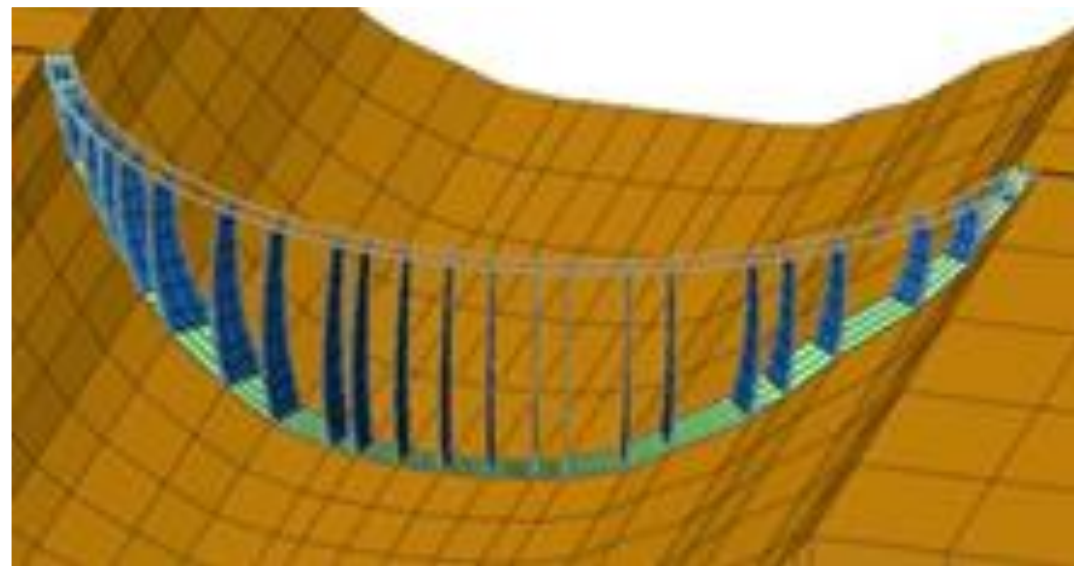
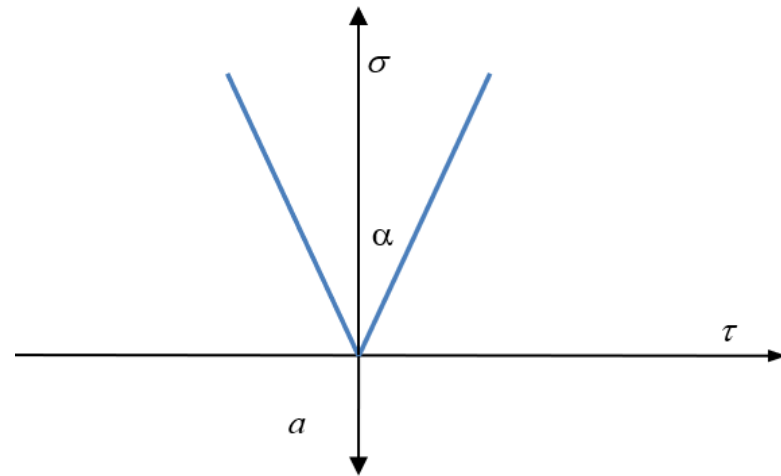
Per quanto riguarda le dighe in calcestruzzo, oltre a simulare gli effetti delle fasi di costruzione in termini di peso proprio, può essere importante anche valutare lo stato tensio-deformativo causato dalla **generazione e dispersione del calore di idratazione** in masse di blocchi di calcestruzzo non completamente libero di contrarsi durante il raffreddamento dei getti.

In particolare, per le **dighe a volta** e ad **arco-gravità**, la simulazione **dell'iniezione dei giunti di contrazione** potrebbe essere di una certa importanza anche se viene in genere trascurata considerando gli **effetti di rilassamento dovuti alla viscosità**.



Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali

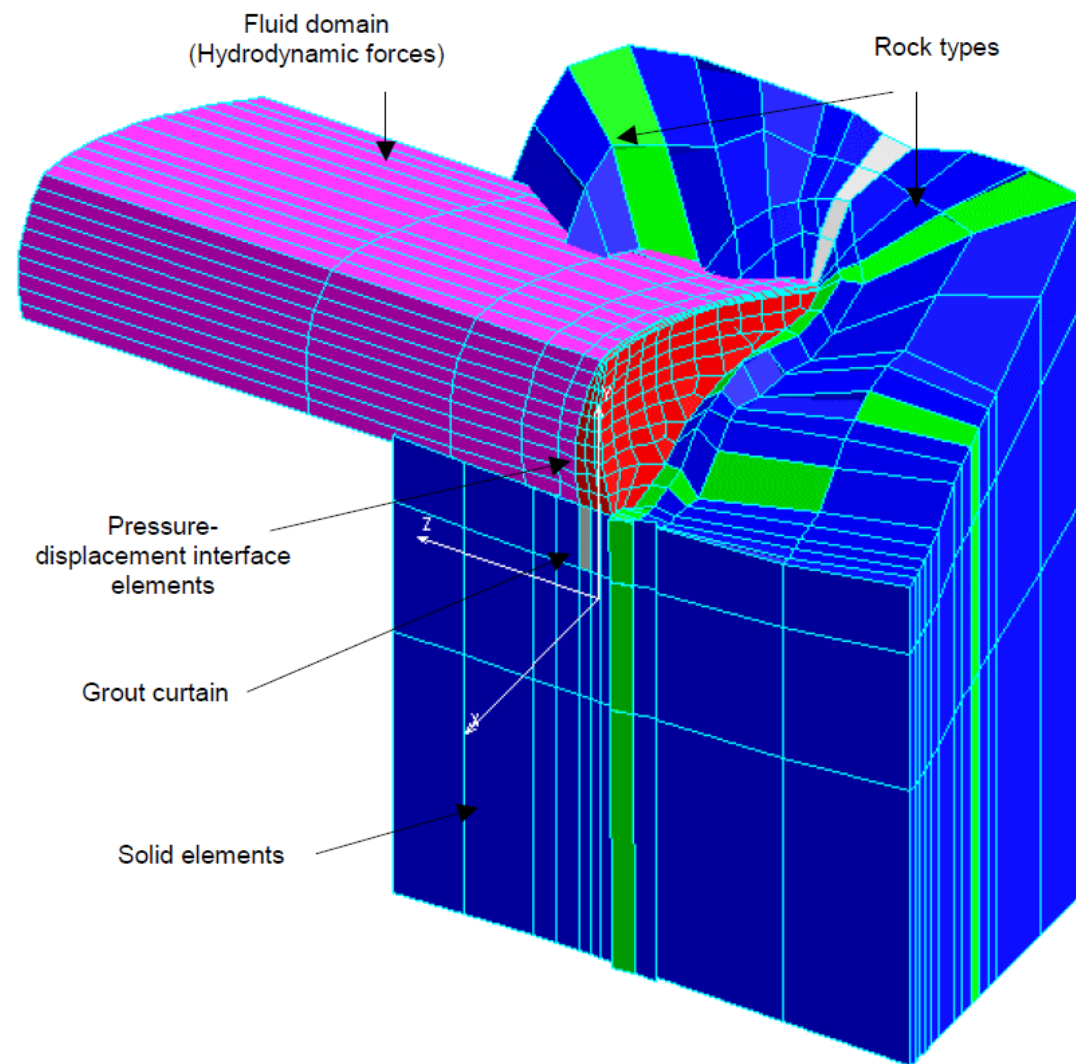
Un ulteriore aspetto da considerare nell'applicazione dei modelli numerici per l'analisi delle dighe è l'inclusione delle **discontinuità**. La questione non è banale dal punto di vista numerico perché le discontinuità (es. giunti di costruzione, interfacce, fessure, ecc.) richiedono in genere una **modellazione agli elementi finiti non lineare**. Come regola generale, è consigliabile effettuare **analisi elastiche lineari preliminari** per verificare se il campo di sollecitazione è in grado di attivare effettivamente la cinematica (apertura o scorrimento) delle discontinuità. **Per le dighe a volta il ricorso a un modello numerico che includa le discontinuità è spesso indispensabile.**



Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali

Quando si realizza un modello FEM è opportuno che **l'estensione minima della fondazione** sia compresa tra 1 e 2 volte, in alcuni casi anche 3 volte, l'altezza della diga. L'estensione in **lunghezza dell'invaso**, quando si eseguono **analisi dinamiche**, dovrebbe essere da 3 a 5 volte l'altezza della diga per evitare problemi legati agli effetti delle onde riflettenti.

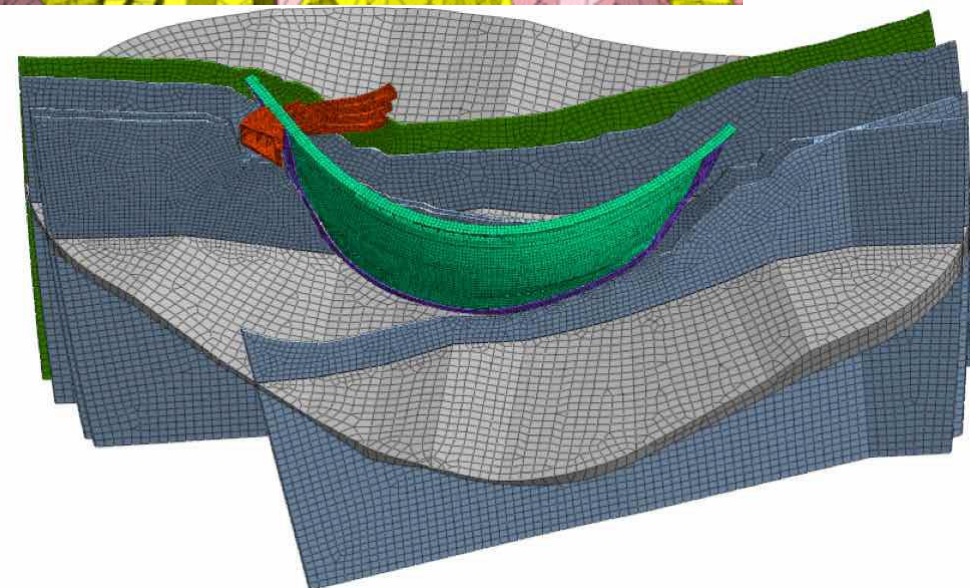
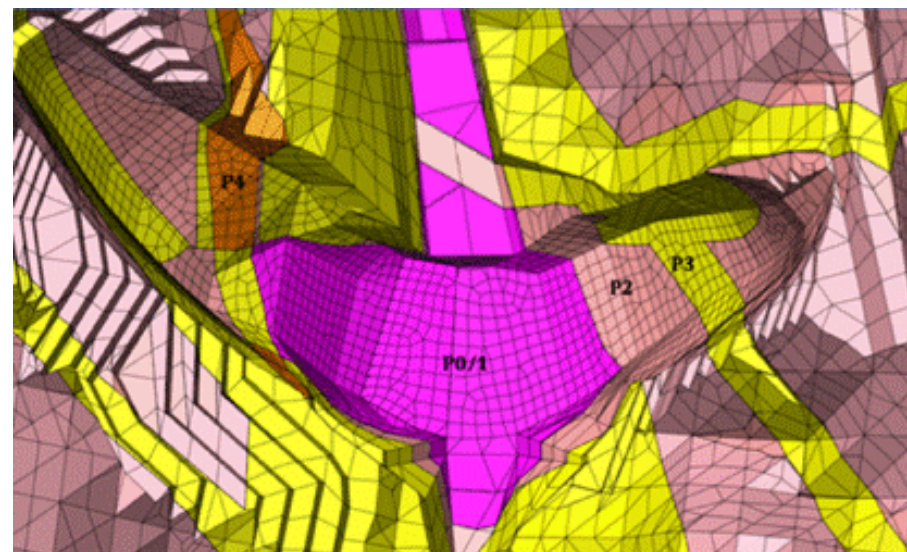
Ad ogni modo, i **risultati** ottenuti devono essere ragionevolmente **indipendenti dalla dimensione della maglia degli elementi finiti**.



Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali

Un altro aspetto, particolarmente complesso da modellare, riguarda la fondazione in particolare quando sono presenti **faglie o discontinuità nella roccia** o quando si vogliano simulare i trattamenti di **consolidamento** (iniezione di cemento, *jet-grouting*, ecc.).

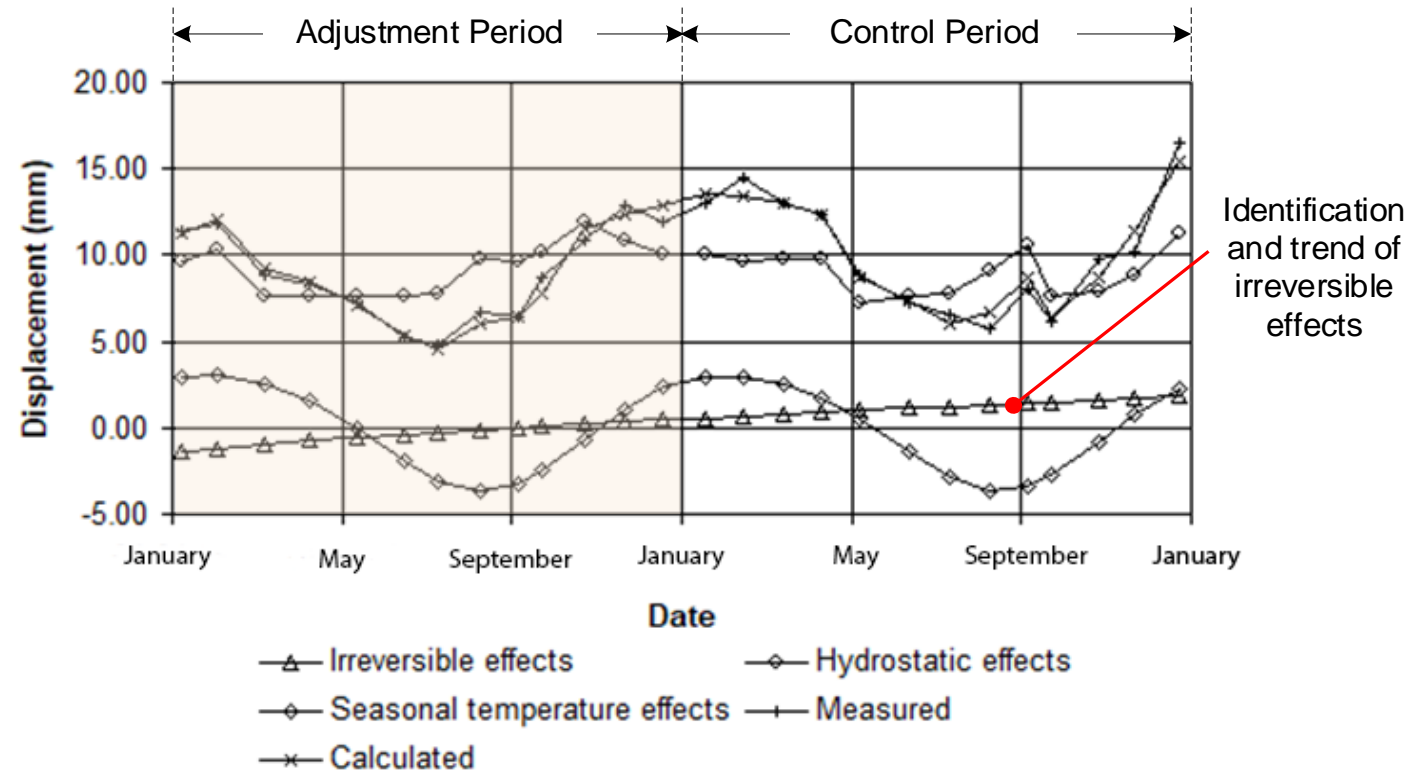
Naturalmente, la complessità del modello aumenta quando lo stato **tensio-deformativo della fondazione** è uno degli obiettivi dell'analisi. L'esecuzione di **analisi parametriche** in tali circostanze può essere di particolare supporto in relazione alla accuratezza dei dati disponibili.



Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali

Il metodo FEM viene anche impiegato nella messa a punto di modelli previsionali basati sull'analisi dei dati per la sorveglianza e il monitoraggio:

- ✓ **Metodi deterministici** come il metodo degli elementi finiti
- ✓ **Metodi statistici**, basati su concetti di *curve fitting* per separare le deformazioni globali misurate in parti relative a diversi effetti (idrostatica, temperatura stagionale, effetti irreversibili, ecc.)
- ✓ **Metodi ibridi** che combinano i due metodi precedenti

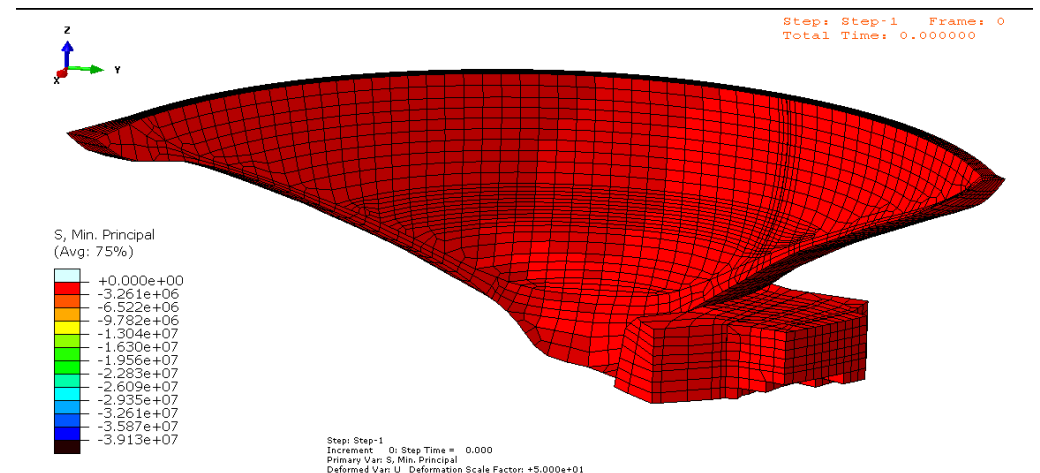
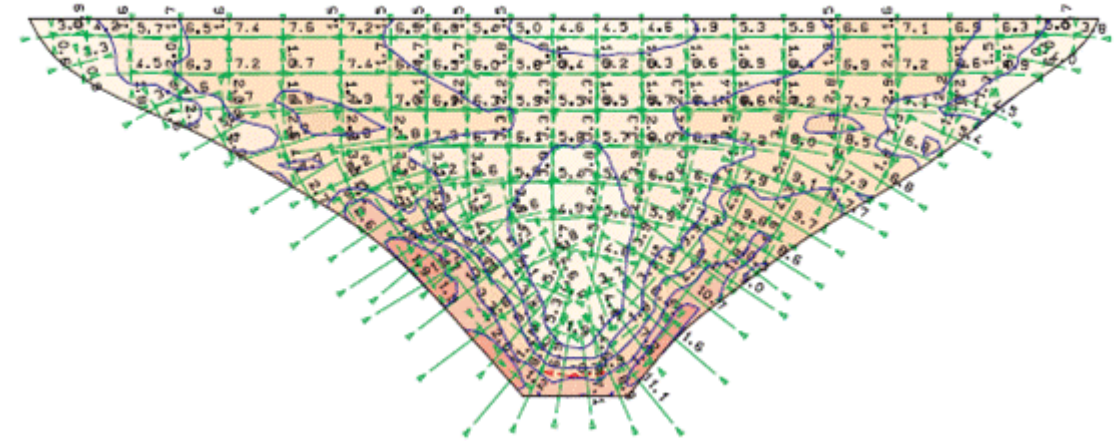


Le misure fornite dai sistemi di monitoraggio consentono di «calibrare» i parametri del modello a elementi finiti

Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali

La **rappresentazione dei risultati** delle analisi **FEM** riveste un'importanza fondamentale.

- ✓ Gli **spostamenti** sono generalmente rappresentati come grafici vettoriali.
- ✓ I principali vettori di **sollecitazione** che si sovrappongono ai contorni sono utili per la valutazione dei risultati.
- ✓ Le **fessurazioni** e la loro propagazione possono essere visualizzate come linee e/o superfici.
- ✓ Le **rappresentazioni "video"** sono anche un modo utile per comprendere meglio i fenomeni in atto.



Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali

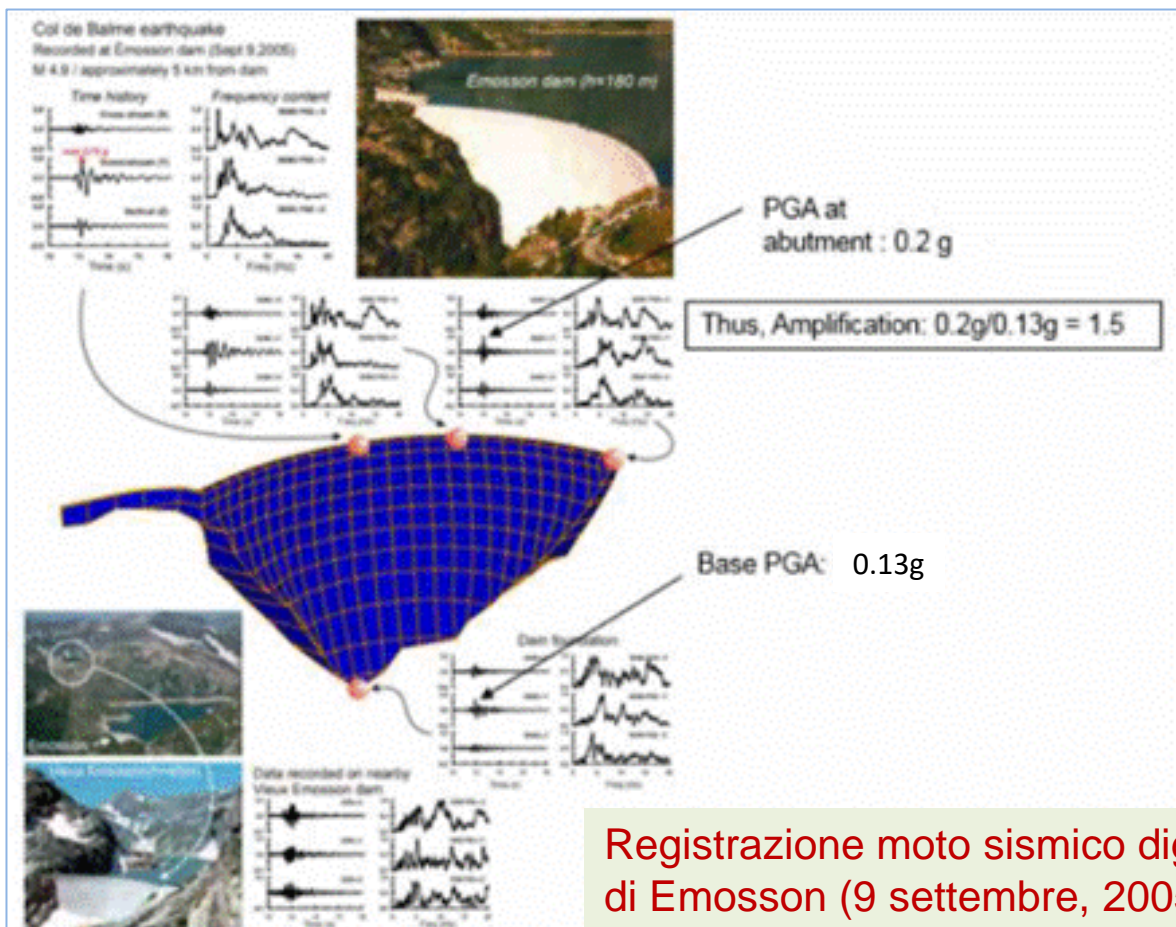
Dati registrati relativi a dighe a volta soggette a terremoti con **PGA > 0.3 g**:

- ✓ *Gibraltar Dam, USA (M 6.3 -1925),*
- ✓ *Pacoima Dam, USA (M 6.6 – 1971 & M 6.8 1994)*
- ✓ *Ambiesta Dam, Italy (M 6.5 -1976 & after shocks)*
- ✓ *Rapel Dam, Chile (M 7.8 - 1985, M 8.8 2010)*
- ✓ *Shapai Dam, China (M 8.0 - 2008) – RCC*
- ✓ *Techi Dam, Taiwan (Chi Chi Earthquake 1999, PHGA 0.3-0.5 g)*

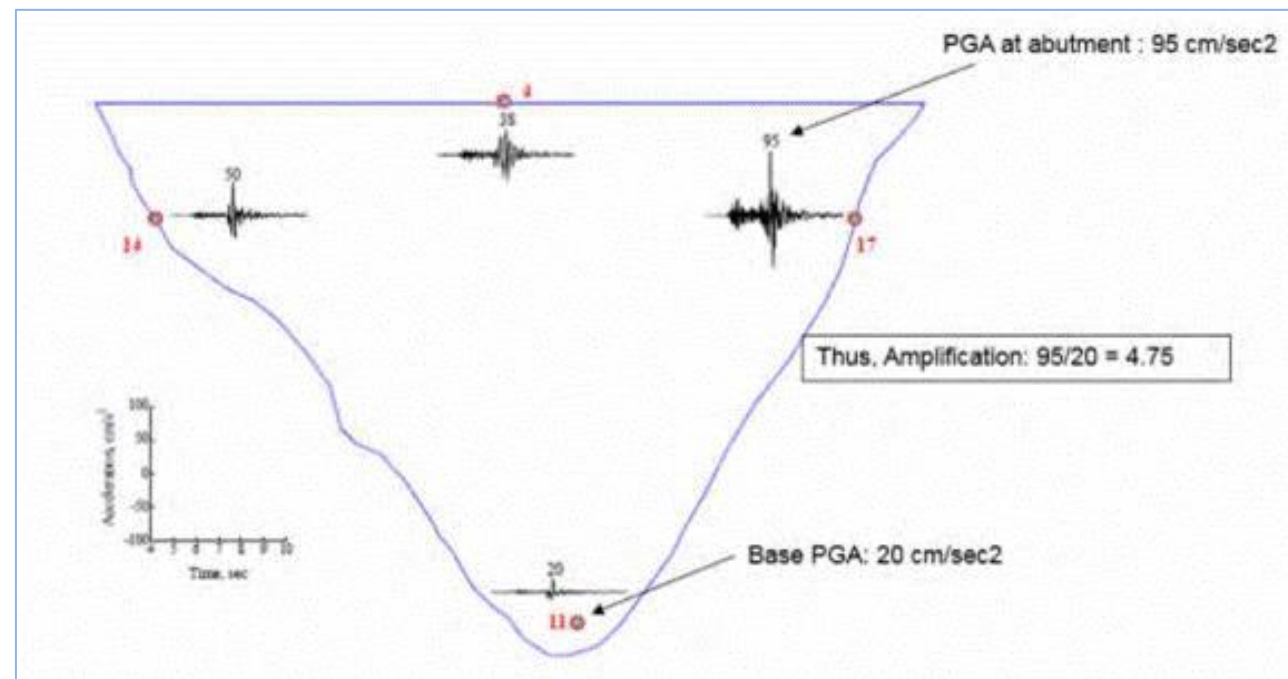


Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali

Esempi di registrazione del moto sismico sulle dighe di Emosson (Svizzera) e Pacoima (California, USA)

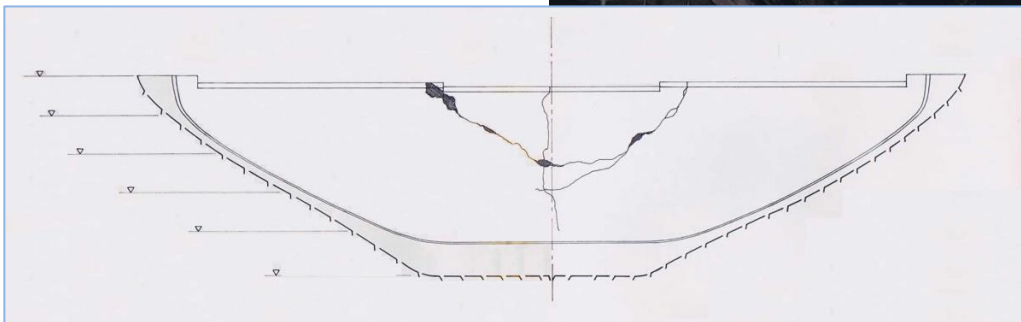
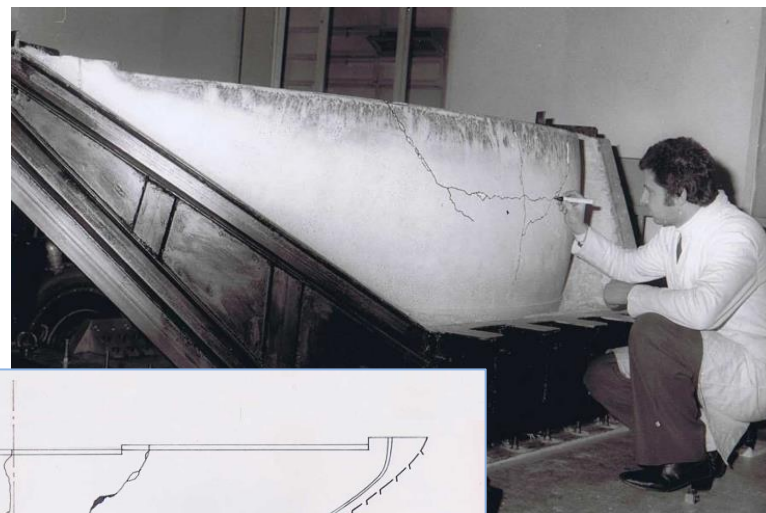


Registrazione moto sismico diga di Emosson (9 settembre, 2005) (Proulx and Darbre, 2008)



Registrazione moto sismico diga
di Pacoima (13 gennaio 2001)
(Chopra and Wong, 2008)

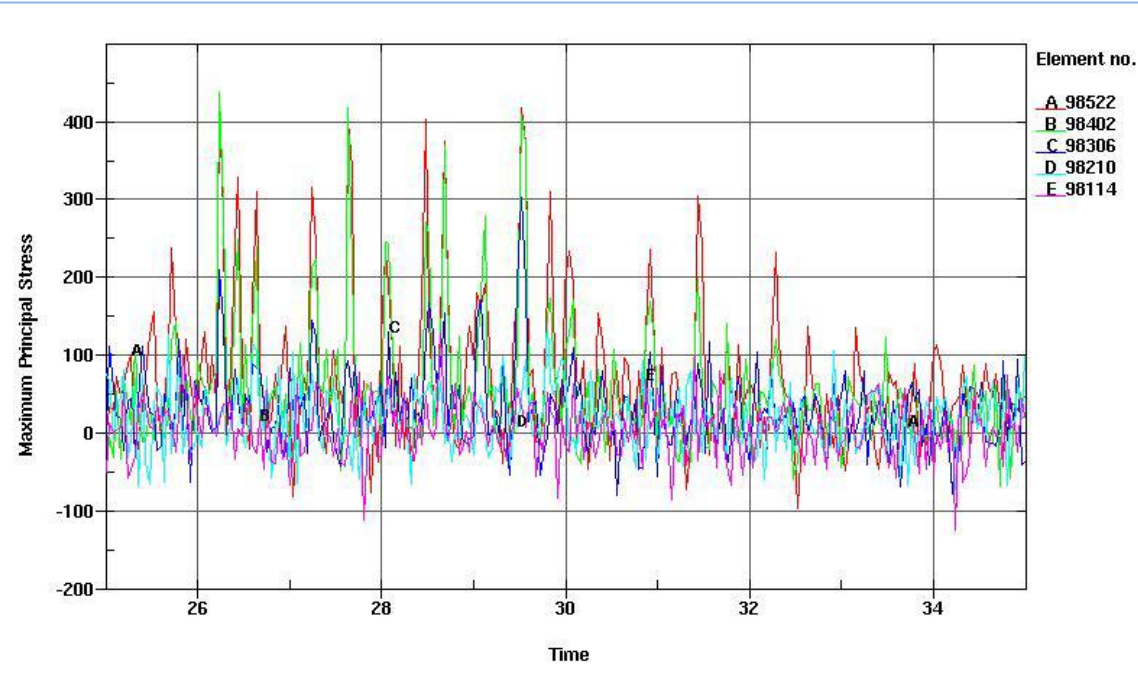
Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali



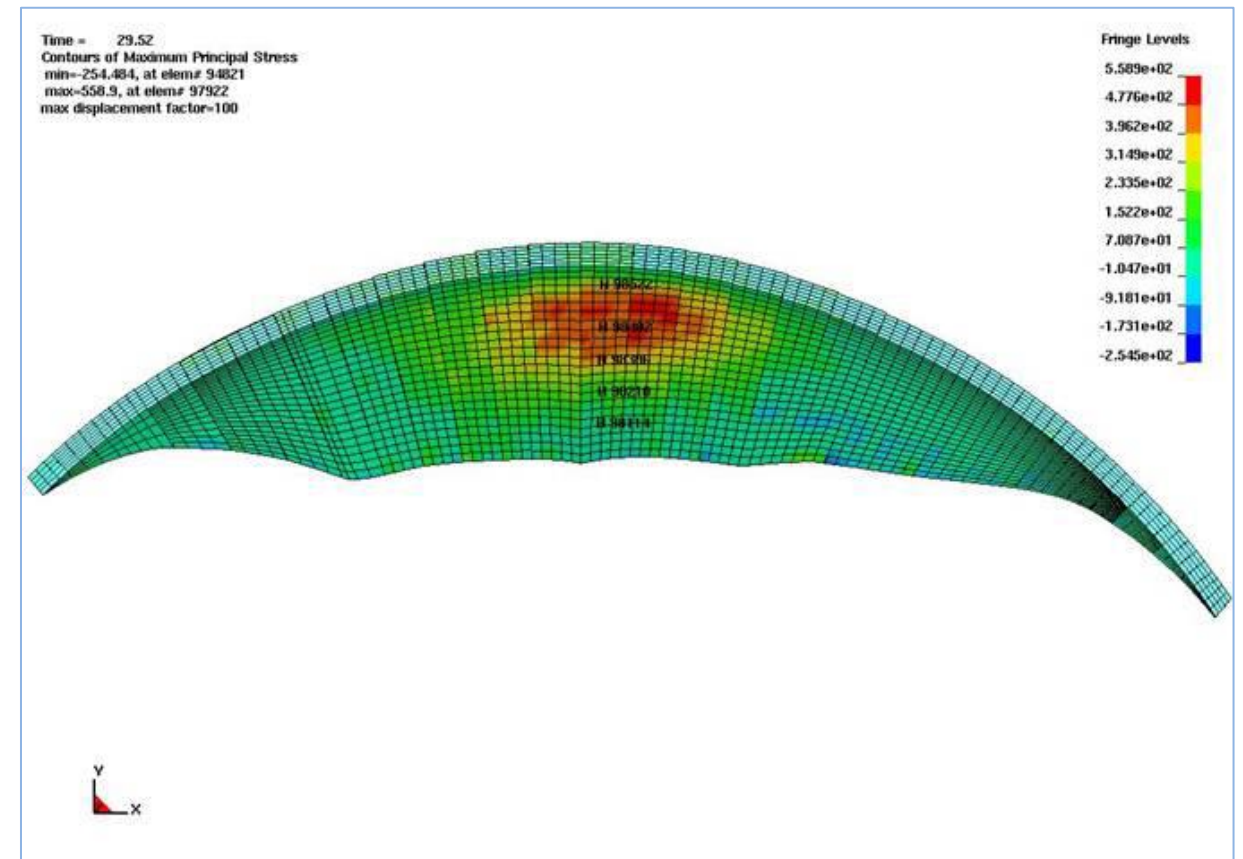
Non si ha notizia di dighe a volta che abbiano subito collasso o danni gravi a causa di terremoti. Quando si sono verificati **danni**, questi hanno riguardato essenzialmente le **strutture ancillari**.

Per avere indicazioni sui possibili **modi di rottura** bisogna fare riferimento ai risultati di **prove** condotte con **tavola vibrante su modelli in scala**.

Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali



Inviluppo degli **sforzi principali massimi (trazioni)** calcolati con un'analisi non lineare (giunti)



Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali

Generalmente **l'analisi sismica**, indipendentemente dal tipo di diga, viene condotta considerando la fondazione senza massa. Tuttavia valgono le seguenti considerazioni:

Fondazione senza massa:

- ✓ Viene considerata solo la deformabilità della roccia di fondazione.
- ✓ La velocità di propagazione delle onde sismiche nella fondazione è infinita, quindi il movimento applicato ai contorni del dominio di calcolo si propaga invariato e istantaneamente fino al contatto diga-fondazione.
- ✓ L'**approccio *massless*** è molto comune nella pratica, tuttavia i **risultati** sono in genere piuttosto **conservativi** (sforzi calcolati anche superiori a 2 volte quelli con i metodi che considerano la massa in fondazione).

Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali

Fondazione con massa:

- ✓ L'analisi con la massa in fondazione consente di includere in modo più aderente al comportamento reale l'interazione diga-fondazione.
- ✓ Le analisi sono più complesse sul piano computazionale (dissipazione al contorno del dominio di calcolo, simulando l'estensione semi infinita della fondazione reale).

Riferimenti bibliografici (attività di ricerca svolte con fondi pubblici del MiSE)

G. Faggiani, P. Masarati, F. Polidoro, G. Bruno, «Modellazione dell'interazione diga - fondazione nell'analisi sismica delle dighe. Applicazione a casi bi-dimensionali» - Ricerca di Sistema-RSE, n. 19012845, Milano, 2019.

G. Faggiani, P. Masarati, F. Polidoro, G. Bruno, «Analisi sismica dei sistemi tridimensionali diga-bacino-fondazione con modelli di interazione avanzata» - Ricerca di Sistema-RSE, n. 20010749, Milano, 2020.

G. Faggiani, P. Masarati, F. Polidoro, G. Bruno, «Analisi sismica dei sistemi tridimensionali diga-bacino-fondazione, con modelli di interazione avanzata: applicazioni e confronti numerico-sperimentali» Ricerca di Sistema-RSE, n. 21010320, Milano, 2021.

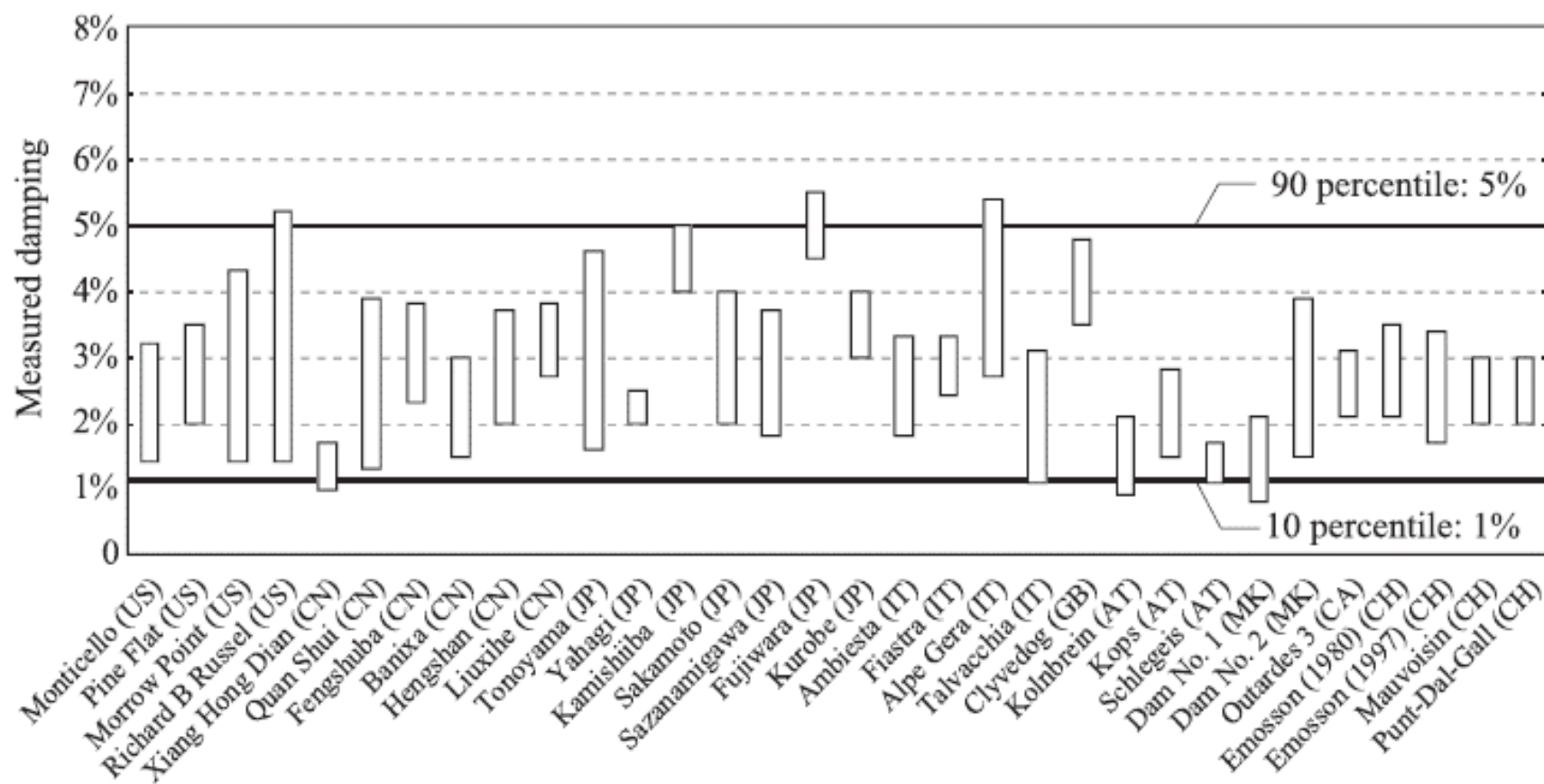
Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali

Le **frequenze e i modi di vibrare delle strutture** (caratterizzazione dinamica strutturale) possono essere misurati in situ tramite **prove di vibrazione forzata** effettuate con particolari apparecchiature (vibroline). In modo indiretto possono quindi essere valutate le **proprietà elastiche** del sistema diga-fondazione facendo corrispondere le misurazioni in situ alle frequenze naturali calcolate con un modello numerico (**processo di «calibrazione» e diagnostica**). Con minore accuratezza possono essere utilizzate anche le misure effettuate con vibrazioni ambientali.



Modelli FEM per le dighe a volta: aspetti generali

Un parametro molto importante nelle analisi sismiche è lo **smorzamento**. Nel diagramma a lato è riportato il parametro dello smorzamento misurato in campo su 32 dighe di calcestruzzo (Lokke e Chopra, 2019).



Nei casi di dighe soggette a **terremoti di forte intensità**, a causa dell'apertura dei giunti e delle crepe, lo **smorzamento** potrebbe essere **superiore al 5%**.

Benchmark Workshop

1st	Bergamo (Italy)	1991
2nd	Bergamo (Italy)	1992
3rd	Paris (France)	1994
4th	Madrid (Spain)	1996
5th	Denver (USA)	1999
6th	Salzburg (Austria)	2001
7th	Bucarest (Romania)	2003
8th	Wuhan (China)	2005
9th	St. Petersburg (Russia)	2007
10th	Paris (France)	2009
11th	Valencia (Spain)	2011
12th	Graz (Austria)	2013
13th	Lausanne (Switzerland)	2015
14th	Stockholm (Sweden)	2017
15th	Milan (Italy)	2019
16th	Ljubljana (Slovenia)	2022



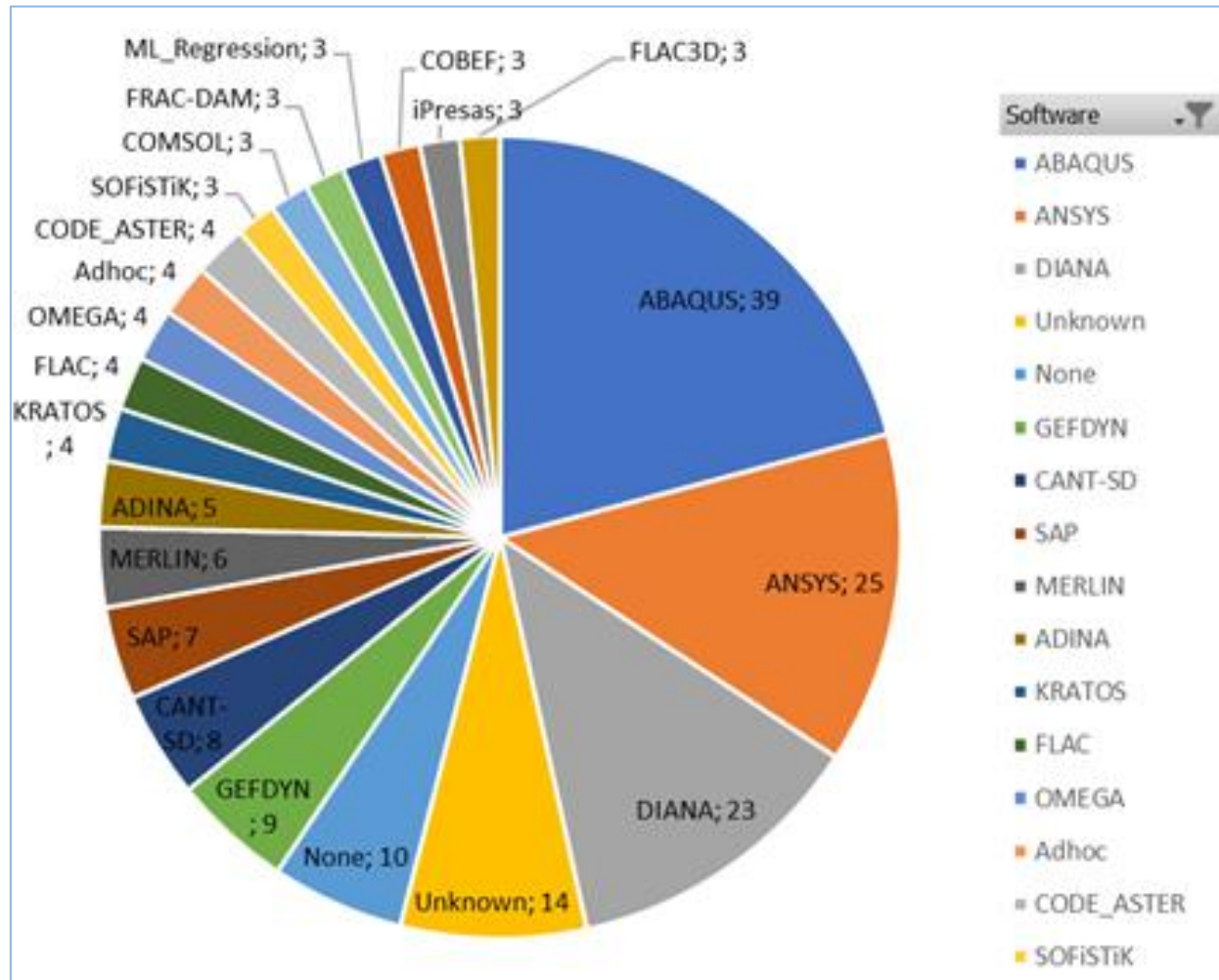
Benchmark Workshop

Organizzazione del 17th Benchmark Workshop

- ✓ Il **Bulgarian National Committee** ospiterà il prossimo BW a Sofia nell'autunno 2024 (*data da definire nel prossimo meeting ICOLD di Gothenburg, Svezia*)

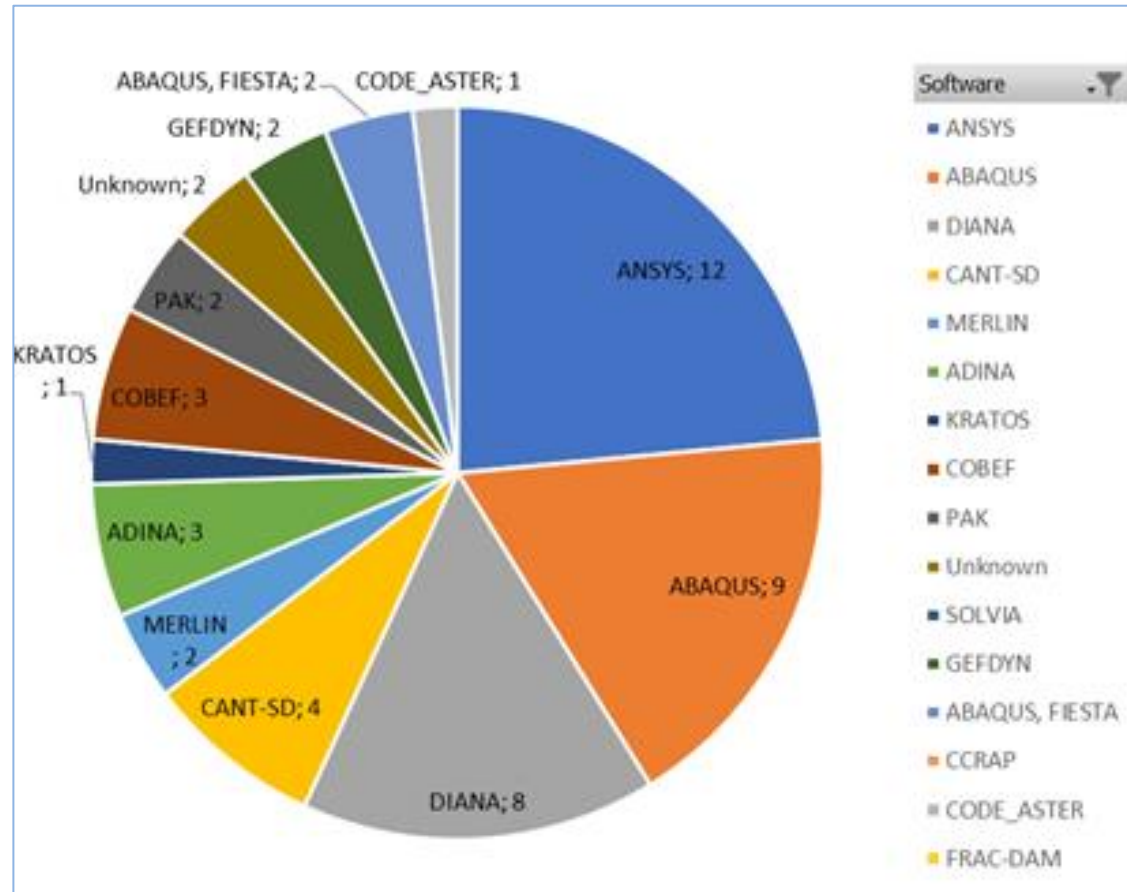


Benchmark Workshop



Codici di calcolo FEM utilizzati nei Benchmark Workshop

Benchmark Workshop



Software	NLFEM				Total NLFEM
	Arch	Arch-Gravity	Buttress	RCC	
ANSYS	12		2		14
ABAQUS	9		2	3	14
DIANA	8		2	3	13
CANT-SD	4			1	5
MERLIN	2		2		4
ADINA	3				3
KRATOS	1	1		1	3
COBEF	3				3
PAK	2				2
Unknown	2				2
SOLVIA			2		2
GEFDYN	2				2
ABAQUS, FIESTA	2				2
CCRAP			2		2
CODE_ASTER	1			1	2
FRAC-DAM			2		2
Total	51	1	14	9	75

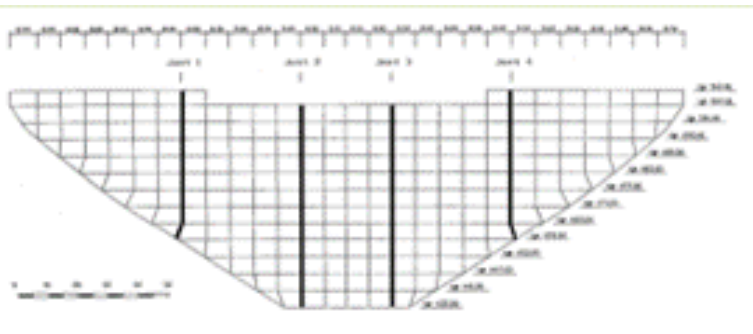
Codici di calcolo FEM utilizzati nei Benchmark Workshop per la soluzione di problem NON-LINEARI

Benchmark Workshop: analisi statica e sismica

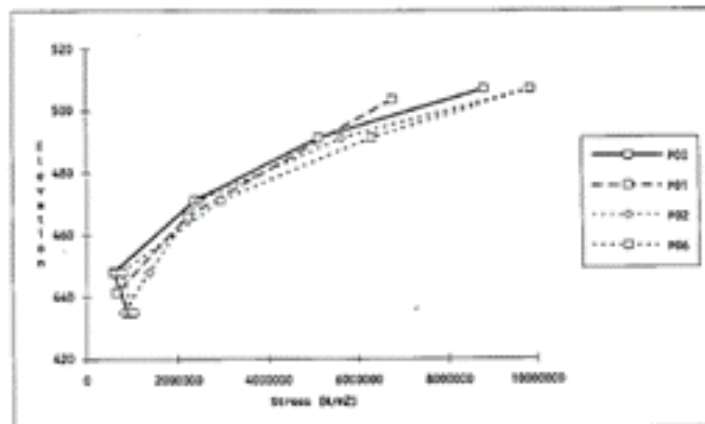
1st BW -Bergamo (Italy), 1991 - The linear-elastic computation of a double curvature arch dam (Talvacchia dam) with its foundation under self-weight, hydrostatic load, thermal load

2nd BW - Bergamo (Italy), 1992 - Seismic analysis of the Talvacchia dam

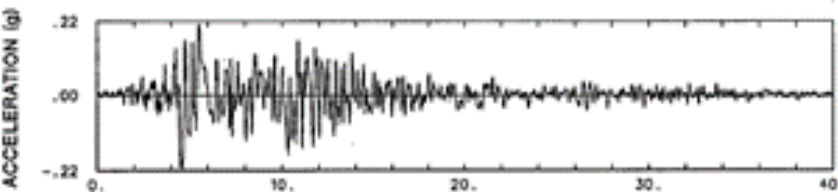
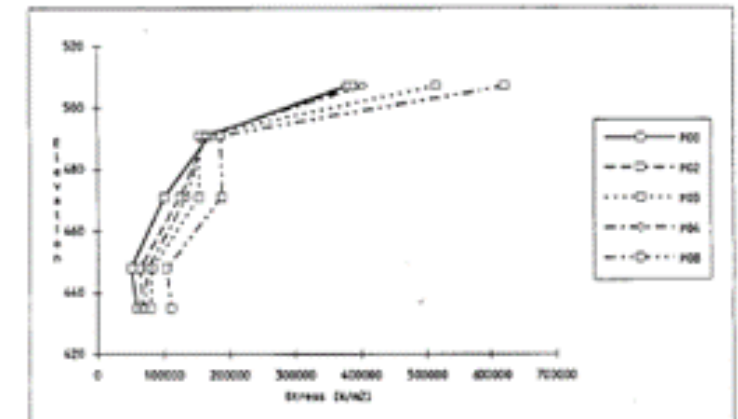
3rd BW - Paris, Gennevilliers (France), 1994 - Non-linear analysis of joint behaviour under thermal and hydrostatic loads for an arch dam (Talvacchia dam)



FLEXIBLE FOUNDATION AND INCOMPRESSIBLE FLUID
MAX ABS PRINCIPAL STRESSES P1 AND THEIR TIME OF OCCURRENCE
CENTRAL CANTILEVER



RIGID FOUNDATION AND COMPRESSIBLE FLUID
MAX ABS PRINCIPAL STRESSES P1 AND THEIR TIME OF OCCURRENCE
CENTRAL CANTILEVER

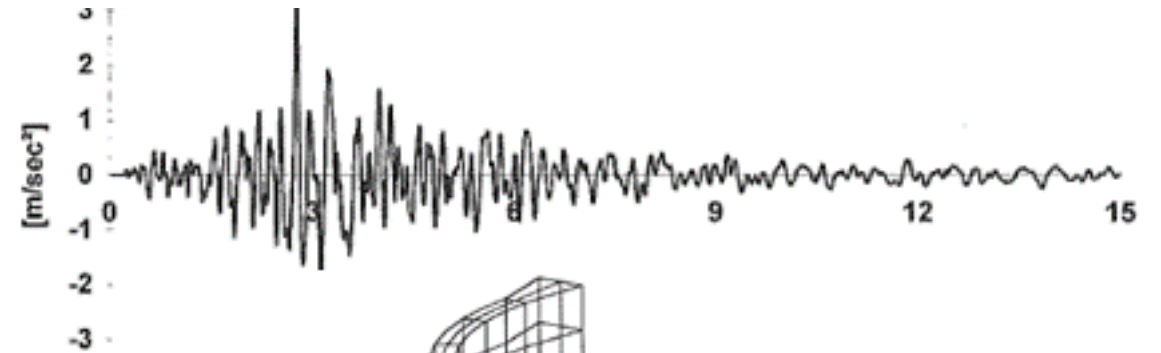
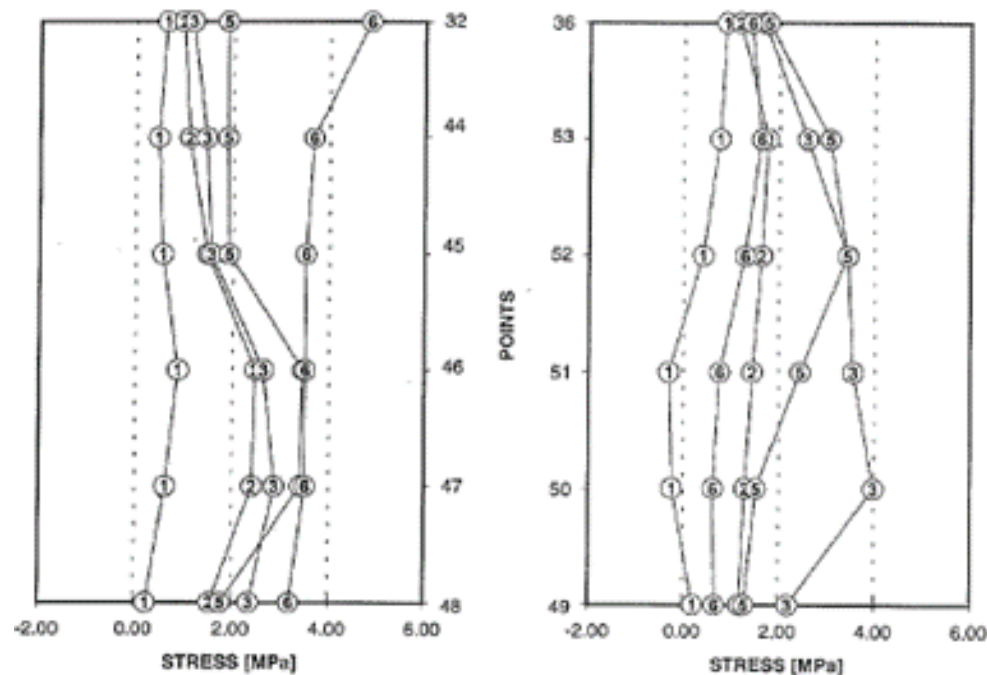


Benchmark Workshop: analisi sismica

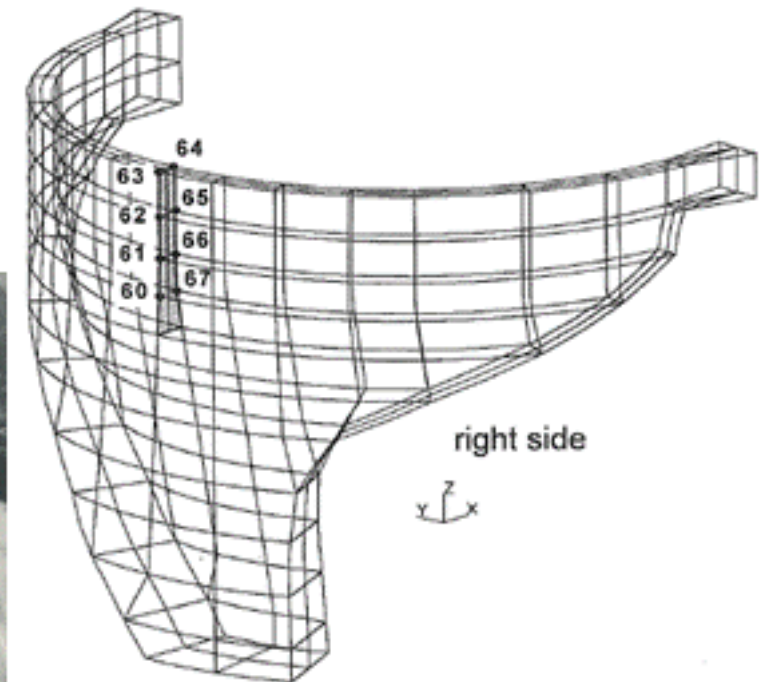
4th BW - Madrid (Spain), 1996 - Earthquake response of an arch dam including the non-linear effects of contraction joint opening (Corfino dam, Italy)

Case 4 : model with joint and water
Maximum principal stresses and their time of occurrence
Component P1

Central cantilever



left side



right side

Benchmark Workshop: analisi sismica

12th BW - Graz (Austria), 2013 - Fluid structure interaction
arch dam - reservoir at seismic loading (idealized dam)

13th BW - Lausanne (Switzerland), 2015 - Seismic Safety
Assessment of the Luzzzone Arch Dam

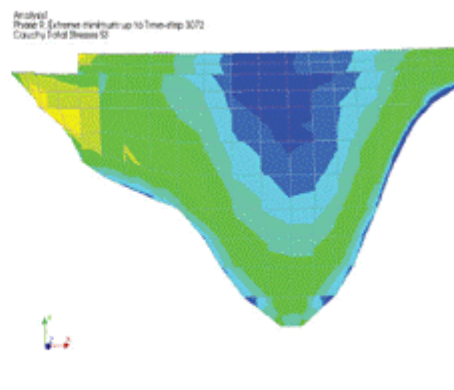
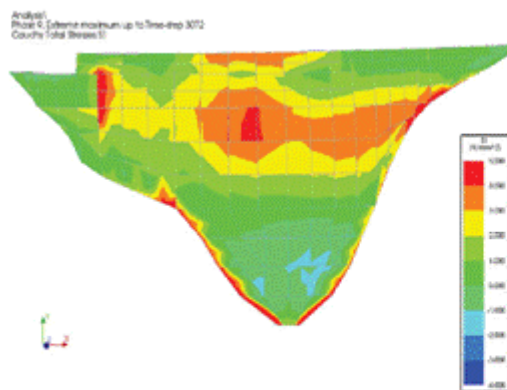
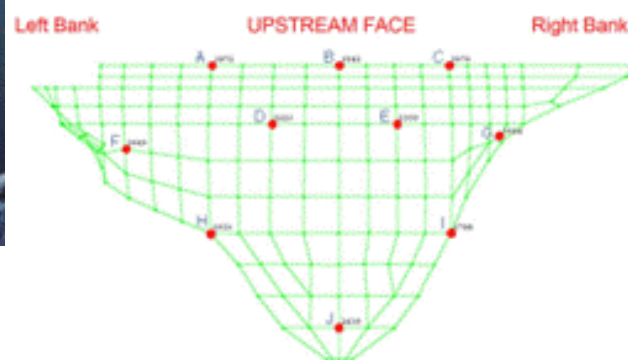
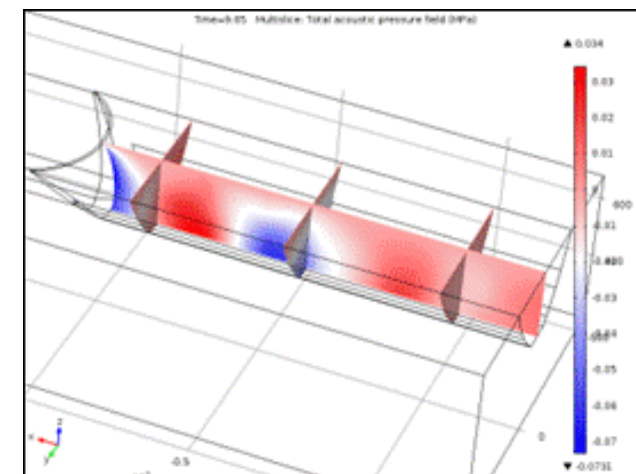
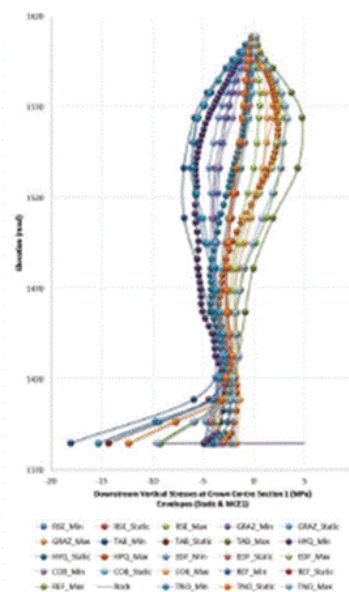
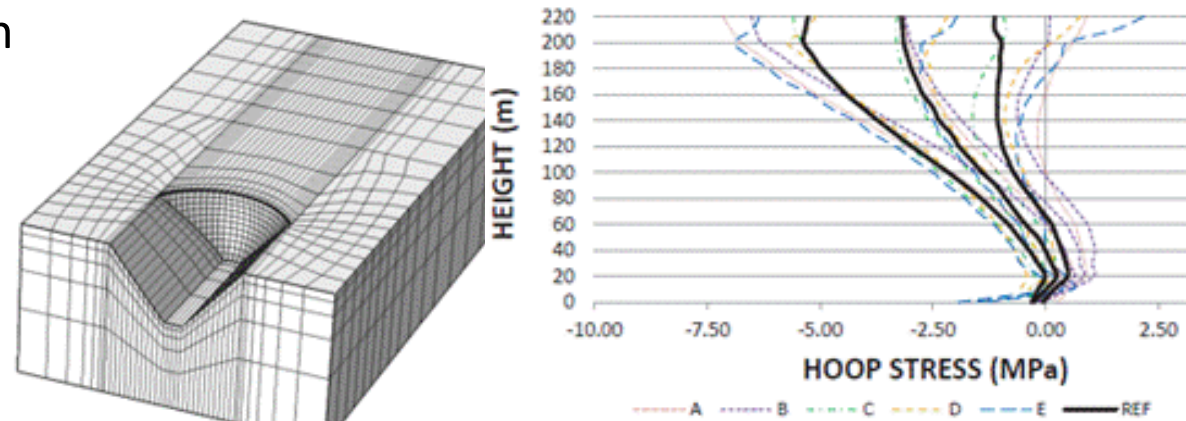


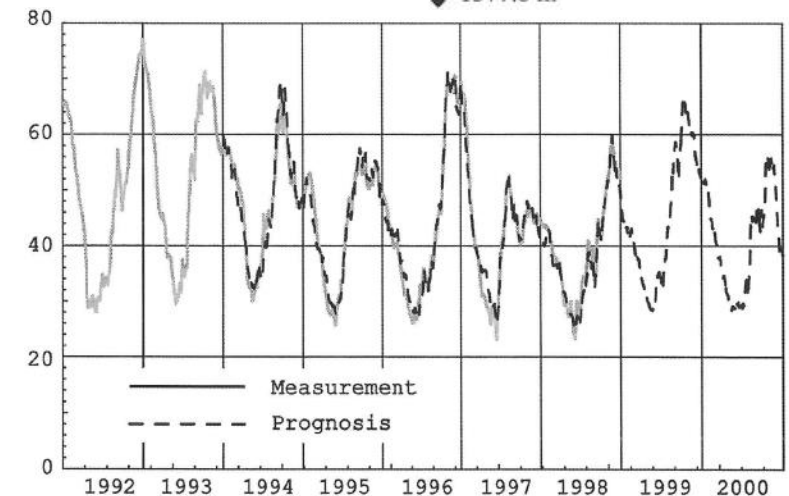
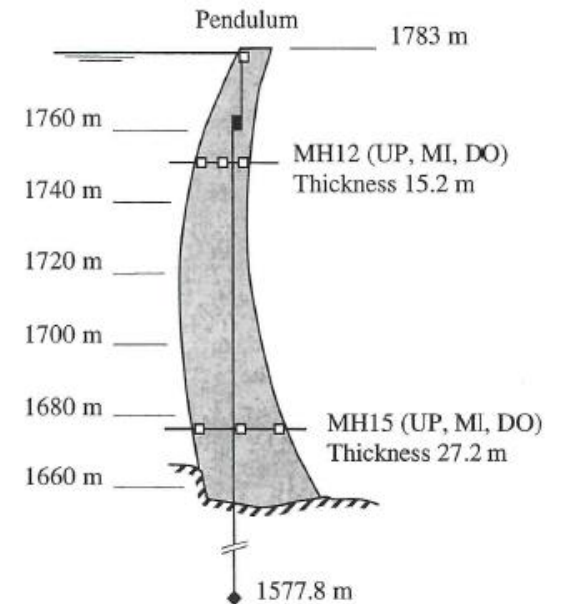
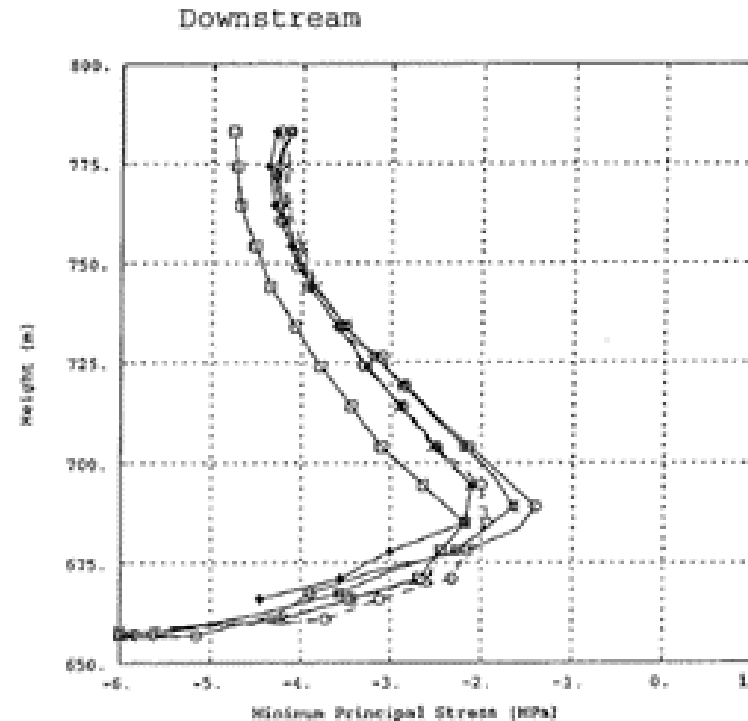
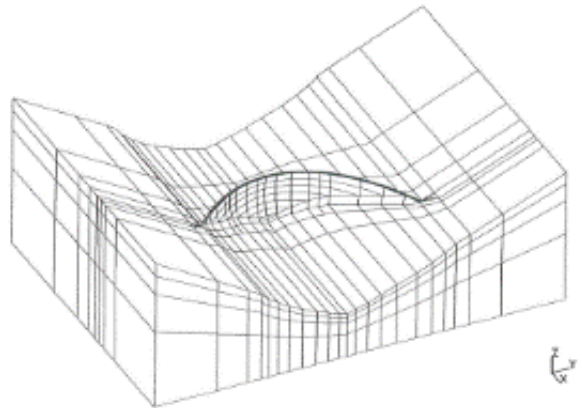
Figure 9 Maximum (Left) and minimum (Right) upstream principal stress (MPa) envelopes
MCE 1



Benchmark Workshop: interpretazione del comportamento

5th BW - Denver, Colorado (USA), 1999 - Uplift pressure and stress analysis of an arch dam and foundation (Schlegeis dam, Austria)

6th BW - Salzburg (Austria), 2001 - Interpretation of measurement results for the radial crest displacements of Schlegeis arch dam



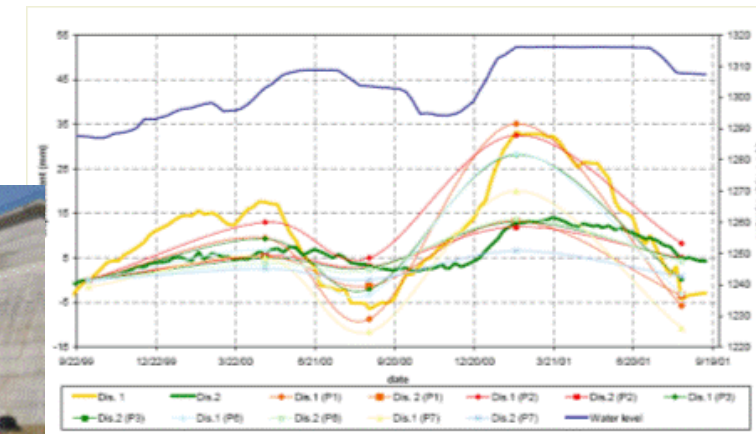
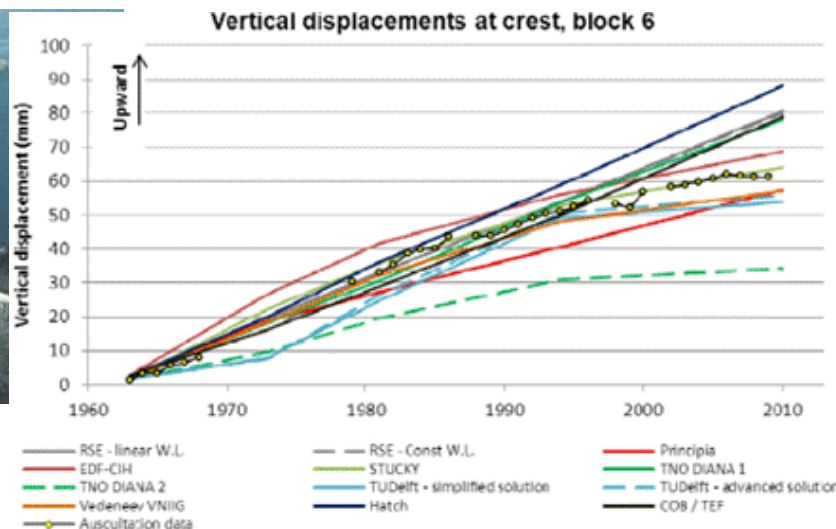
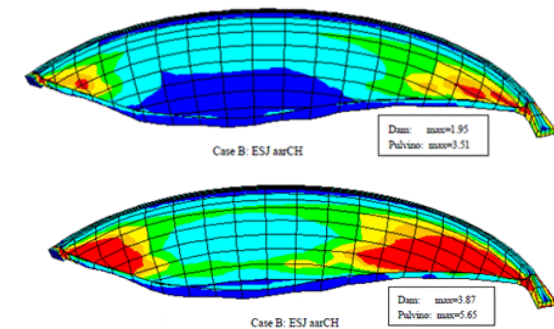
Benchmark Workshop: reazione alcali-aggregato

6th BW - Salzburg (Austria), 2001 - Evaluation of AAR (alkali-aggregate reaction) effects on the structural behaviour of an arch dam (Pianteleccio dam, Italy)

9th BW - St. Petersburg (Russia), 2007 - Analysis of the elastic behavior of an arch-gravity dam (La Aceña dam, Spain)

11th BW - Valencia (Spain), 2011 - Effect of concrete swelling (La Aceña dam, Spain)

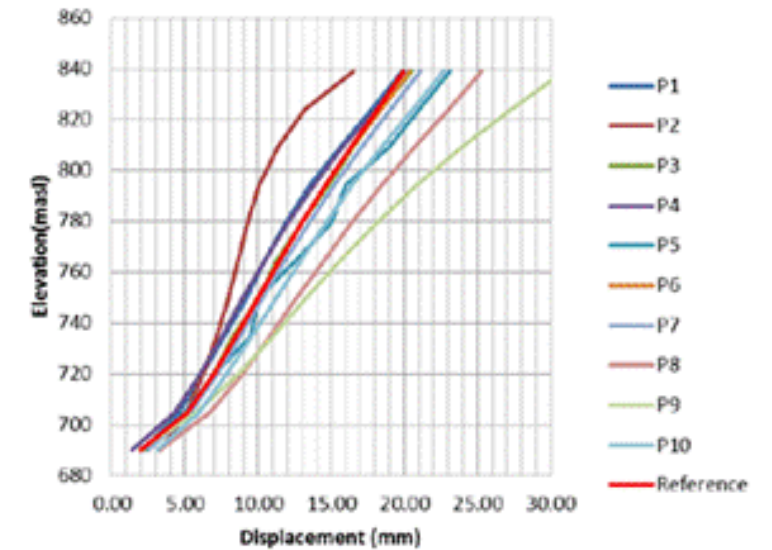
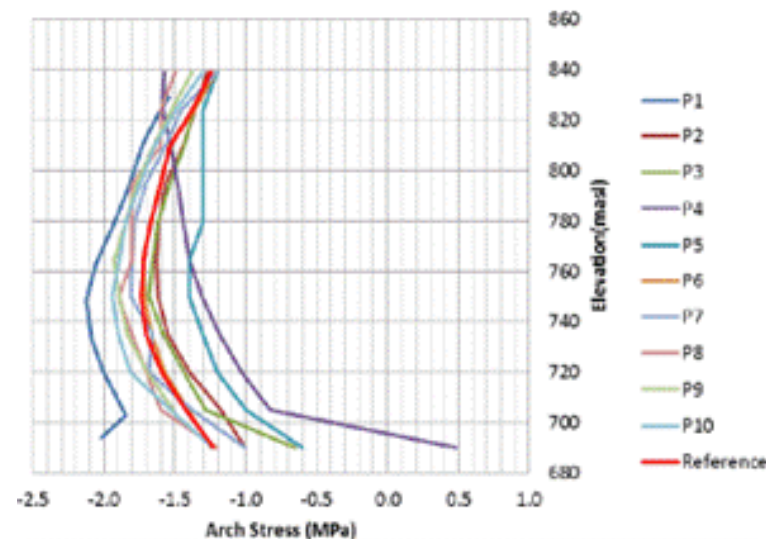
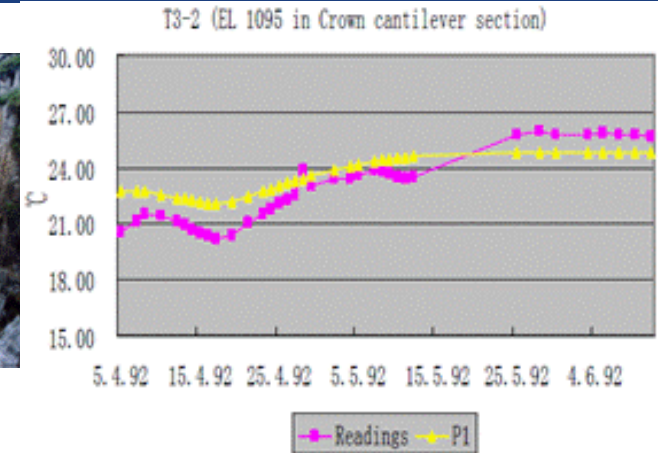
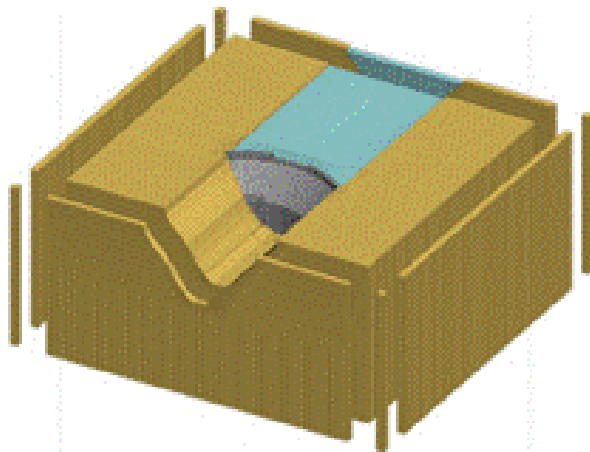
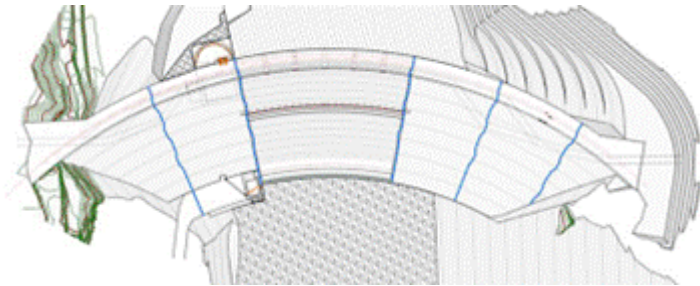
11th BW – Valencia (Spain), 2011 - Effect of concrete swelling on the equilibrium and displacements of an arch dam (Kariba dam)



Benchmark Workshop: analisi dighe RCC

8th BW – Wuhan (China), 2005 - Temperature field simulation and crack analysis of an RCC arch dam

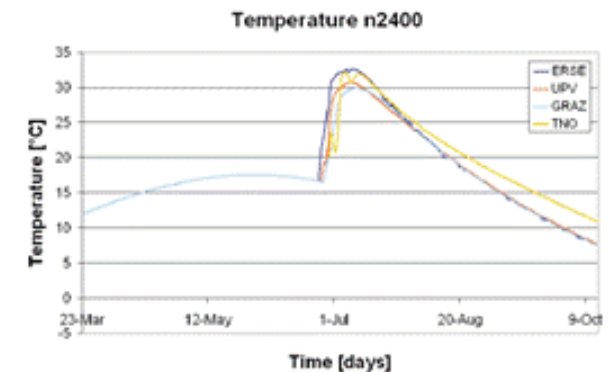
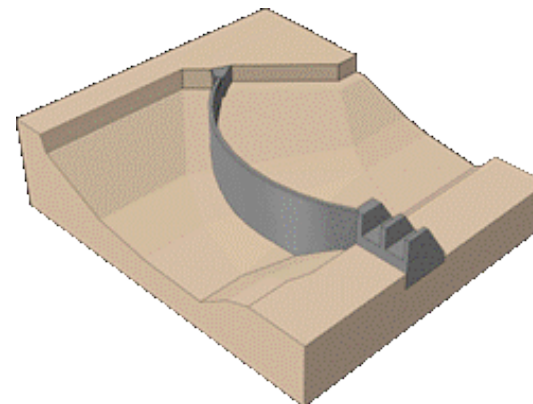
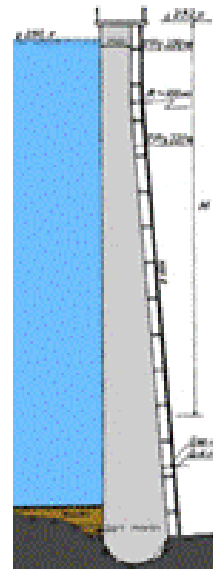
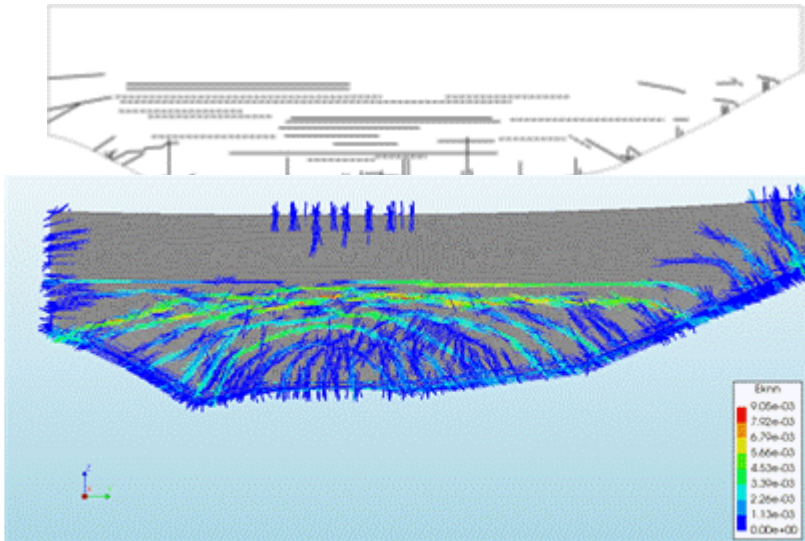
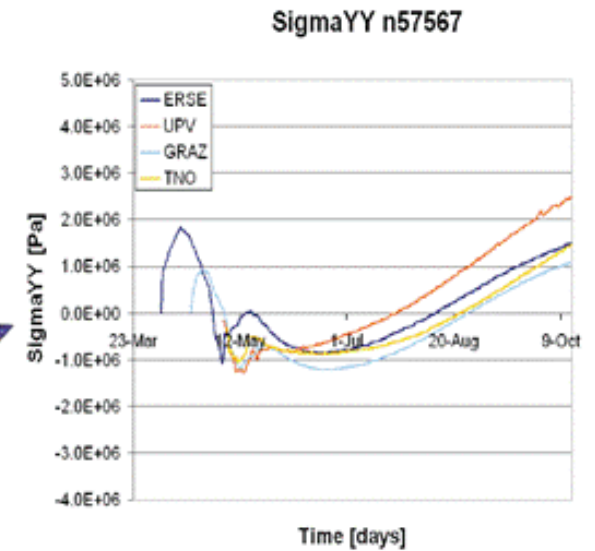
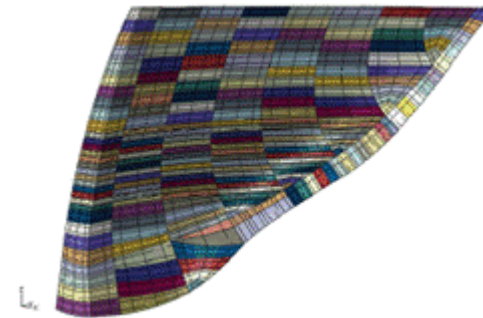
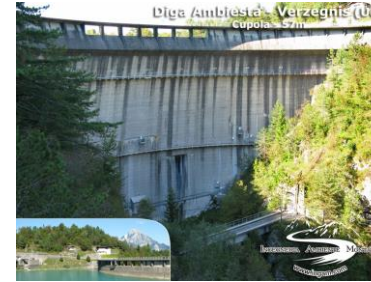
14th BW – Stockholm (Sweden), 2017 - Static and seismic analysis of an arch-gravity dam (Janneh RCC dam, Lebanon)



Benchmark Workshop: analisi termiche

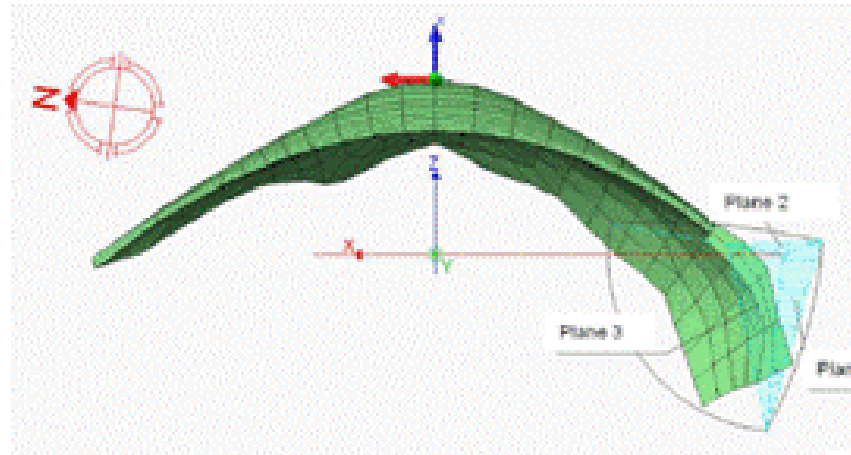
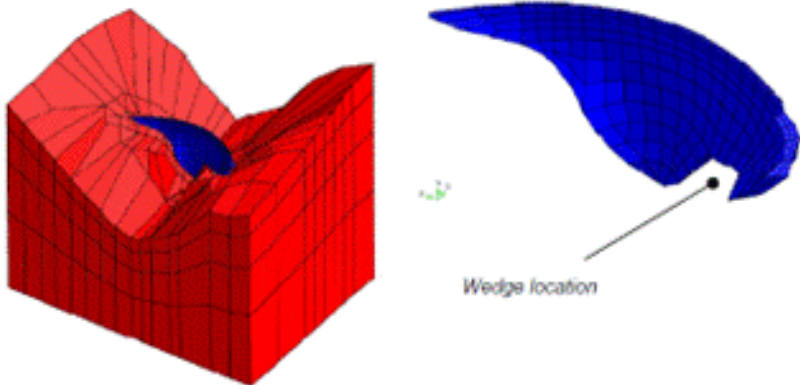
10th BW - Paris (France), 2009 - Initial strain and stress development in a thin arch dam considering realistic construction sequence (Ambiesta dam, Italy)

14th BW - Stockholm (Sweden), 2017 - Cracking of a concrete arch dam due to seasonal temperature variations (Swedish dam)

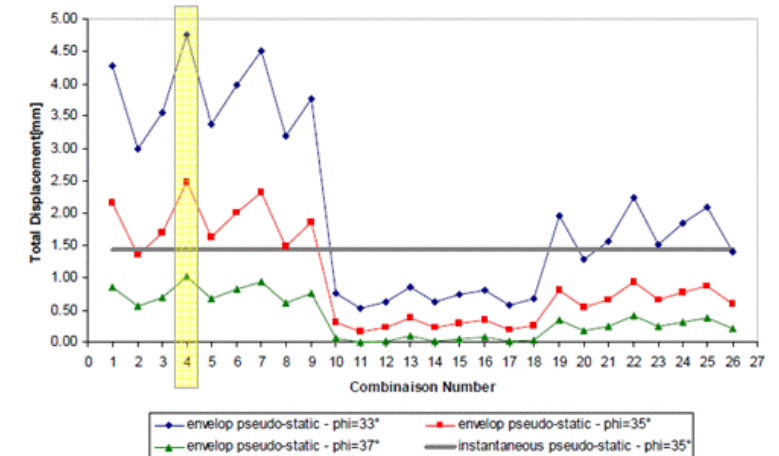
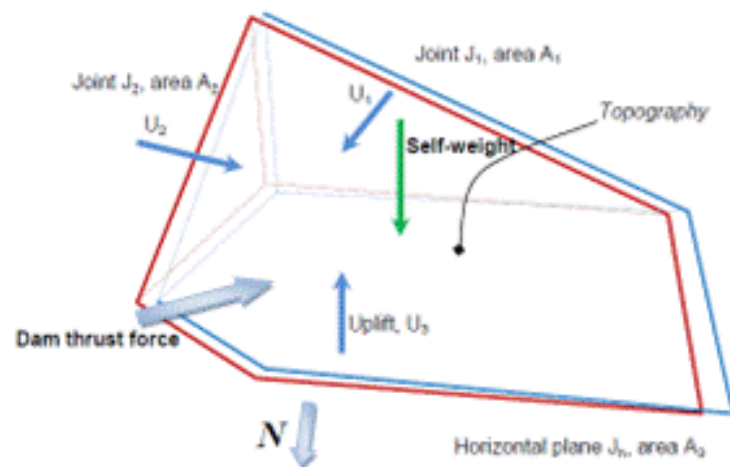
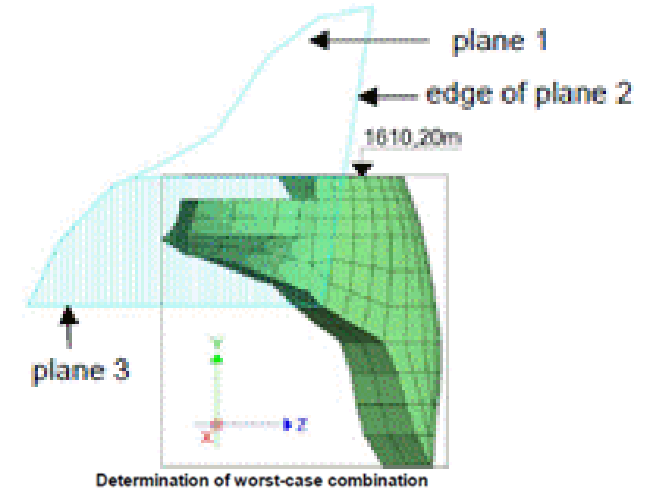


Benchmark Workshop: problemi di fondazione

10th BW - Paris (France), 2009 - Stability of a dam abutment including seismic loading
(Luzzone dam, Switzerland)



(a)



Bibliografia e Bollettini ICOLD

BOGGS H. L., “**Guide for Preliminary Design of Arch Dams**”, Engineering Monograph No. 36, Reclamation, Denver, 1977

Bureau of Reclamation, “**Design of Arch Dams**”, Design Manual for Concrete Arch Dams, Denver, 1977.

USACE, “**Arch Dams Design**”, EM 1110-2-2201, US Army Corps of Engineers, 1994.

FERC, “**Arch Dams – Chapter 11**”, Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects, DC, 2018.

Comité Français des Barrages et Réservoirs, **Recommandations provisoires pour la justification du comportement des barrages-voûtes**, 2018

Bibliografia e Bollettini ICOLD

Bollettini ICOLD

Bollettino n. 30 (1978), **Finite Element Methods in Analysis and Design of Dams**, dedicato alla presentazione del metodo FEM applicato alle dighe

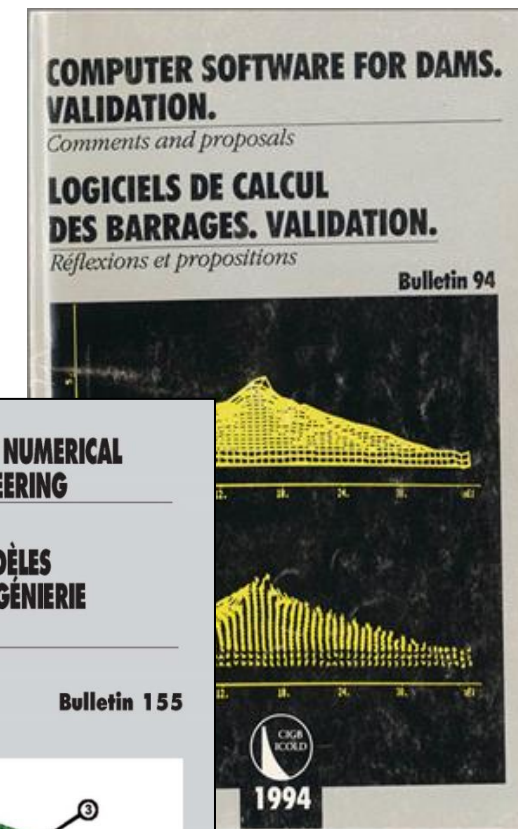
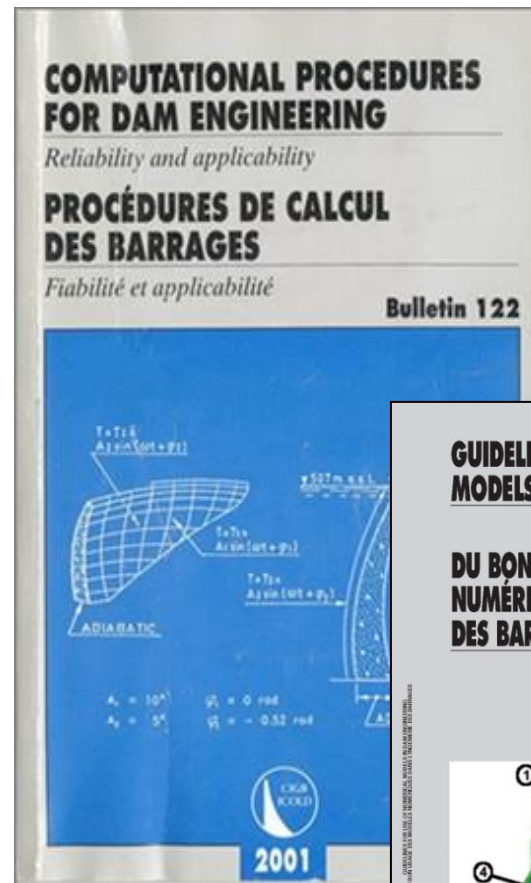
Bollettino n. 52 (1986), **Earthquake analysis procedures for dams** redatto da O.C. Zienkiewicz, RW Clough e H.B. Seed, presenta lo stato dell'arte nell'analisi sismica applicata alle dighe

Bibliografia e Bollettini ICOLD

Bulletin N. 94 (1994)
Computer software for dams. Validation

Bulletin N. 122 (2001)
Computational Procedures for Dam Engineering

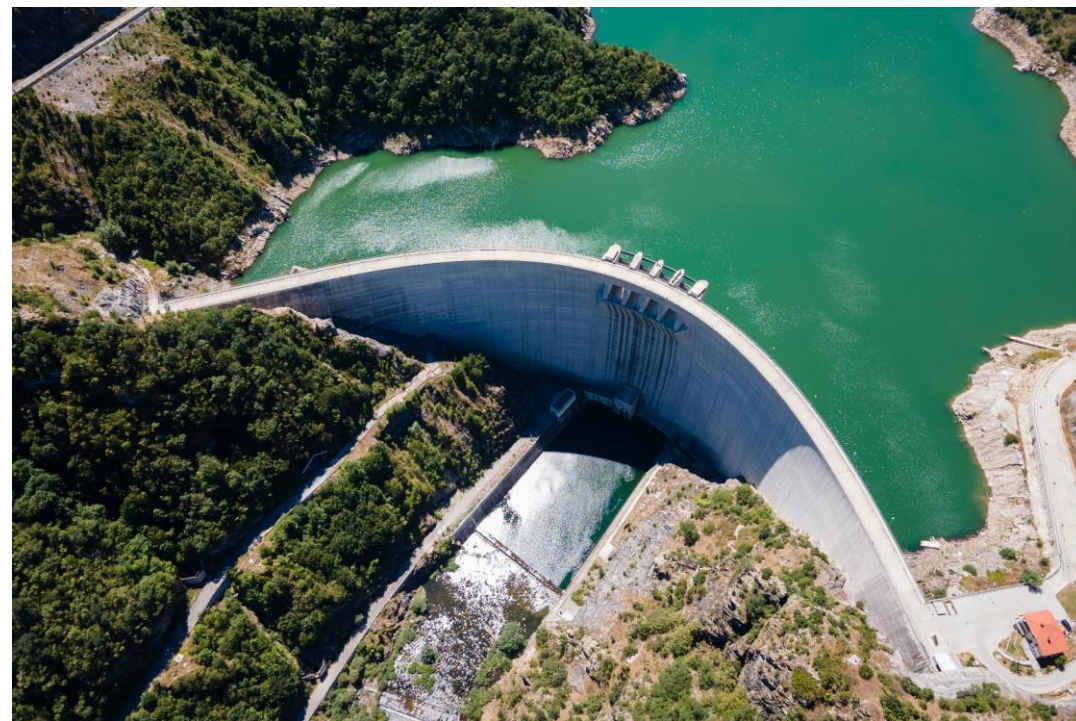
Bulletin N.155 (2013)
Guidelines for use of numerical models in dam engineering



Bibliografia e Bollettini ICOLD

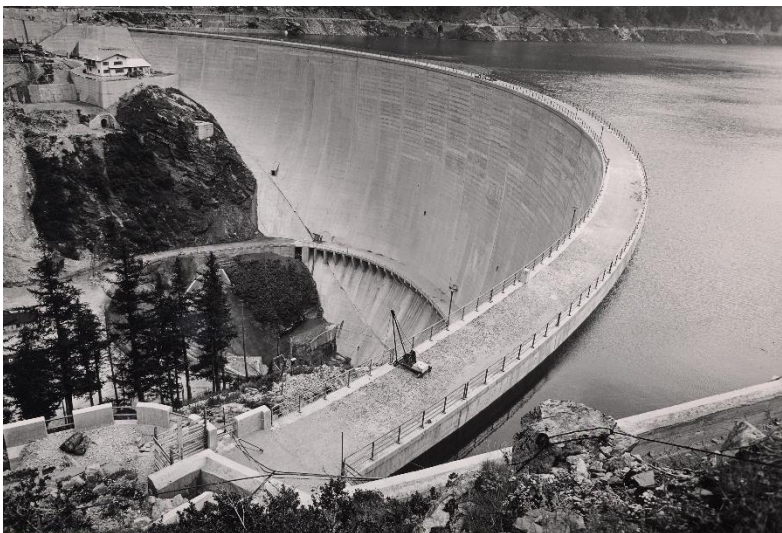
Bollettini in preparazione:

- ✓ Non Linear Modelling of Concrete Dams
- ✓ Capitalization of results of the Benchmark Workshops: concrete dams
- ✓ Capitalization of results of the Benchmark Workshops: embankment dams
- ✓ Joint Bulletin (ICOLD Committee D & Committee A) on “**Arch Dams Design Methodologies and Criteria**”

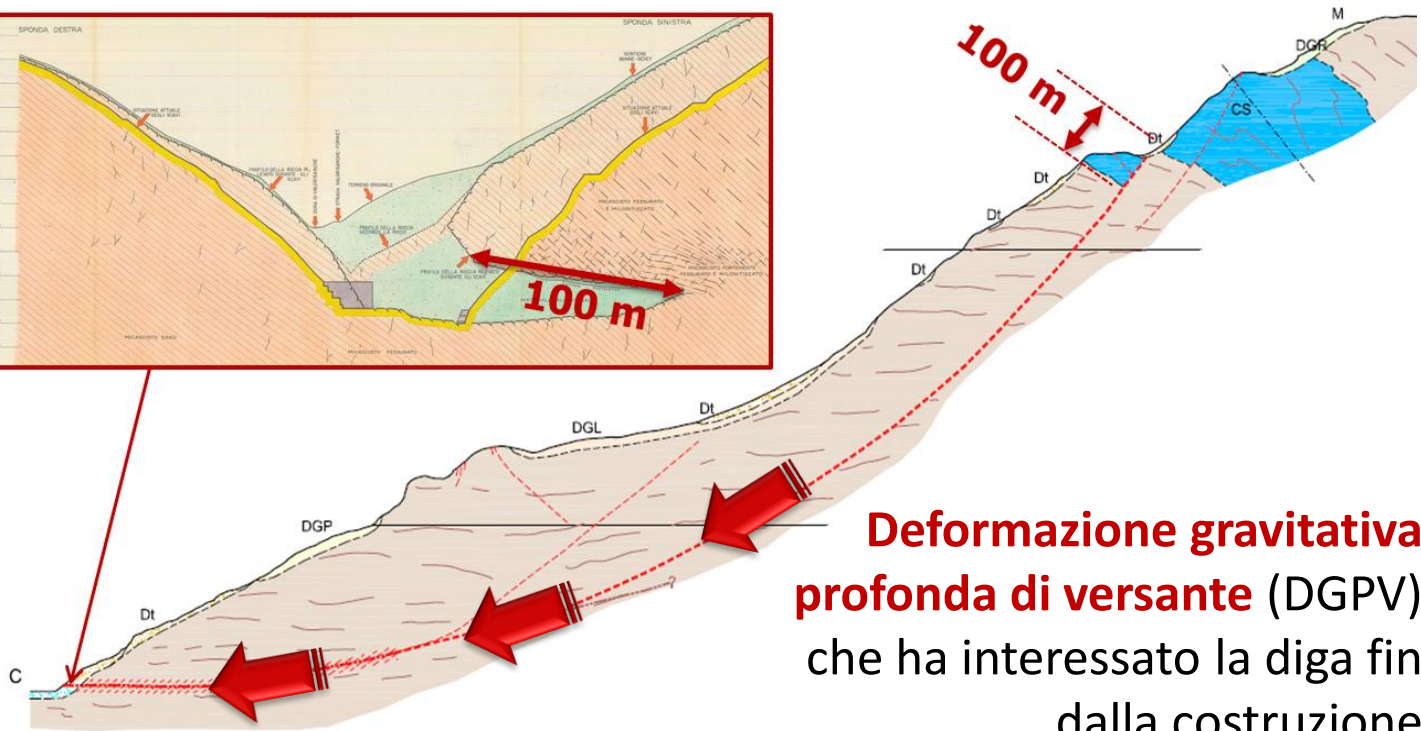
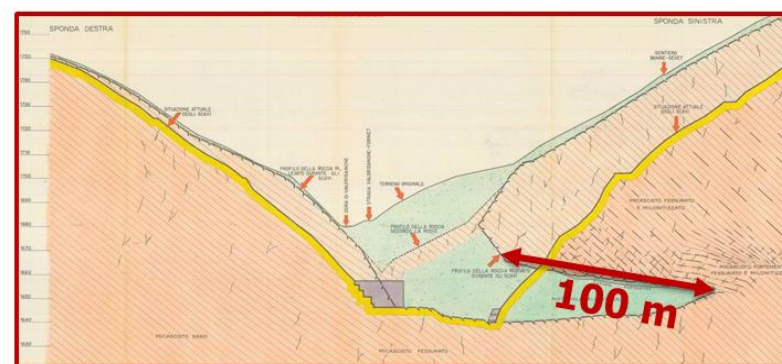


Progetto preliminare e ottimizzazione di forma della diga di *Tsankov Kamak* in Bulgaria (doppia curvatura alta 130 m) realizzati dal Prof. Michele Fanelli utilizzando RITTER++/OPTIMIZER/OPTARC.

Impiego di modellazione FEM per un caso reale



Studio del comportamento della **diga di Beauregard (CVA)** e supporto con modello FEM per l'individuazione di una soluzione progettuale di **messa in sicurezza**.

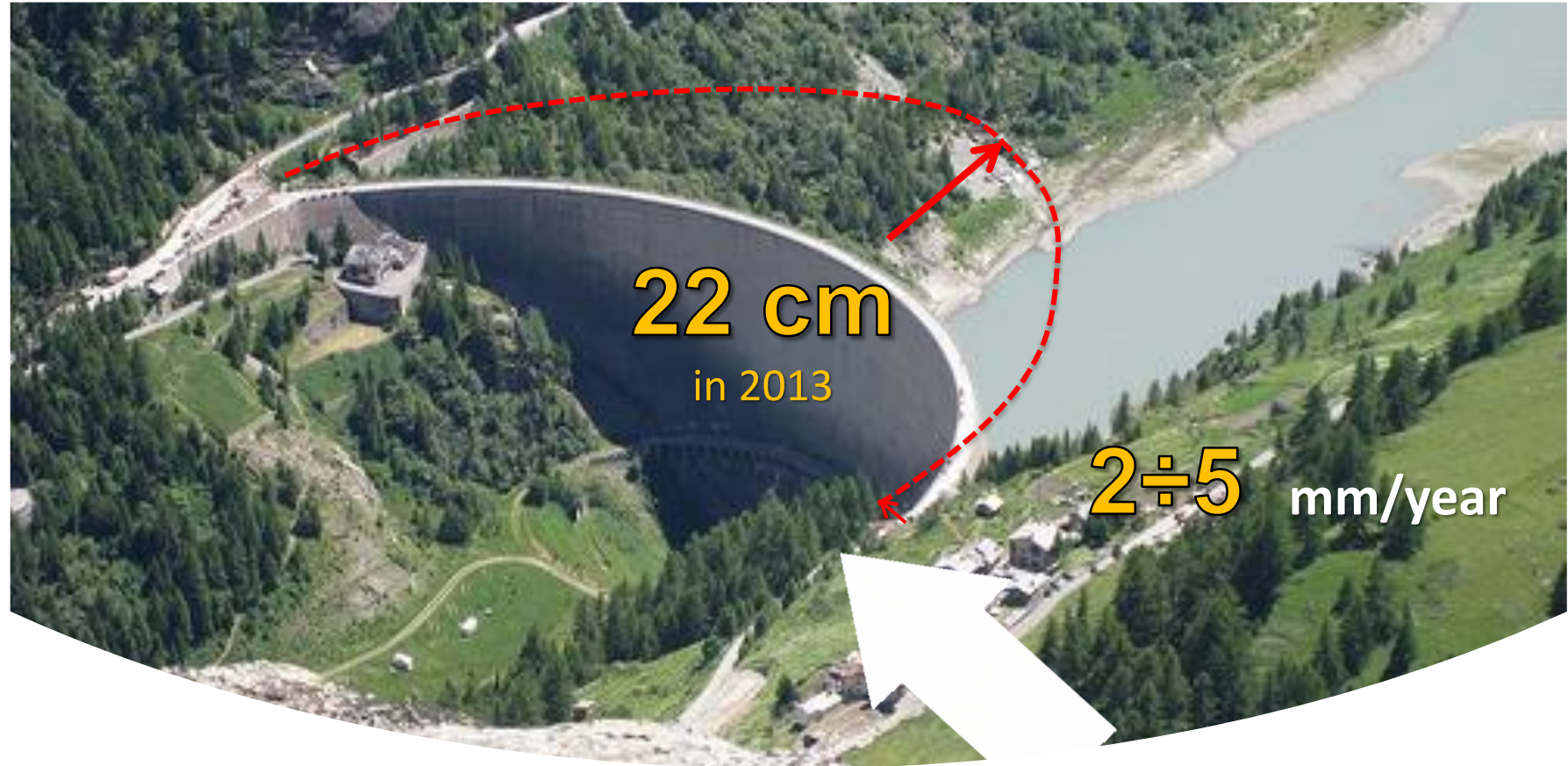


Deformazione gravitativa profonda di versante (DGPV) che ha interessato la diga fin dalla costruzione

Impiego di modellazione FEM per un caso reale

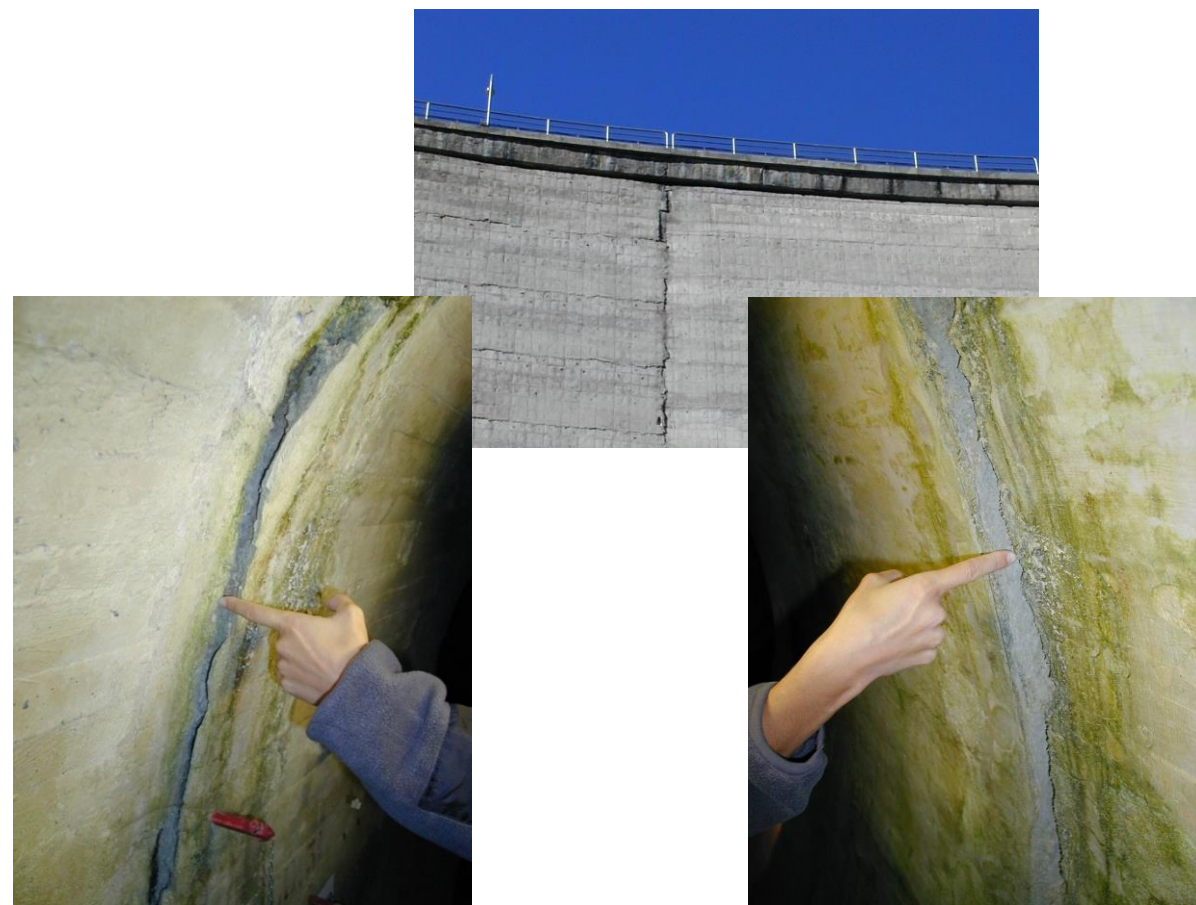
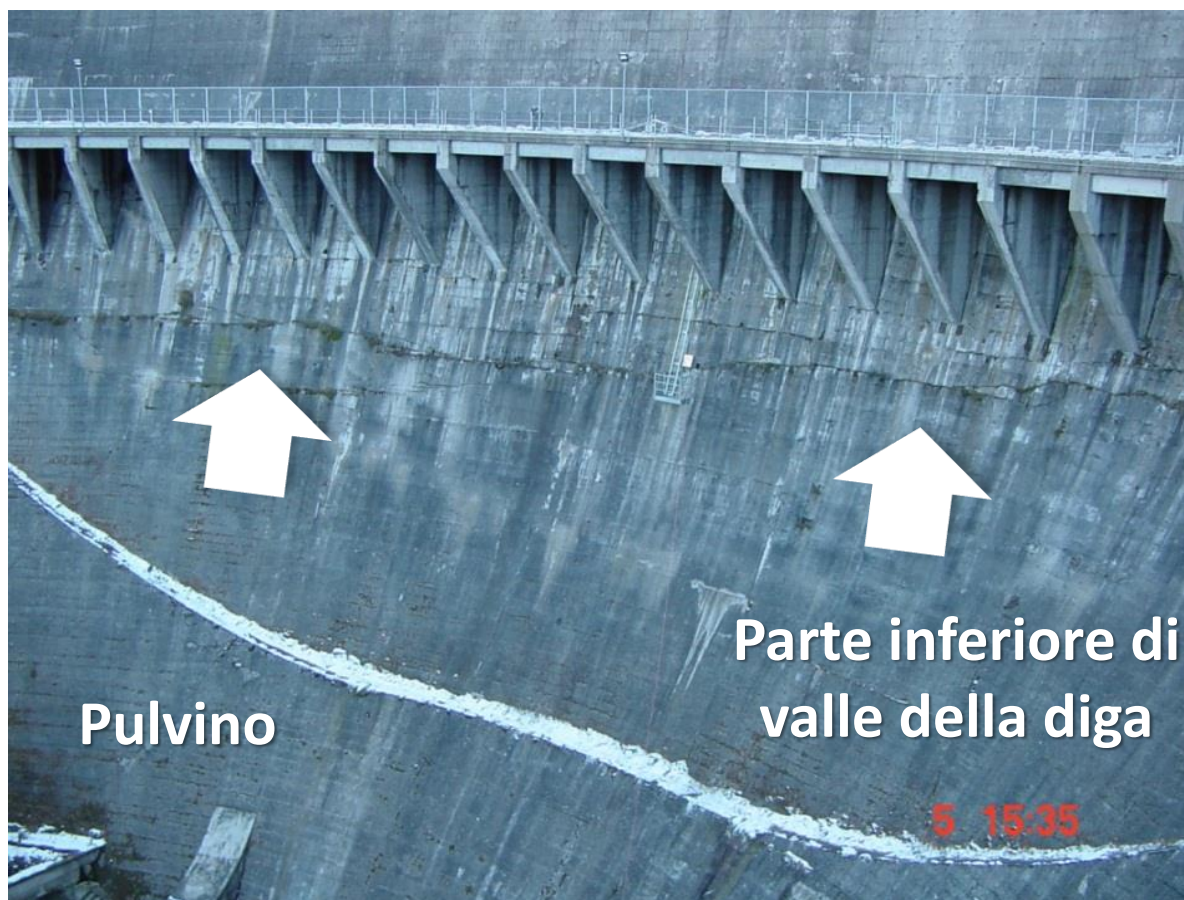
A partire dai primi invasi la diga aveva mostrato spostamenti del coronamento verso monte.

Per motivi di sicurezza, nel 1969 l'invaso fu ridotto da quota 1770 m s.l.m. a 1710 m s.l.m.



Impiego di modellazione FEM per un caso reale

Evidenti fessure si erano manifestate nella parte bassa della volta sul paramento di valle e in alcuni cunicoli. Evidente dislocazione di un giunto.



Impiego di modellazione FEM per un caso reale

Studio del **comportamento osservato** per prevedere il **comportamento a breve-medio termine** della diga.

Obiettivo: supportare la scelta di soluzioni per la **messa in sicurezza** della struttura.

1



Identificare i parametri del materiale del modello numerico per interpretare il comportamento della diga sin dai suoi primi riempimenti

2



Prevedere il futuro comportamento della diga a breve-medio termine ricorrendo al modello numerico calibrato

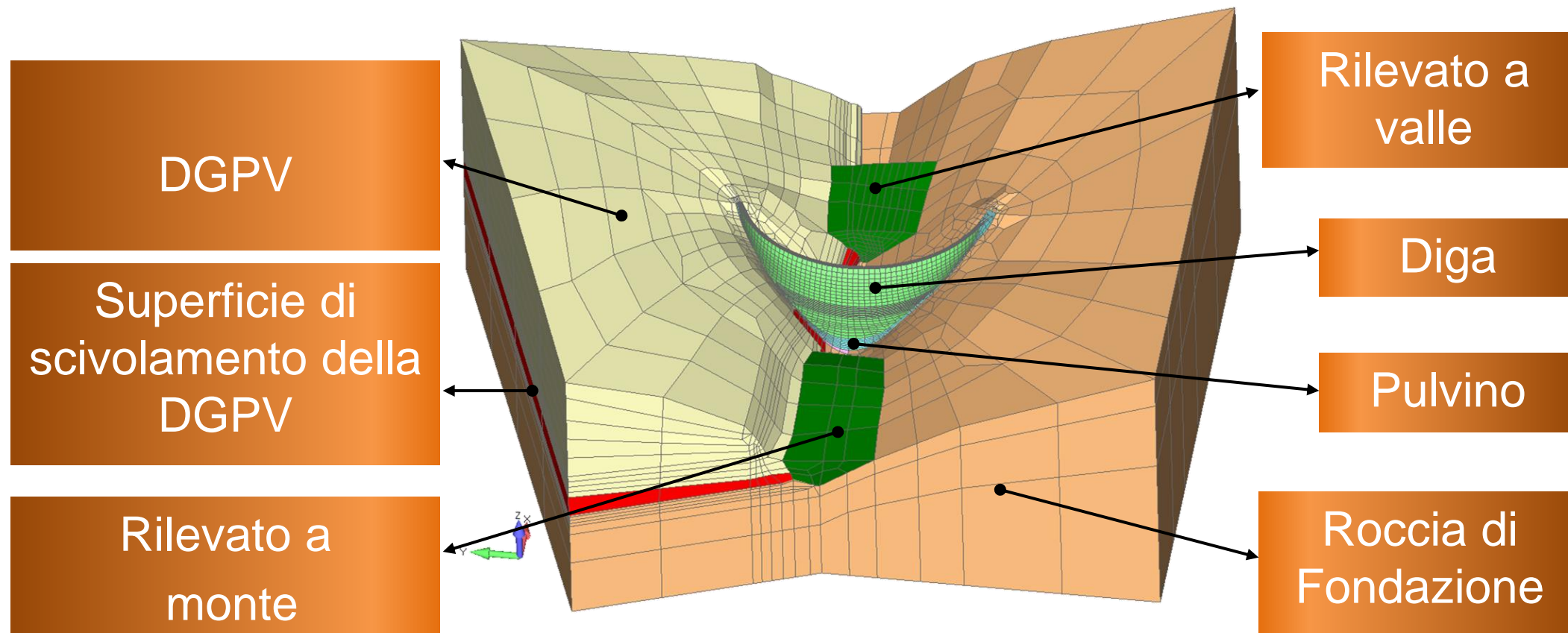
3



Supportare il progettista nella valutazione di diverse soluzioni di riabilitazione per garantire il funzionamento in sicurezza a lungo termine della diga

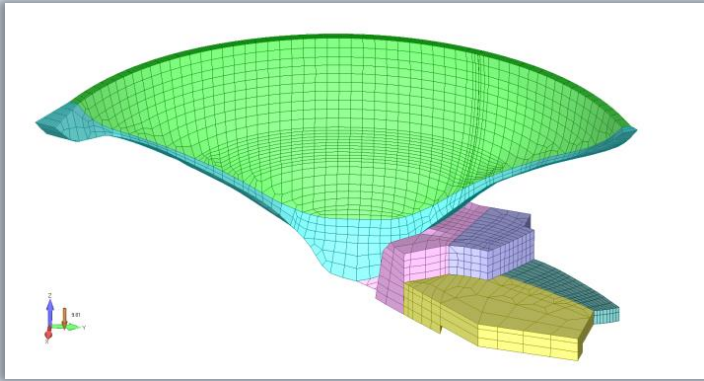
Impiego di modellazione FEM per un caso reale

Il modello finale FEM



... e 16 superfici di contatto

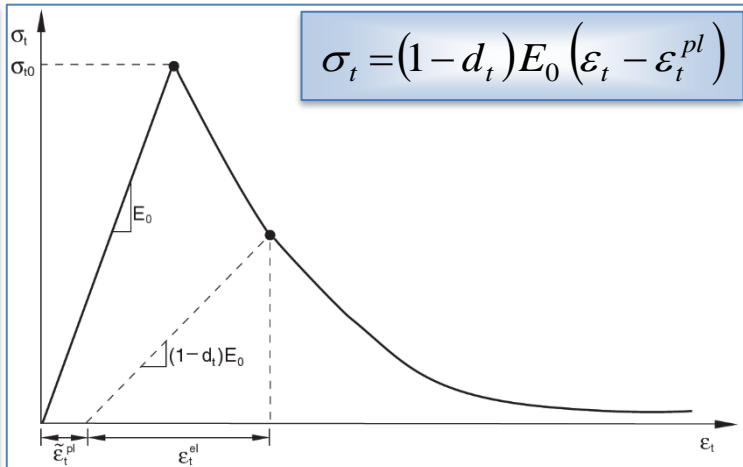
Impiego di modellazione FEM per un caso reale



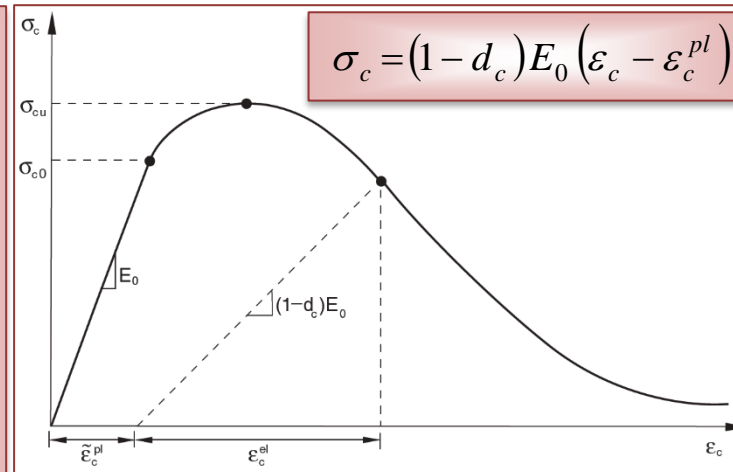
I dati rilevati in situ e dalle prove sui materiali sono stati utilizzati per definire i parametri dei materiali da adottare nelle leggi costitutive del calcestruzzo



Uniaxial loading in
tension



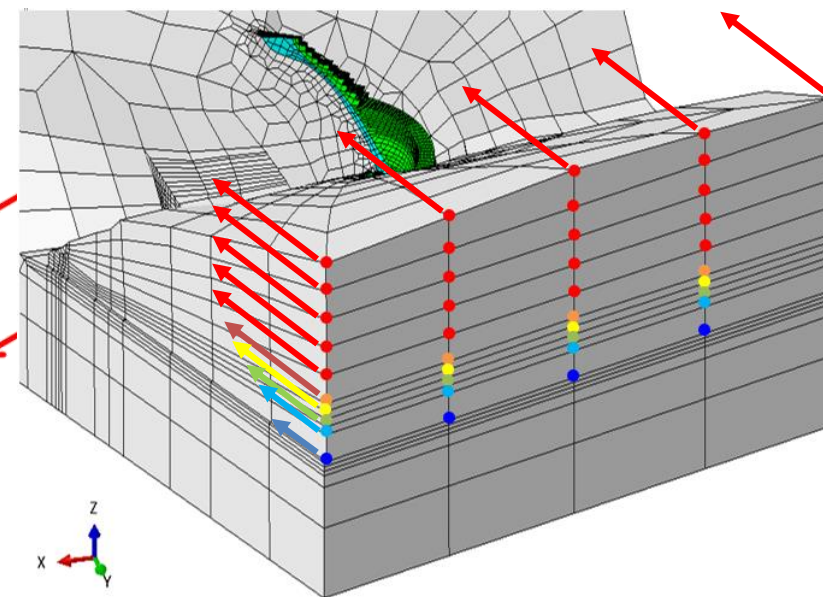
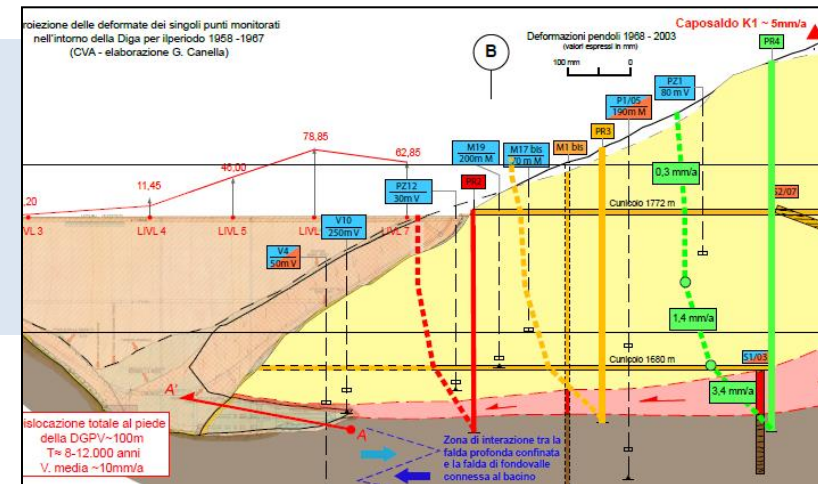
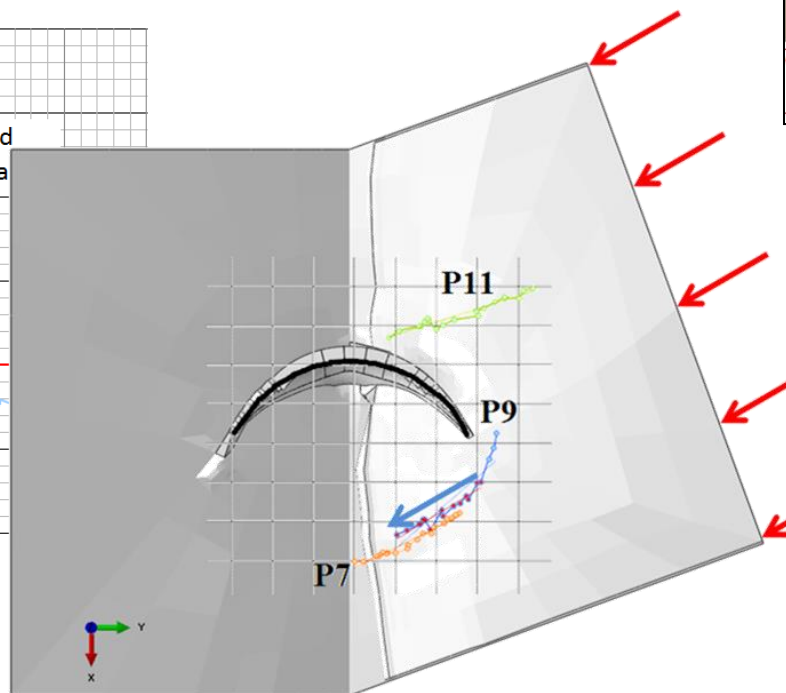
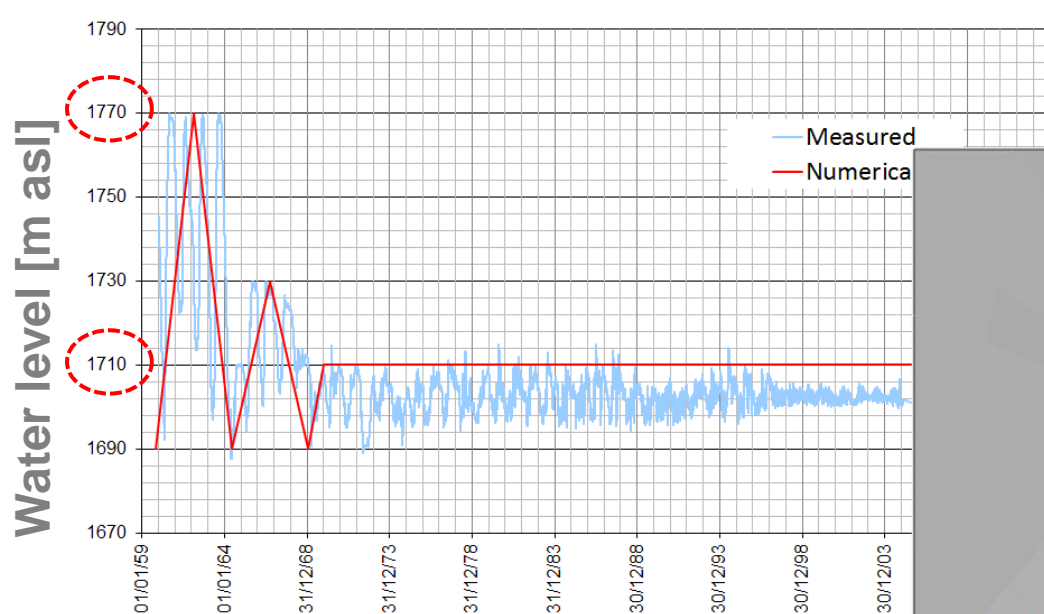
Uniaxial loading in
compression



Per la
modellazione del
CLS è stato scelto
il legame
costitutivo
**Concrete Damage
Plasticity**

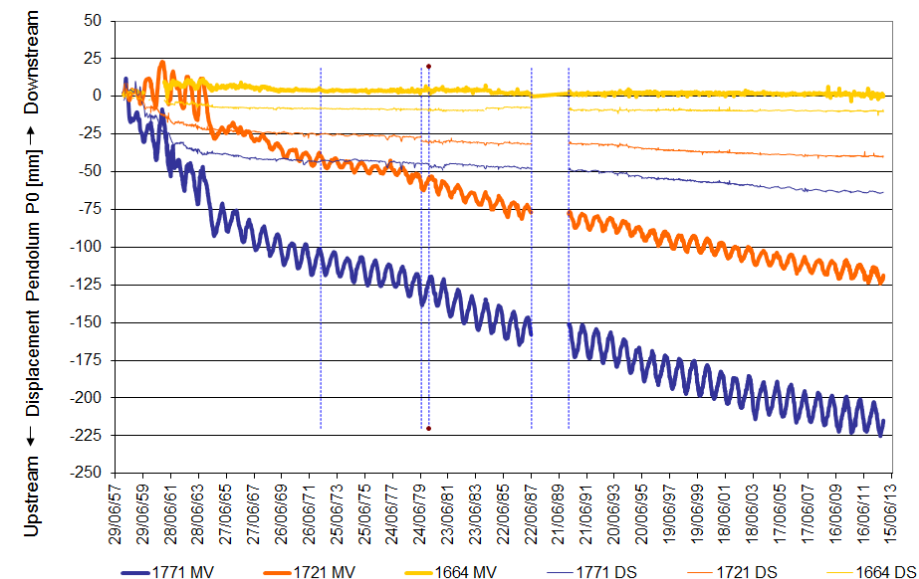
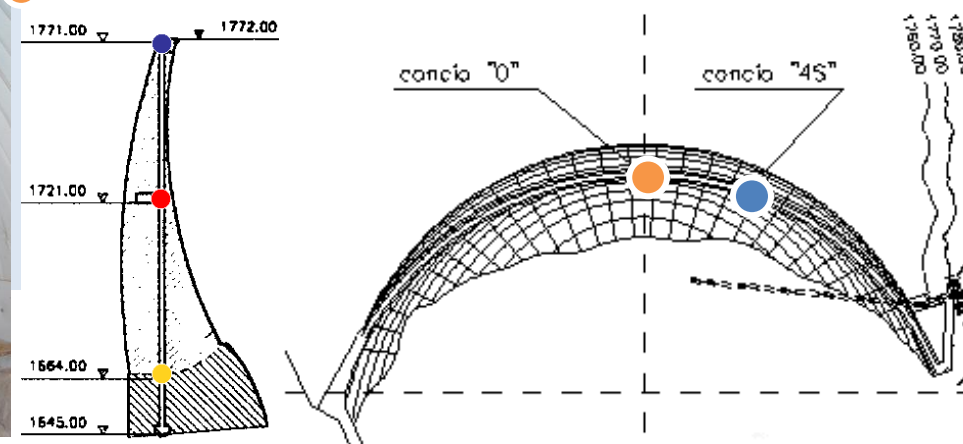
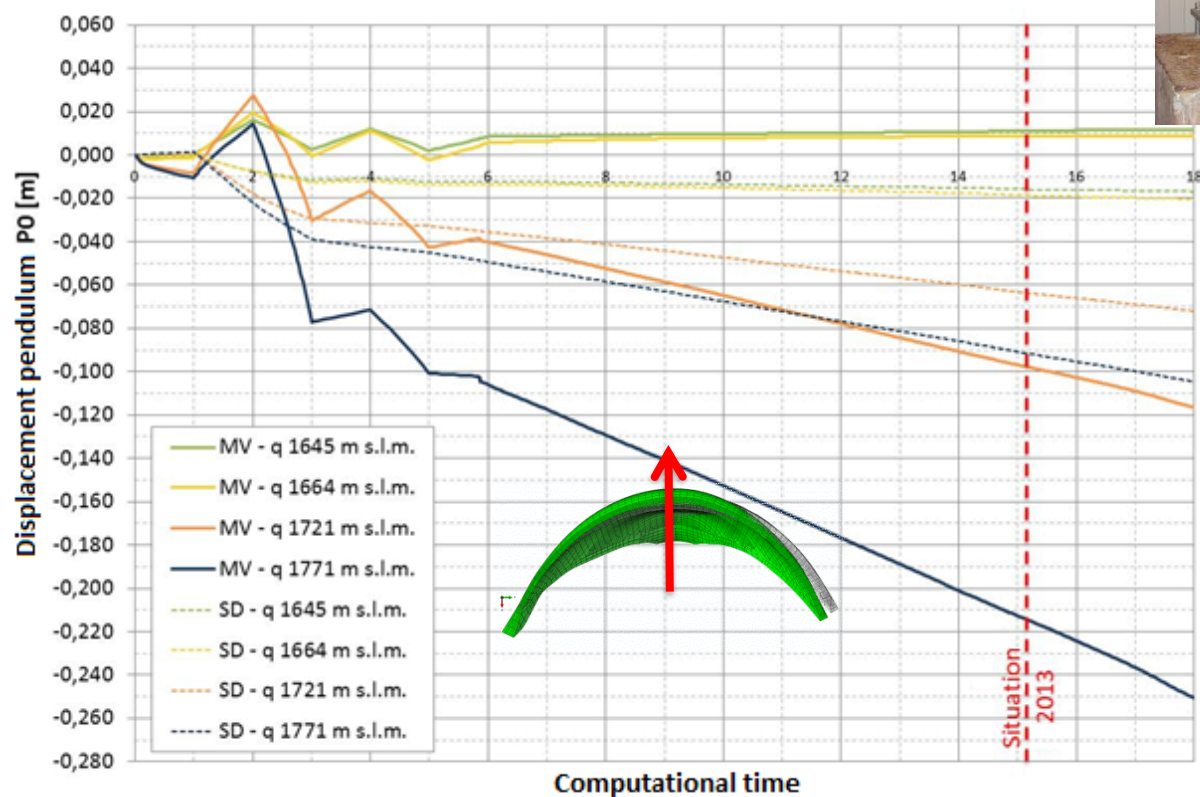
Impiego di modellazione FEM per un caso reale

I dati provenienti dai **sistemi di monitoraggio** e controllo sono stati fondamentali per impostare correttamente le **condizioni di carico e cinematiche** del modello numerico



Impiego di modellazione FEM per un caso reale

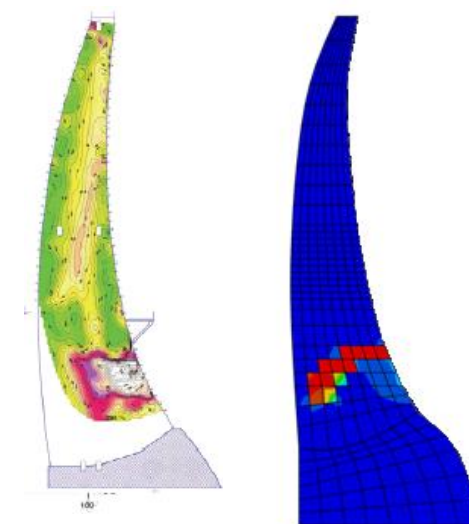
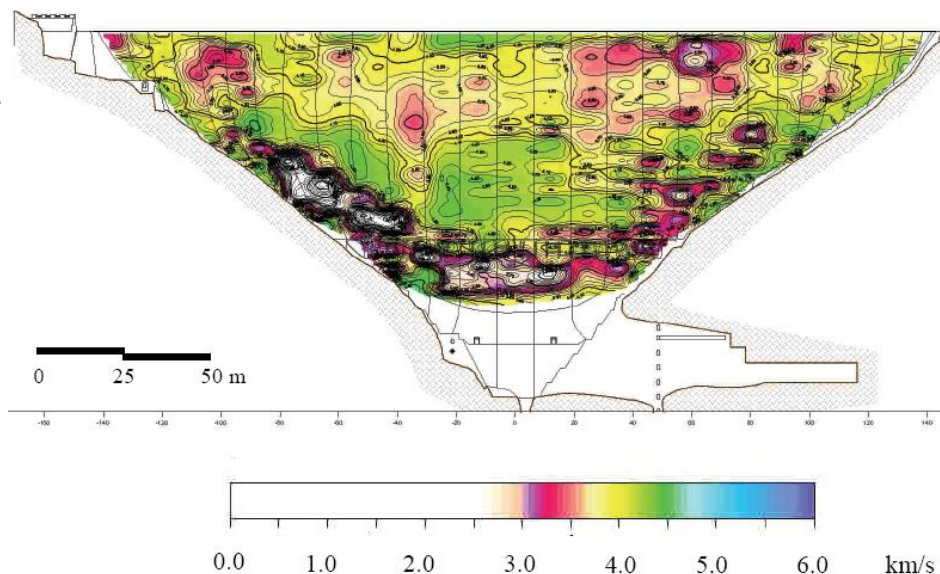
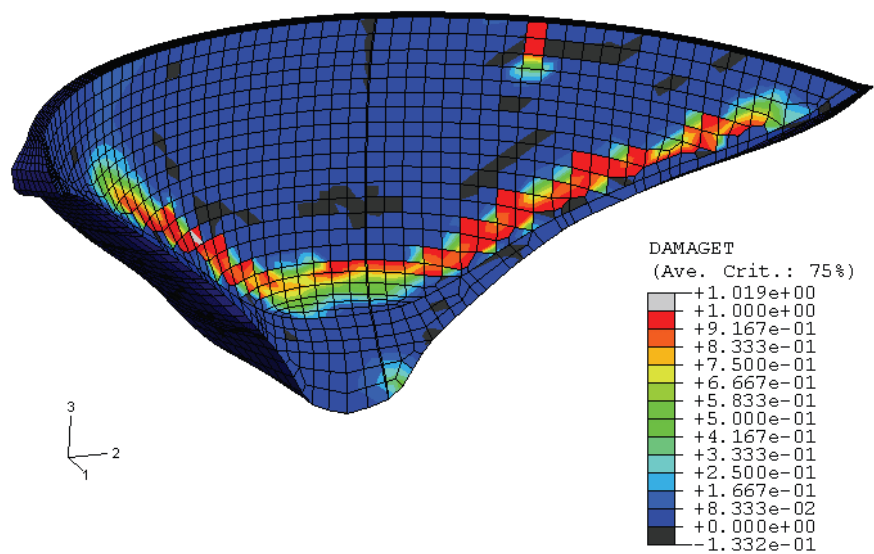
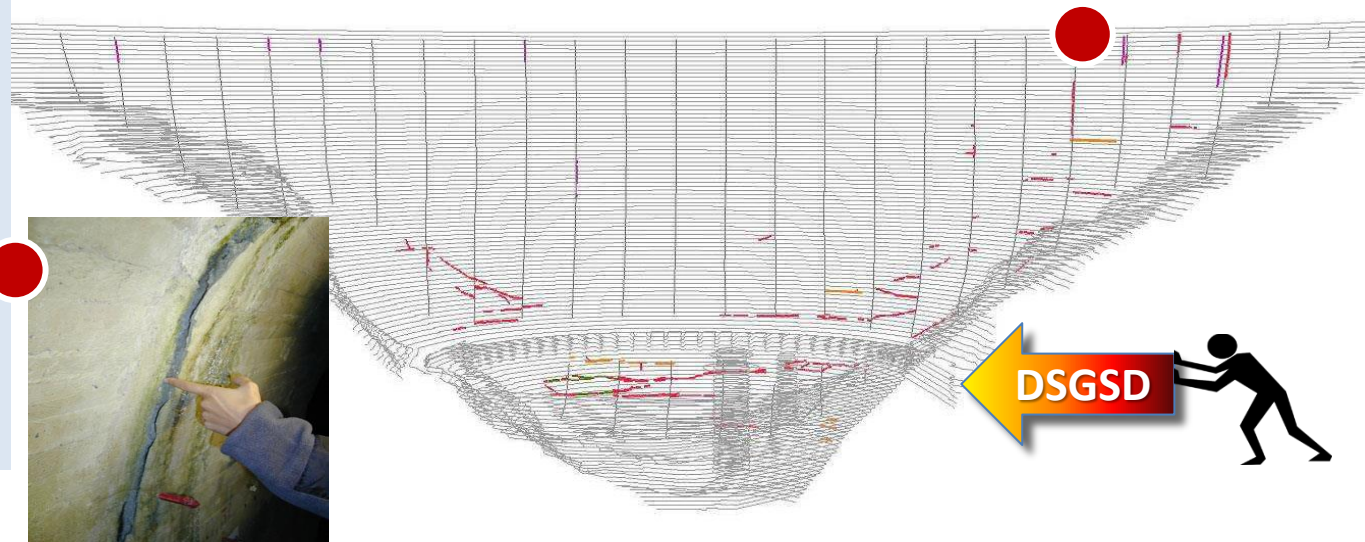
Calibrazione del modello numerico per confronto tra spostamenti misurati e calcolati



Impiego di modellazione FEM per un caso reale

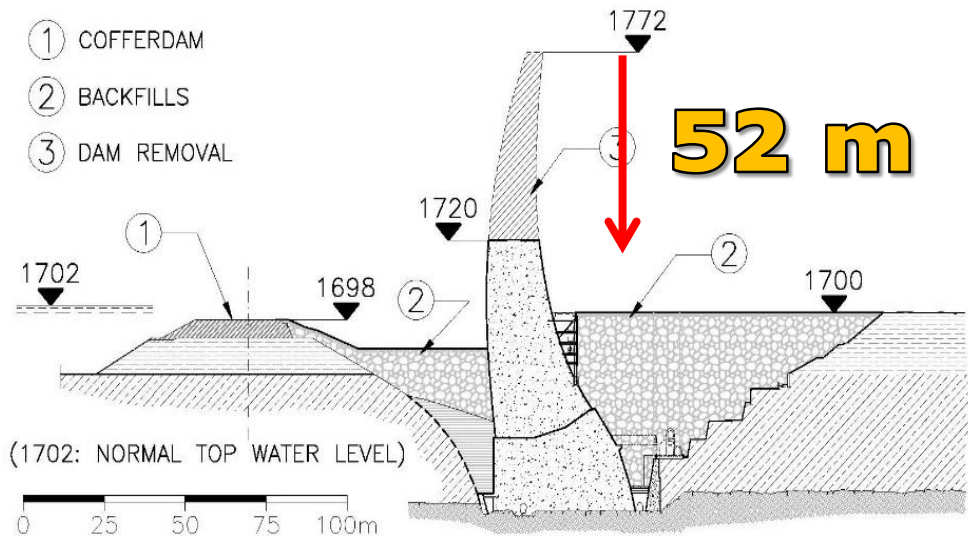
I contour del parametro di danno sono stati confrontati con:

- **Quadro fessurativo** da ispezioni visive
- **Tomografia della velocità P-wave** misurata sul paramento di valle e sulla sezione maestra



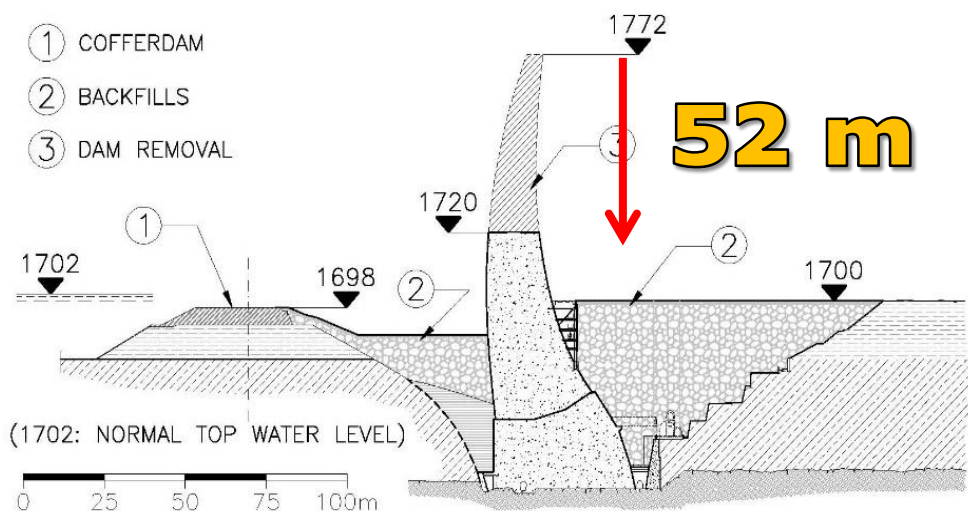
Impiego di modellazione FEM per un caso reale

Soluzione adottata dal progettista:
**demolizione parziale della parte
alta della diga**



Impiego di modellazione FEM per un caso reale

Soluzione adottata dal progettista:
**demolizione parziale della parte
alta della diga**

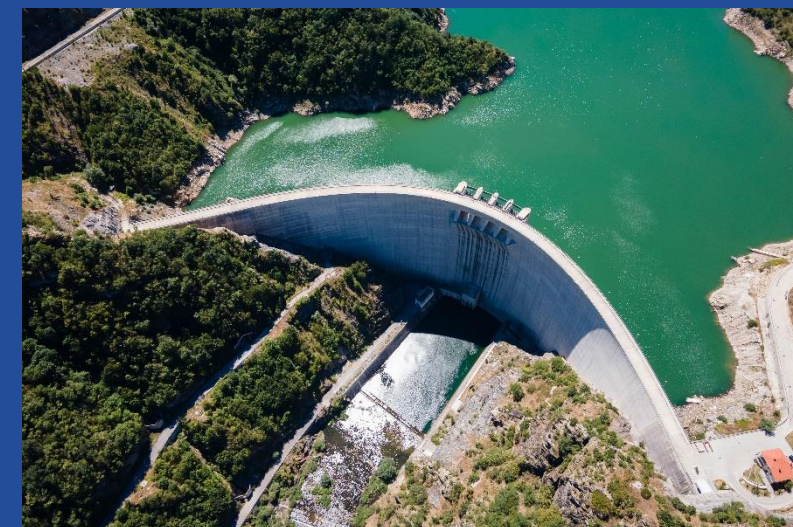


FORMAZIONE DIGHE A VOLTA

Grazie per l'attenzione

ANALISI STRUTTURALE

La modellazione numerica applicata alle dighe a volta



Guido Mazzà

Vice Presidente ITCOLD

Chairman Comitato ICOLD

«Computational Aspects of Analysis and Design of Dams»