

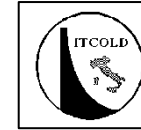
Dighe a gravità – Aspetti statici e sismici

Comportamento sismico

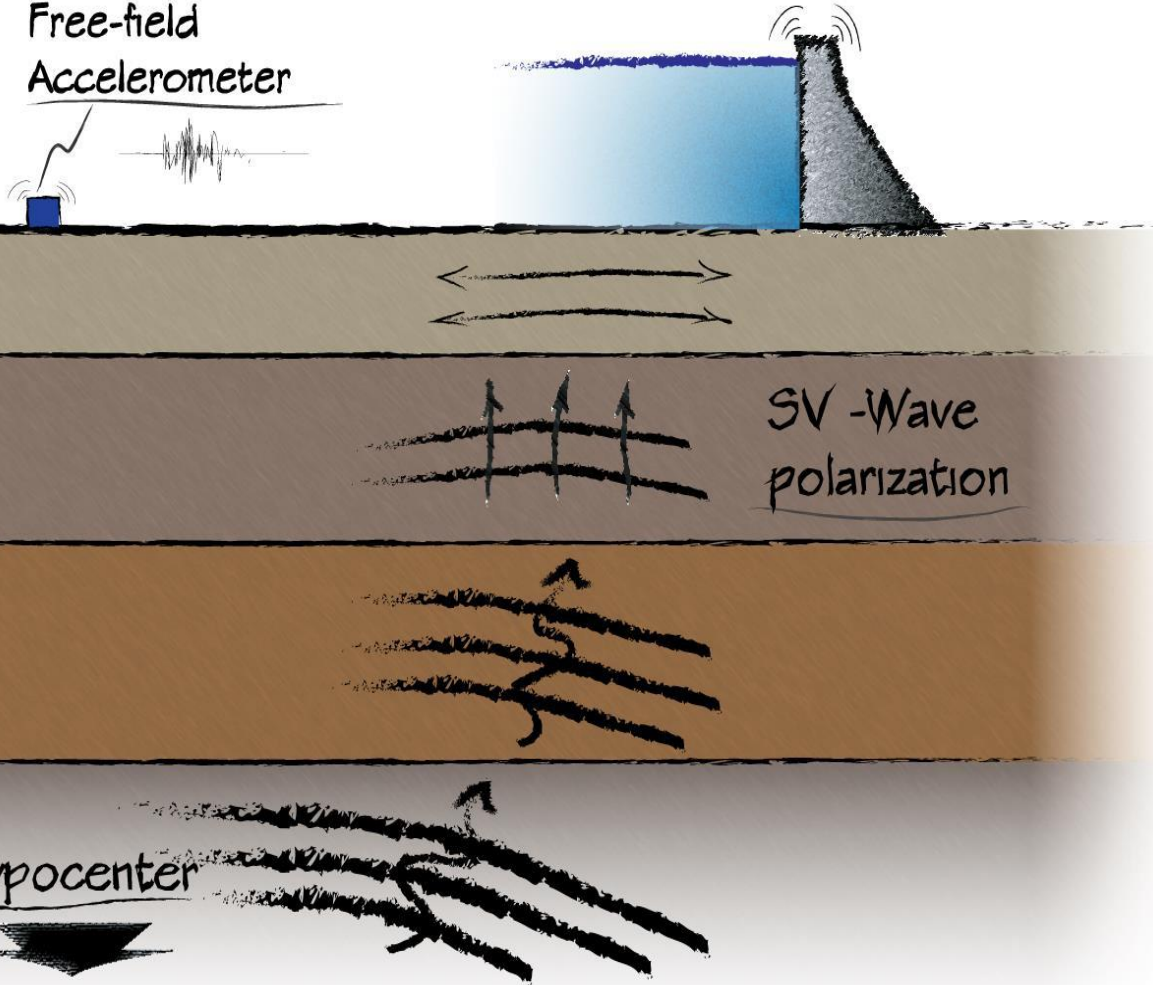
Anna De Falco

Università di Pisa

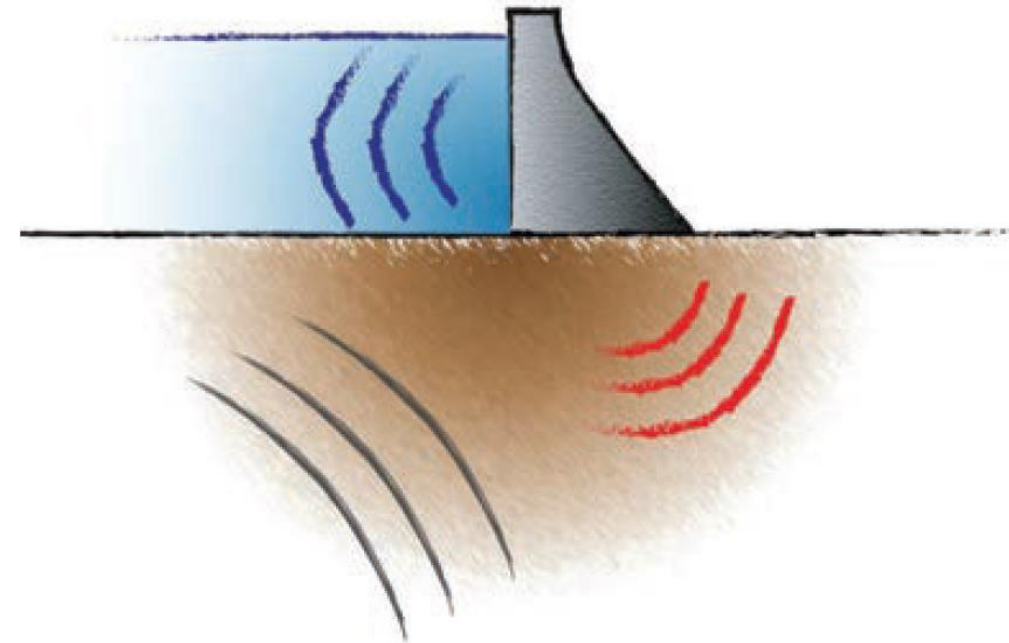
Gli effetti del sisma



Free-field
Accelerometer

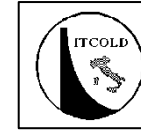


Interazione fluido-struttura



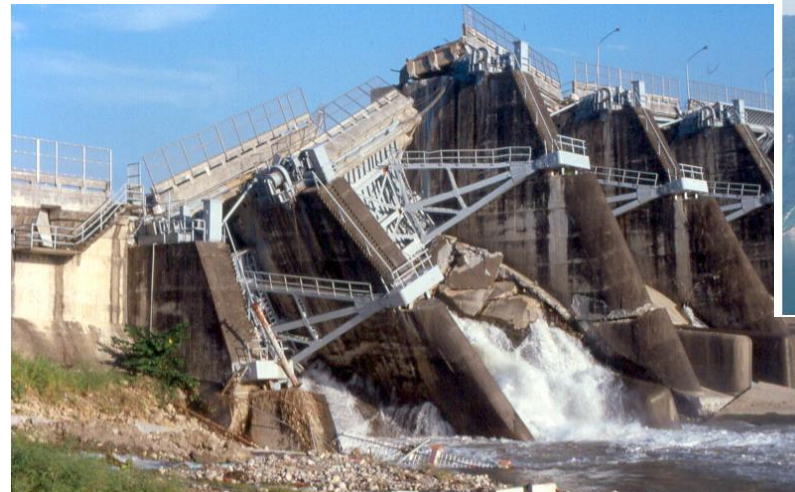
Interazione terreno-struttura

Gli effetti del sisma

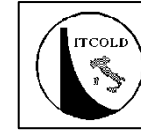


SCENARI IN CASO DI SISMA

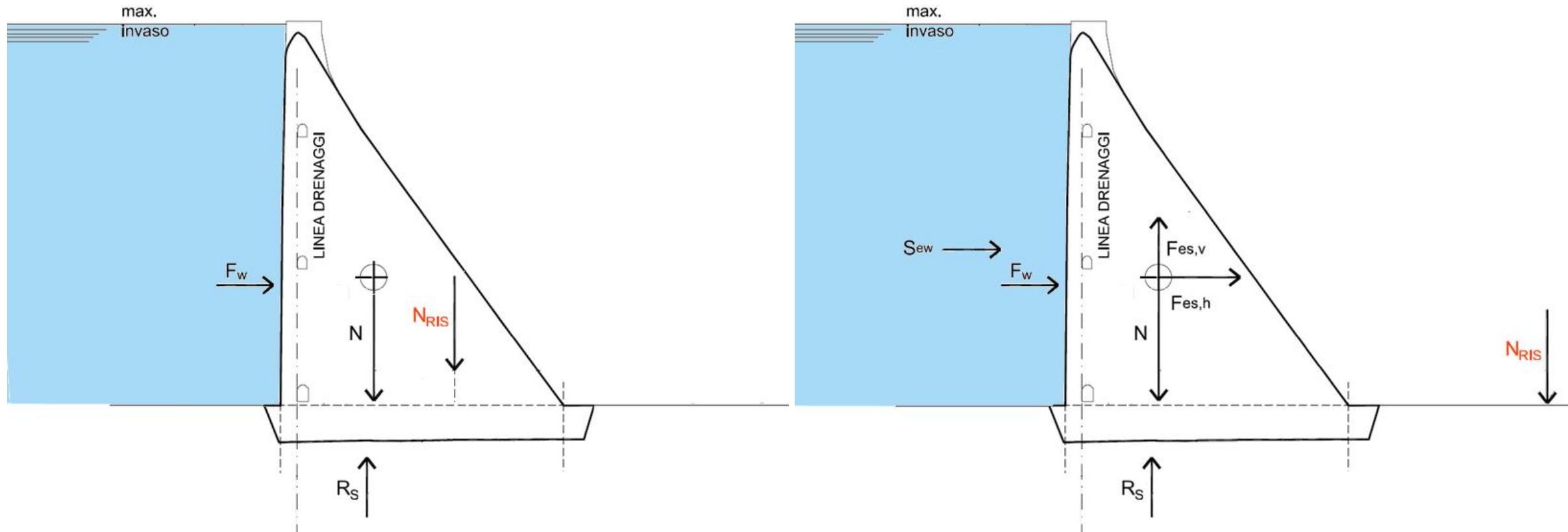
- **Scuotimento del terreno** → **vibrazioni nel corpo diga, sollecitazioni, deformazioni**, danni alle strutture e alle attrezzature pertinenti.
- **Movimenti di massa: crolli e frane** → danni alle strutture accessorie, blocco dell'accesso ai siti delle dighe e al bacino, dighe da frana (1990 Manjil (Iran) e 1999 Chichi a Taiwan oltre 10.000 frane).
- **Movimenti di faglia** → danni strutturali, oscillazioni del livello nel serbatoio, abbassamento della cresta, con conseguente possibile sormonto della diga.
- **Danneggiamenti agli sfioratori e alle paratie**
- **Ostruzione degli scarichi**
- **Movimenti di massa nel serbatoio** → onde impulsive.
- **Cambiamento di consistenza del suolo** → cedimenti



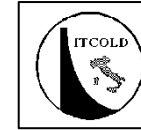
Gli effetti del sisma



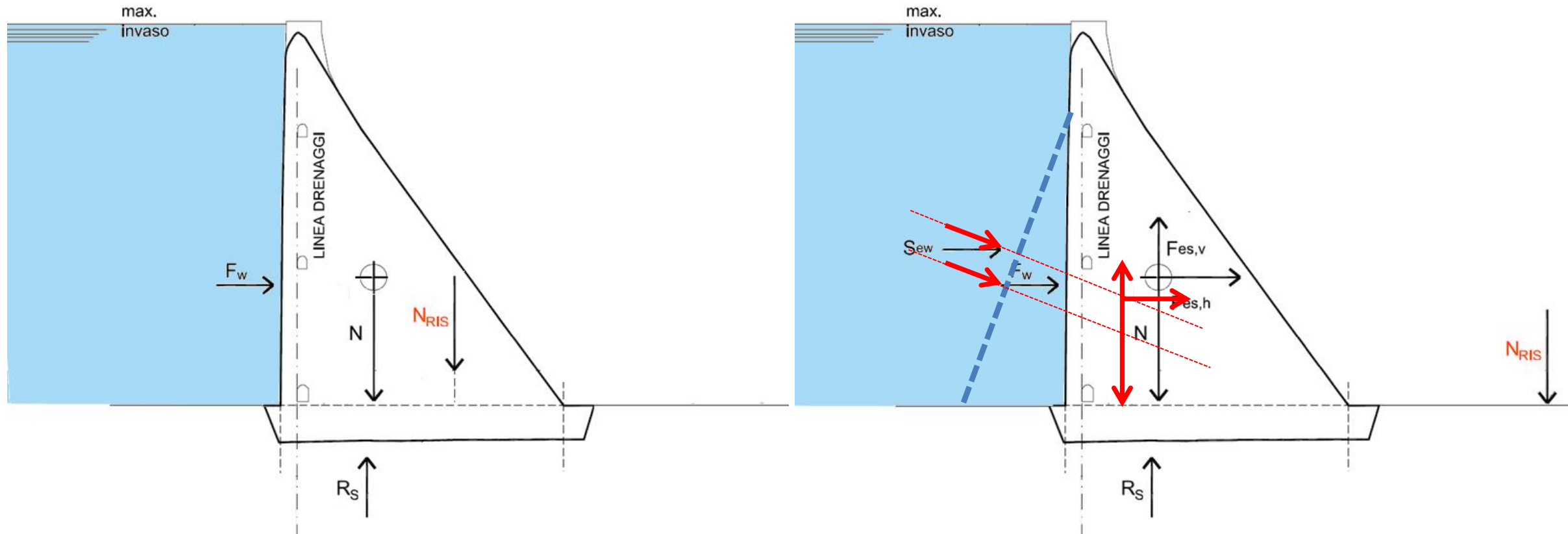
Azioni agenti su una diga per effetto di sisma



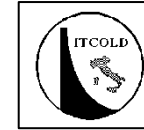
Gli effetti del sisma



Azioni agenti su una diga per effetto di sisma



Gli effetti del sisma



ITCOLD

Comitato Nazionale Italiano delle Grandi Dighe

Gruppo di Lavoro 'Comportamento delle dighe italiane in occasione di terremoti storici'

Catalano, A., Caruana R., Del Gizzi, F. and De Sortis A.

Observed behaviour of Italian dams under historical earthquakes

USSD

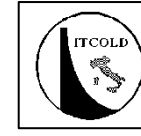
Seismic Analysis of Concrete Dams Workshop - 2017 USSD Annual Conference April 6-7, 2017



Case Histories and Seismic Potential Failure Modes – presentation from

Nuss, L.K., Matsumoto, N., Kenneth, D., Hansen, D.K., **"Shaken, But Not Stirred - Earthquake Performance of Concrete Dams"**, United States Society on Dams (USSD) Conference, New Orleans, April 2012

Gli effetti del sisma



SISMA DI SAN FRANCISCO, M 8.3 – 18 APRILE 1906

Diga **Lower Crystal Springs (USA) (1890)**

Interlocking concrete blocks

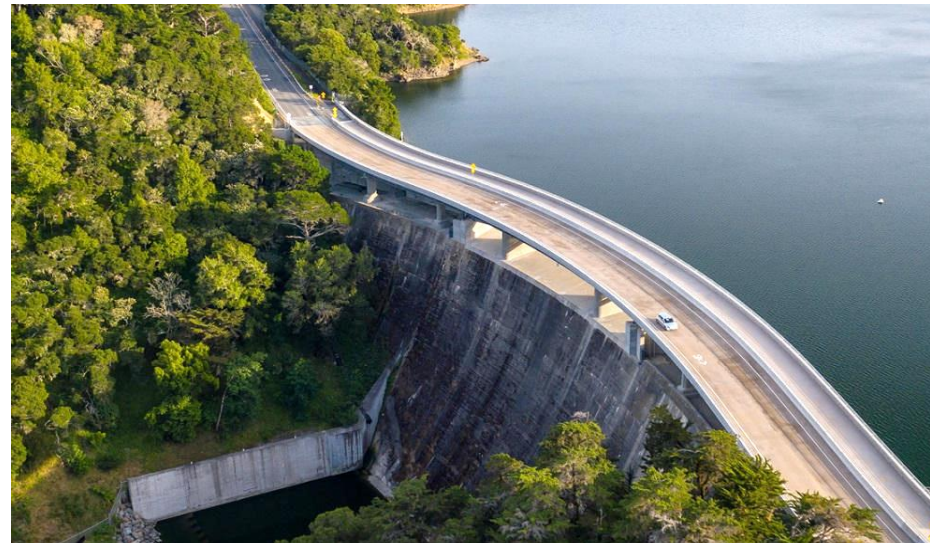
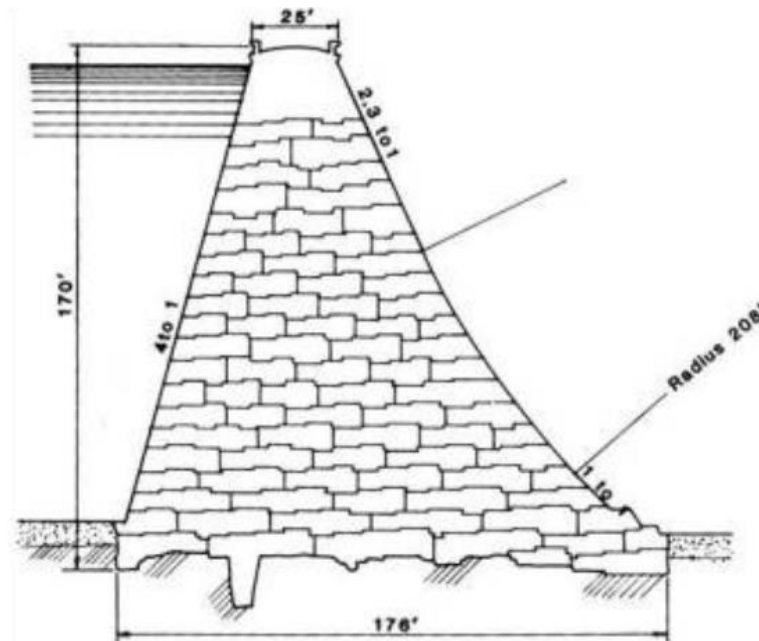
32 km a sud di San Francisco

H = 47 m

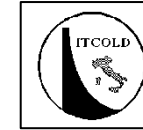
Lunghezza in cresta = 183 m

Distanza dalla faglia di Sant'Andrea = 0.4 km

acc. di picco tra 0.52 e 0.68 g



Gli effetti del sisma



SISMA DI KOYNA, M 6.5 – 11 DICEMBRE 1967

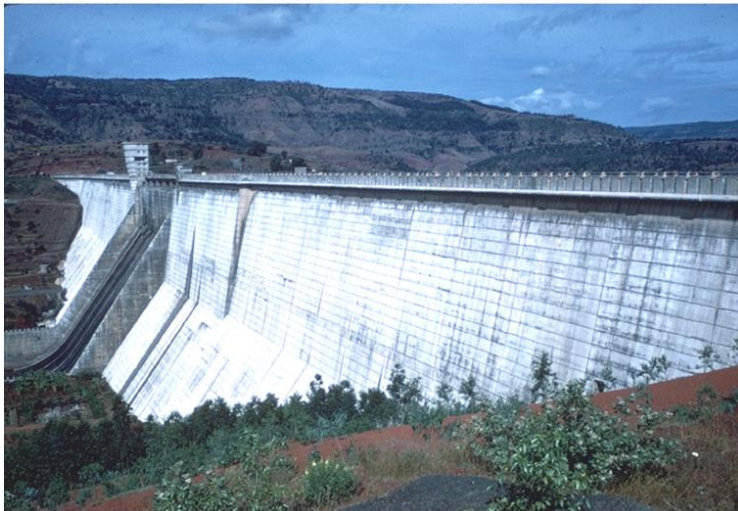
Diga di **Koyna (1963)**

H = 103 m

Lunghezza in cresta = 853 m

Distanza dall'epicentro = 13 km

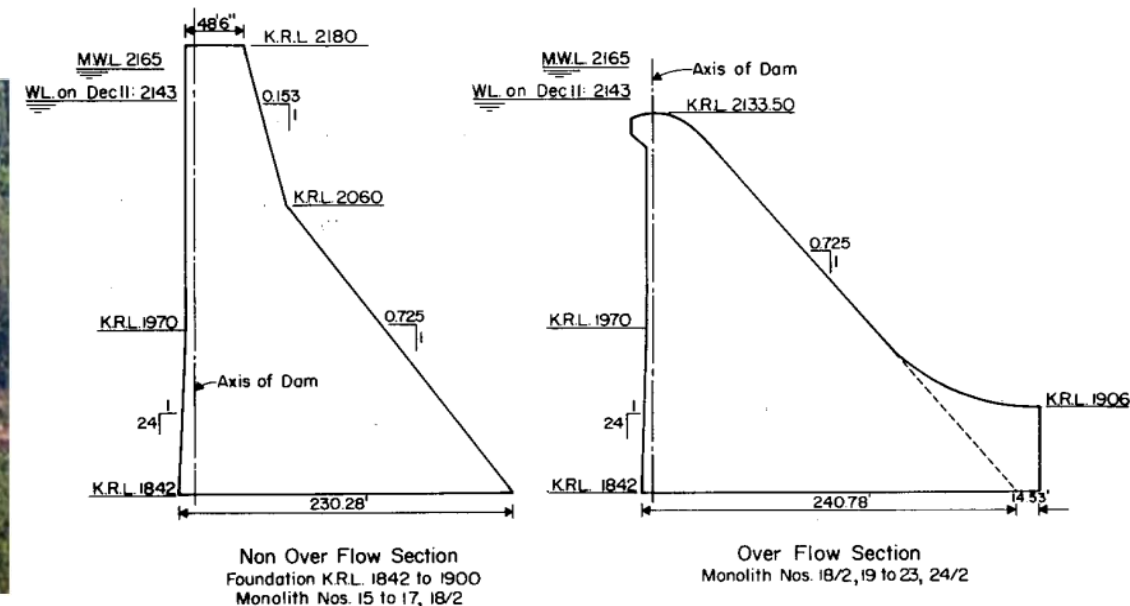
acc. di picco galleria inferiore = 0.49 g trasv. 0.63 g long. 0.34 g vert.



downstream face

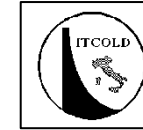


after adding buttresses



18 fessure orizzontali a monte e 7 a valle vicino al cambio di pendenza nel profilo

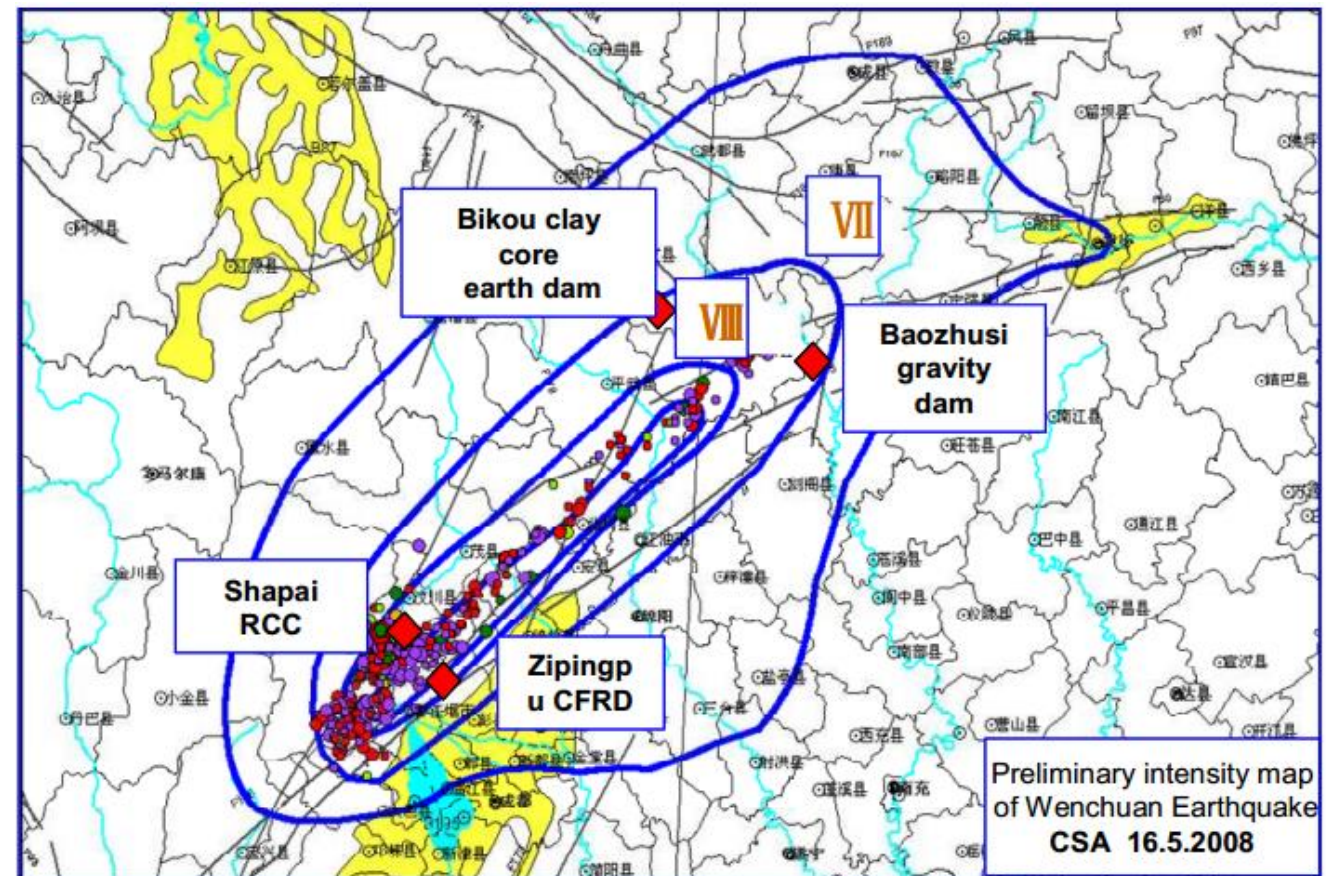
Gli effetti del sisma



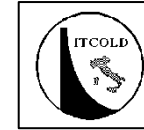
SISMA DI WENCHUAN Cina, M **8.0** - 12 MAGGIO 2008

terremoto devastante nella contea di Wenchuan nella provincia di Sichuan in Cina. La provincia del Sichuan ha il più grande potenziale idroelettrico della Cina e il terremoto ha colpito un gran numero di dighe.

1803 dighe e bacini e 403 impianti idroelettrici con una potenza installata di 3.3 GW complessivi hanno subito danni: fessurazioni, scivolamento di porzioni, assestamento della cresta, perdite, rottura degli sfioratori e dei dispositivi di scarico.



Gli effetti del sisma



SISMA DI WENCHUAN, M 8.0 - 12 MAGGIO 2008

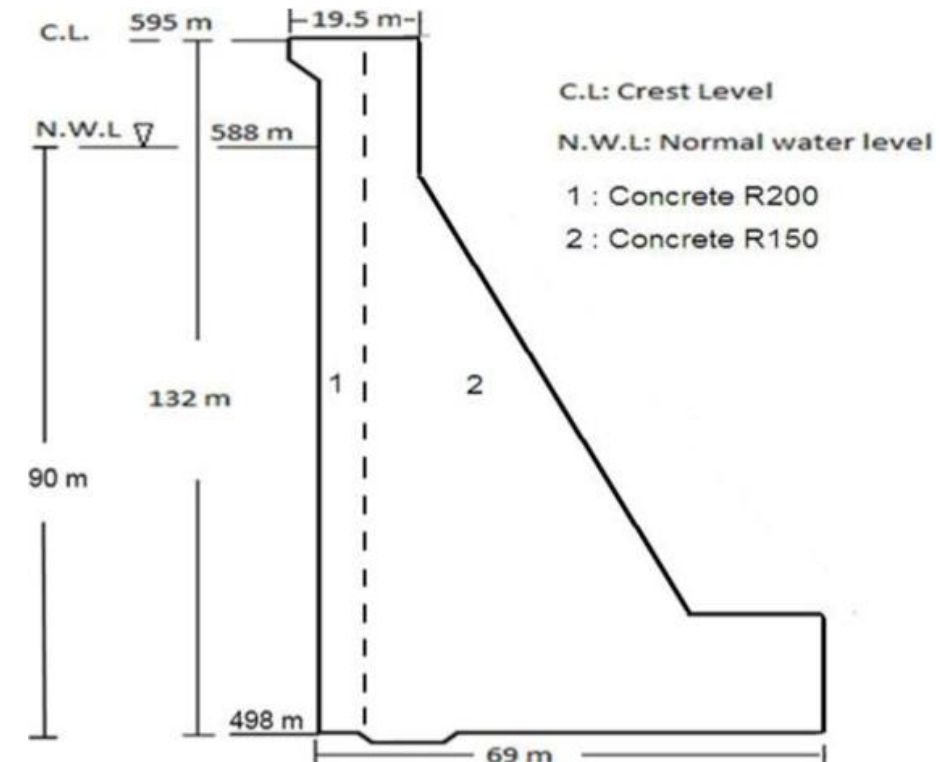
Diga di **Baozhusi** Sichuan (1998)

H = 132 m

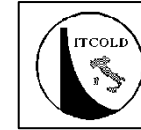
Intensità nel sito della diga = VII-VIII.

Scossa di assestamento a Qingchuan M 6,4 a circa 20 km dalla diga

acc. di picco = 0.2 g



Gli effetti del sisma



SISMA DI CHI CHI, M 7.6 – 21 SETTEMBRE 1999

Diga di **Mingtán**, Taiwan (1990)

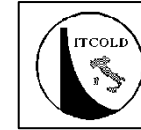
H = 82 m

Distanza dall'epicentro = 12 km

acc. di picco = 0.4 g ÷ 0.5 g



Gli effetti del sisma



SISMA DI CHI CHI, M 7.6 – 21 SETTEMBRE 1999

Diga di **Shih Kang** (Taiwan) Gravity Spillway Dam (1977)

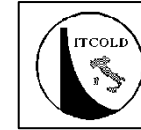
H = 21 m

Lunghezza = 357 m

acc. di picco = 0,51 orizz. 0,53 vert.



Gli effetti del sisma



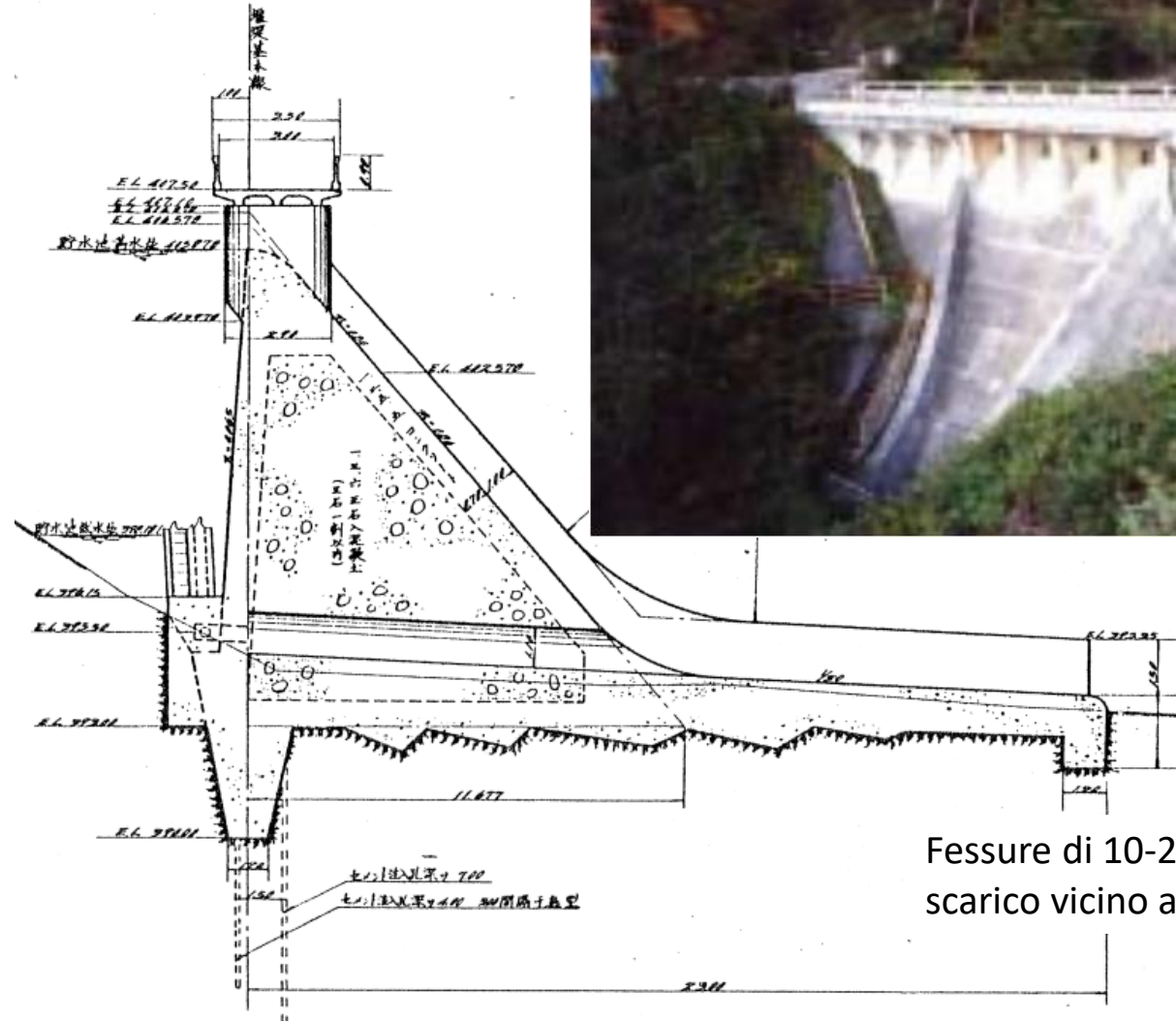
SISMA DI WESTERN TOTTORI, M 7.3 - 6 OTTOBRE 2000

Diga di Uh (Giappone)

H = 14 m

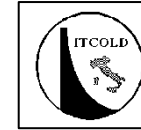
L = 32 m

acc. di picco > 1.0 g



Fessure di 10-20 mm sul canale di scarico vicino alla base lato monte.

Gli effetti del sisma



SISMA DI WESTERN TOTTORI, M 7.3 - 6 OTTOBRE 2000

Diga di **Kasho** (Kasyo) (Giappone) (**1989**)

H = 46 m

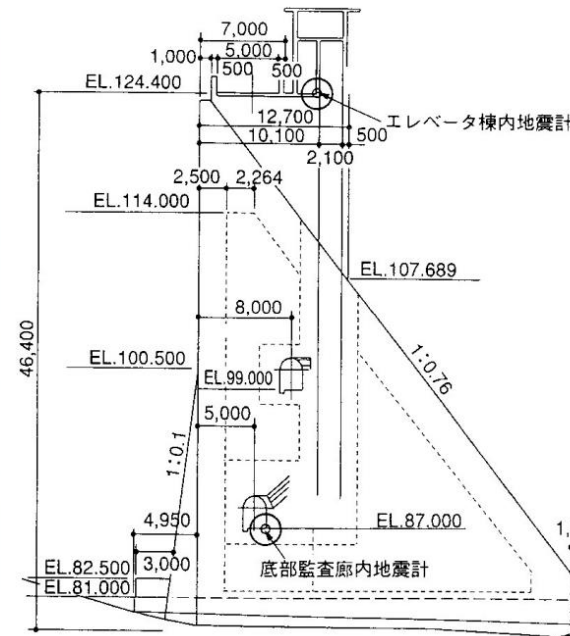
L = 174 m

Distanza dall'epicentro = 5 km

Numerose scosse di assestamento fino a M 7.0

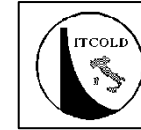
acc. di picco = orizz. 0.54 g vert. 0.49 g

In cresta 2.09 g



Fessure sulle pareti della casa di guardia in cresta.

Gli effetti del sisma



SISMA DI WESTERN TOTTORI, M **7.3** - 6 OTTOBRE 2000

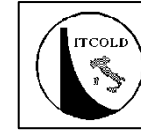
Diga di **Sugesawa** (Giappone) (**1967**)

H = 73.5 m

acc. di picco = 0.16 g



Gli effetti del sisma



SISMA DI KOBE, M 7.2 - 17 GENNAIO 1995

Diga di **Gohonmatsu** (Giappone) (1900)

H = 33 m

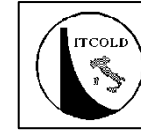
Distanza dall'epicentro = 15 km

acc. di picco = 0.83 g



Unico danneggiamento: una sottile fessura nel rivestimento del parapetto in cresta.

Gli effetti del sisma



SISMA DI TOHOKU, M 9.0 – 11 MARZO 2011

Diga di **Takou** Iwate Prefecture (Giappone) (2006)

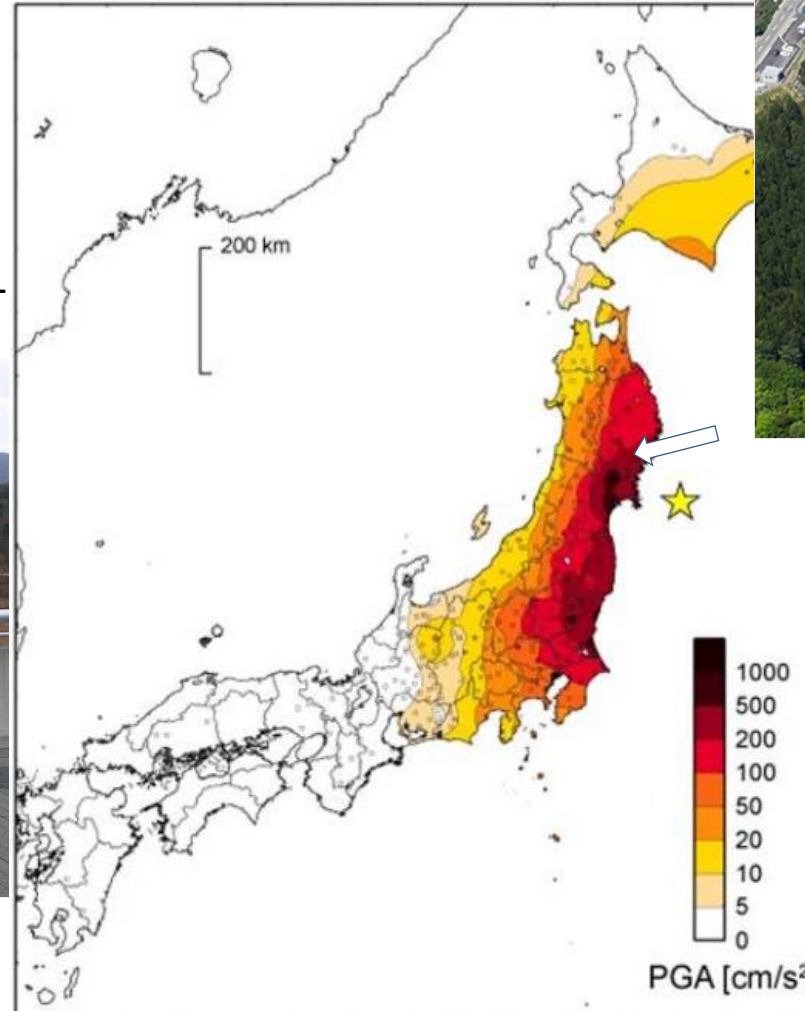
H = 77 m

Distanza dall'epicentro = 112 km

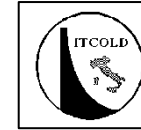
acc. di picco = 0.4 g

accelerazione in cresta = 2 g

Aftershock M 7.1 - 17 marzo 2011



Gli effetti del sisma



SISMA DI HYOGOKEN-NAMBU M 7.2 - 17 GENNAIO 1995

Diga di **Hitokura** (Giappone) (1983)

H = 75 m

Distanza dall'epicentro = 47 km

acc. di picco = 0.18 g

Galleria superiore = 0.48 g

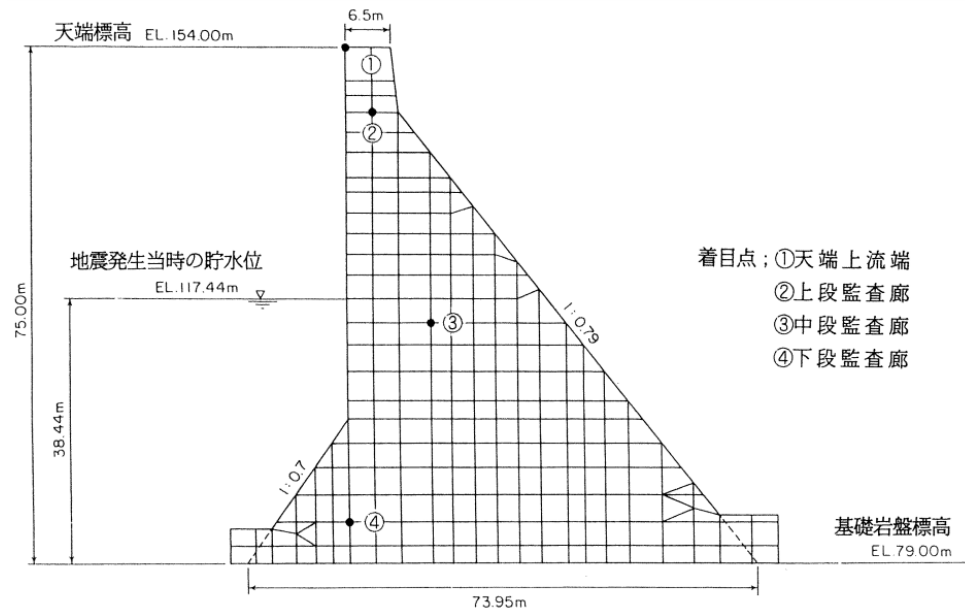
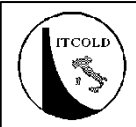


図-2 動的解析モデル



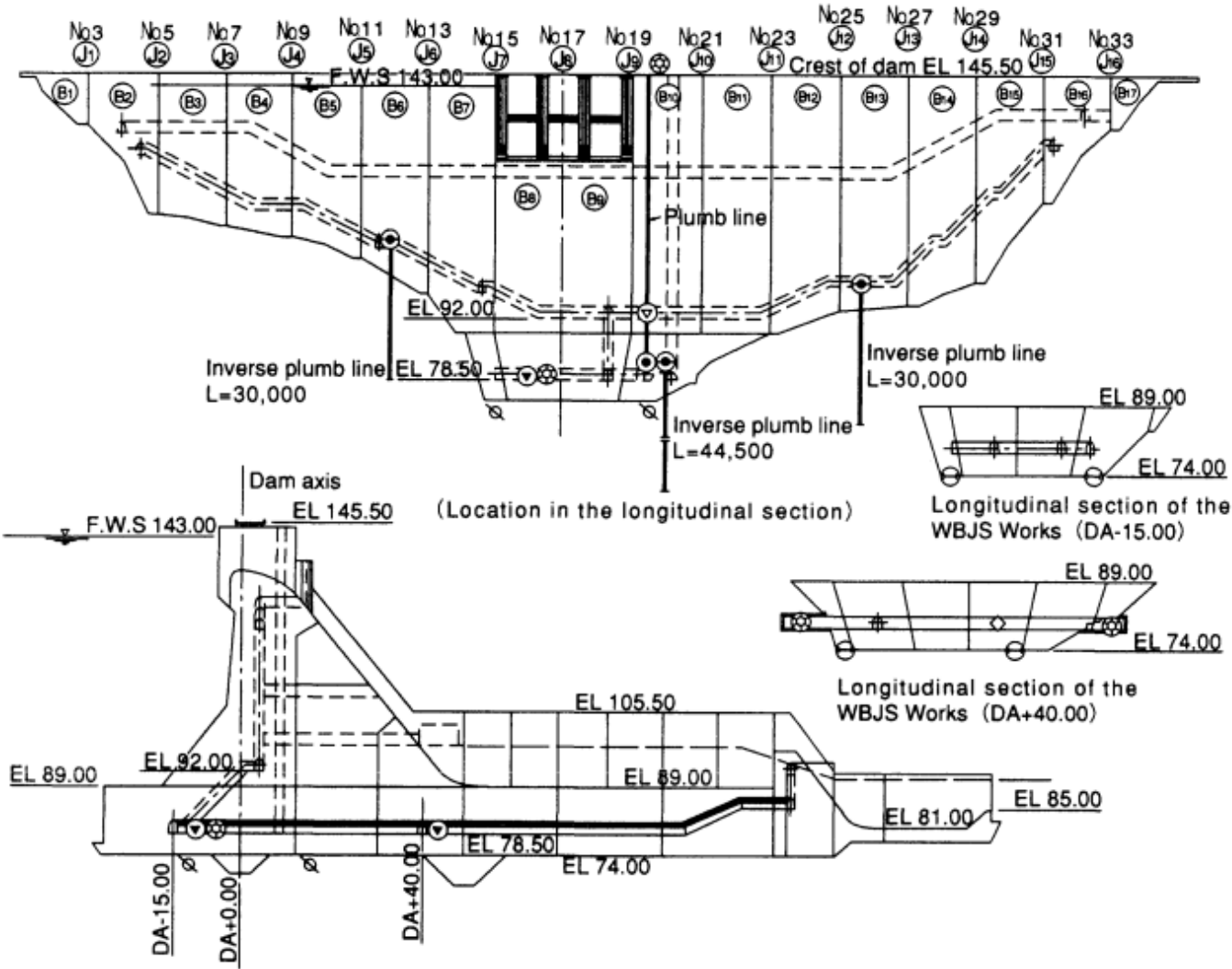
Gli effetti del sisma



SISMA DI HYOGOKEN-NAMBU M 7.2 - 17 GENNAIO 1995

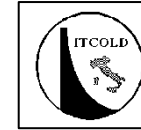
Diga di **Dondo** (Giappone) (1990)
H = 71.5 m
Distanza dall'epicentro = 20 km
acc. di picco = 0.16 g

Temporaneo incremento delle perdite
spostamento max dei giunti 0.05 mm



Symbol	Sensors
●	Plumb line
⊙	Inverse plumb line
⊗	Seismograph
▽	Leakage in the rock zone
▼	Leakage in the fractured zone
⊖	Displacement gauge of the fault
⊗	Pressure gauge of the fault
◇	Surveying device

Gli effetti del sisma



SISMA DI NOTO HANTO di Mw **6.7** - 25 marzo 2007

Diga di **Hakkagawa** (Giappone) (**1995**)

H = 52 m

Distanza dall'epicentro = 14 km

acc. di picco = 0,17 g

acc. in cresta 0,87 g

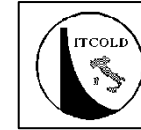
Leggero danneggiamento in
corrispondenza dei giunti.

Temporaneo aumento delle perdite.

Spostamento permanente di 0.5 mm



Gli effetti del sisma



SISMA DI DERBY (Midlands) Mw **5.3** - 11 febbraio 1957

Diga di **Blackbrook** (Inghilterra) (**1906**)

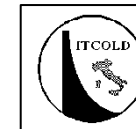
H = 30 m

Distanza dall'epicentro = 6,4 km

Caduta del materiale di rivestimento e
fessure sulle facce della diga



Gli effetti del sisma



SISMA DI MANJIL, Mw 7.6 - 20 giugno 1990

Diga a contrafforte **Sefid Rud** (Iran) (1962)

H = 106 m

Lunghezza = 425 m

Distanza dall'epicentro = 6 km

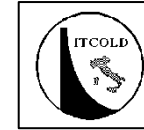
acc. di picco = 0.51g long. 0.49 g trasv.

PGA di progetto – coefficiente sismico = 0.25 g



gravemente danneggiata la parte superiore della diga con crepe orizzontali (80) in corrispondenza delle riprese di getto, ma senza scorrimento. Spostamento permanente differenziale dei conci fino a 50 mm. Perdite dai giunti verticali.

Gli effetti del sisma



Seismic Analysis of Concrete Dams Workshop - 2017 USSD Annual Conference April 6-7, 2017



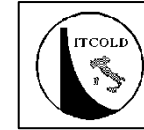
Case Histories and Seismic Potential Failure Modes – presentation from

Nuss, L.K., Matsumoto, N., Kenneth, D., Hansen, D.K., **“Shaken, But Not Stirred - Earthquake Performance of Concrete Dams”**, United States Society on Dams (USSD) Conference, New Orleans, April 2012

Possibili ragioni per cui le dighe in calcestruzzo hanno avuto un buon comportamento al sisma

- Livello di sollecitazione troppo basso.
- Strutture massicce e ridondanti.
- Durata dello scuotimento più violento troppo breve.
- Resistenza a trazione dinamica maggiore di quella valutata in situazione statica.
- Meccanismi di smorzamento.
- Frequenza naturale favorevole.
- Configurazione tridimensionale.

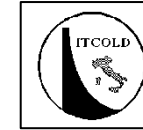
Gli effetti del sisma



La mancanza di case history con danni significativi fa ritenere che non ci sia piena consapevolezza del grado di sicurezza delle dighe a gravità e fa sì che il loro comportamento non sia ancora ben conosciuto

- **NECESSITÀ DI VALUTAZIONE**
- **COMPLESSITÀ DEL COMPORTAMENTO DA DESCRIVERE**
- **RICERCA DI STRUMENTI PER LA PREVISIONE**
- **SCELTA DI METODI PER L'ANALISI**
- **FORMULAZIONE DI CRITERI UNIFORMI PER LA SICUREZZA**
- **VALUTAZIONE DEGLI SCENARI DI CRISI CON IL CONTRIBUTO DI COMPETENZE DIVERSE**

La modellazione



- **GEOMETRIA**

Modello della struttura
Modello del terreno
Modello del bacino

- **AZIONE SISMICA**

coefficiente sismico
spettro di progetto
storie temporali

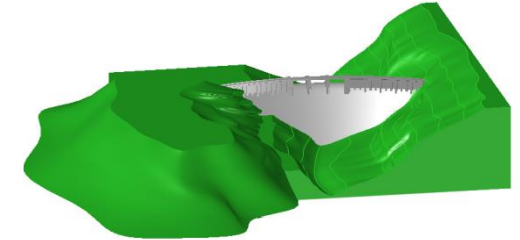
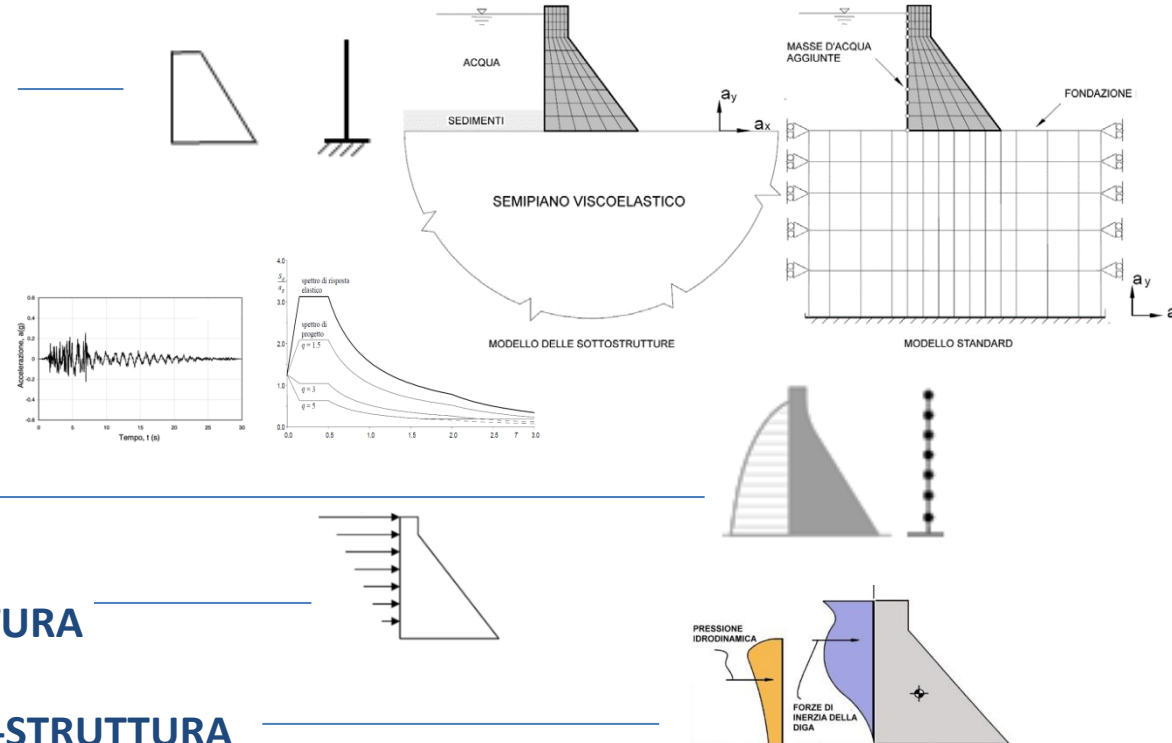
- **AZIONI INERZIALI DELL'ACQUA**

- **AZIONI INERZIALI DELLA STRUTTURA**

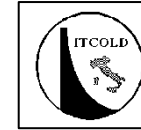
- **INTERAZIONE FLUIDO-TERRENO-STRUTTURA**

- **SCENARI DI DANNO**

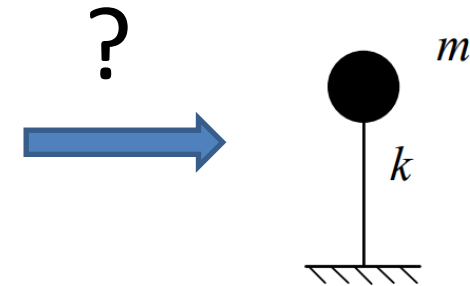
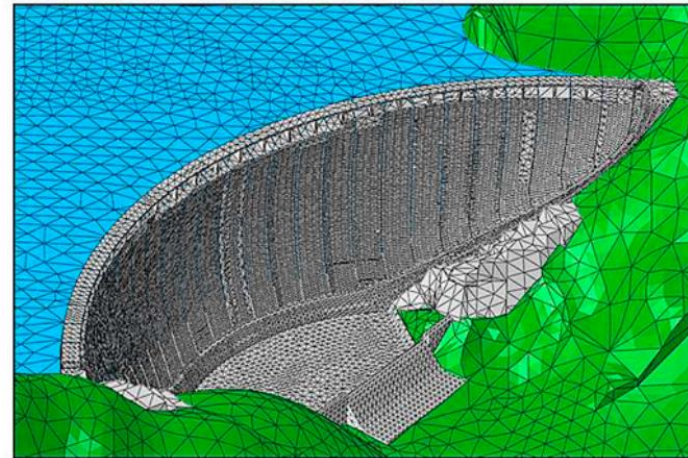
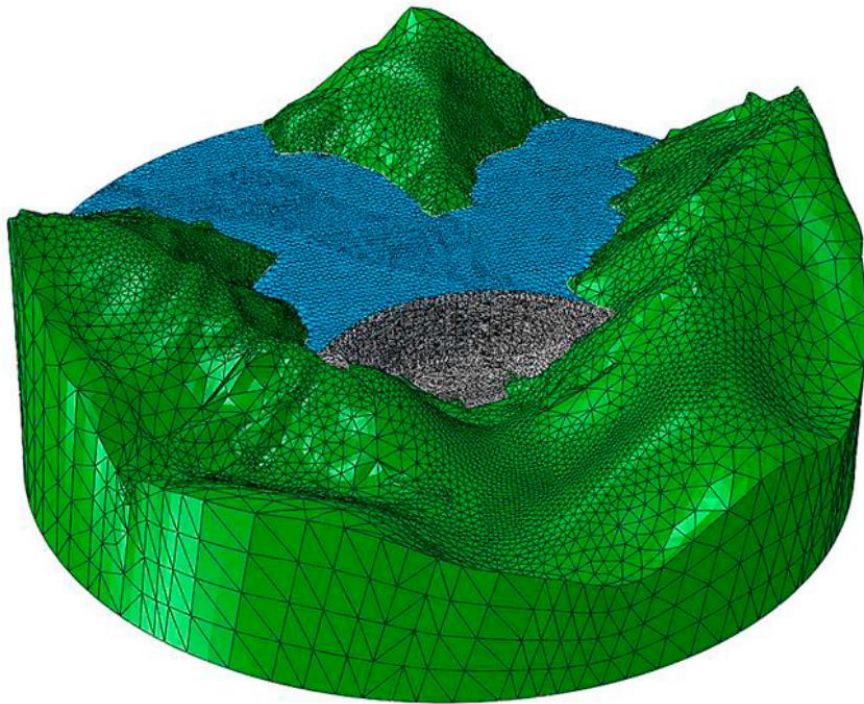
- **STATI LIMITE, PERFORMANCE RICHIESTE E VERIFICHE DI SICUREZZA**



Modelli per l'analisi sismica

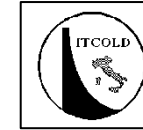


ACCURATEZZA DELLA DESCRIZIONE GEOMETRICA



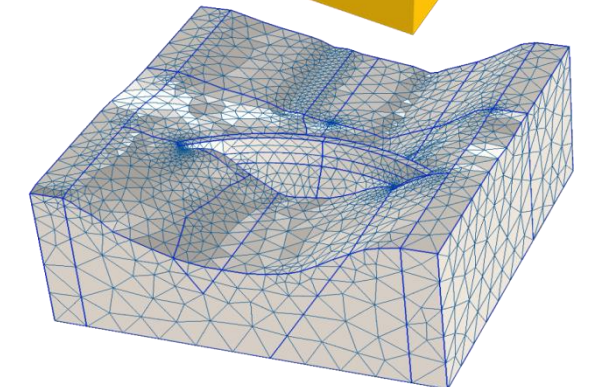
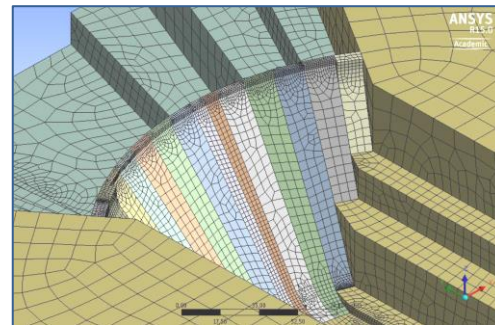
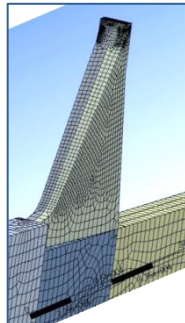
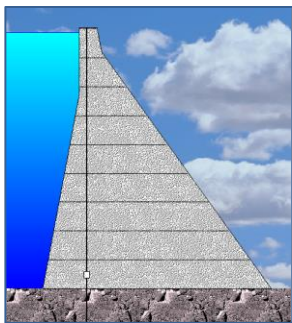
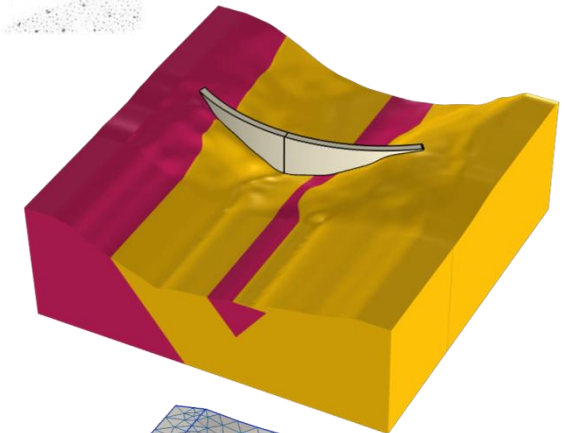
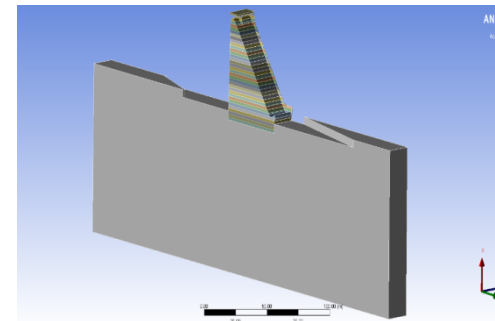
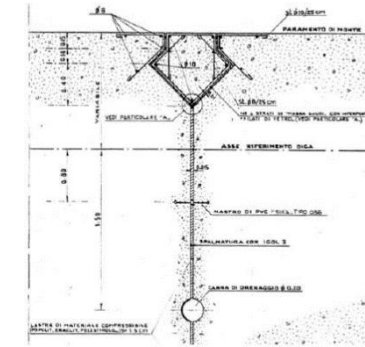
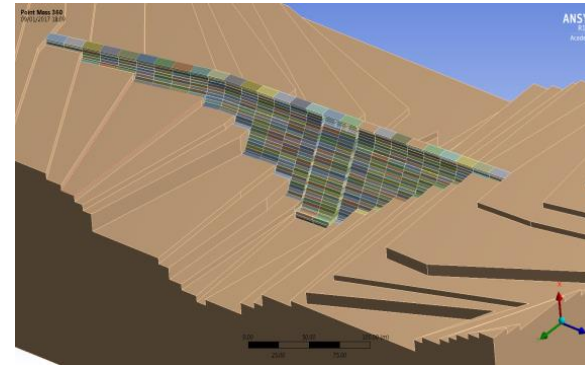
Buffi G., Manciola, P., De Lorenzis, L., Cavalaglia, N., Comodinia, F., Gambic, A., Gusella, V., Mezzi, M., Niemeierd, W., Tamagnini, C.
Calibration of finite element models of concrete arch-gravity dams using dynamical measures: the case of Ridracoli
X International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2017 - Procedia Engineering 199 (2017) 110–115

Modelli per l'analisi sismica



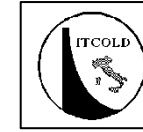
ACCURATEZZA DELLA DESCRIZIONE GEOMETRICA

- OGGETTO DELLA VALUTAZIONE
- SCENARIO DA SIMULARE
- FORMA IN PIANTA DELLA DIGA
- PRESENZA DI GIUNTI DI CONTRAZIONE
- FORMA DELLA STRETTA
- CARATTERISTICHE DEL TERRENO



UNIVERSITÀ DI PISA

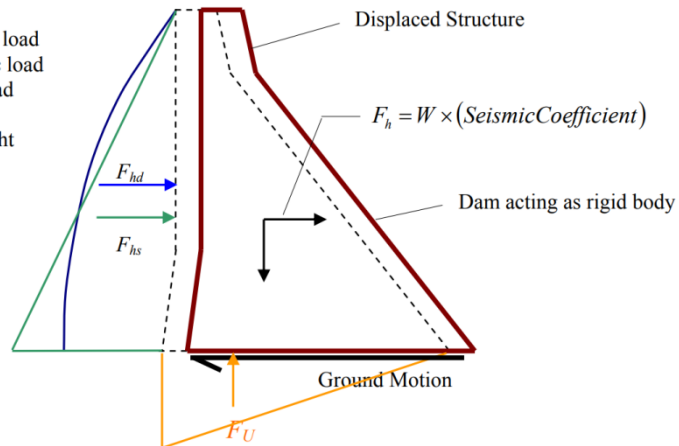
La modellazione dell'azione sismica



MOTO SISMICO DI BASE PER IL PROGETTO

COEFFICIENTE SISMICO

F_h = Seismic inertia load
 F_{hd} = Hydrodynamic load
 F_{hs} = Hydrostatic load
 F_u = Uplift load
 W = Structure weight



Tratto da EM 1110-2-6053

SPETTRO DI RISPOSTA

parametri desunti dalle *mappe di pericolosità*

probabilità di superamento di un certo valore di accelerazione in un dato intervallo di tempo

specifiche indagini di sito

studi deterministici o probabilistici

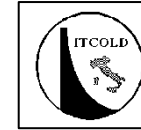


In Italia, se nel sito della diga è $a_g \geq 0.15$ g per un tempo di ritorno di 475 anni, deve essere effettuato lo studio sismotettonico del sito

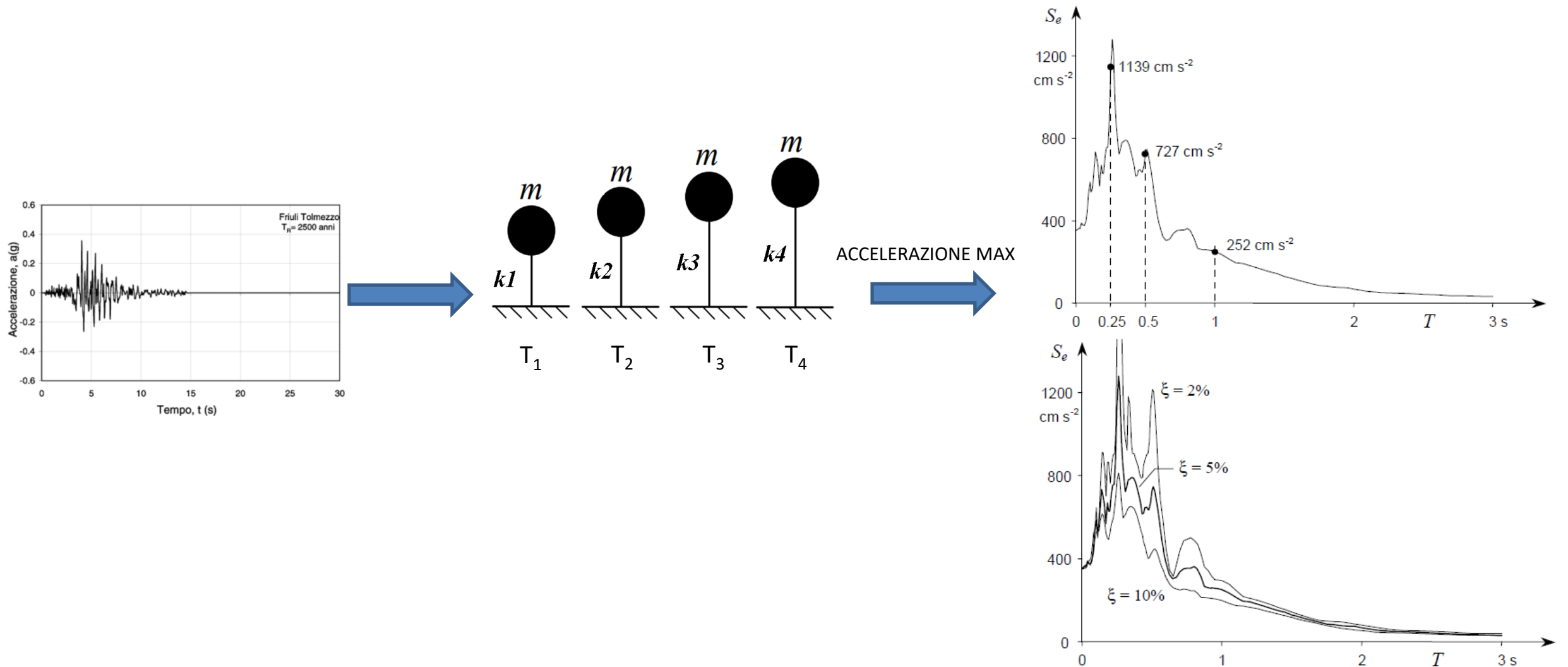
STORIE TEMPORALI

storie di accelerazione , spostamento o velocità registrate o generate

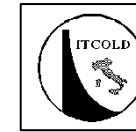
La modellazione dell'azione sismica



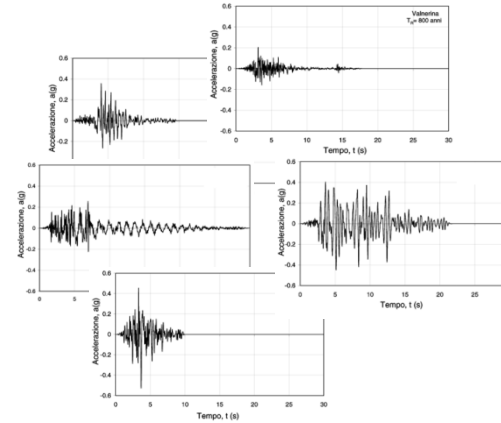
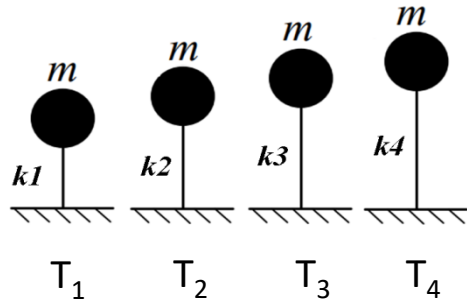
SPETTRO DI RISPOSTA



La modellazione dell'azione sismica



SPETTRO DI RISPOSTA



SPETTRO INVILUPPO

SPETTRO NORMALIZZATO

SPETTRO DI PROGETTO

☐ Ricerca per coordinate
 LONGITUDINE: 10,4147 LATITUDINE: 43,7118

☒ Ricerca per comune
 REGIONE: Toscana PROVINCIA: Pisa COMUNE: Pisa

Elaborazioni grafiche:
 Grafici spettri di risposta
 Variabilità dei parametri

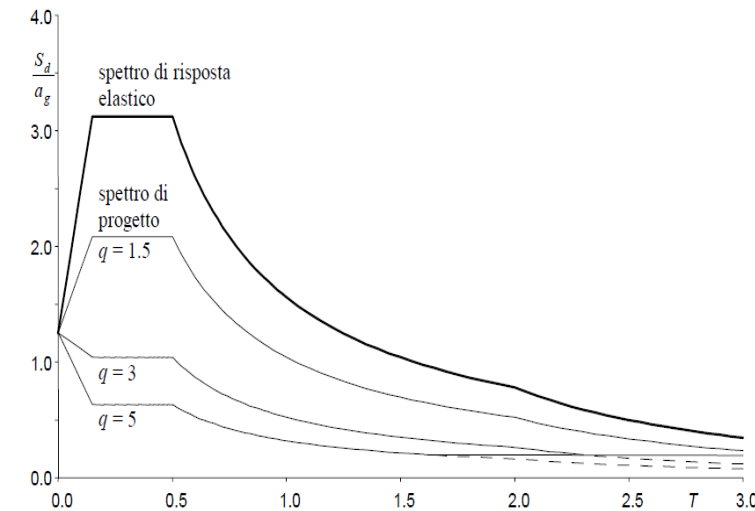
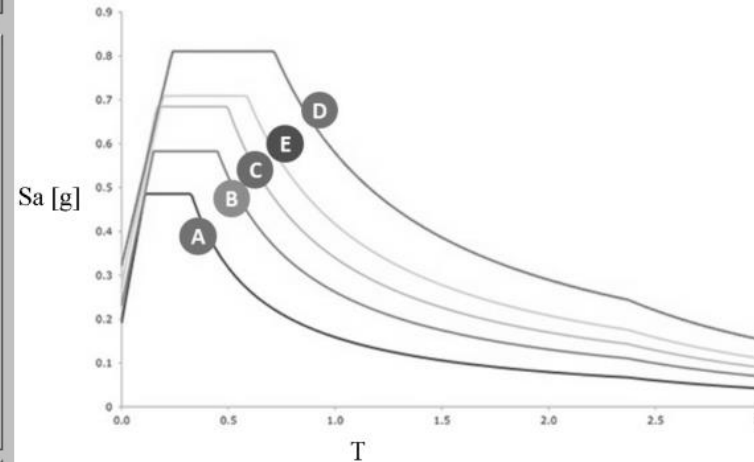
Elaborazioni numeriche:
 Tabella parametri

Nodi del reticolo intorno al sito
 km 7,5
 -7,5 20046 20047
 -20268 -20263 km
 -7,5

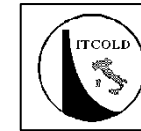
Reticolo di riferimento
 Controllo sul reticolo:
☒ Sito esterno al reticolo
☒ Interpolazione su 3 nodi
☒ Interpolazione corretta
 Interpolazione:
 superficie rigata

La "Ricerca per comune" utilizza le coordinate ISTAT del comune per identificare il sito. Si sottolinea che all'interno del territorio comunale le azioni sismiche possono essere significativamente diverse da quelle così individuate e si consiglia, quindi, la "Ricerca per coordinate".

INTRO **FASE 1** FASE 2 FASE 3



la modellazione delle azioni inerziali dell'acqua



MODELLO ACUSTICO Westergaard (1933)

«... Since the involved motions are small, the relatively simple equations may be used, that apply to sound in liquids. ... »

EQUAZIONE DI D'ALAMBERT

Equazione di Navier-Stokes (fluidi reali):

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla(\vec{u}) \right) = \rho \vec{f} + \nabla(\vec{T})$$

Equazione delle onde di D'Alembert:

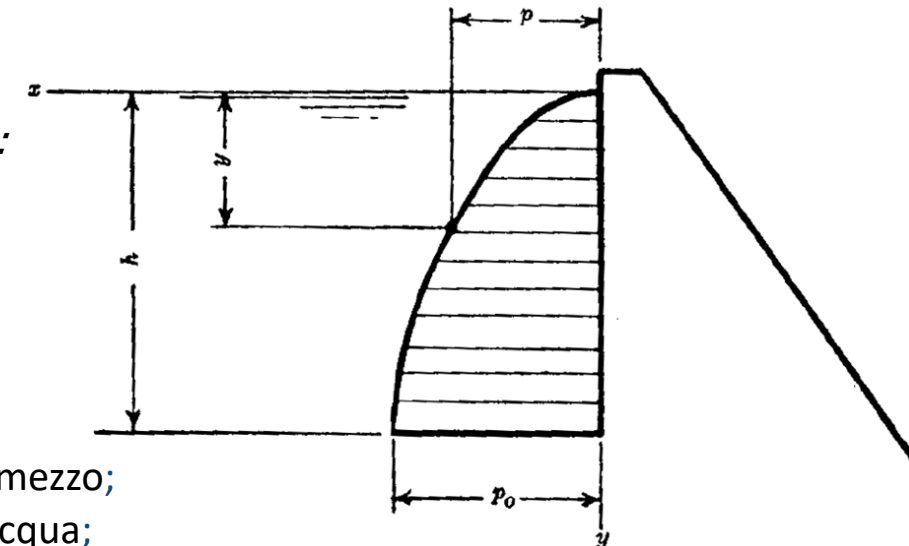
$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

p pressione;

$c = \sqrt{k/\rho}$ velocità del suono nel mezzo;

k modulo di compressibilità dell'acqua;

ρ densità dell'acqua;



Ipotesi:

- **Fluidi globalmente in quiete**
- **Fluidi non viscosi**
- **Piccole oscillazioni delle particelle fluide**

Condizione di **parete rigida sul fondo del bacino**

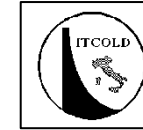
Condizione di **pressione nulla in corrispondenza del pelo libero**

Condizione di **accelerazione prescritta sul paramento della diga**

Condizione di **bacino infinito a monte**

Moto alla base con **periodo superiore a quello della struttura**

la modellazione delle azioni inerziali dell'acqua



PRESSIONI IDRODINAMICHE

Westergaard

$$P_{ew} = \frac{2}{3} C_e \alpha y \sqrt{hy}$$

$$C_e = \frac{51}{\sqrt{1 - 0.72 \left(\frac{h}{1000 T} \right)^2}}$$

P_{ew} = pressione idrodinamica alla generica profondità y in kilopound

h = altezza totale del serbatoio in feet;

α = coefficiente sismico adimensionale;

T = periodo della sollecitazione sismica dominante;

y = quota a partire dal coronamento.

Zangar

$$p_z = a \rho c y_0$$

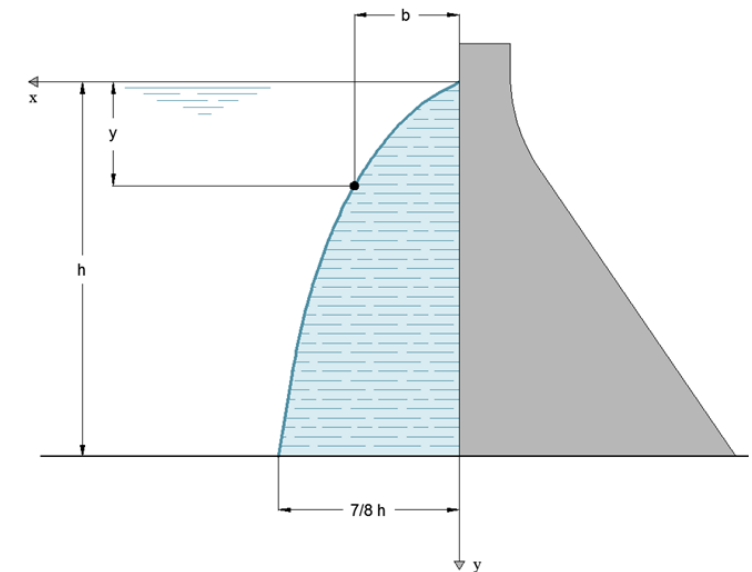
$$c = \frac{c_m}{2} \left[\frac{y}{y_0} \left(2 - \frac{y}{y_0} \right) + \sqrt{\frac{y}{y_0} \left(2 - \frac{y}{y_0} \right)} \right]$$

$$c_m = -0.0073\alpha + 0.7412,$$

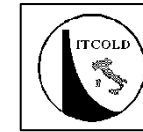
α = inclinazione del paramento rispetto alla verticale

a = accelerazione massima al sito

y_0 = massima altezza d'acqua



la modellazione delle azioni inerziali dell'acqua

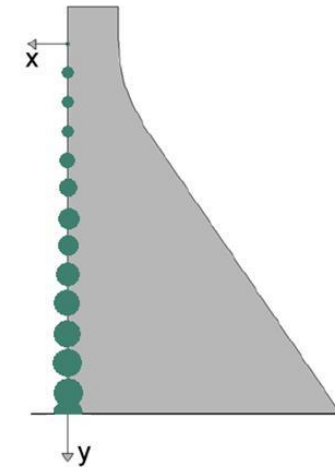
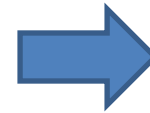
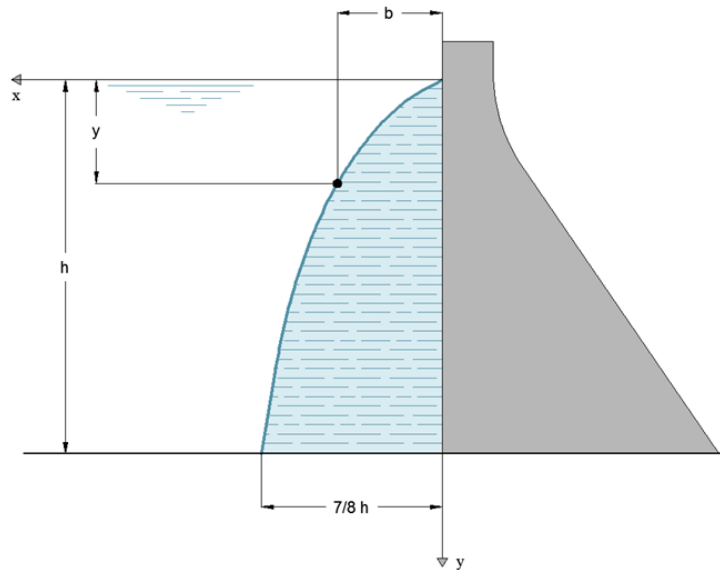


MODELLO A MASSE AGGIUNTE

FORZE DI
PRESSIONE



FORZE
D'INERZIA



$$F_{water} = M_{agg} \cdot \alpha$$

α = coefficiente sismico

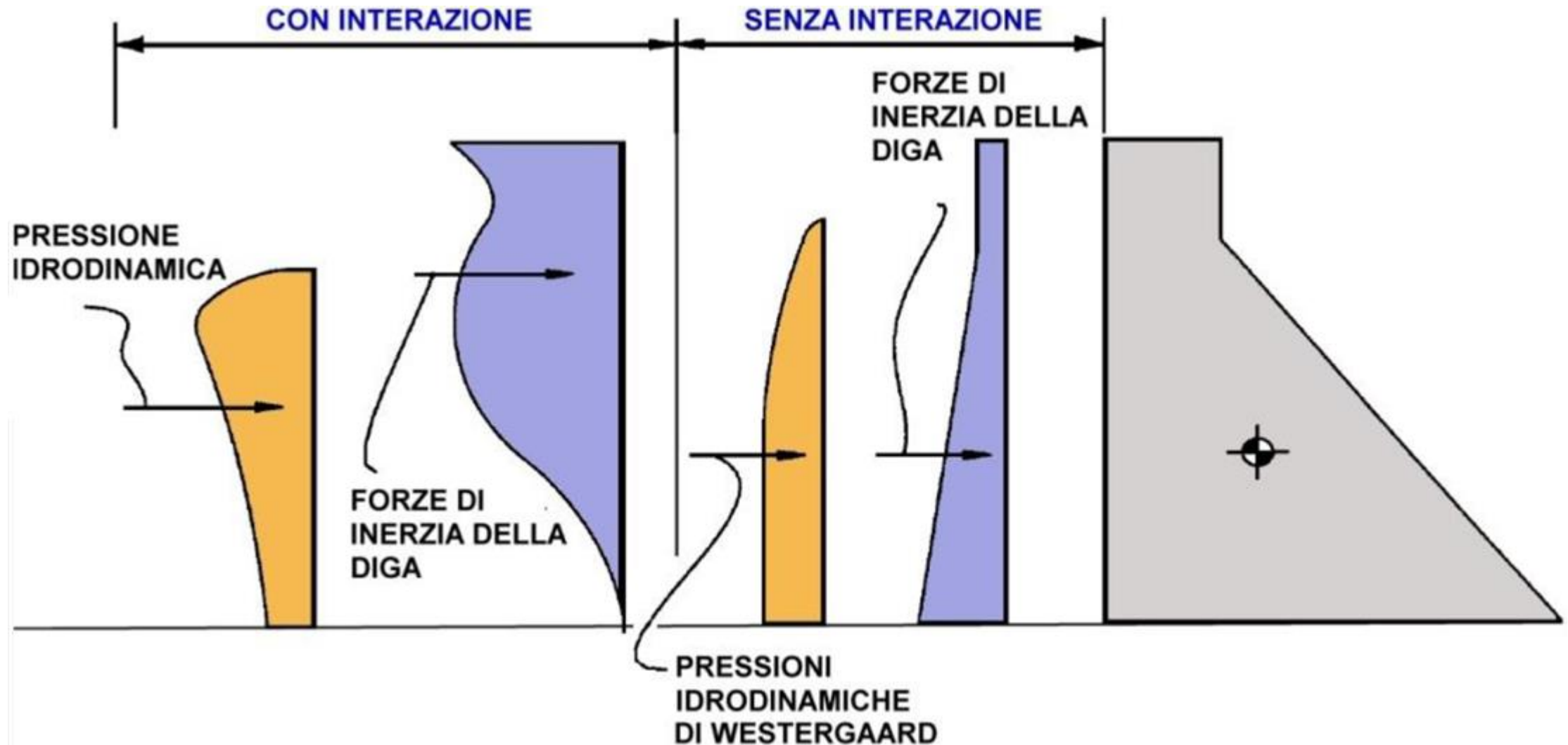
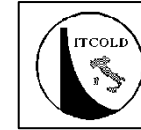
Massa aggiunta di Westergaard

$$M_{West} = \int_0^h \frac{7}{8} \gamma_w \sqrt{hy}$$

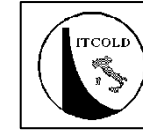
Massa aggiunta di Chopra

$$M_{Chopra} = 0.54 \gamma_w h^2$$

Modelli di interazione

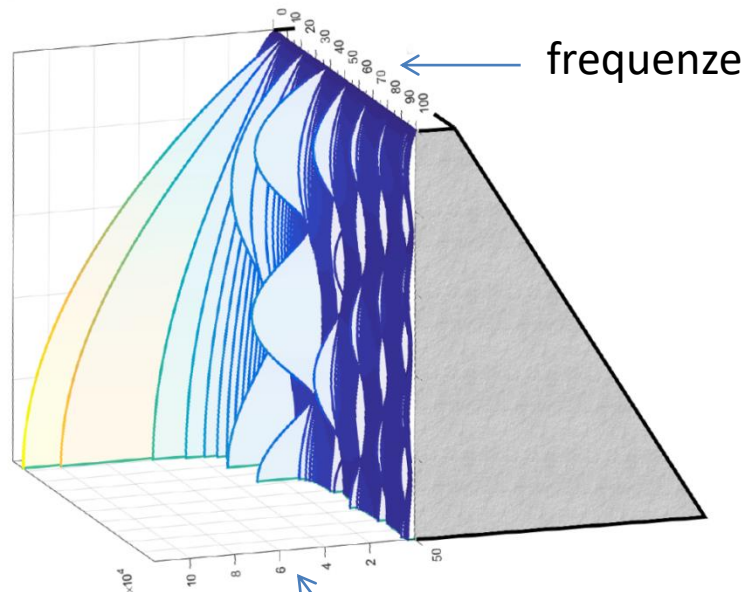


la modellazione dell'interazione fluido-struttura

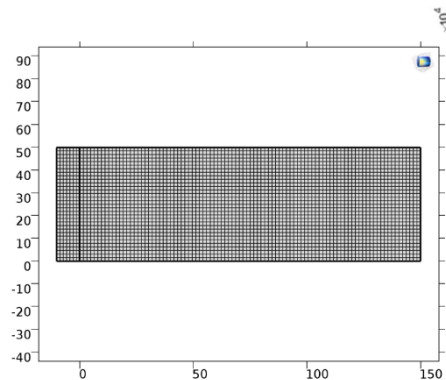


Andamento delle pressioni idrodinamiche con la quota e la frequenza della forzante

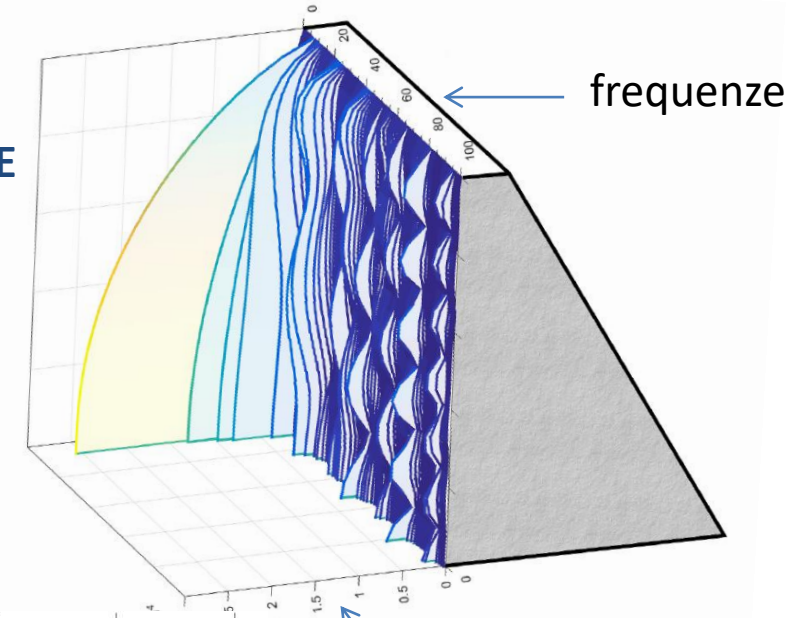
DIGA RIGIDA



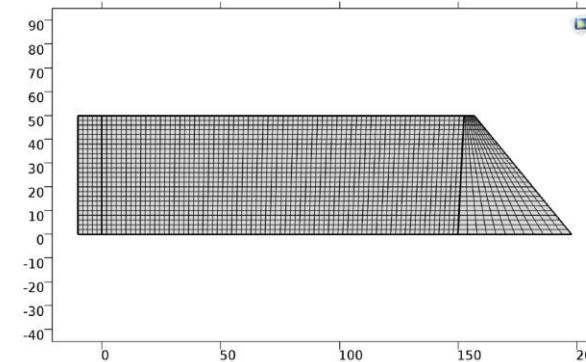
ampiezze



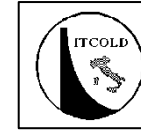
DIGA DEFORMABILE



ampiezze



Modellazione del terreno

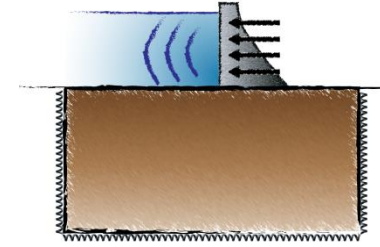


CARATTERISTICHE DELLA PORZIONE DI TERRENO DA MODELLARE

- **DIMENSIONI**



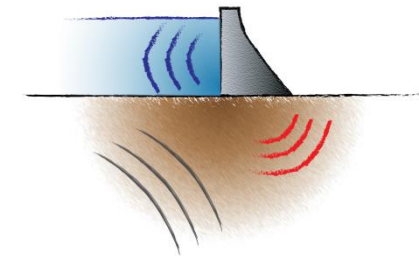
Interazione **cinematica**:
influenza della rigidezza
del terreno



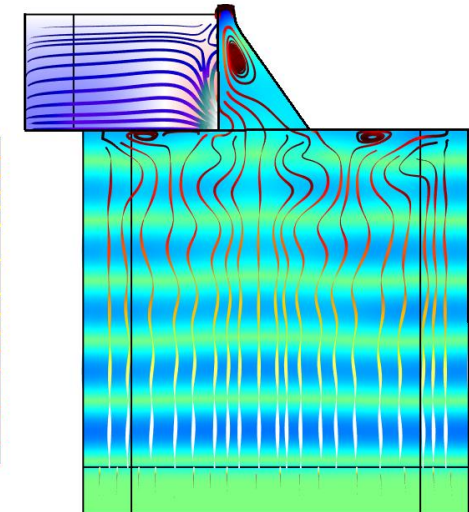
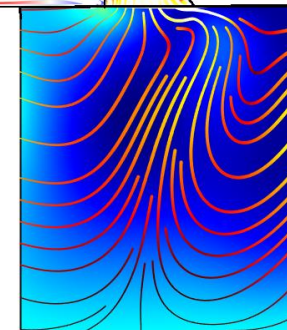
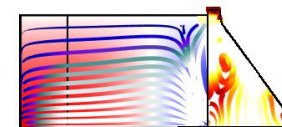
- **TERRENO CON MASSA O SENZA MASSA**



Interazione **inerziale**:
influenza della massa
del terreno

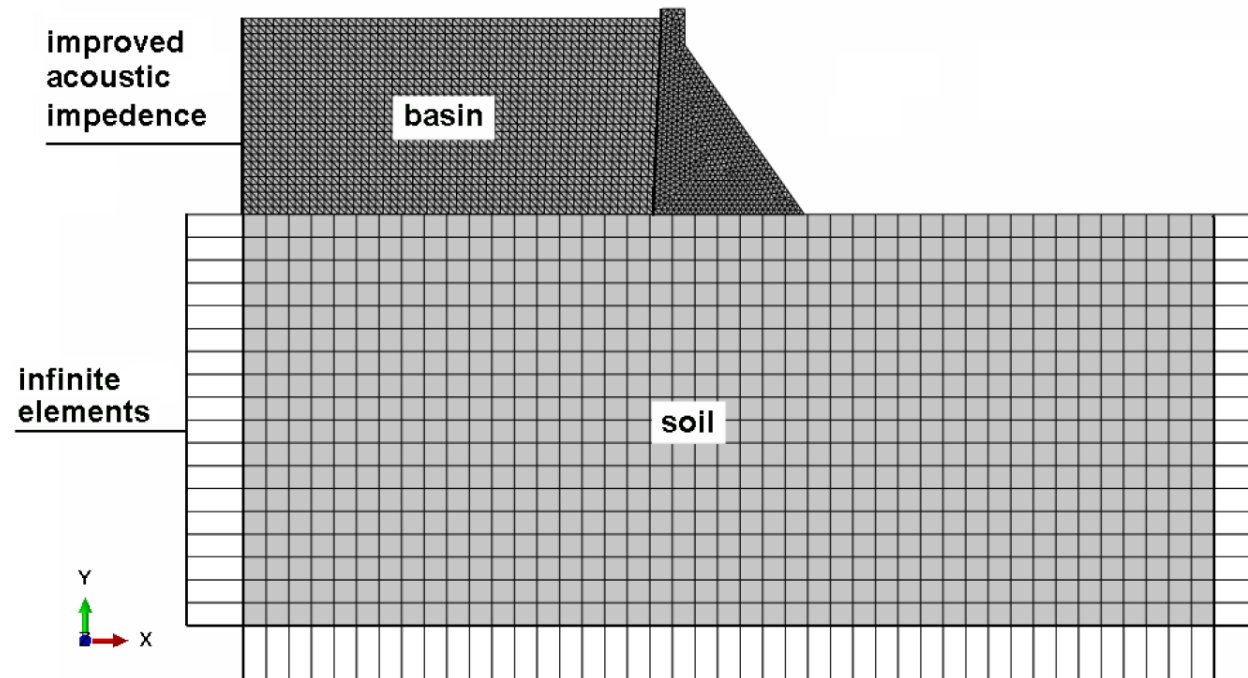
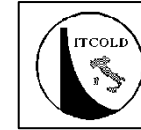


- **APPLICAZIONE E DECONVOLUZIONE DEL SEGNALE**



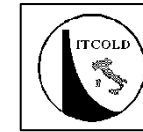
- **CONTORNI ASSORBENTI**

Interazione fluido-terreno-struttura

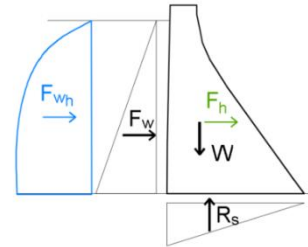


A. De Falco, M. Mori, and G. Sevieri *Soil-structure interaction modeling for the dynamic analysis of concrete gravity dams* in proc. of COMPDYN 2019 - 7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering - M. Papadrakakis, M. Fragiadakis (eds.) Crete, Greece, 24–26 June 2019

Metodi di analisi sismica



ANALISI PSEUDO-STATICA

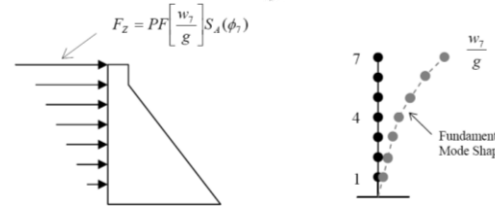


Forze idrodinamiche

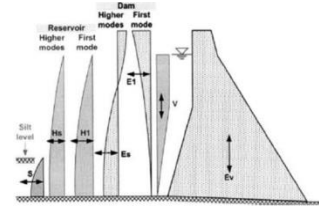


Forze d'inertia della diga calcolate con accelerazione pari all'ordinata spettrale ma applicate nel baricentro

FORZE LATERALI EQUIVALENTI

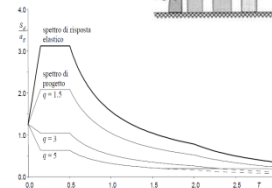


ANALISI PSEUDO-DINAMICA



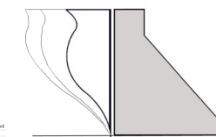
- deformabilità della struttura e del terreno
- primo modo di vibrare della struttura
- interazione fluido-struttura
- sedimenti di fondo

ANALISI CON SPETTRO DI RISPOSTA



ANALISI PUSHOVER

Curva di spinta – analisi statica non lineare



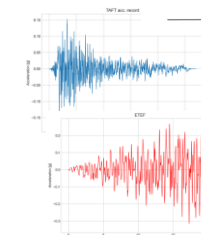
ANALISI CON TIME HISTORY



Incremental Dynamic Analysis (IDA)



Endurance Time Analysis (ETA)



- curve di comportamento
- materiale non lineare

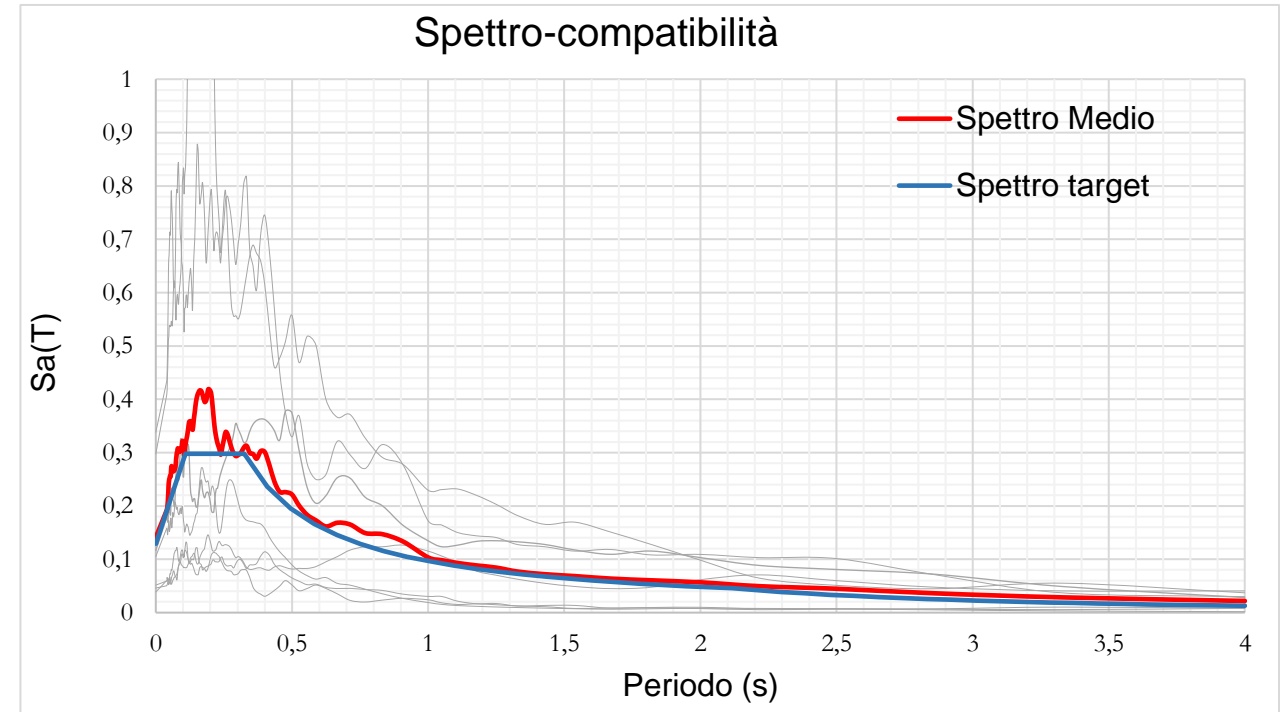
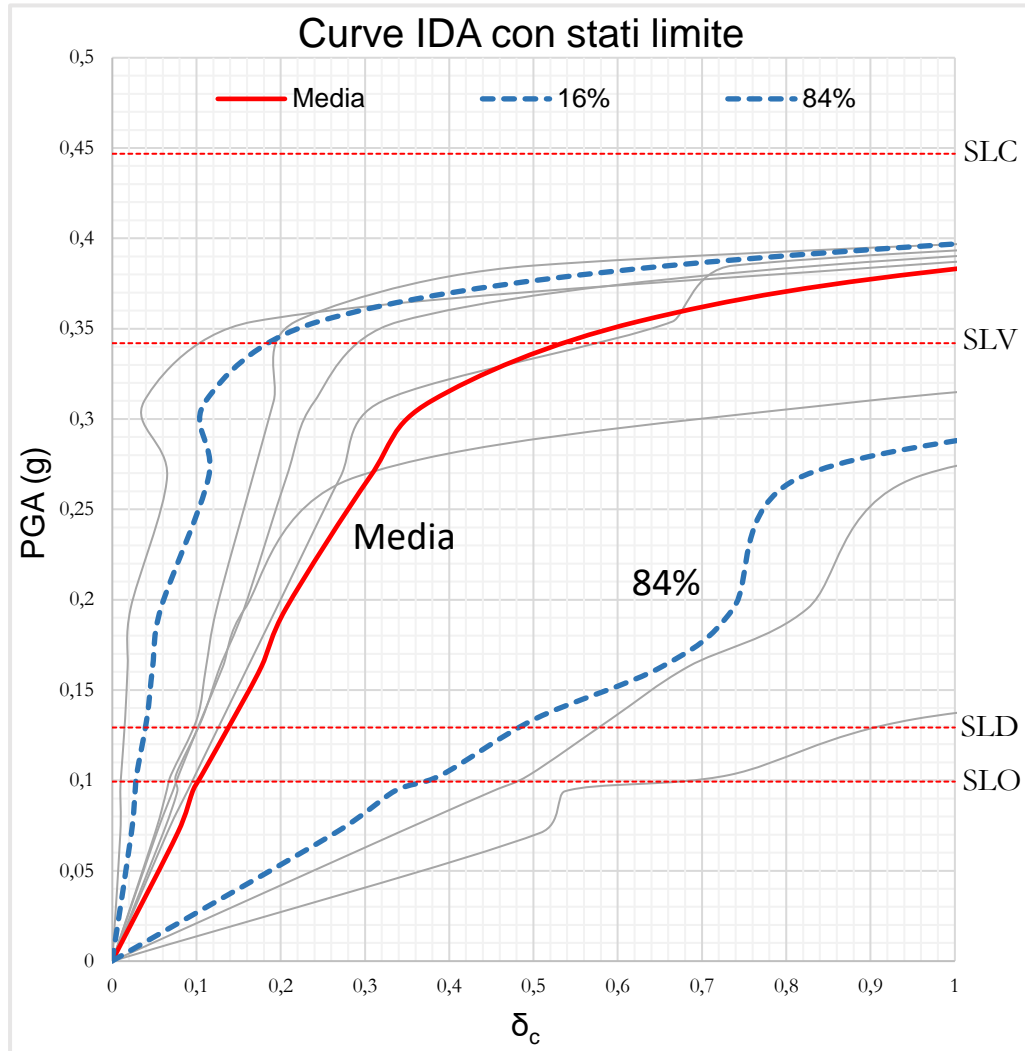
materiale lineare

LE CURVE DI COMPORTAMENTO

Incremental Dynamic Analysis (IDA): curva di comportamento che mette in relazione l'intensità dell'azione eccitante con un output rilevante per la sicurezza della struttura (per esempio, il drift di sommità), costruita attraverso analisi dinamiche con accelerogrammi opportunamente scalati.

Endurance Time Analysis (ETA): curva di comportamento ottenuta con un'unica analisi dinamica al passo. Pushover dinamica con azione sismica di intensità crescente nel tempo, detta Endurance Time Excitation Function (ETEF).

INCREMENTAL DYNAMIC ANALYSIS



Storie temporali reali

Selezione gruppo di 7
accelerogrammi

Spettro compatibilità NTC
2008.

Terremoto
scenario

Magnitudo
Distanza
Sito

ENDURANCE TIME ANALYSIS

azione sismica di intensità crescente nel tempo, detta Endurance Time Excitation Function (ETEF).
L'ETEF è costruita appositamente affinché il suo spettro di risposta cresca linearmente nel tempo.

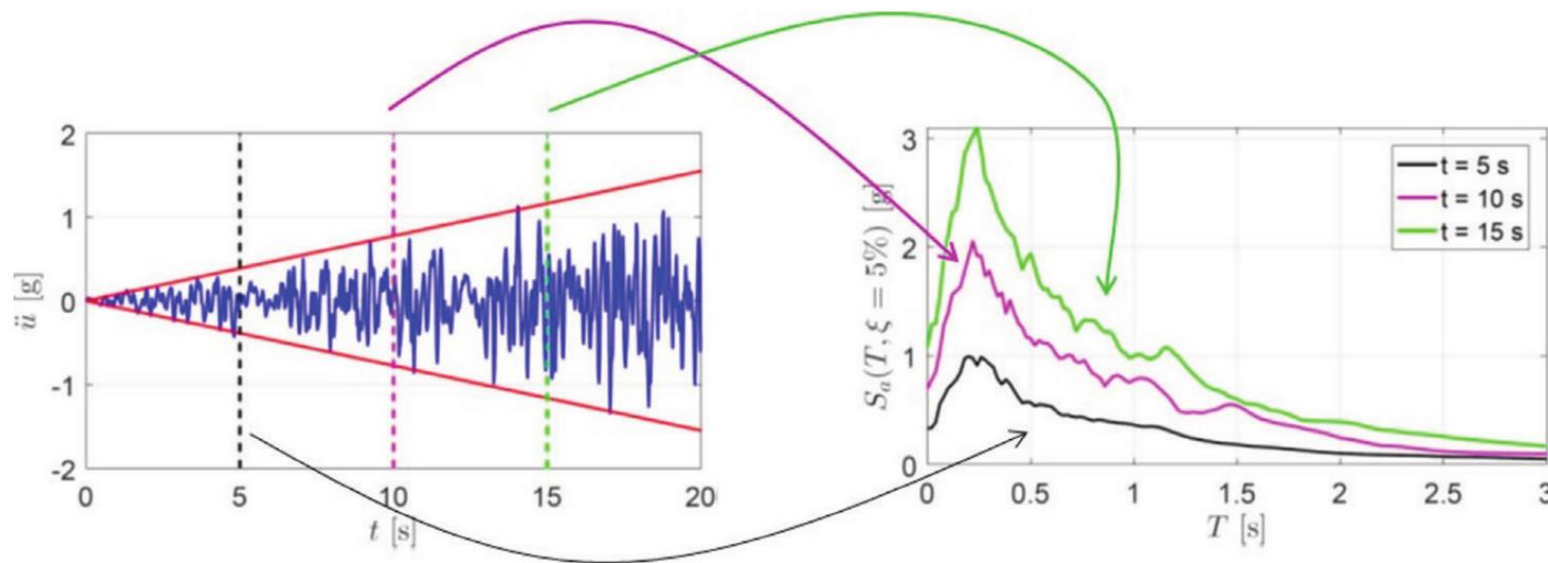
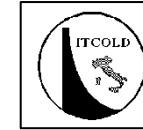


Immagine tratta da: Salamon, J.W., M.A. Hariri-Ardebili, H.E. Estekanchi, and M.R. Mashayekhi (2019). 'Seismic Assessment of a Dam-Foundation-Reservoir System Using Endurance Time Analysis'. In *Sustainable and Safe Dams Around the World*, edited by Jean-Pierre Tournier et al. 2649–59. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429319778-236>.

Metodi di analisi sismica



DECRETO 26 giugno 2014 **Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)** **NTD2014**

punto D.I.3 tipi di analisi sismica:

analisi pseudostatica:

- sovrappressione dinamica; → **azioni di Zangar**
- carichi statici equivalenti → **$\alpha \times M_s$** → massa della struttura
↓
coefficiente sismico calcolato dallo spettro elastico in base a:
• periodo proprio della struttura
• Interazione col terreno
• livello di invaso
→ possibilità di scalare lo spettro elastico (q?)

analisi dinamica lineare:

- spettro di risposta

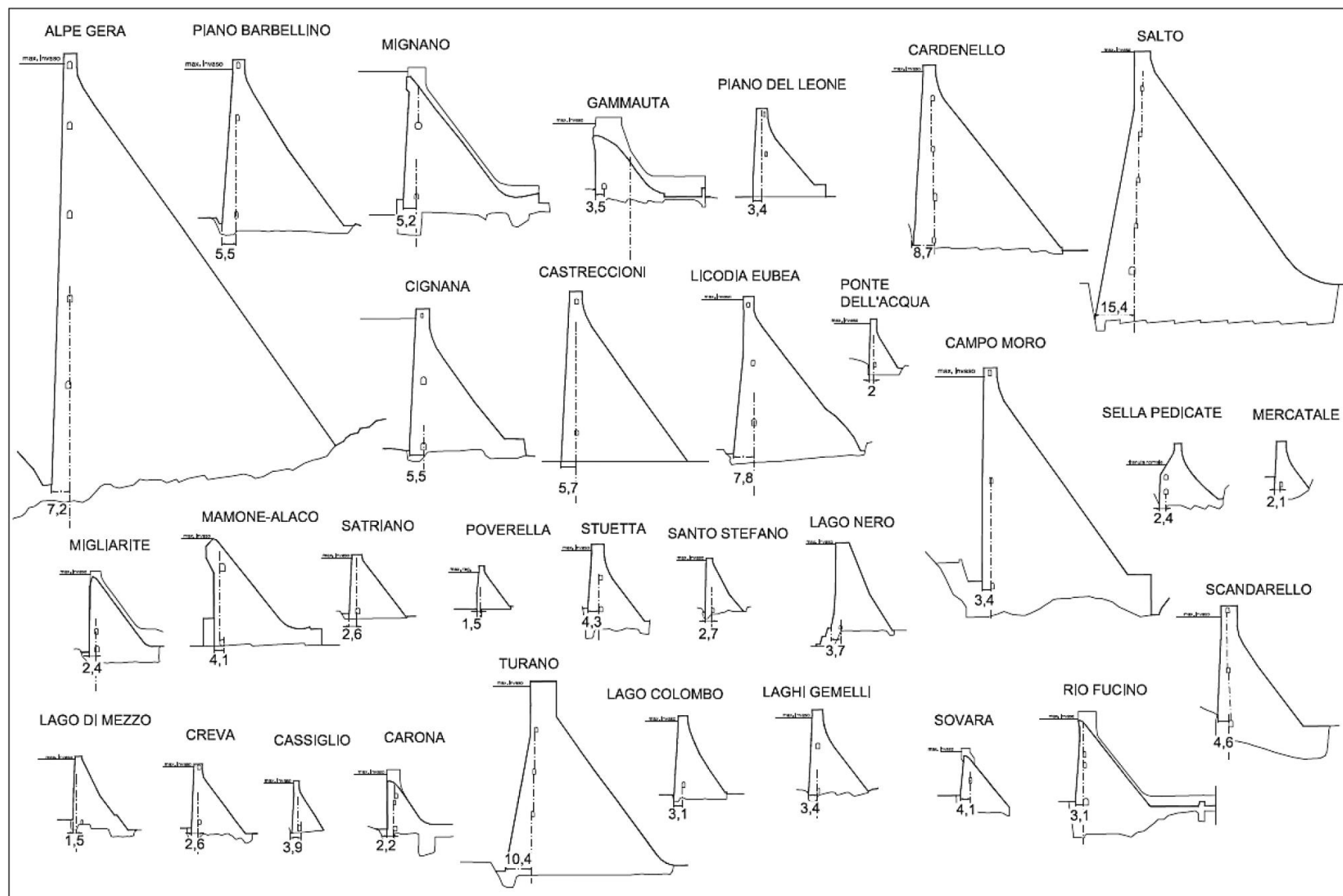
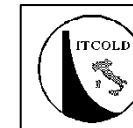
analisi statica non lineare:

da valutare il legame costitutivo e il criterio per la trasformazione nell'oscillatore semplice

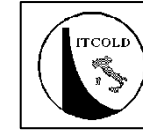
analisi dinamica non lineare:

- accelerogrammi

Analisi comparativa di dighe italiane



Analisi comparativa di dighe italiane

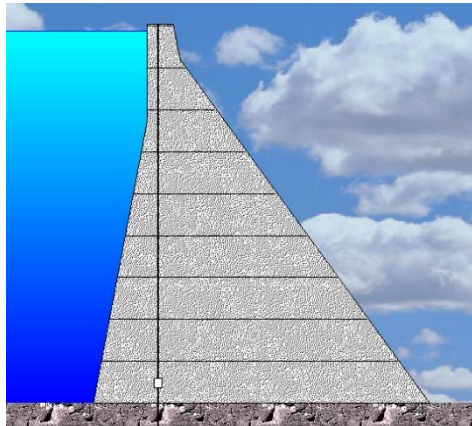


ANALISI PARAMETRICHE

METODI

Pseudo statico

Pseudo dinamico



CADAM 2D - Computer Analysis of gravity DAMs r. 2.0.3

PARAMETRI VARIABILI

Azioni

PGA verticale

Modifica delle sottopressioni

Materiale

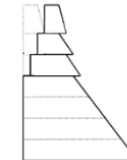
Angolo di attrito

Resistenza a trazione

VALORI RICERCATI

PGA di collasso

Modalità e altezza di rottura



Caso A : sottopressioni non modificate, resistenza a trazione 0 kPa

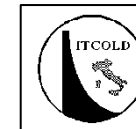
Caso B : sottopressioni modificate, resistenza a trazione 0 kPa

Caso C : sottopressioni modificate, resistenza a trazione 500 kPa

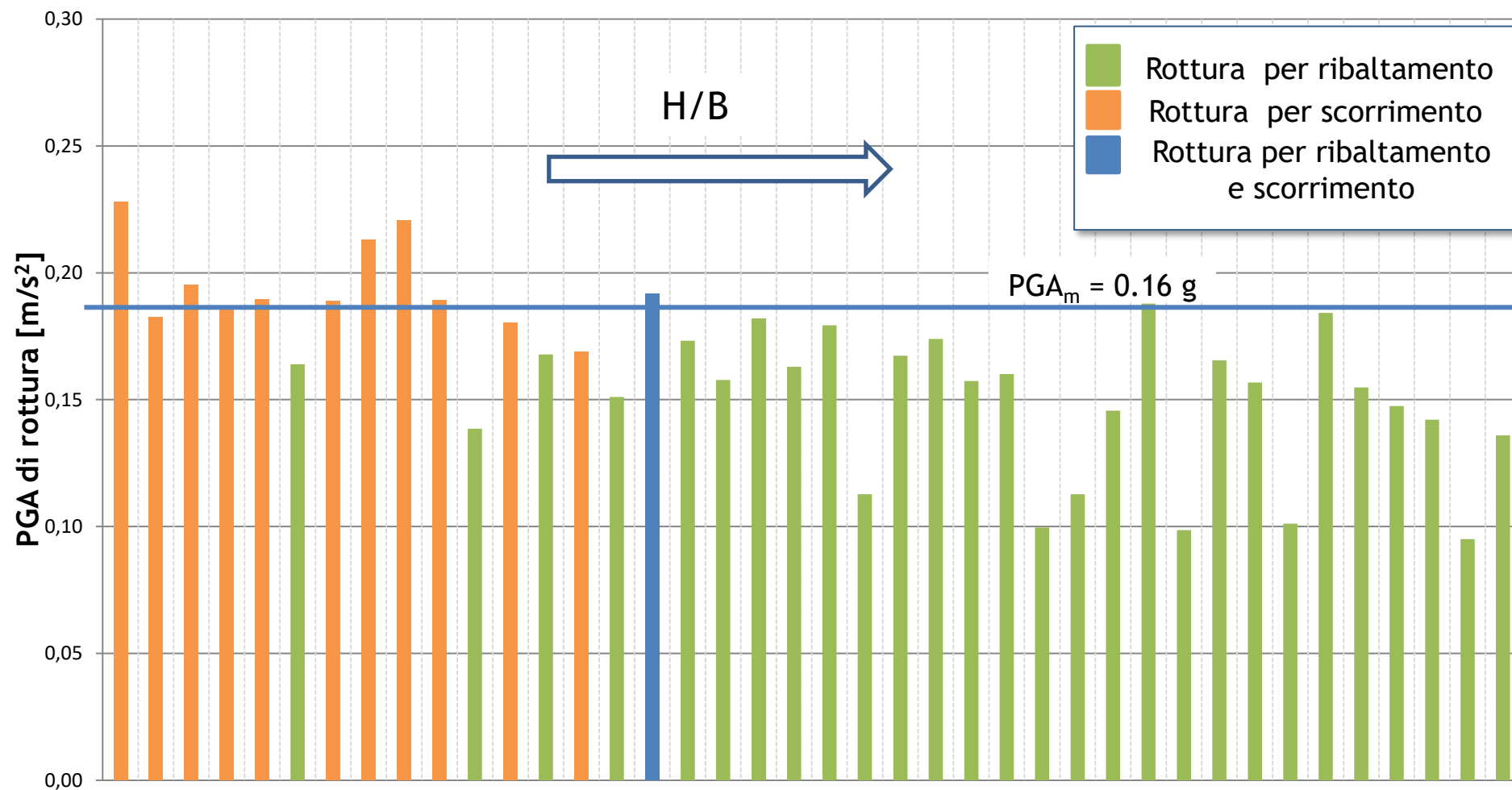
Caso D : sottopressioni modificate, resistenza a trazione 1000 kPa

TESI di laurea magistrale – premio ITCOLD 2018 Greta Sbragia «Metodi di analisi semplificati per grandi dighe a gravità esistenti con applicazione a un caso studio»
relatori: Anna De Falco e Giacomo Sevieri.

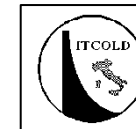
Analisi comparativa di dighe italiane



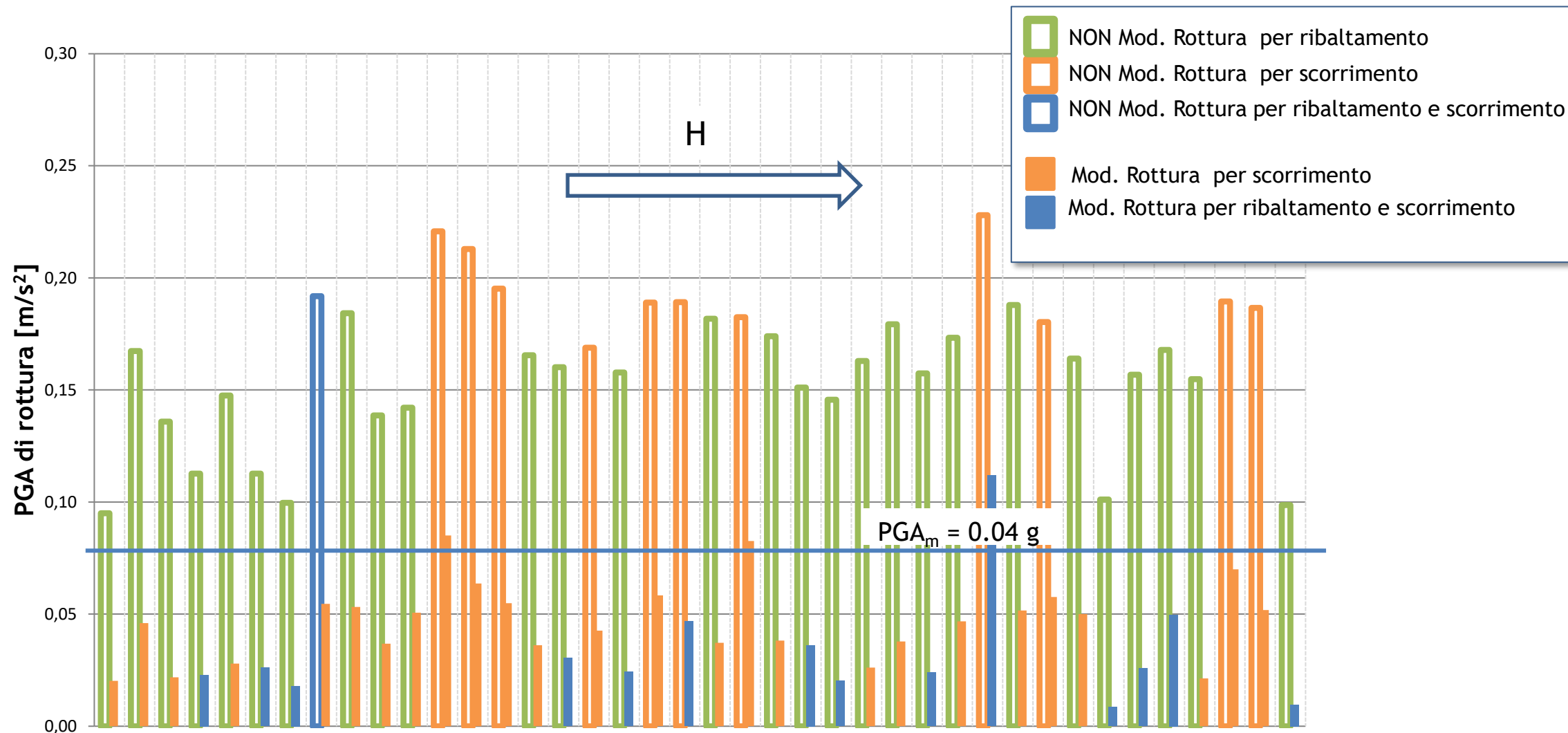
MODIFICA DELLE SOTTOPRESSIONI $f_t = 0$ kPa $\phi 55^\circ$ Metodo PS solo PGA orizzontale



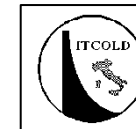
Analisi comparativa di dighe italiane



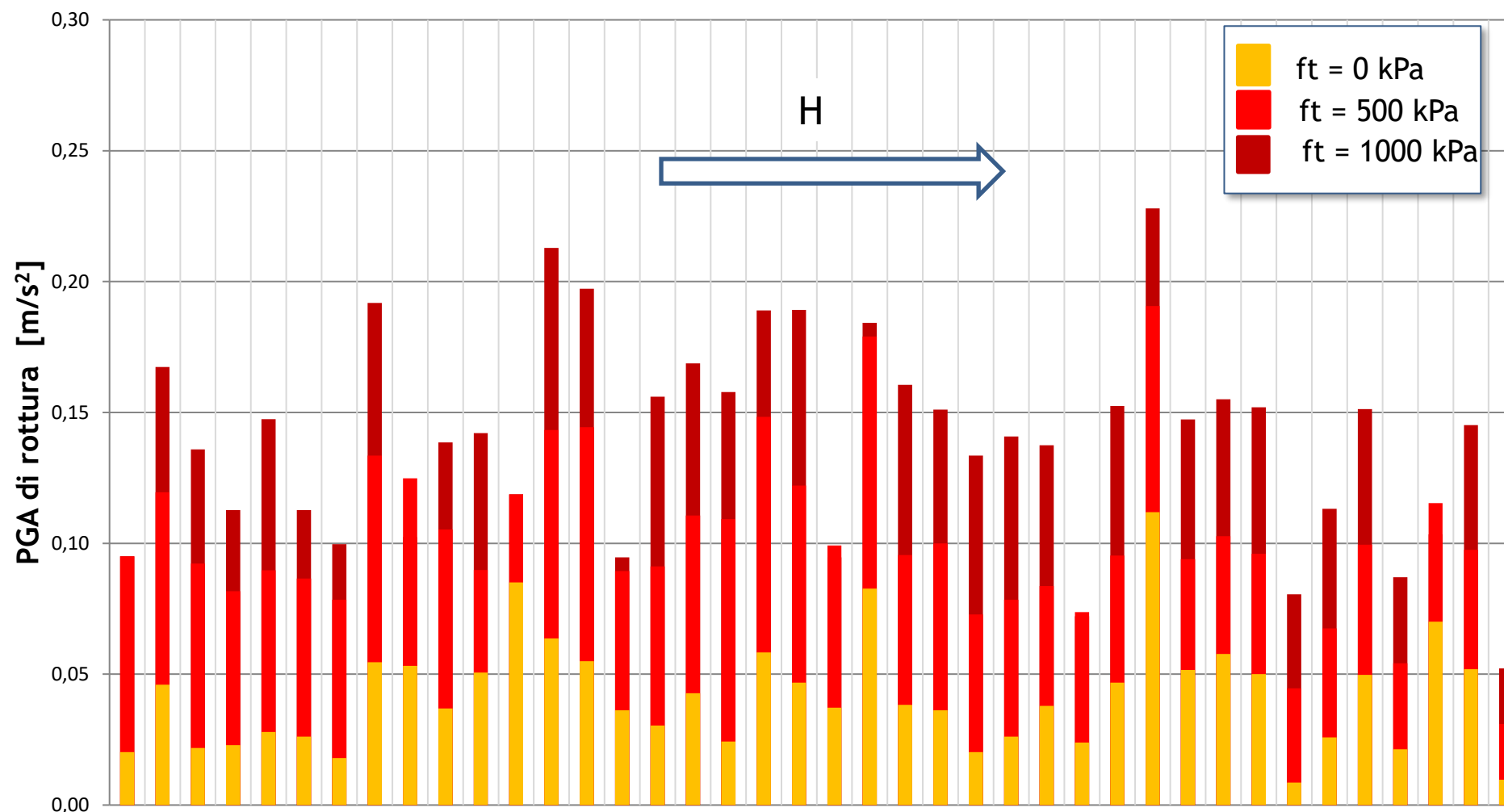
MODIFICA DELLE SOTTOPRESSIONI $f_t = 0$ kPa $\phi = 55^\circ$ Metodo PS solo PGA orizzontale



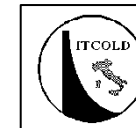
Analisi comparativa di dighe italiane



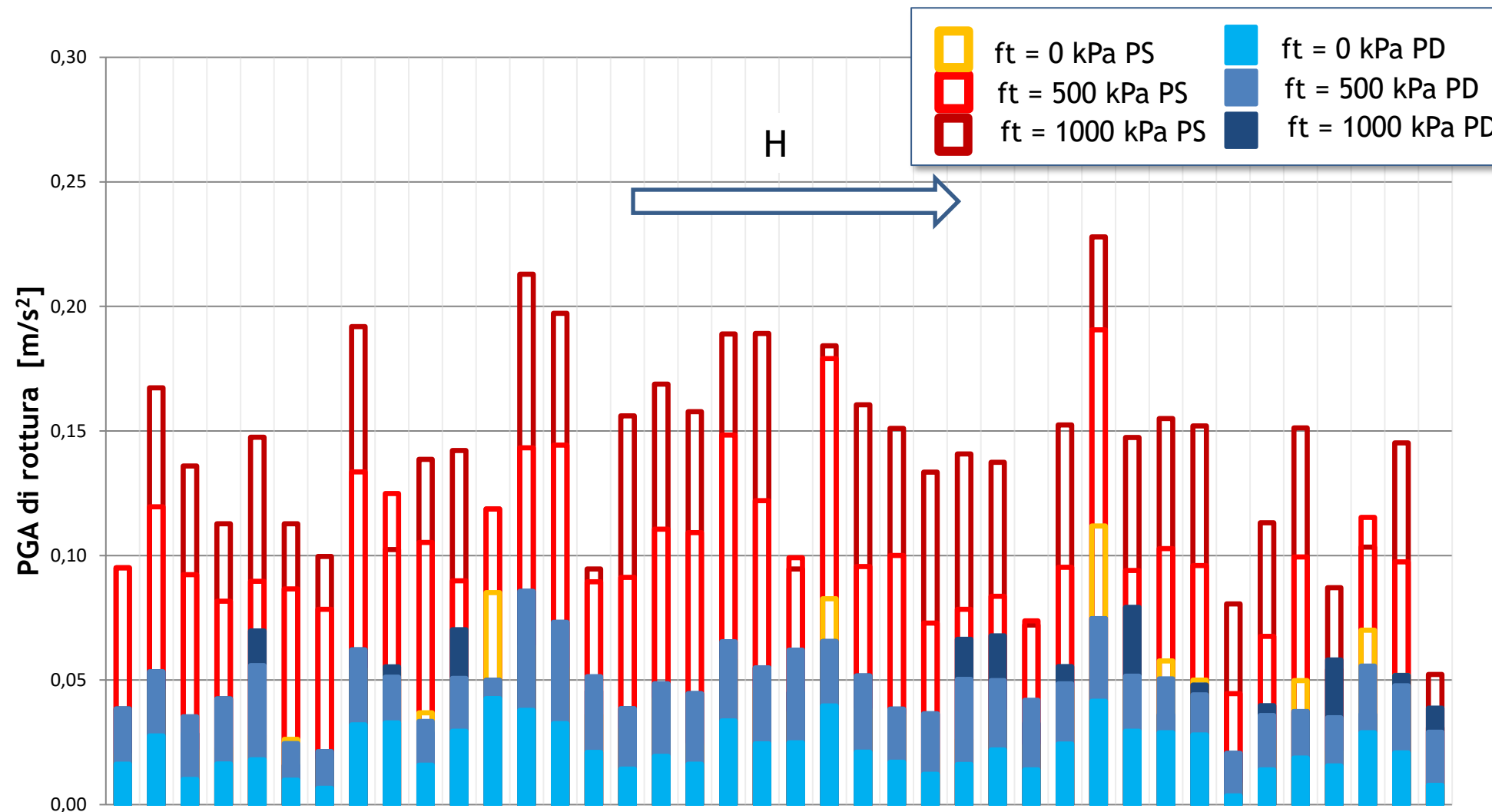
INSERIMENTO RESISTENZA A TRAZIONE ϕ 55° Metodo PS solo PGA orizzontale



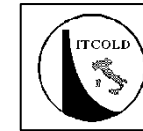
Analisi comparativa di dighe italiane



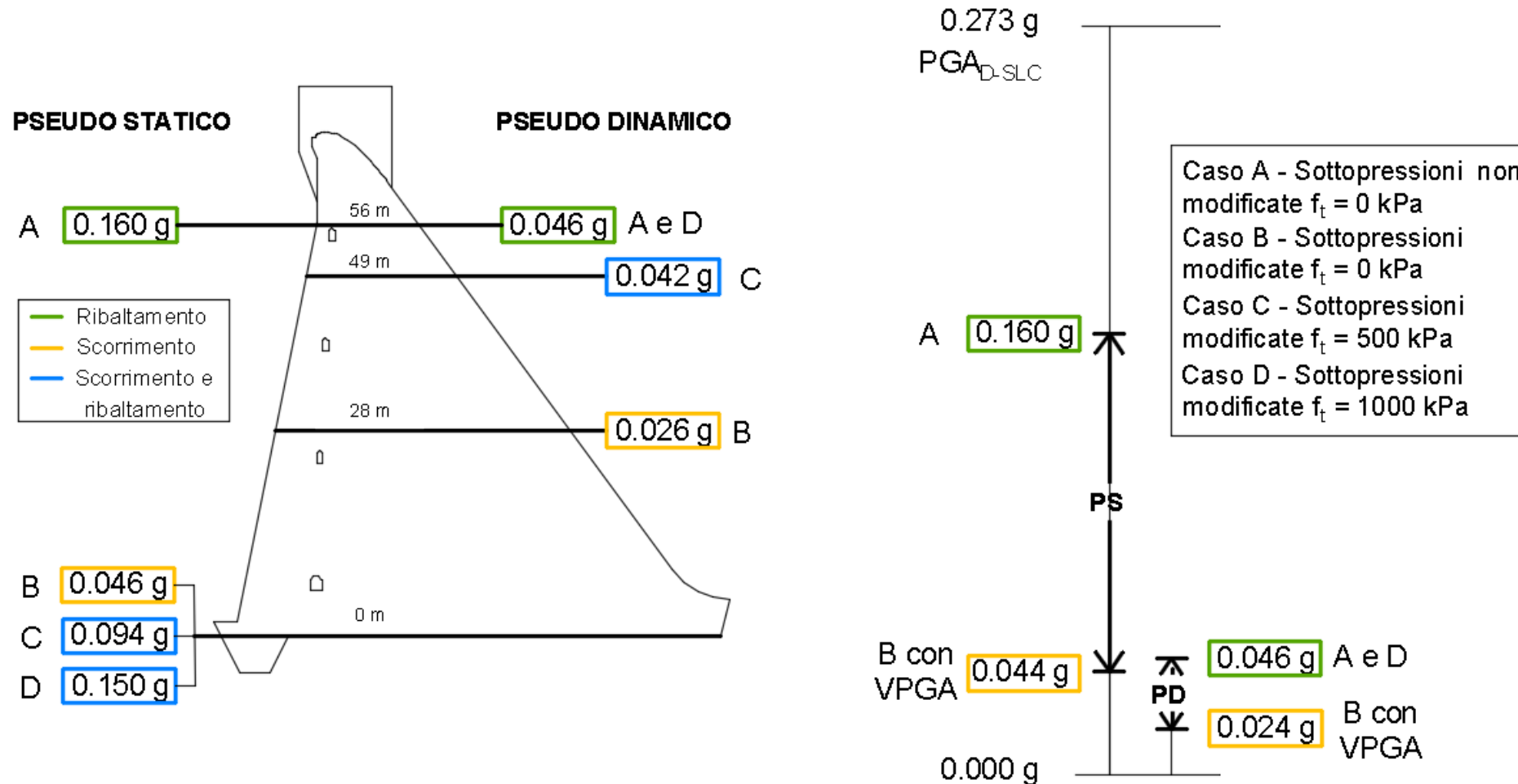
METODO PSEUDO DINAMICO vs PSEUDO STATICO ft varie ϕ 55° solo PGA



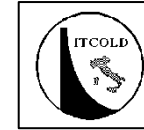
Analisi comparativa di dighe italiane



RISULTATI ANALISI PARAMETRICHE SU UN CASO STUDIO E_c 26000 MPa E_g 60000 MPa








I criteri di prestazione sismica



DM 26 giugno 2014

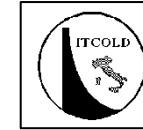
NORME TECNICHE PER LA PROGETTAZIONE E LA COSTRUZIONE DEGLI SBARRAMENTI DI RITENUTA (DIGHE E TRAVERSE)

CONDIZIONI CARATTERISTICHE:

1. normale funzionamento;  **SLO**
2. danni riparabili, senza rilascio incontrollato di acqua;  **SLD**
3. danni non riparabili, senza rilascio incontrollato di acqua;  **SLD**
4. danni che determinano il rilascio incontrollato di acqua, o comunque rischio di perdite di vite umane;  **SLV**
5. collasso della struttura.  **SLC**

- PESO PROPRIO
- SPINTA IDROSTATICA
- COAZIONI D'ORIGINE TERMICA E DA RITIRO
- SOTTOSPINTE
- SPINTA DEL GHIACCIO
- SPINTA DOVUTA ALL'INTERRIMENTO
- AZIONE SISMICA

I criteri di prestazione sismica



DM 26 giugno 2014

NORME TECNICHE PER LA PROGETTAZIONE E LA COSTRUZIONE DEGLI SBARRAMENTI DI RITENUTA (DIGHE E TRAVERSE)

“i livelli di sicurezza richiesti nei confronti degli SLU e SLE devono essere garantiti non soltanto dallo sbarramento in senso stretto, ma anche da tutte le opere che con esso interagiscono e che concorrono a garantire la funzionalità dell’impianto (SLE) e la capacità di ritenuta (SLU)”.

ITCOLD *Dispositivi di intercettazione e scarico (paratoie, valvole, sistemi di azionamento)* Report GdL “Dispositivi di Intercettazione e di Scarico”

*... le paratoie degli sfioratori e gli scarichi di fondo (cioè gli organi di intercettazione che concorrono alla funzione di ritenuta e di controllo del livello di invaso) **devono rimanere azionabili** (quindi anche i motori, le unità di controllo, gli alimentatori e i generatori di emergenza devono rimanere accessibili e funzionanti), e allo stesso tempo **non devono subire deformazioni inelastiche che possano causarne l’inceppamento**...*

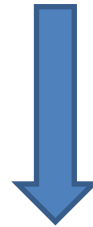
anche le pile di supporto non subiscano deformazioni anelastiche, in particolare nella direzione spalla-spalla dello sbarramento, e che non si verifichino movimenti differenziali dei giunti della struttura di supporto. Fra gli altri modi di rottura si ricordano anche la rottura dei contrappesi o di altre componenti atte ad operare le paratoie e i danneggiamenti causati dalla caduta di elementi massivi (quali travi di ponte, gru a cavalletto, motori, contrappesi, ecc.).

COME STABILIRE SE LA DIGA È SICURA A PARTIRE DAI RISULTATI DEL MODELLO?

QUALE È IL PARAMETRO RAPPRESENTATIVO DI UNA CERTA PERFORMANCE?

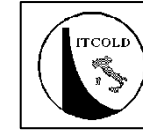
COME INTERPRETARE IL SUPERAMENTO DEL LIMITE DI RESISTENZA DEI MATERIALI NEL MODELLO?

COME INTERPRETARE LA PRESENZA NEL MODELLO DI ZONE DANNEGGIATE O DI UN CERTO VALORE DEL DRIFT?



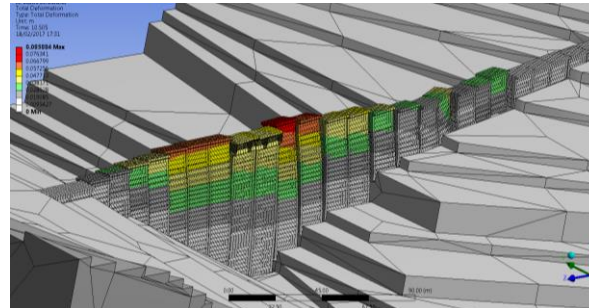
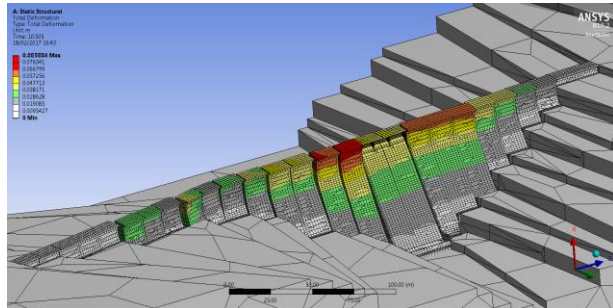
NECESSITÀ DI ANALISI DI SCENARIO E DI CALIBRAZIONE DEI MODELLI

Analisi parametriche

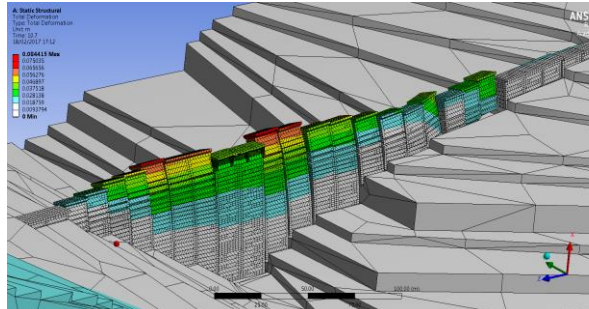
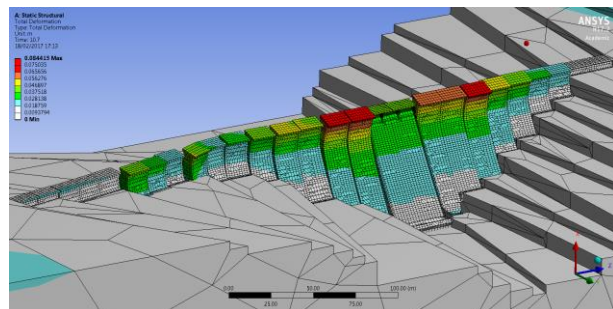


MODELLO A CONCI CON GIUNTI VERTICALI E ORIZZONTALI DOTATI DI ATTRITO

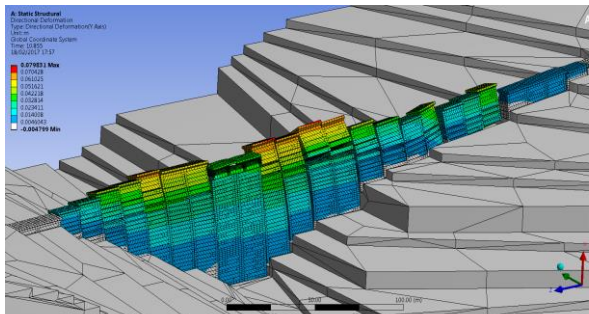
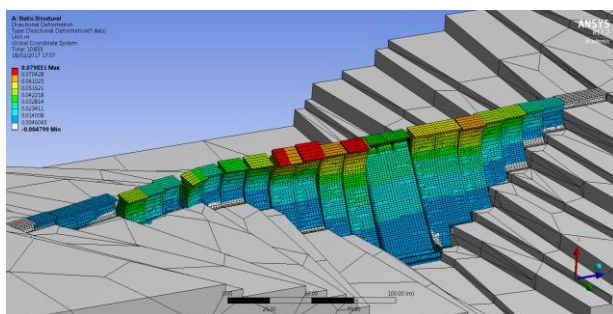
Modalità di collasso modello completo con $\phi_v = 45^\circ$



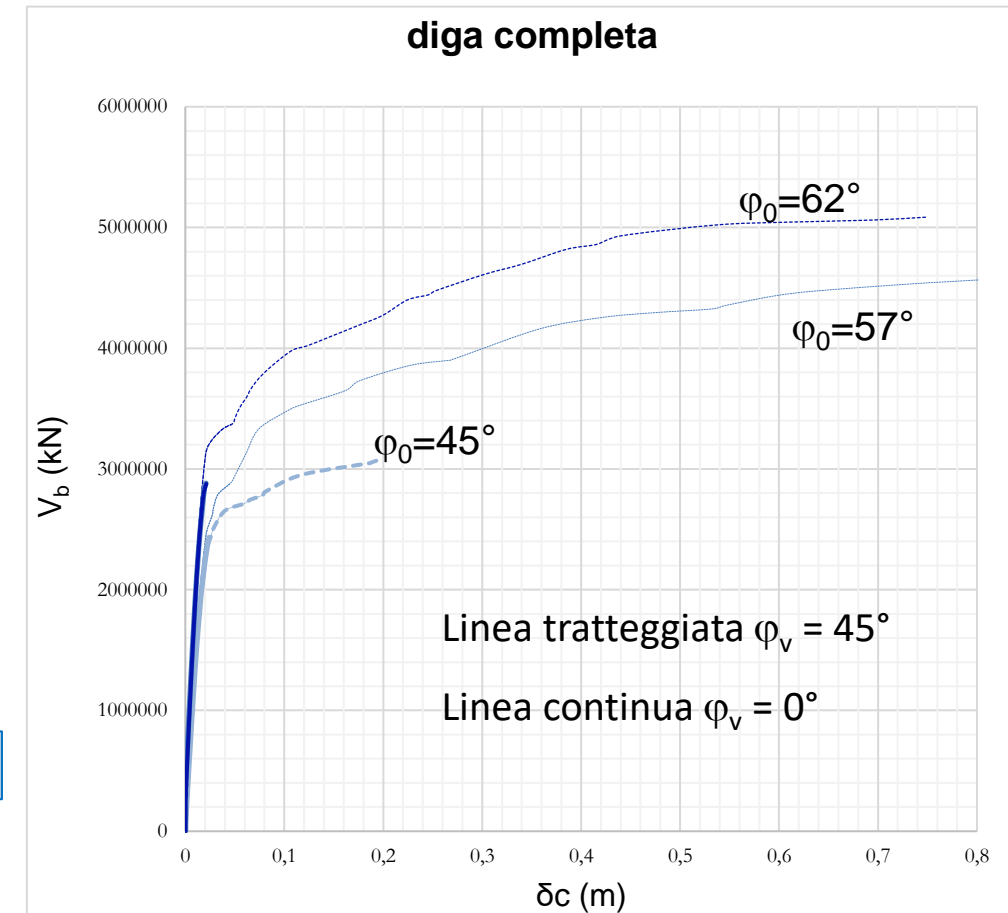
$\phi_0 = 45^\circ$



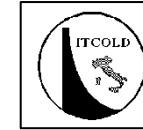
$\phi_0 = 57^\circ$



$\phi_0 = 62^\circ$

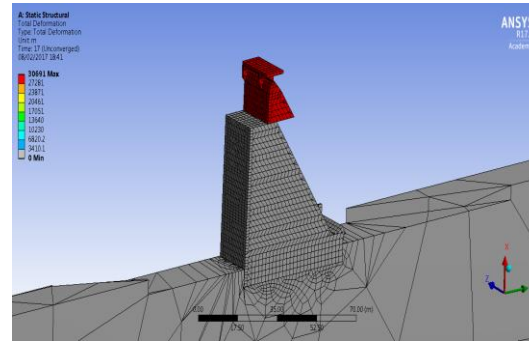
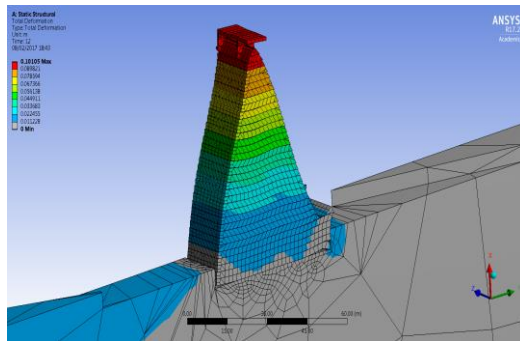


Analisi parametriche

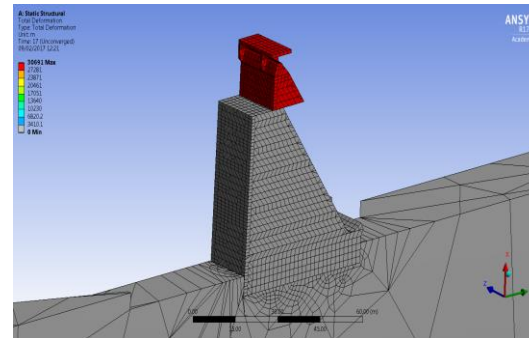
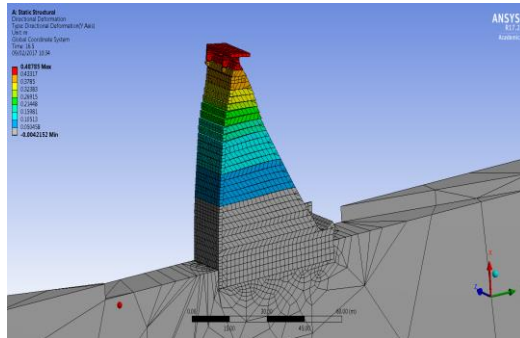


MODELLO A CONCI CON GIUNTI VERTICALI E ORIZZONTALI DOTATI DI ATTRITO

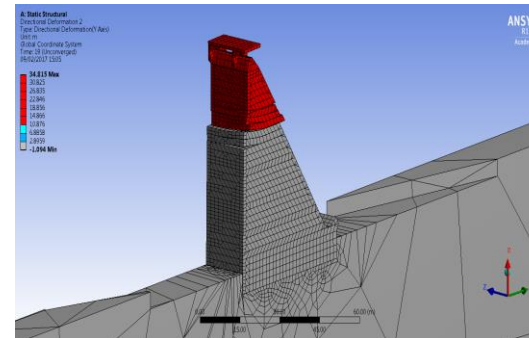
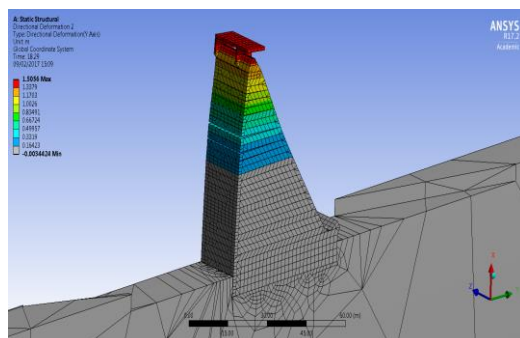
Modalità di collasso modello concio singolo



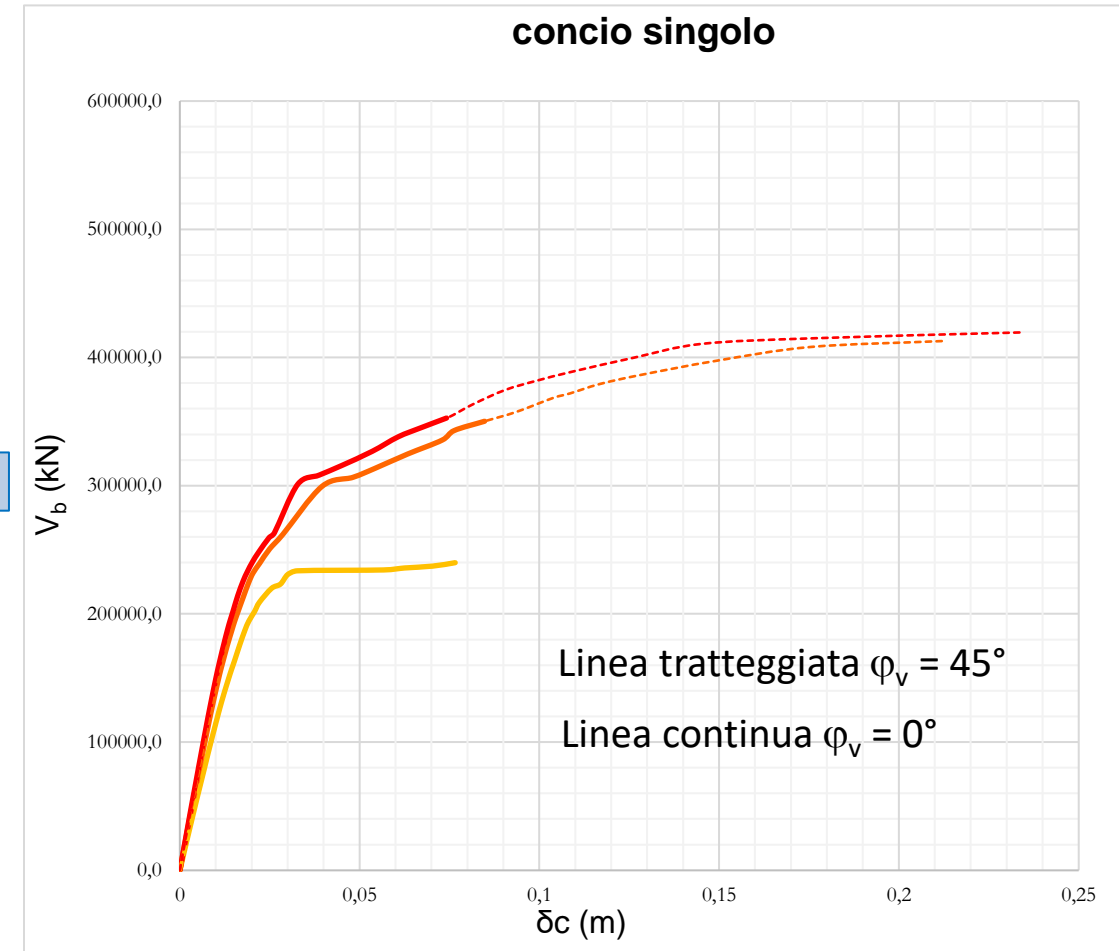
$\varphi_0 = 45^\circ$



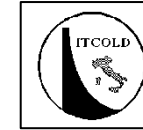
$\varphi_0 = 57^\circ$



$\varphi_0 = 62^\circ$



Analisi parametriche



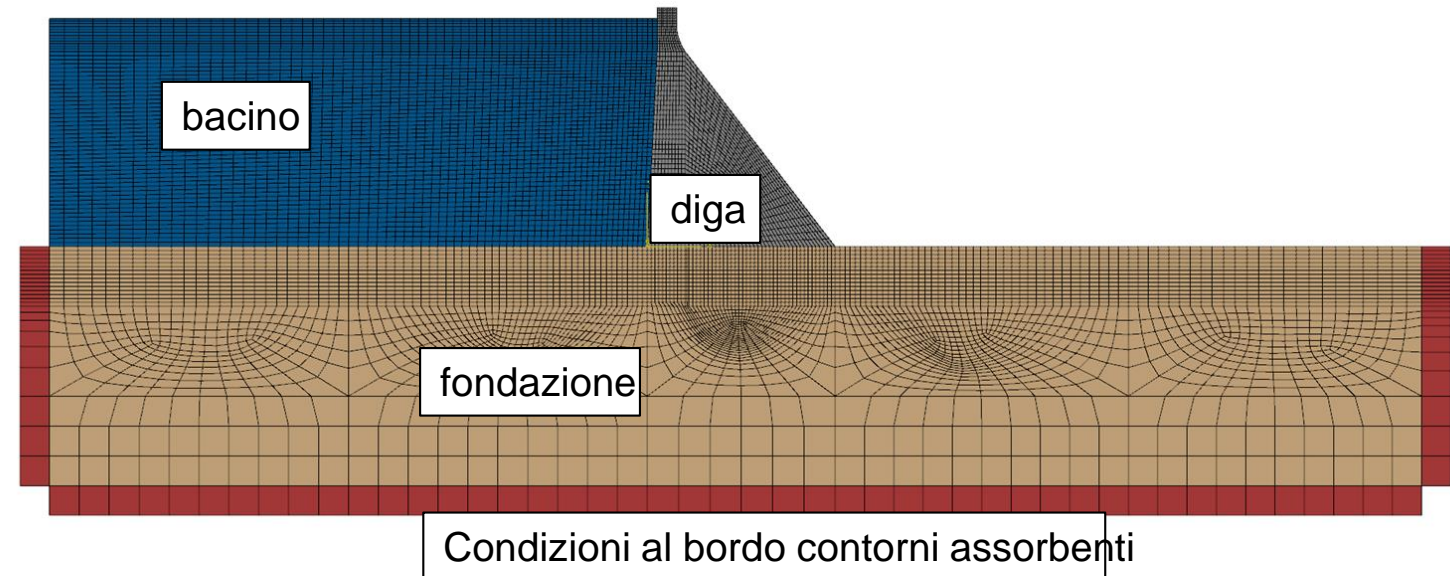
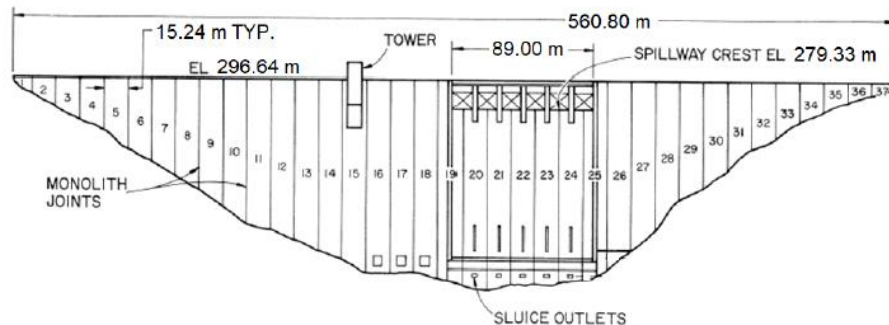
Sperimentazione numerica con lo scopo di valutare l'affidabilità delle analisi ETA nella costruzione di curve di comportamento in rapporto all'analisi IDA, considerata standard.

ICOLD 15TH INTERNATIONAL BENCHMARK WORKSHOP ON NUMERICAL ANALYSIS OF DAMS 9 – 11 SEPTEMBER 2019, MILAN, ITALY

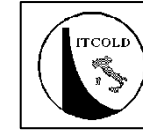
Pine Flat Dam (1954)



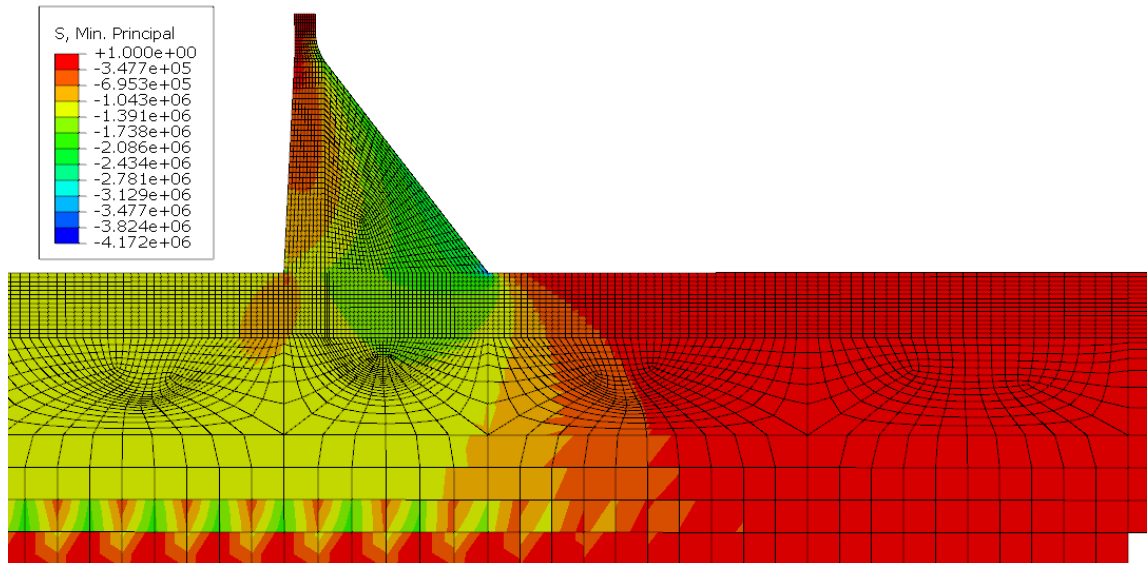
Figure 1 Downstream view of Pine Flat Dam [ref. Wikipedia.org]



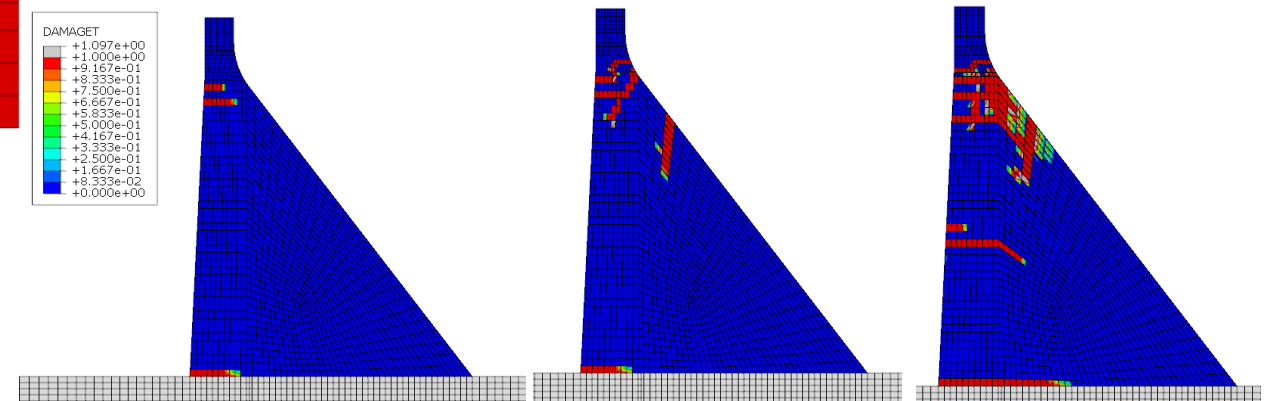
Analisi parametriche



Confronto tra diverse tipologie di modello, elastico lineare o non lineare, Concrete Damaged Plasticity, con massa o senza. Grandezze monitorate: drift, danneggiamento e tensioni alla base.

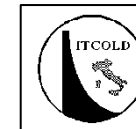


Stato tensionale

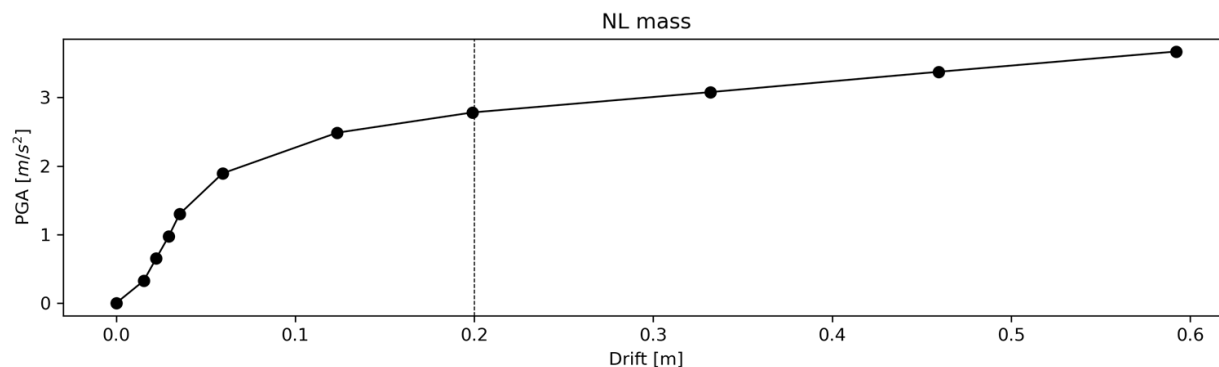


Progredire del danneggiamento

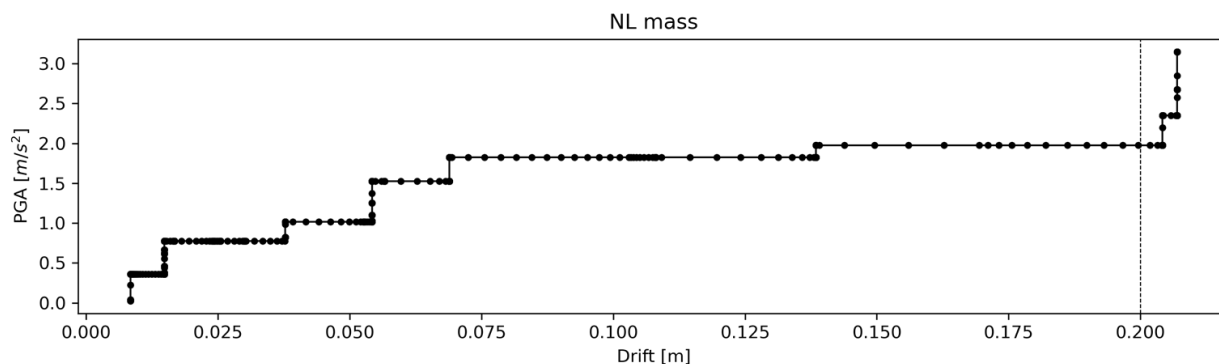
Analisi parametriche



PRIMI CONFRONTI

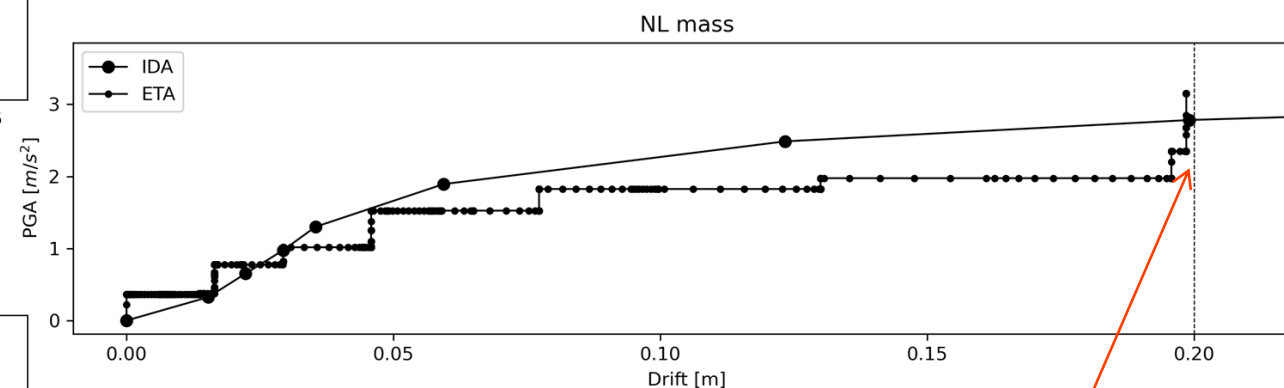


Curva IDA costruita con 10 analisi dinamiche
(ca. 10 ore di tempo di calcolo)



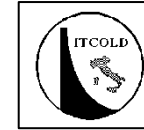
Curva costruita con singola analisi ETA
(ca. 1 ora di tempo di calcolo)

Primo confronto (dati provvisori)



Drift limite raggiunto per valori
simili di PGA

osservazioni sui metodi per la valutazione della sicurezza sismica



1. Modellazione

- Il modello di calcolo delle grandi dighe è spaziale
- Quando e con quali tipi di dighe è necessario
- Il modello di calcolo va validato con i dati del monitoraggio almeno nelle condizioni di funzionamento
- Quali sono i dati di monitoraggio che riteniamo necessari per assumere queste decisioni e su quale entità di intervalli temporali devono essere disponibili
- Come si caratterizzano i materiali. Nel calcestruzzo si deve diversificare il comportamento nelle riprese di getto da quello dei getti massicci.

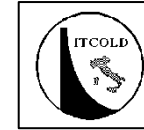
2. Le analisi con modelli semplificati

- È possibile adottare metodi di calcolo semplificati, quando e quali?
- È utile adottare modelli a complessità crescente (geometria e materiali)?

3. Valutazione dei livelli di sicurezza e dell'entità dei rischi connessi

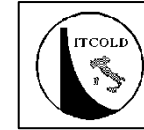
- Stati limite e/o scenari?
- Come tenere conto dell'entità dei rischi connessi?
- Giudizio finale sulla sicurezza?

Considerazioni finali



- **I METODI DI ANALISI NON FORNISCONO INDICAZIONI SODDISFACENTI NEPPURE PER QUANTO RIGUARDA IL MANTENIMENTO DELL'INTEGRITÀ DEL SOLO CORPO DIGA.**
- **L'ANALISI DINAMICA, SIA CON SPETTRO DI RISPOSTA, SIA CON STORIE TEMPORALI ALLA BASE, ESEGUITA NELL'IPOTESI DI MATERIALE ELASTICO LINEARE È SICURAMENTE IL PUNTO DA CUI PARTIRE.**

Considerazioni finali



- **La previsione del comportamento sismico di un'opera di ritenuta è cosa estremamente complessa.**
- **La valutazione della sicurezza sismica richiede la conoscenza del comportamento delle strutture e dell'interazione e la definizione degli scenari di danno con relative conseguenze.**
- **Le normative francesi forniscono un metodo progressivo.**
- **Le normative statunitensi forniscono metodi precisi da utilizzare, con relativi modelli e un ordine da rispettare nell'esecuzione delle analisi.**
- **La normativa italiana non fornisce indicazioni precise su quali verifiche effettuare sulle dighe e su quali modelli utilizzare.**
- **La normativa può/deve fornire indicazioni precise? Quali?**