

STUDIO DI RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DI UNA DIGA IN TERRA ZONATA: CASE HISTORY DELLA DIGA DI CONZA



Mariagrazia Tretola
Università degli Studi del Sannio

STUDIO DI RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DI UNA DIGA IN TERRA ZONATA: CASE HISTORY DELLA DIGA DI CONZA



- *Norme Tecniche delle Costruzioni (NTC2018)*
- *Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse) (NTD2014)*
- *Circolare della Direzione Generale Dighe n. 16790 del 03/07/2019 (circ. DGD 16790, 2019)*



- Sintesi della storia della diga di Conza
- Inquadramento geologico dell'area e caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione e del corpo diga
- Monitoraggio dell'opera nelle fasi di costruzione e di esercizio
- Analisi numeriche statiche e sismiche
- Spostamenti sismo-indotti
- Verifica del potenziale di liquefazione
- Verifica a fratturazione idraulica del nucleo

SINTESI DELLA STORIA DELLA DIGA DI CONZA



1980

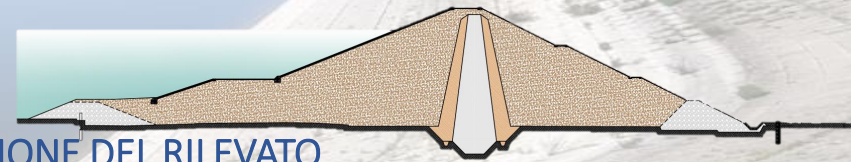
23 Novembre
1980

COSTRUZIONE INTERROTTA DA EVENTO SISMICO



7 Agosto
1979

INIZIO COSTRUZIONE DEL RILEVATO



SINTESI DELLA STORIA DELLA DIGA DI CONZA

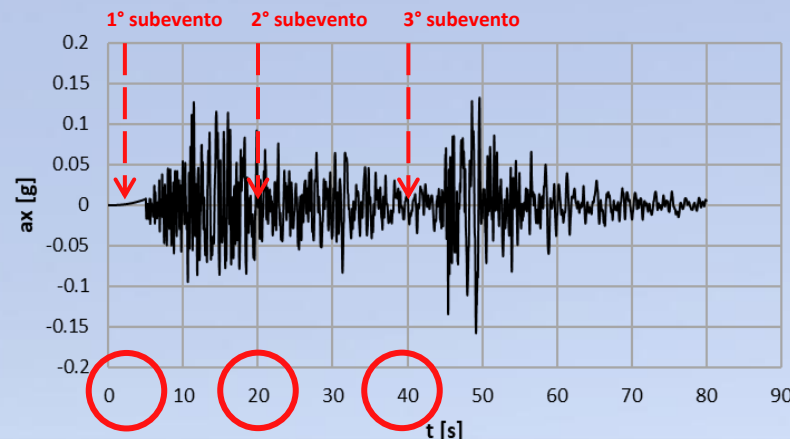


23 Novembre
1980

COSTRUZIONE INTERROTTA
DA EVENTO SISMICO

Lancieri & Zollo A., 2009
Cocco & Pacor, 1993
Bernard P. & Zollo A., 1989

Accelerazione
registrata a Calitri



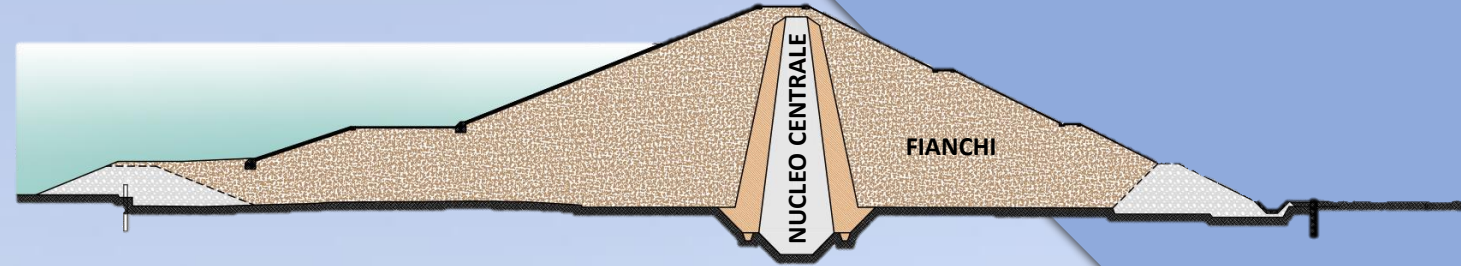
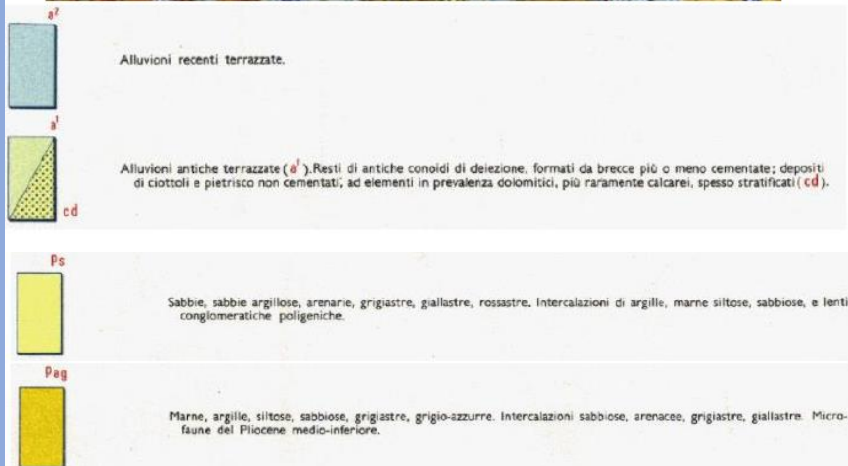
Magnitudo: 6.9
Durata: 80 s



SINTESI DELLA STORIA DELLA DIGA DI CONZA

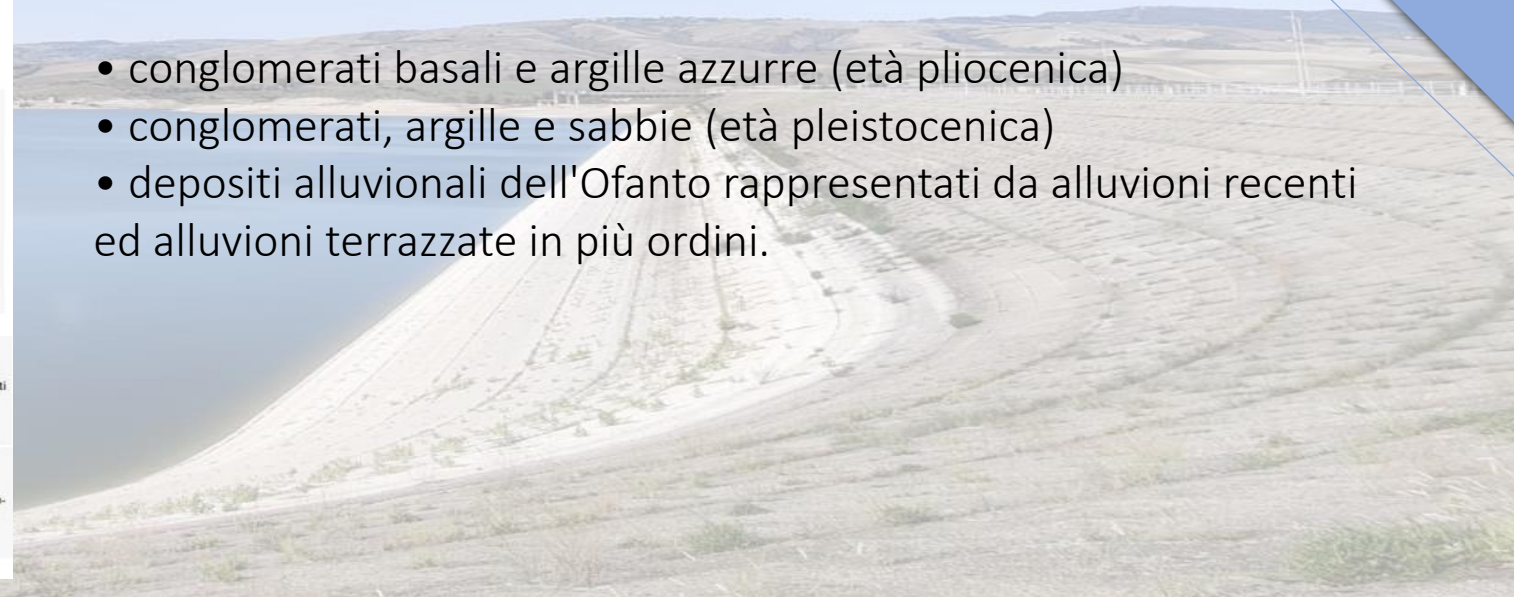


INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI DI FONDAZIONE E DEL CORPO DIGA

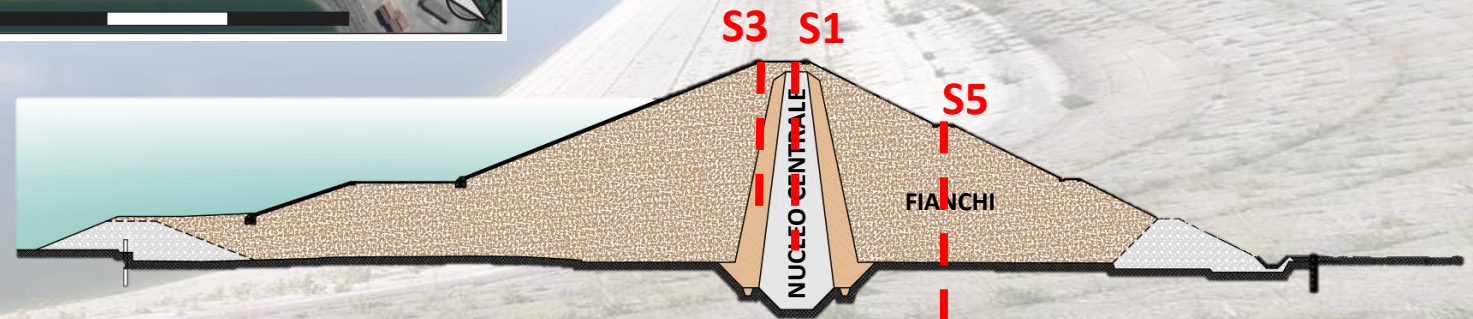
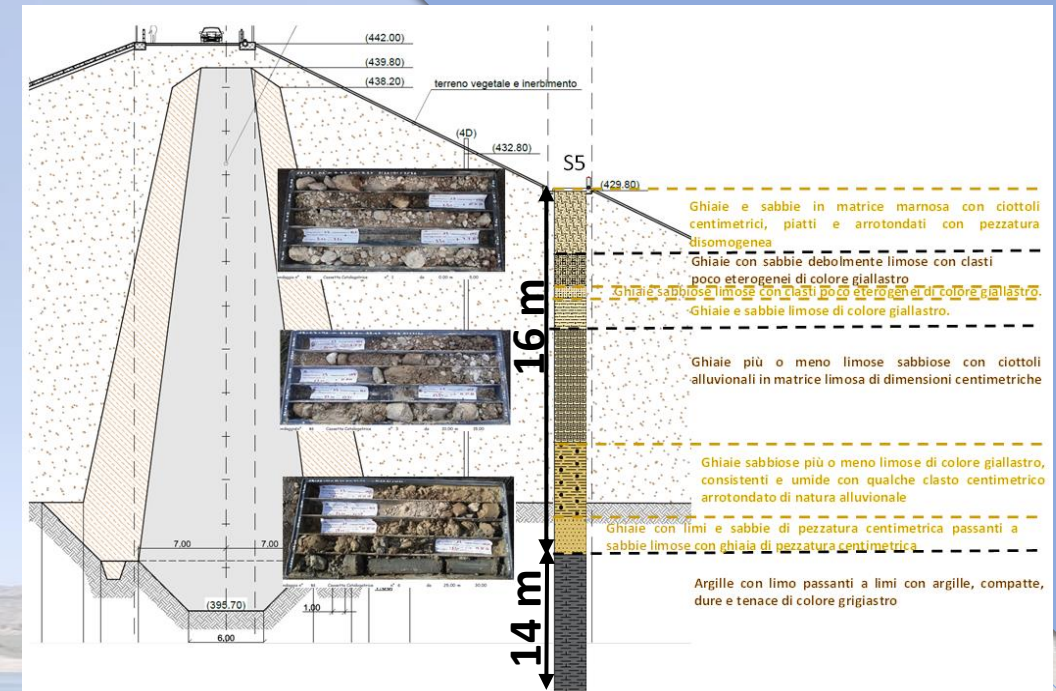
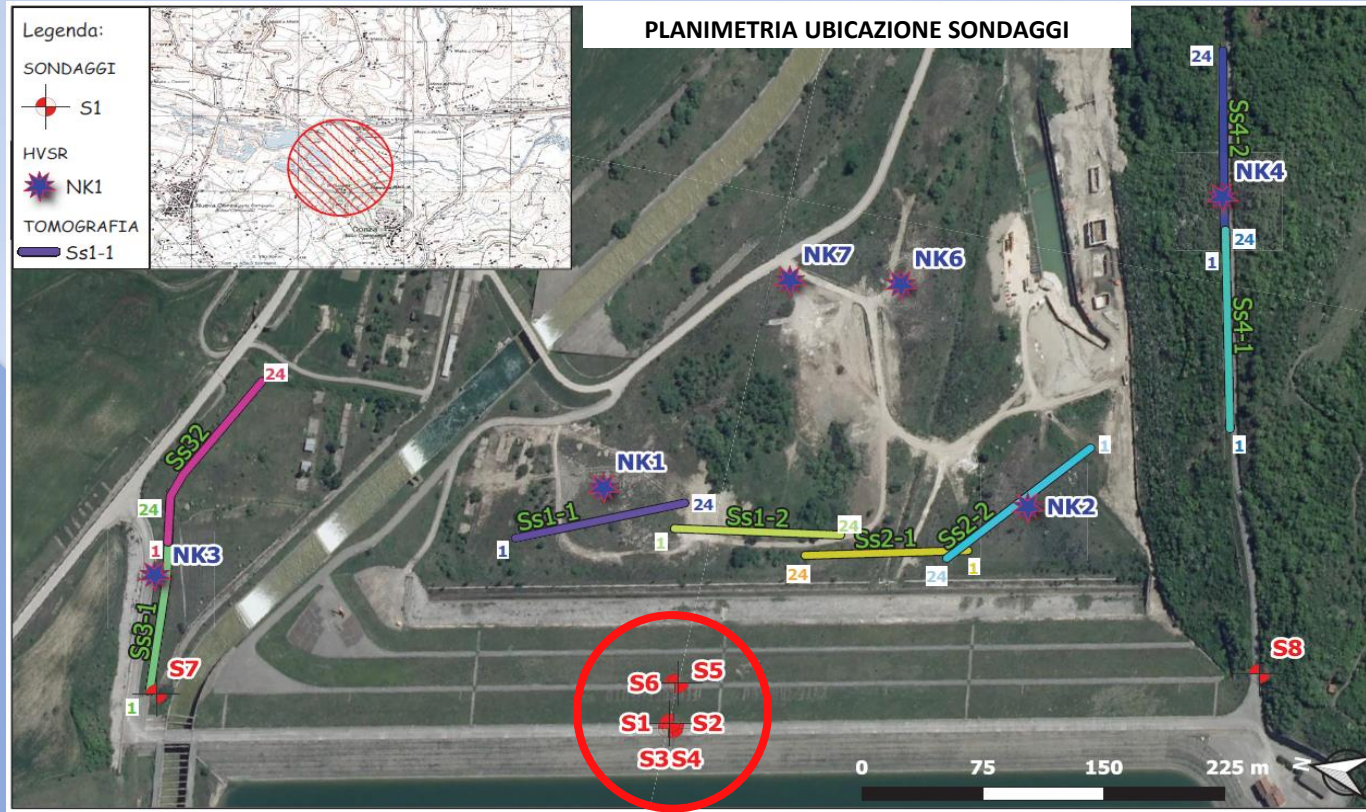


FORMAZIONI PLIO-PLEISTOCENICHE

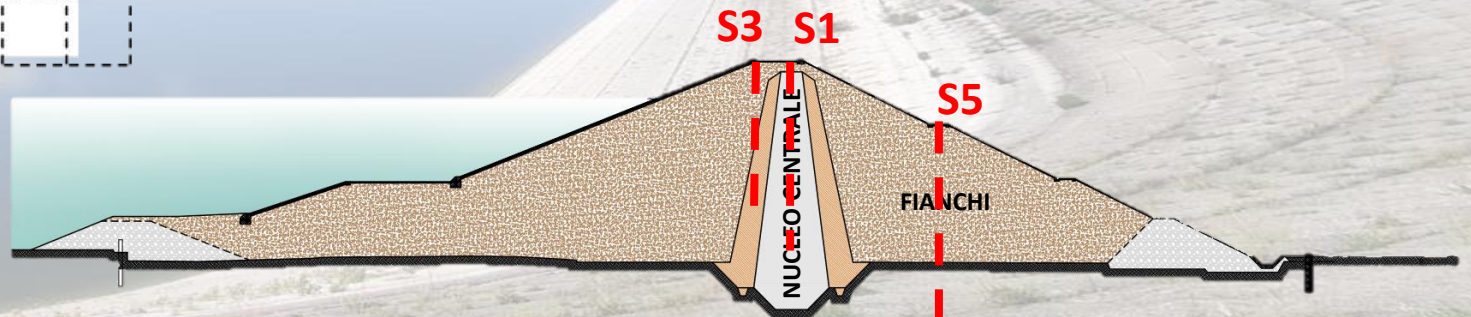
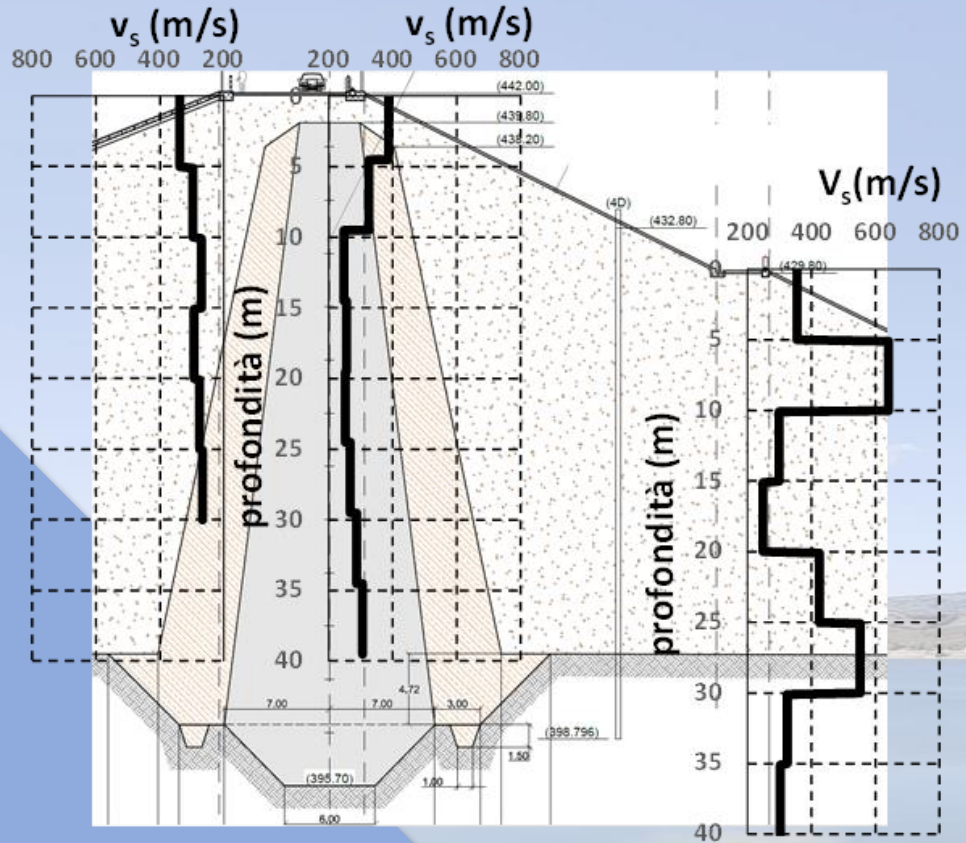
- conglomerati basali e argille azzurre (età pliocenica)
- conglomerati, argille e sabbie (età pleistocenica)
- depositi alluvionali dell'Ofanto rappresentati da alluvioni recenti ed alluvioni terrazzate in più ordini.



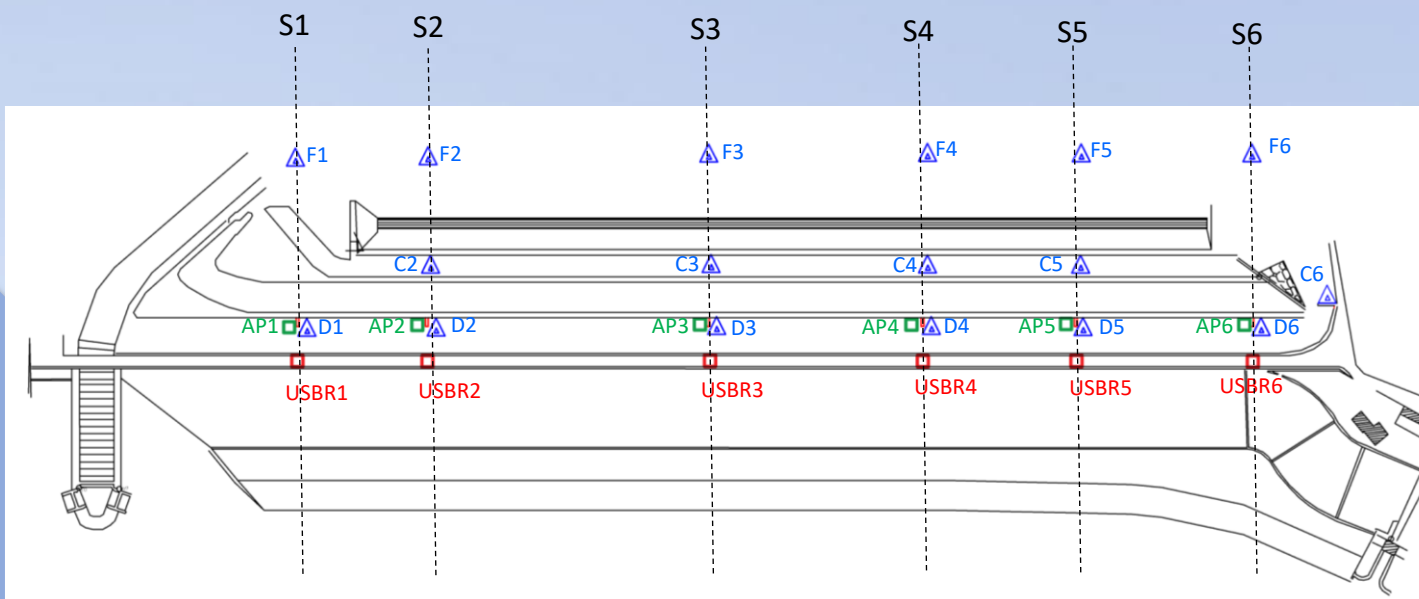
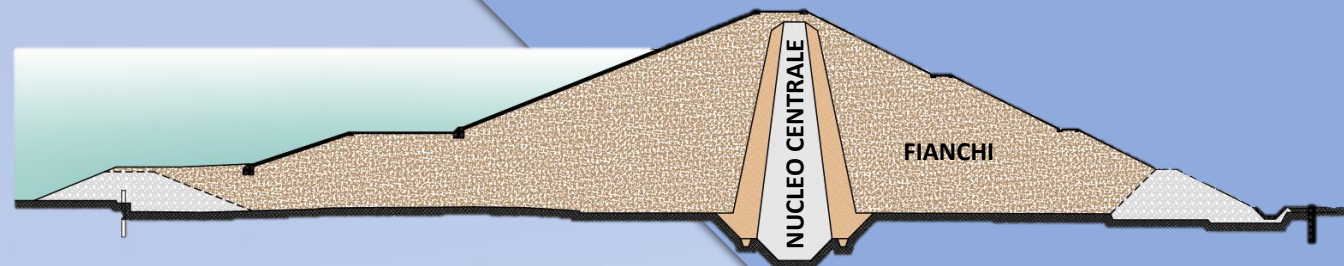
INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI DI FONDAZIONE E DEL CORPO DIGA



INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI DI FONDAZIONE E DEL CORPO DIGA



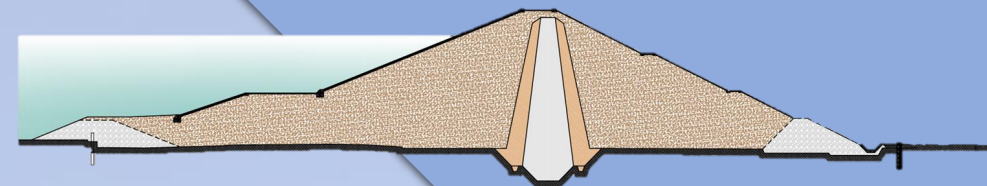
MONITORAGGIO DELL'OPERA



- ASSESTIMETRI (**USBR**)
- ASSESTIMETRI A PIASTRA (**AP**)
- PIEZOMETRI A TUBO APERTO (**C, D, F**)
- CELLE PIEZOMETRICHE (in sezioni S2, S4 ed S6)
- CELLE DI CARICO (in sezioni S2, S4 ed S6)

- livello di invaso
- pressioni interstiziali nel nucleo e nei terreni di fondazione
- cedimenti interni del corpo rilevato
- spostamenti plano-altimetrici al contorno del rilevato
- tensioni verticali totali nel nucleo e nei fianchi
- portate filtranti

ANALISI NUMERICHE STATICHE E SISMICHE



Categoria della diga	Costruzione	Coefficiente d'uso, C_U	Vita naturale, V_N (anni)	Vita di riferimento, V_R (anni)	Periodo di ritorno, T_R (anni)			
					SLO	SLD	SLV	SLC
Strategica	Esistente	2	50	100	60	100	950	1950

Circolare DGD 16790 (2019):

Stato Limite di Danno (SLD): le deformazioni permanenti sono accettabili se dell'ordine del centimetro e la risposta sismica risulta connotata da un comportamento essenzialmente elastico.

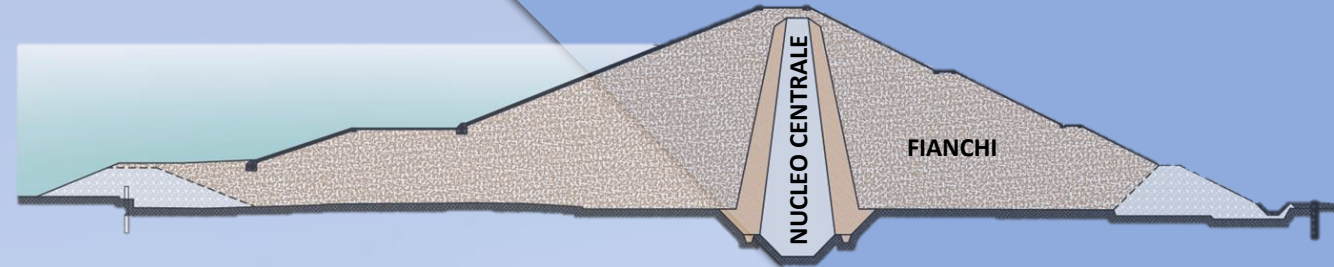
Stato Limite di Collasso (SLC): lo spostamento massimo è ammissibile se inferiore ad una quota parte della differenza tra la quota di massima ritenuta e la quota sommitale dell'elemento di tenuta. Il cedimento calcolato deve essere confrontato con l'altezza della diga: cedimenti inferiori all'1% dell'altezza della diga sono, in linea generale, accettabili.

Il giudizio ingegneristico motivato di accettabilità dei risultati dovrà anche considerare:

1. il confronto dei risultati ottenuti con valutazioni semplificate degli spostamenti permanenti, che si possono ottenere utilizzando le note correlazioni empiriche proposte da vari Autori;
2. il rischio di perdita di funzionalità dell'elemento di tenuta, quella di integrità dei filtri, anche con riferimento agli spostamenti calcolati lungo le superfici critiche in relazione allo spessore ed alla geometria dei vari strati;
3. l'adeguatezza della strumentazione installata, atta al controllo delle condizioni di sicurezza post-sismiche dello sbarramento, in particolare la misura delle pressioni interstiziali;
4. l'ammissibilità degli spostamenti e delle deformazioni per lo SLD e SLC.

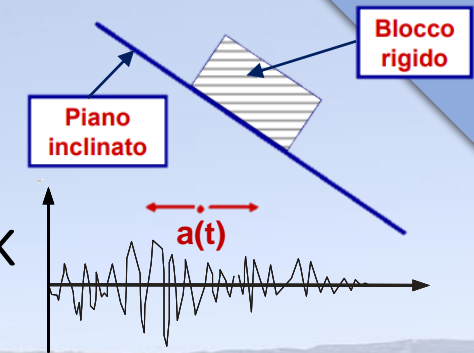
ANALISI NUMERICHE STATICHE E SISMICHE

Analisi a complessità crescente



➡ ANALISI DINAMICHE SEMPLIFICATE

➡ METODO DI NEWMARK



➡ ANALISI DINAMICHE AVANZATE

➡ APPROCCI AL CONTINUO



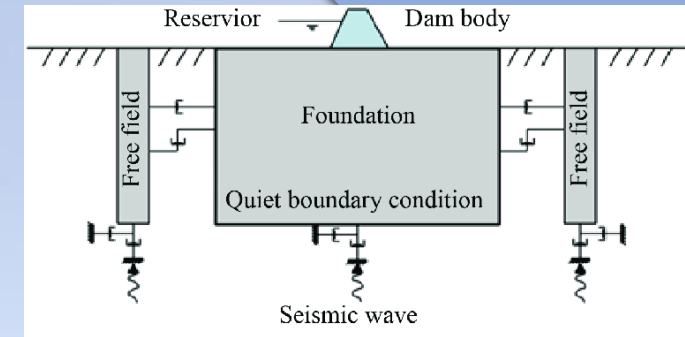
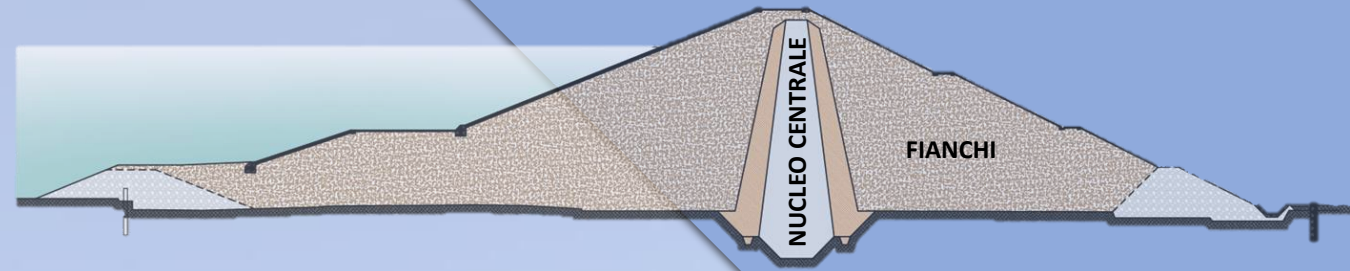
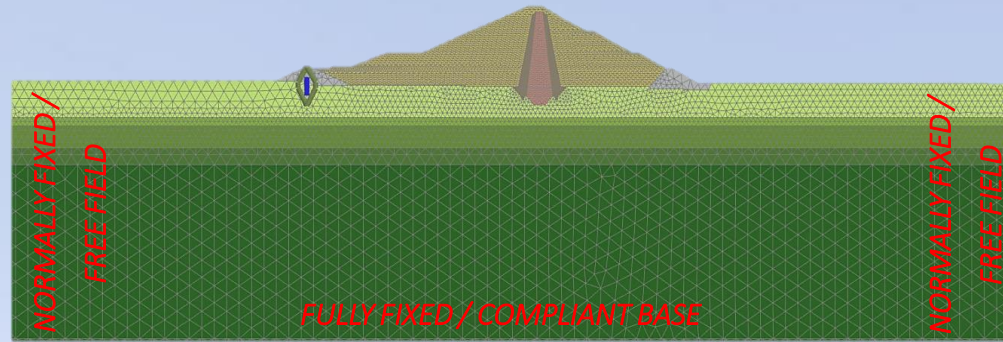
● LEGAMI COSTITUTIVI AVANZATI

● APPROCCIO IN TENSIONI EFFICACI

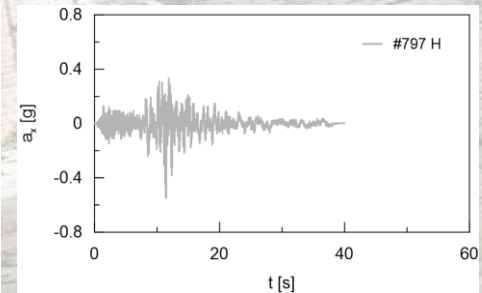
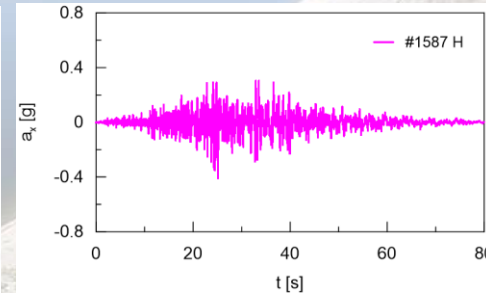
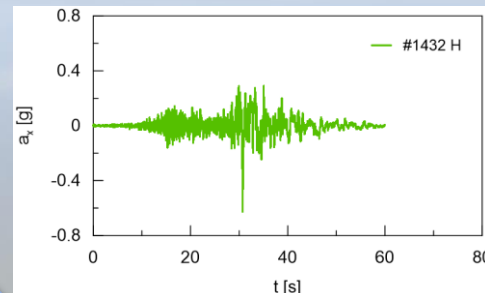
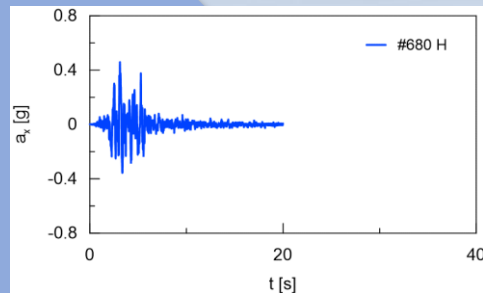
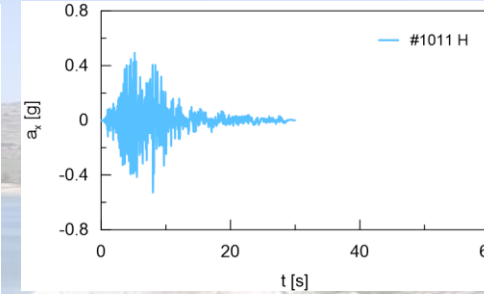
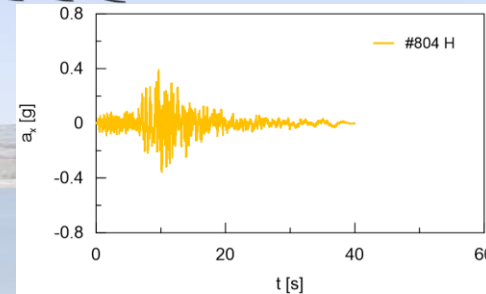
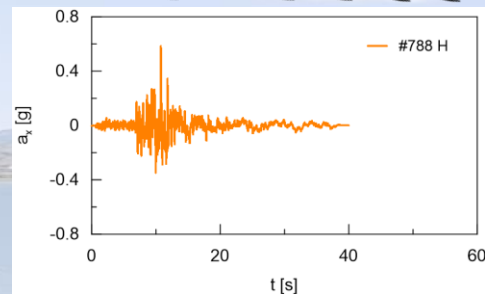
ANALISI NUMERICHE STATICHE E SISMICHE

ANALISI DINAMICHE AVANZATE (PLAXIS 2D)

Condizioni al contorno



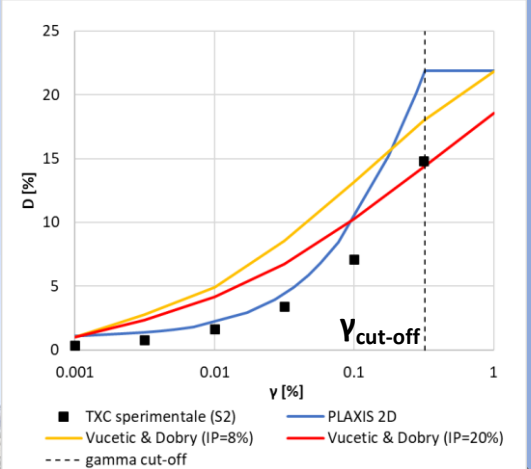
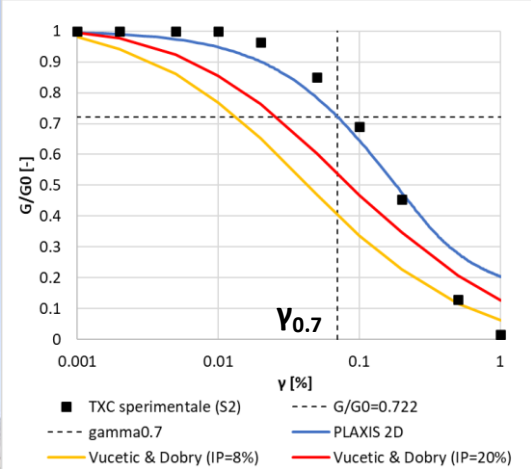
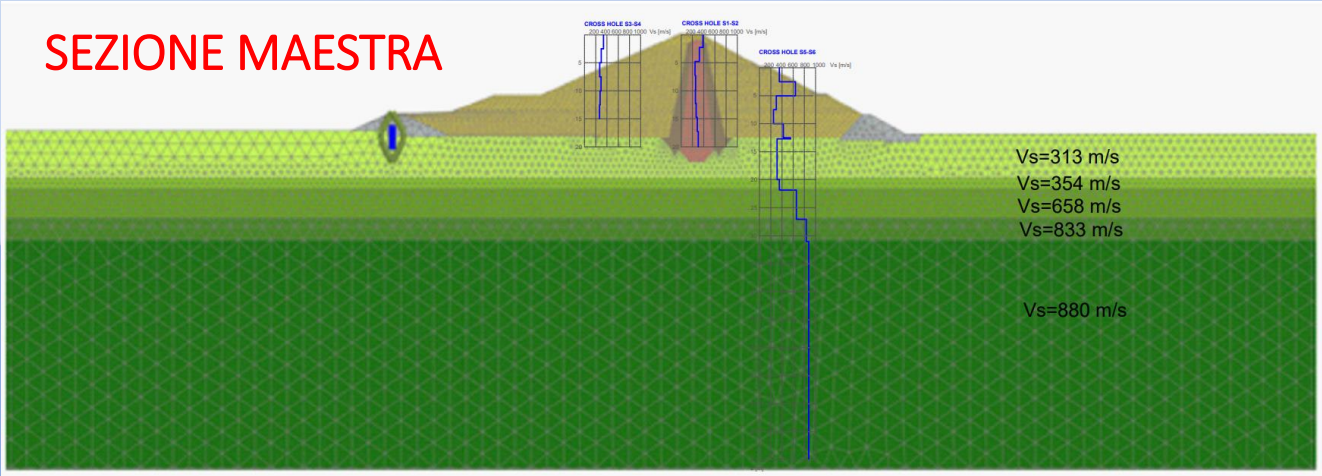
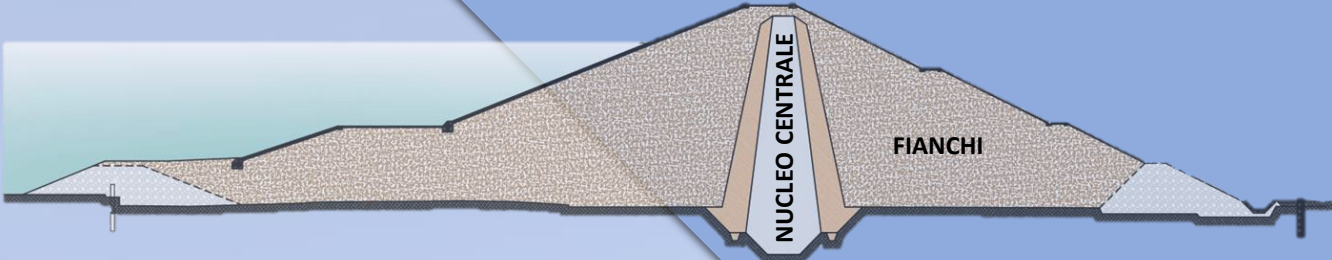
7 segnali
accelerometrici orizz.



N.B.: Segnali accelerometrici utilizzati nelle analisi dinamiche derivate da uno studio sismologico ad hoc (Barani & Spallarossa et al., 2020-2023)

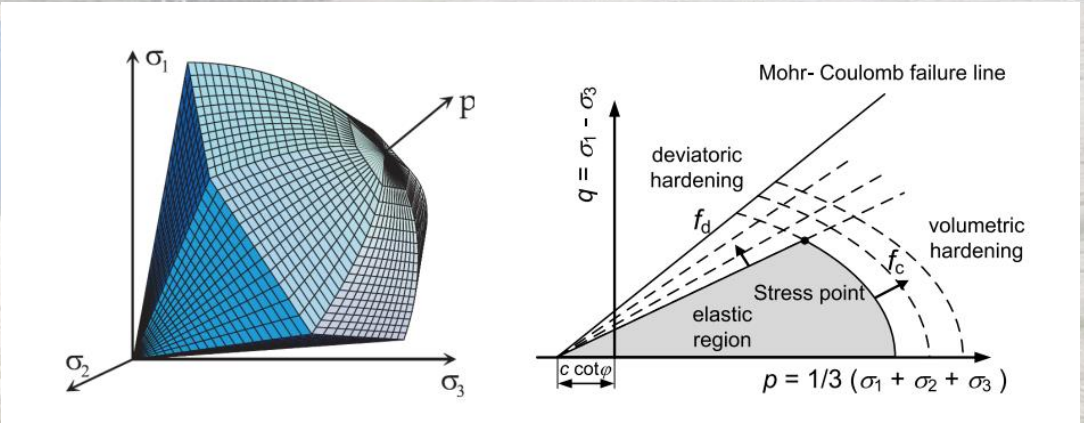
ANALISI NUMERICHE STATICHE E SISMICHE

ANALISI DINAMICHE AVANZATE (PLAXIS 2D)

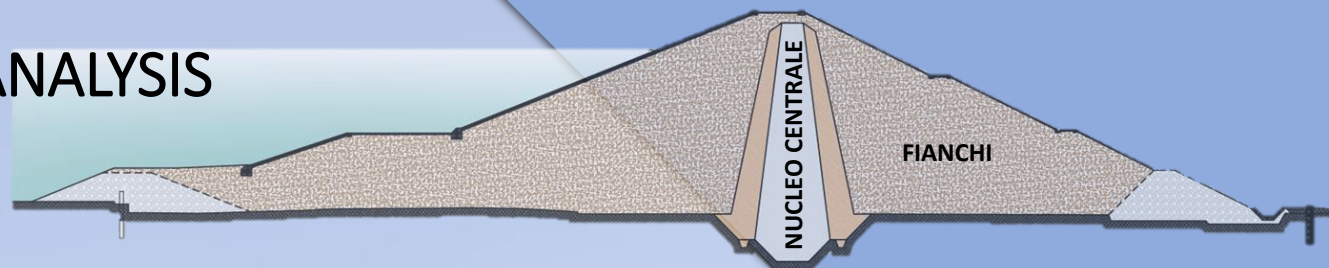


Modello costitutivo avanzato del terreno

➡ Hardening Soil with small strain stiffness (HS-small)

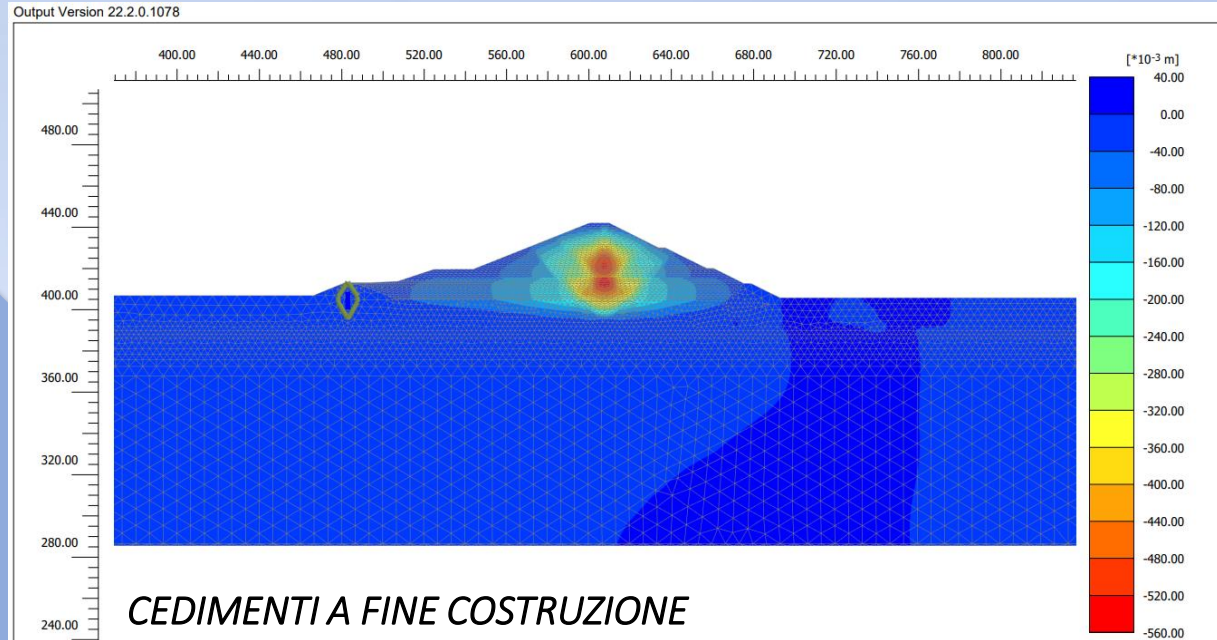
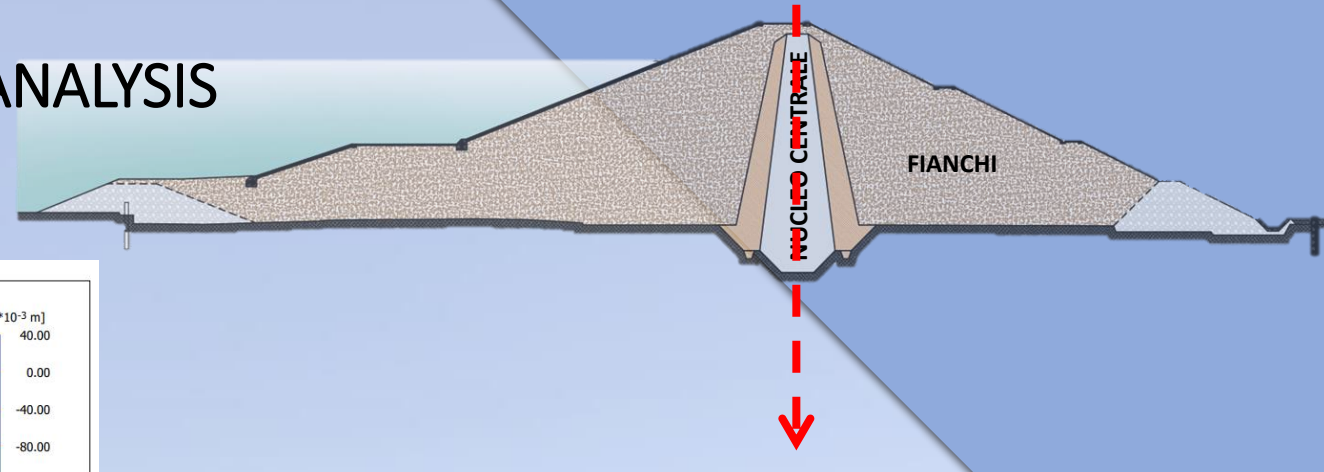


SIMULAZIONE DELLE FASI STATICHE E BACK-ANALYSIS DEL COMPORTAMENTO OSSERVATO

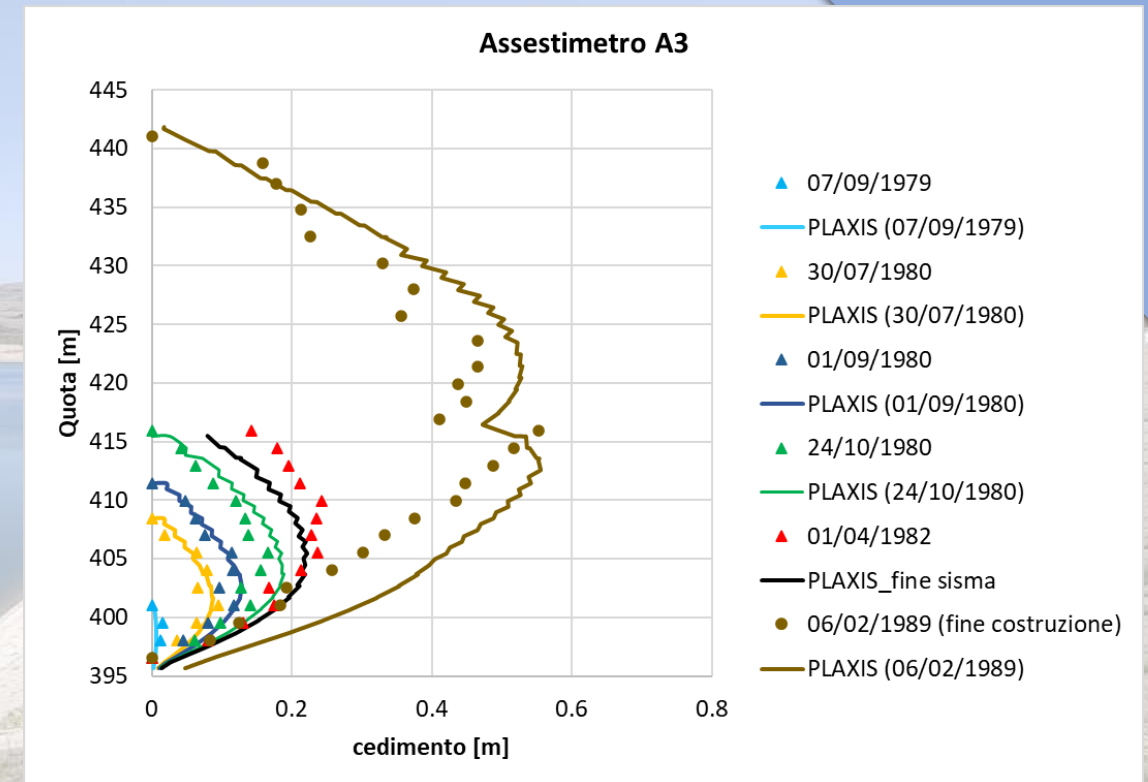


- Fase iniziale: attivazione dei pesi propri nei terreni di fondazione;
- Prima fase di costruzione del corpo diga in 20 *step* di carico, con l'attivazione di uno strato di circa 1 metro di altezza per singolo step;
- Fase sismica relativa al sisma dell'Irpinia del 1980 (segnale di Calitri) (*Dello Russo et al., 2017*)
- Consolidazione post-sisma del 1980 fino all'inizio della seconda fase di costruzione del rilevato (1985);
- Seconda fase di costruzione del corpo diga in 26 *step* di carico, con l'attivazione di uno strato di circa 1 metro di altezza per singolo step;
- Consolidazione post-costruttiva tra 1989-1992;
- Fase di invaso;
- Consolidazione post-invaso.

SIMULAZIONE DELLE FASI STATICHE E BACK-ANALYSIS DEL COMPORTAMENTO OSSERVATO



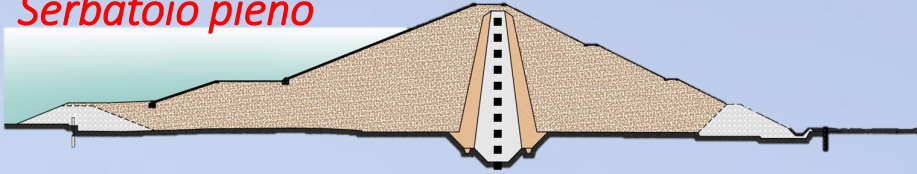
*Dello Russo et al., 2017
Sica & Dello Russo, 2021*



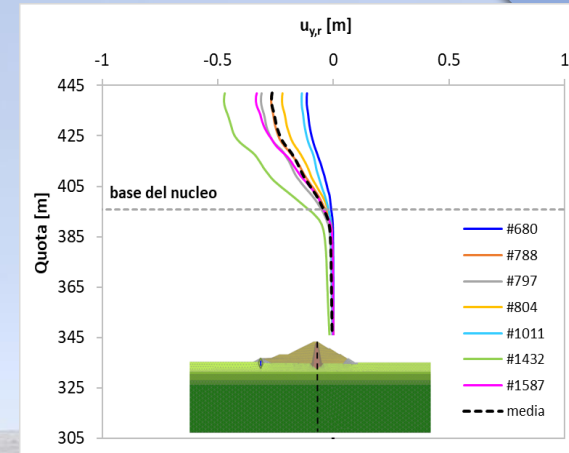
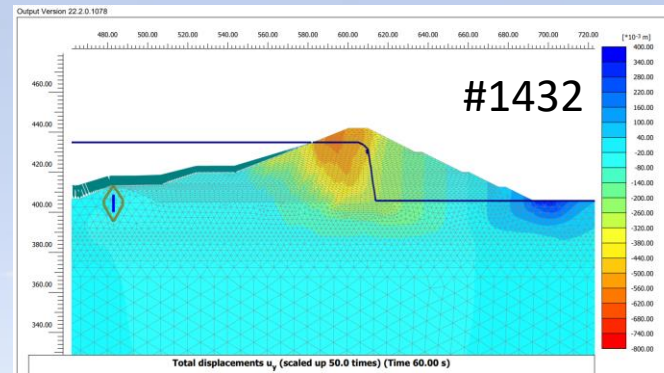
RISULTATI DELLE SIMULAZIONI DINAMICHE AVANZATE: SPOSTAMENTI SISMO-INDOTTI

VERIFICA ALLO SLC

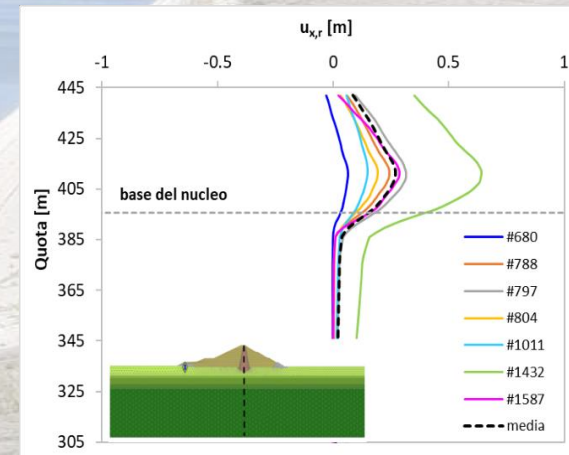
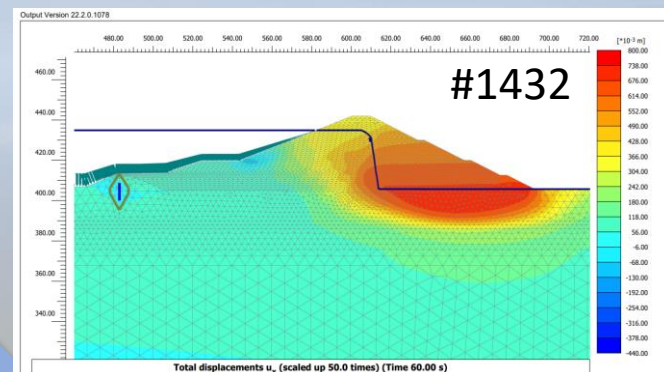
Serbatoio pieno



Spostamenti verticali



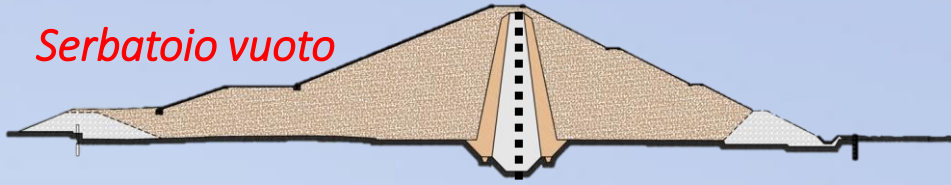
Spostamenti orizzontali



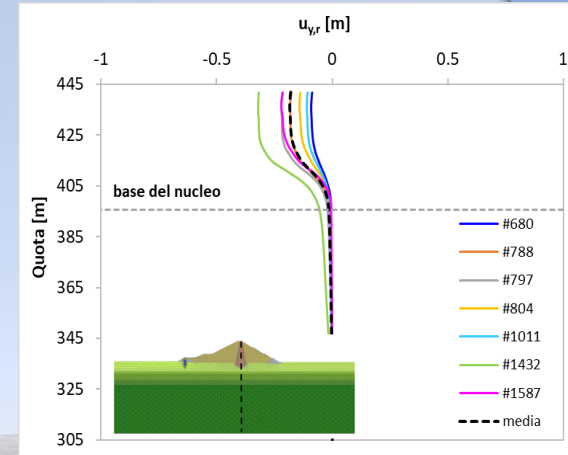
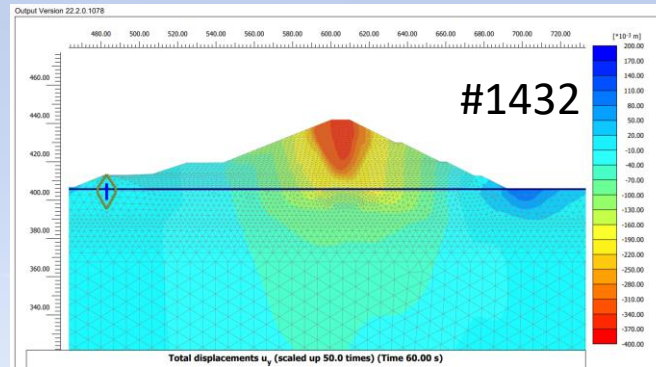
RISULTATI DELLE SIMULAZIONI DINAMICHE AVANZATE: SPOSTAMENTI SISMO-INDOTTI

VERIFICA ALLO SLC

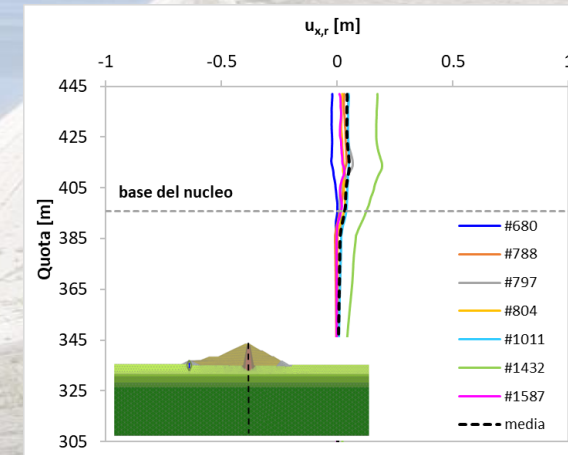
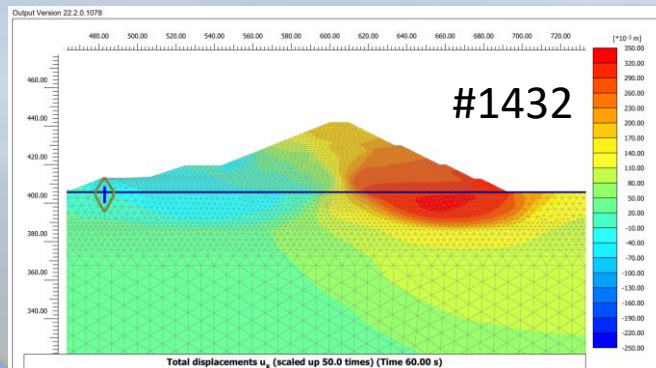
Serbatoio vuoto



Spostamenti verticali

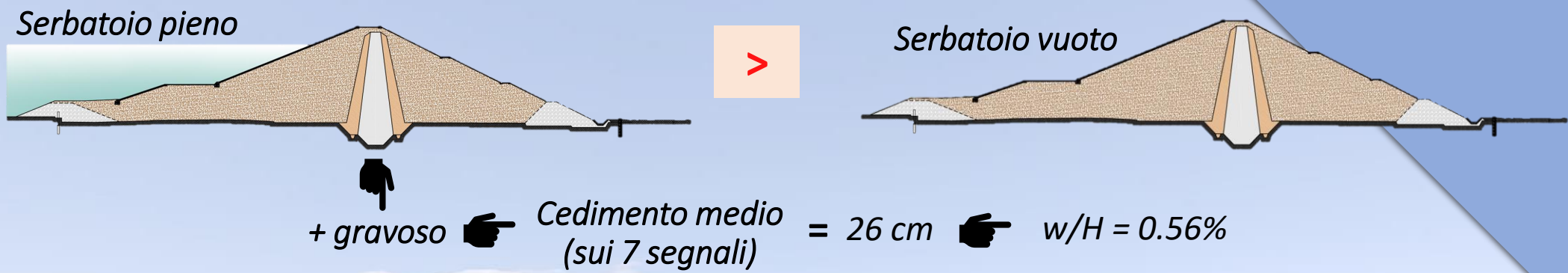


Spostamenti orizzontali



RISULTATI DELLE SIMULAZIONI DINAMICHE AVANZATE: SPOSTAMENTI SISMO-INDOTTI

VERIFICA ALLO SLC

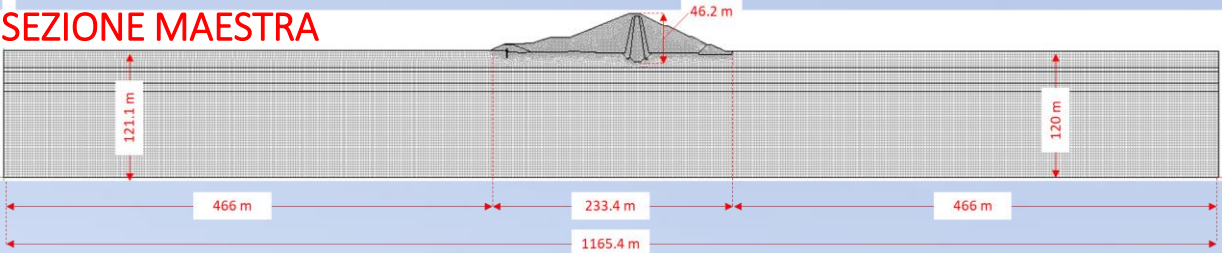
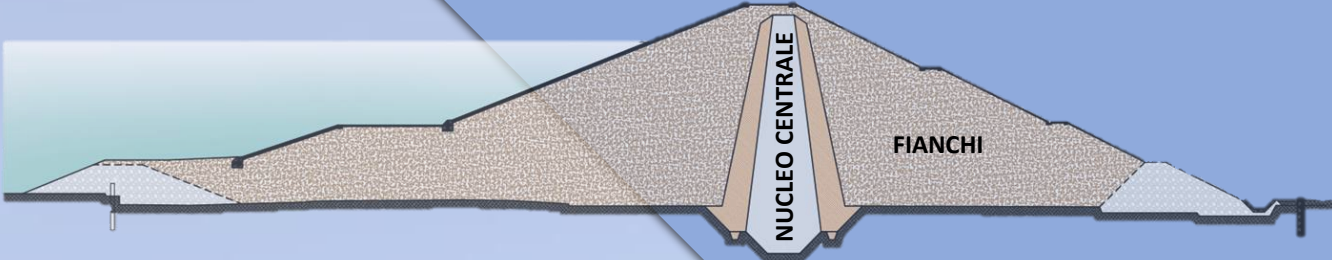


Classe di danno		Max larghezza fessura longitudinale	Max cedimento relativo alla cresta
#	Descrizione	(mm)*	(%)**
0	Nessuno	< 10	<0.03
1	Lieve	10-30	0.03-0.2
2	Moderato	30-80	0.2-0.5
3	Significativo	80-150	0.5-1.5
4	Grave	150-550	1.5-5
5	Collasso	>500	>5

Pells & Fell (2003)

ANALISI NUMERICHE STATICHE E SISMICHE

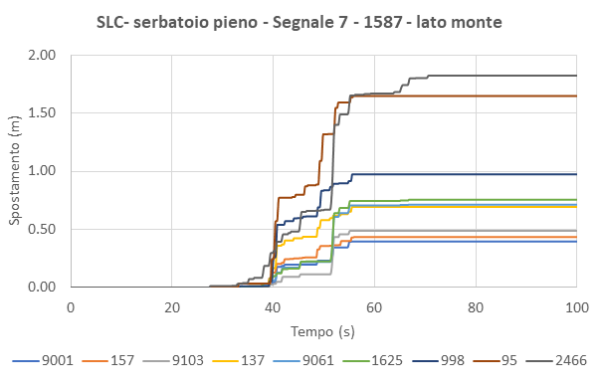
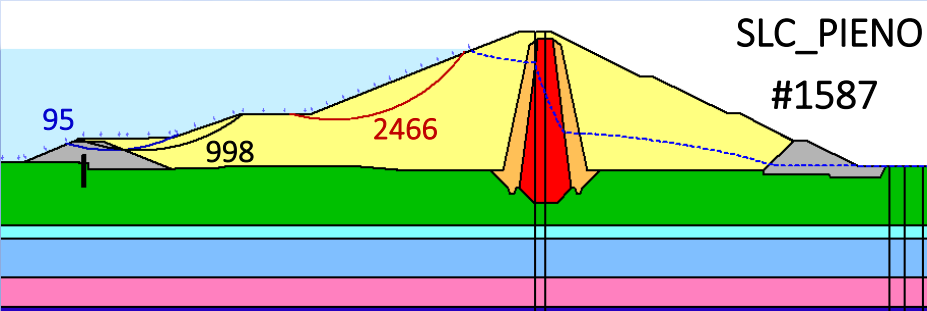
ANALISI SEMPLIFICATE (NEWMARK) 2D



CODICE QUAKE
(GEOSTUDIO)

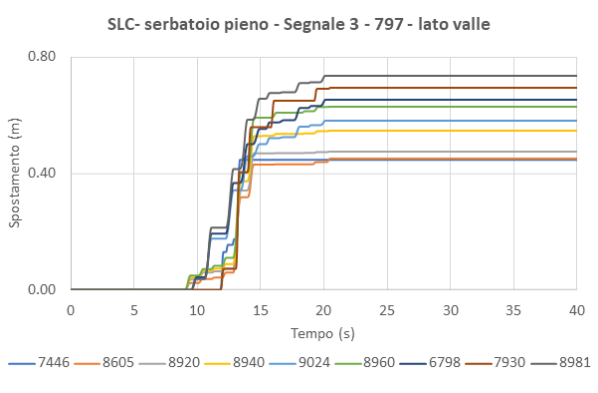
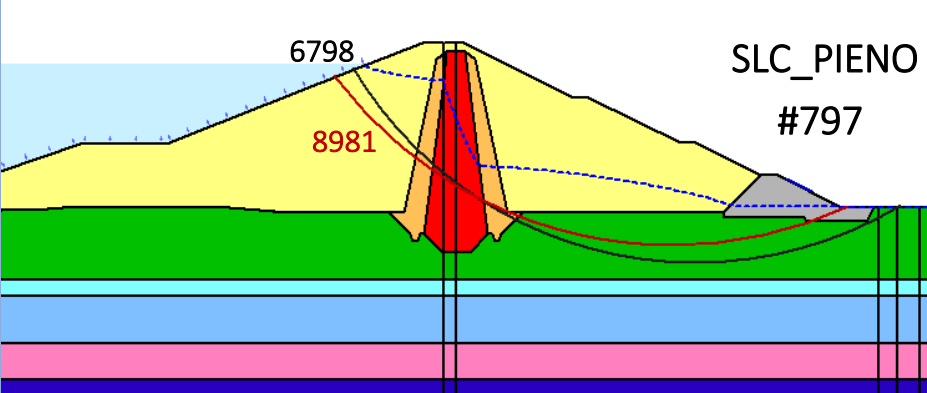


ANALISI DINAMICHE
LINEARI EQUIVALENTI



SLC - serbatoio pieno - monte (acc 1587)

Superficie di scorrimento	FoS	Spostamento (m)	ay (g)	K max (g)
9001	4.66	0.40	0.33	0.35
157	6.00	0.43	0.52	0.80
9103	3.50	0.49	0.39	0.44
137	6.20	0.69	0.47	0.72
9061	3.57	0.71	0.39	0.40
1625	3.59	0.76	0.43	0.44
998	8.74	0.97	0.49	0.91
95	23.73	1.65	0.50	1.28
2466	3.66	1.82	0.40	0.44

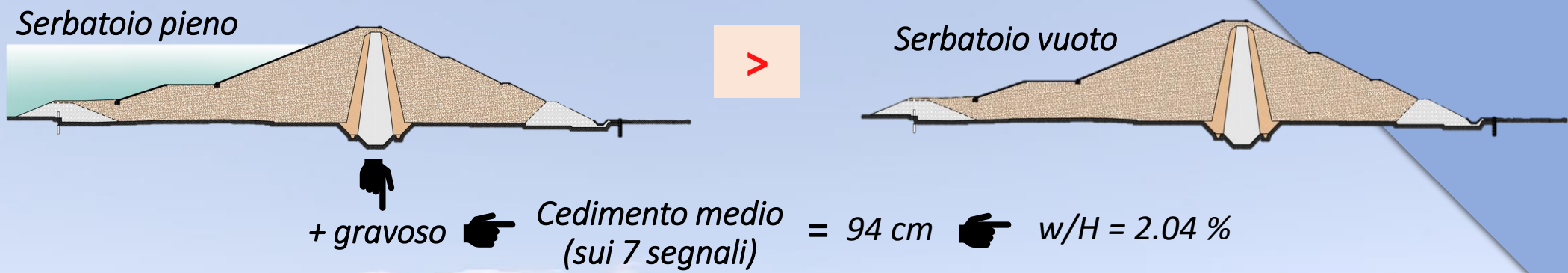


SLC - serbatoio pieno - valle (acc 797)

Superficie di scorrimento	FoS	Spostamento (m)	ay (g)	K max (g)
7'446	2,66	0,45	2,03	4,28
8'605	1,57	0,45	0,14	0,57
8'920	1,99	0,48	0,17	0,50
8'940	1,90	0,55	0,18	0,54
9'024	1,60	0,58	0,15	0,60
8'960	1,80	0,63	0,18	0,57
6'798	1,57	0,65	0,15	0,57
7'930	1,52	0,70	1,90	4,43
8'981	1,70	0,73	0,17	0,60

RISULTATI DELLE SIMULAZIONI DINAMICHE SEMPLIFICATE: SPOSTAMENTI SISMO-INDOTTI

VERIFICA ALLO SLC



Classe di danno		Max larghezza fessura longitudinale	Max cedimento relativo alla cresta
#	Descrizione	(mm)*	(%)**
0	Nessuno	< 10	<0.03
1	Lieve	10-30	0.03-0.2
2	Moderato	30-80	0.2-0.5
3	Significativo	80-150	0.5-1.5
4	Grave	150-550	1.5-5
5	Collasso	>500	>5

Pells & Fell (2003)

VERIFICA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

7.11.3.4.2 Esclusione della verifica a liquefazione

La verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

1. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;
2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$ dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Fig. 7.11.1(a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ e in Fig. 7.11.1(b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$.

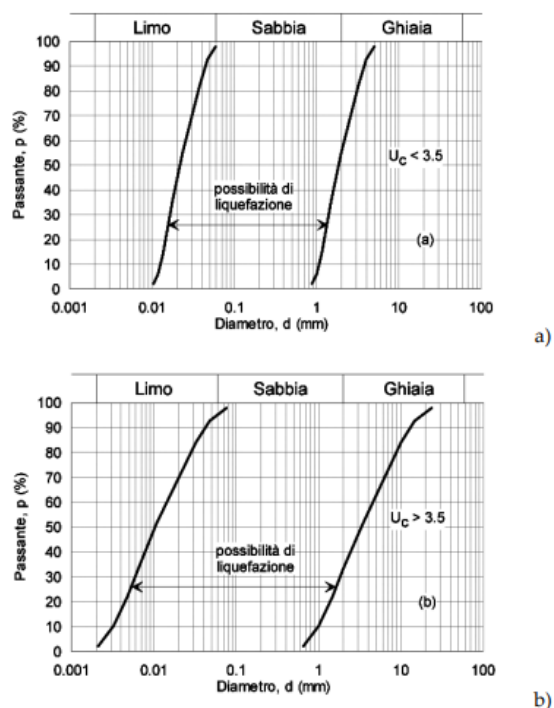
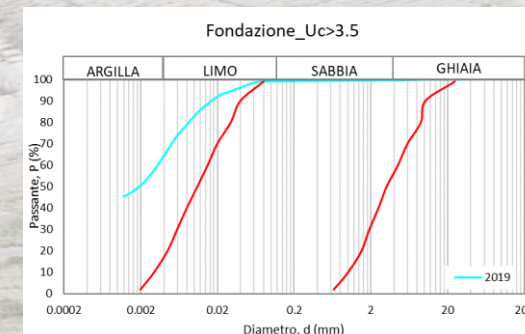
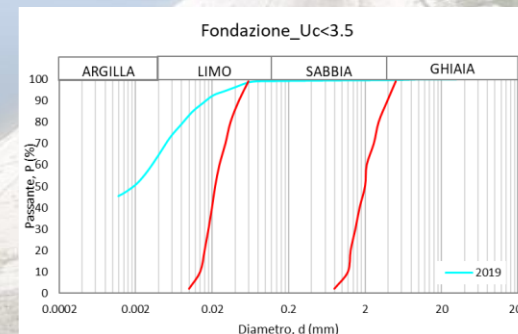
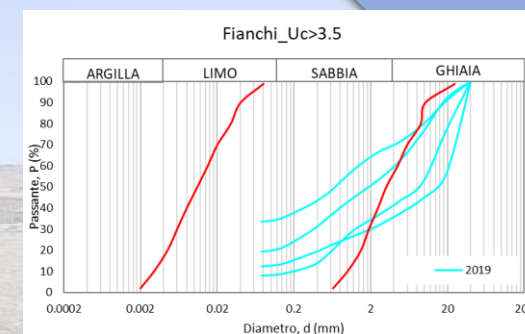
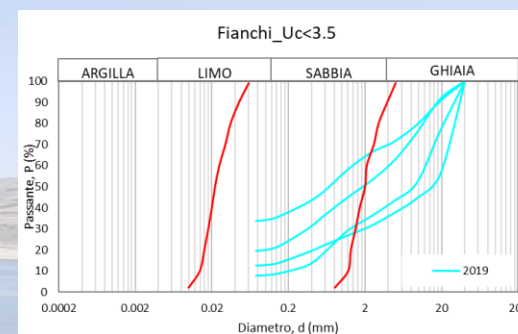
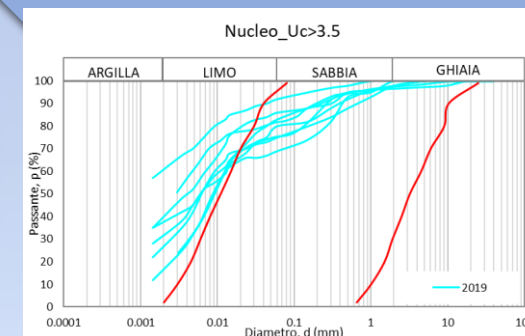
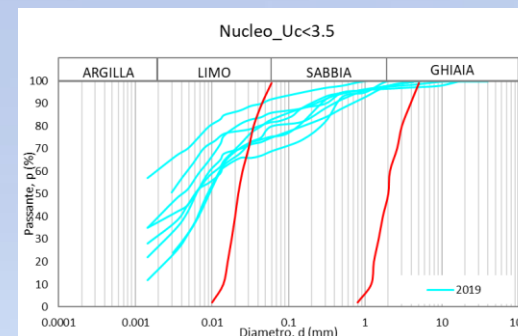
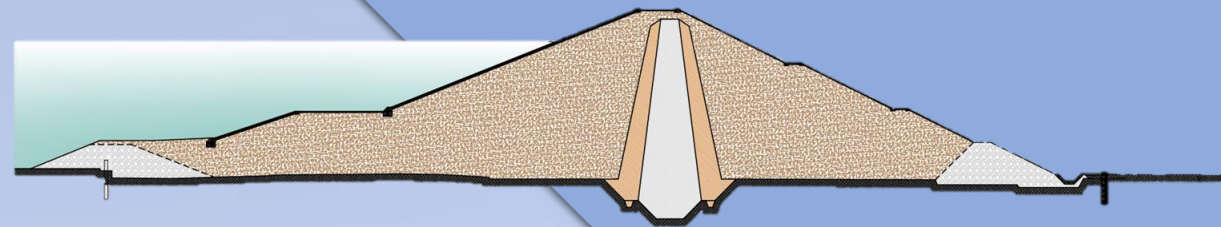
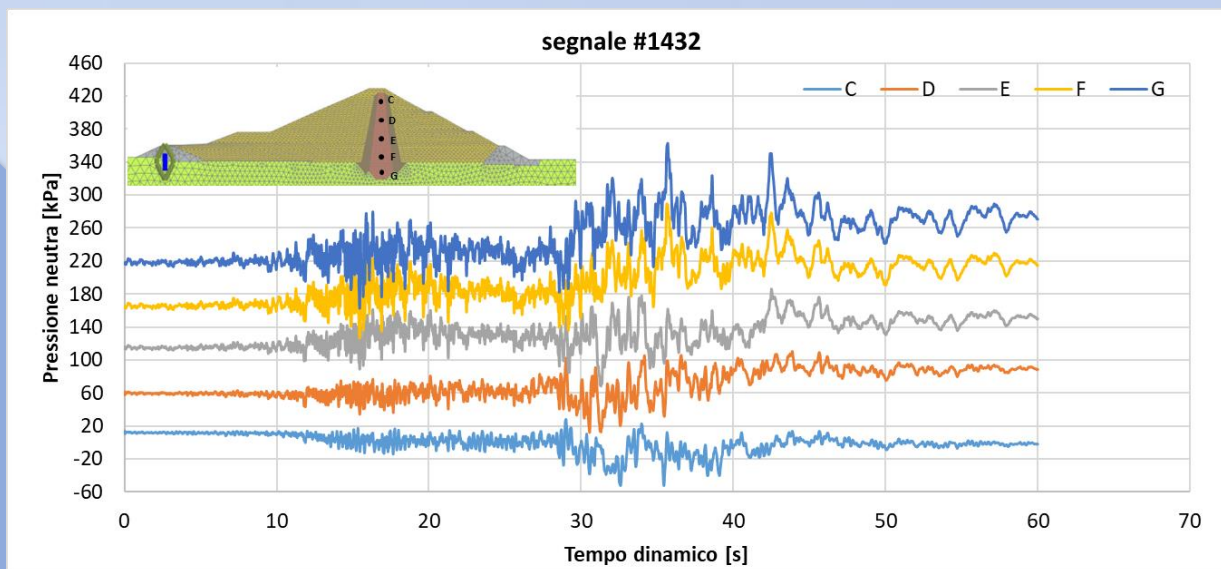
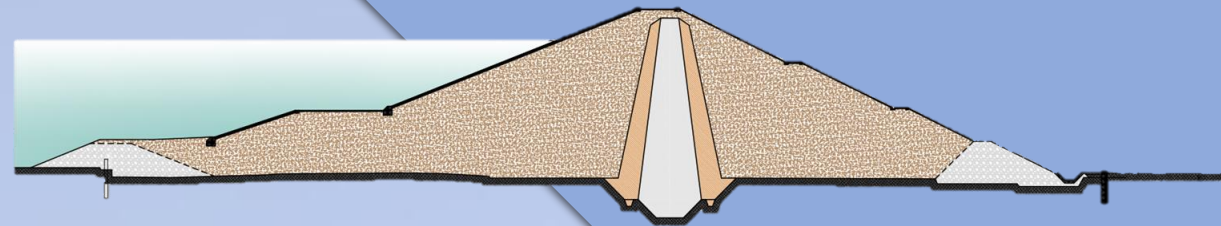


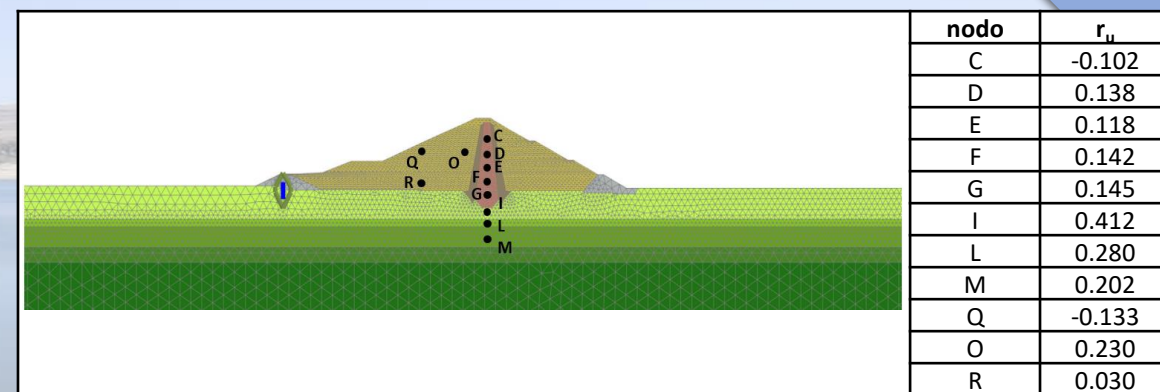
Fig. 7.11.1 – Fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione



VERIFICA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE



$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} \rightarrow 1 \rightarrow \textbf{LIQUEFAZIONE}$$

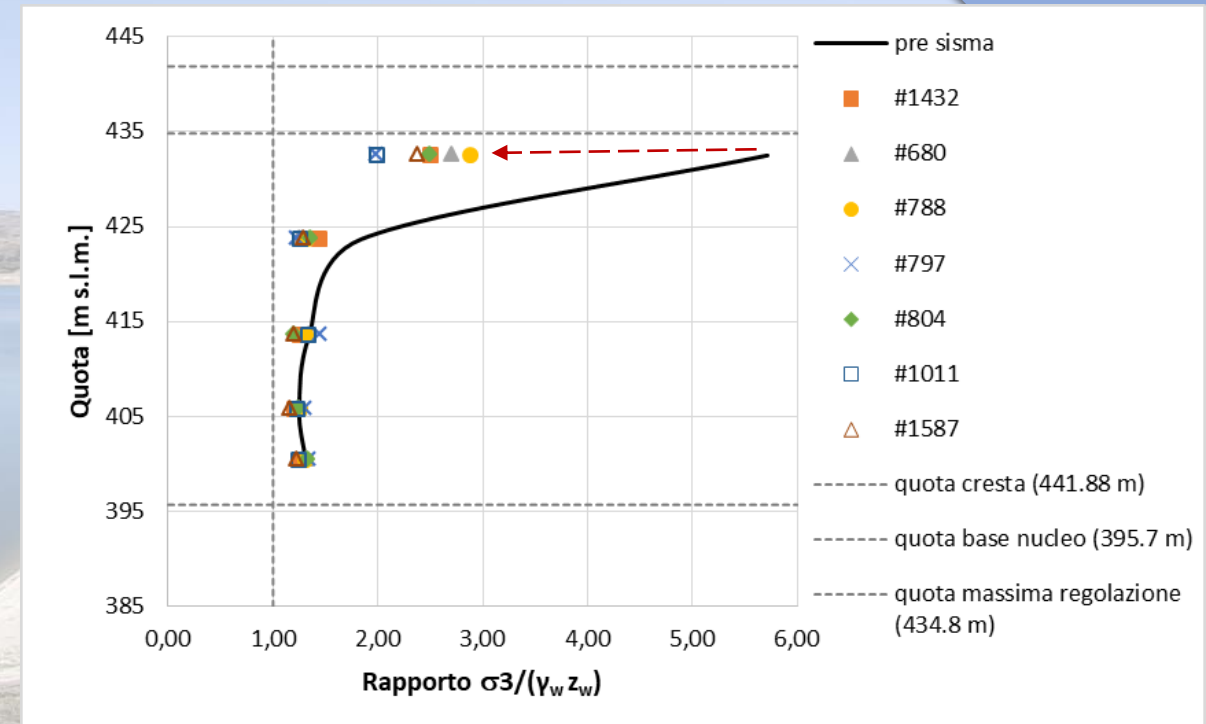
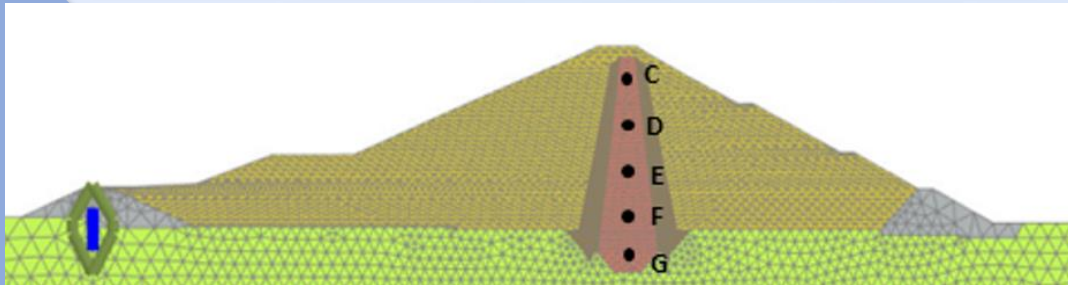
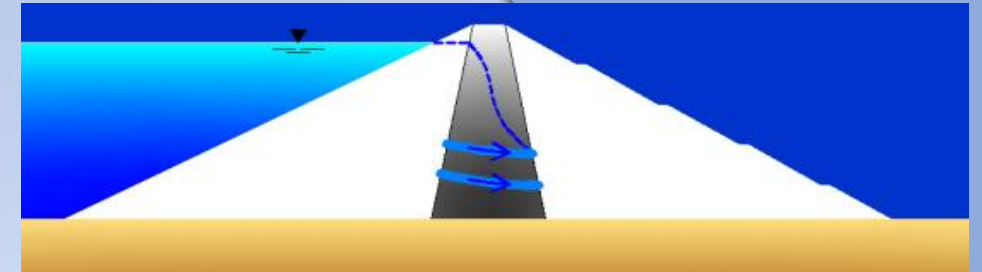
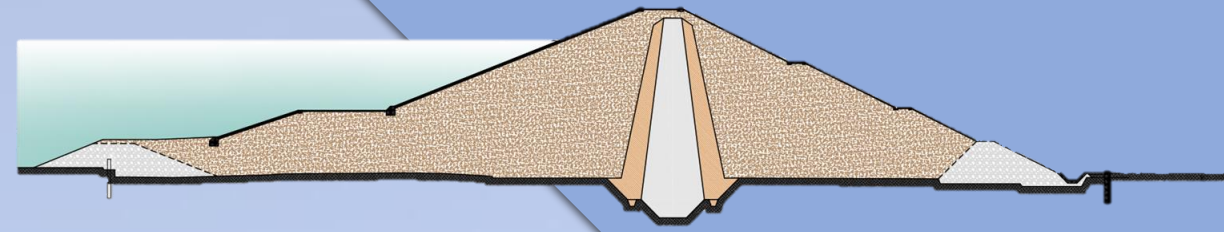


VERIFICA A FRATTURAZIONE IDRAULICA DEL NUCLEO

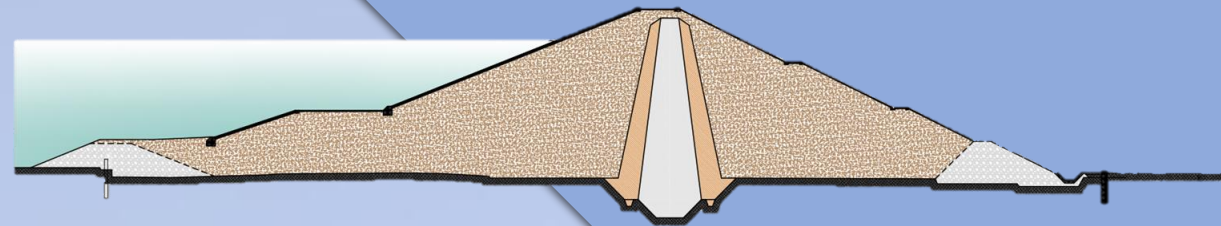
VERIFICA: $\frac{\sigma_3}{\gamma_w \cdot z_w} < 1 \rightarrow \text{FORMAZIONE DI FRATTURE}$

γ_w = peso dell'acqua

z_w = profondità del punto al di sotto del livello massimo d'invaso



CONCLUSIONI



Lo studio di rivalutazione della sicurezza sismica di una diga in terra **esistente** è molto articolato e si esplica in più fasi partendo dall'analisi storico-critica dell'opera, che deve garantire un livello di conoscenza adeguato agli strumenti di analisi richiesti.

I dati di monitoraggio del comportamento dell'opera sia nelle fasi statiche sia sismiche (e.g., sisma Irpinia 1980) possono rappresentare un utile strumento di back-analysis, per definire in modo corretto lo stato iniziale dell'opera prima della simulazione degli eventi sismici di scenario.

Lo studio della risposta sismica dello sbarramento di Conza sul fiume Ofanto è stato effettuato mediante approcci dinamici a diversa complessità come richiesto dalle normative di settore.

In occasione di eventi sismici rappresentativi dello **scenario SLC (Tr=1950 anni)**, il danno atteso per la diga di Conza è risultato significativo/severo secondo le indicazioni di Pells & Fell (2003). I risultati ottenuti con il metodo semplificato di Newmark (1965) risultano leggermente più conservativi ma coerenti con quelli delle analisi dinamiche avanzate.

Nello **scenario SLD (TR = 100 anni)** il danno atteso è risultato «nullo» (Pells & Fell, 2003).



GRAZIE PER L'ATTENZIONE