



Comportamento di dighe in terra in campo statico

Augusto Desideri

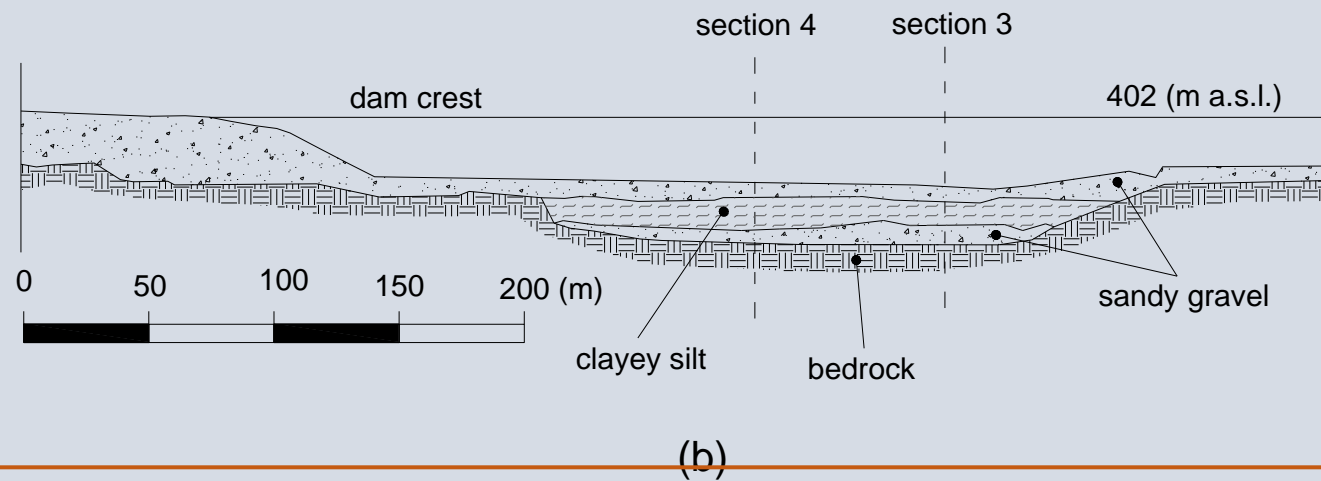
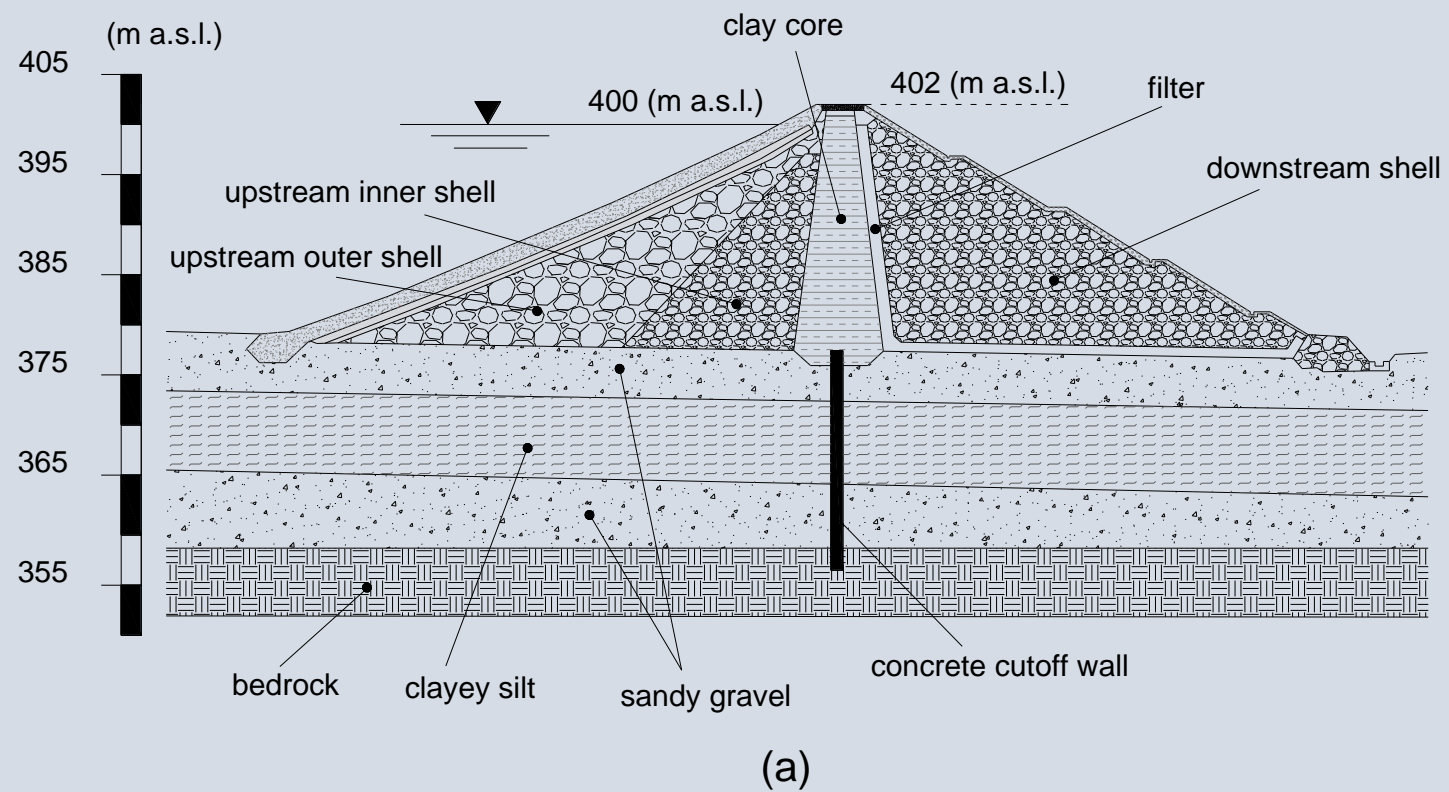
Per parlare del comportamento è necessario osservare il comportamento

Il monitoraggio, la strumentazione di monitoraggio e l'interpretazione delle misure di monitoraggio rivestono un ruolo fondamentale per la comprensione e la descrizione dei comportamenti

Nell'elencare i motivi che spingono all'osservazione del comportamento di un'opera, emerge immediatamente come il monitoraggio sia strettamente legato al modello utilizzato per descriverne il comportamento, sia nella scelta delle quantità da misurare, sia nell'aggiornamento delle previsioni sulla base delle osservazioni, in un processo di continua interazione fra previsioni e misure ...

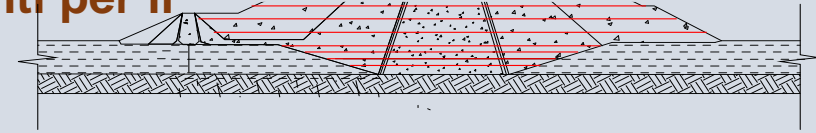
Comportamento e Controllo delle Opere Geotecniche
Desideri e Callisto, 2009

Diga Zonata



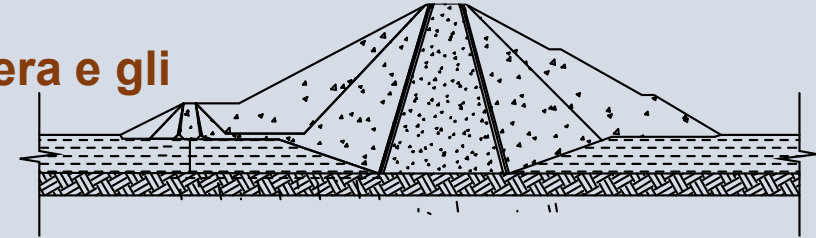
COSTRUZIONE

posa in opera per strati; costipamento di un mezzo parzialmente saturo; installazione di strumenti per il monitoraggio



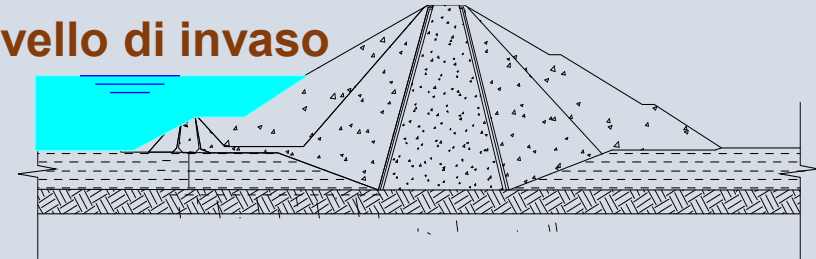
CONSOLIDAZIONE POST-COSTRUTTIVA

Intervallo temporale tra l'ultimazione dell'opera e gli Invasi sperimentali



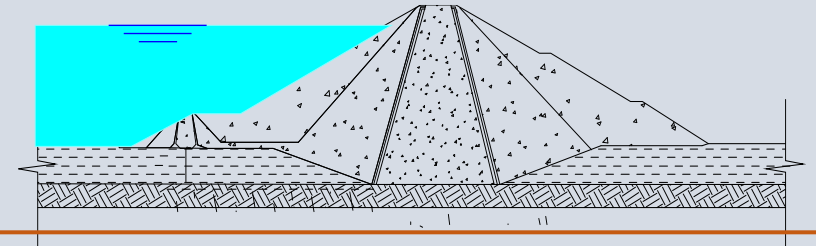
INVASI SPERIMENTALI

Si programma l'innalzamento graduale del livello di invaso per il collaudo della diga



ESERCIZIO

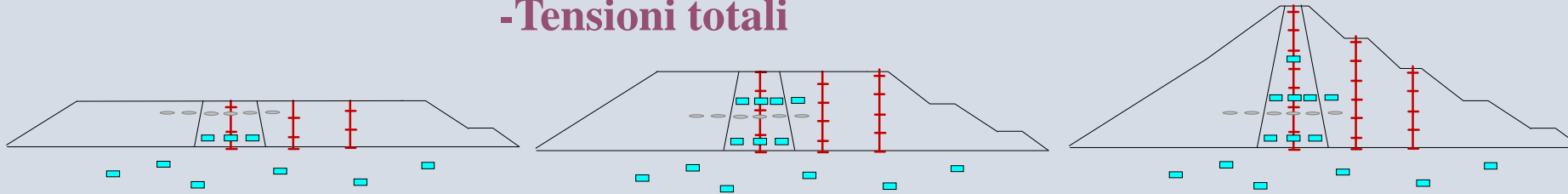
Il livello d'invaso può incrementarsi fino ad una soglia; vengono monitorate e interpretate alcune grandezze fisiche per il controllo della sicurezza



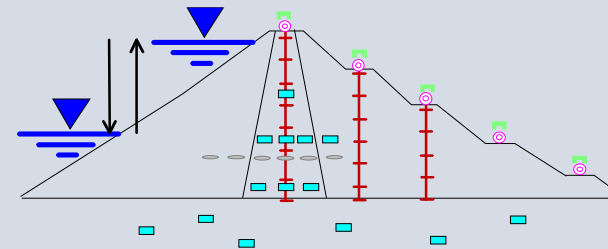
EVENTI SISMICI

Cosa si misura

- **Costruzione**
 - Cedimenti interni
 - Cedimenti di contorno
 - Pressioni interstiziali
 - Tensioni totali



- **Esercizio**
 - Cedimenti interni
 - Cedimenti di contorno
 - Spostamenti orizzontali di contorno
 - Pressioni interstiziali
 - Tensioni totali
 - Portate filtranti
 - Accelerazioni



Proprietà dei materiali : misure e controlli

FASE COSTRUTTIVA

IL MATERIALE VIENE:

PRELEVATO DA UNA CAVA DI PRESTITO

CONTROLLATO NELLE SUE PROPRIETA' INTRINSECHE

EVENTUALMENTE VARIATO NEL CONTENUTO D'ACQUA

POSTO IN OPERA PER COSTIPAMENTO AD UNA DETERMINATA ENERGIA

COSTIPAMENTO:

PIEDI DI PECORA (GRANA FINE)

RUOTE GOMMATE (GRANA GROSSA-GRANA FINE)

VIBRAZIONE (GRANA GROSSA)

L'ENERGIA DIPENDE DALLE MASSE E DAL NUMERO DI CICLI

IN ALCUNIO CASI IL ROCKFILL VIENE SEMPLICEMENTE SCARICATO

MATERIALI A GRANA FINE

- a) omogeneità, intesa principalmente come assenza di discontinuità attraverso cui possano svilupparsi fenomeni di flusso concentrato*
- b) bassa permeabilità (inferiore a 10^{-5} cm/s)*
- c) bassa compressibilità, per evitare pressioni interstiziali eccessive e deformazioni inaccettabili*
- d) elevata resistenza (requisito di minor importanza nel caso di nucleo verticale)*
- e) stabilità nel tempo delle proprietà meccaniche e idrauliche in condizioni di completa saturazione*
- f) duttilità, in misura sufficiente affinché cedimenti differenziali siano assecondati dall'opera senza lo sviluppo di rotture localizzate*
- g) non erodibilità*

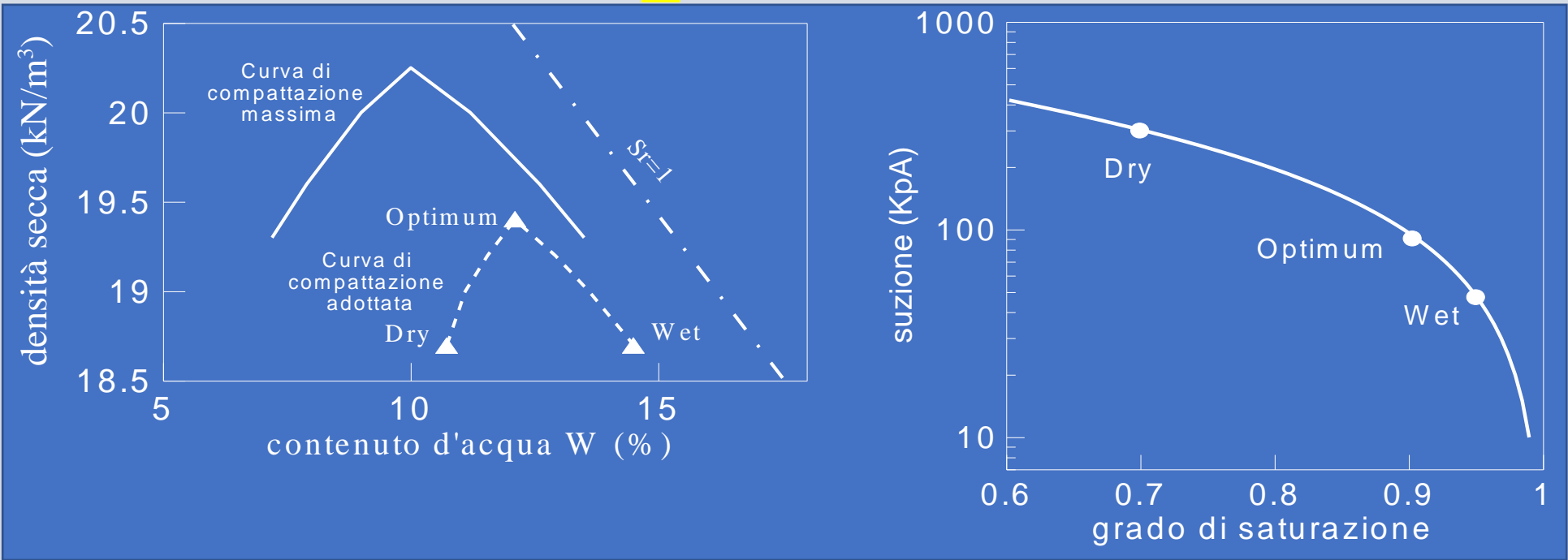
E' possibile utilizzare una vasta gamma di materiali naturali quali argille con indice di plasticità fino al 35%, argille sabbiose o sabbie argillose, argille con ghiaia, argille ghiaiose, limi, limi sabbiosi etc.

Compattazione

Caratteristiche meccaniche del materiale da nucleo

Lawton et al., 1989

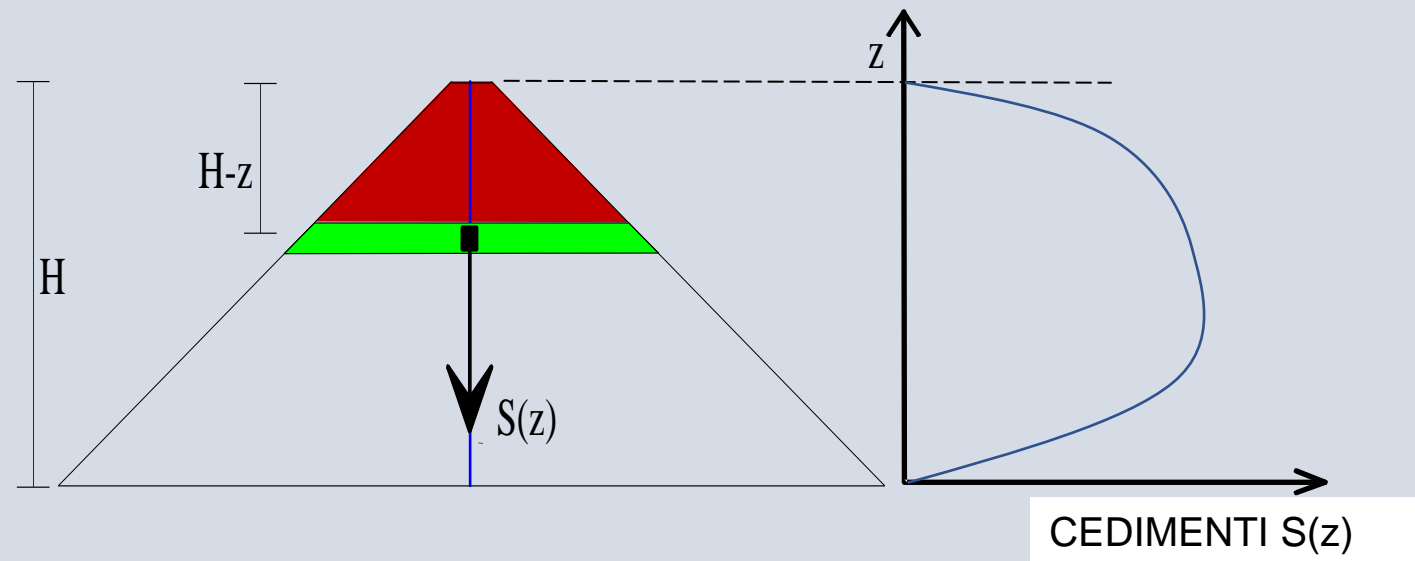
Alonso et al., 1995



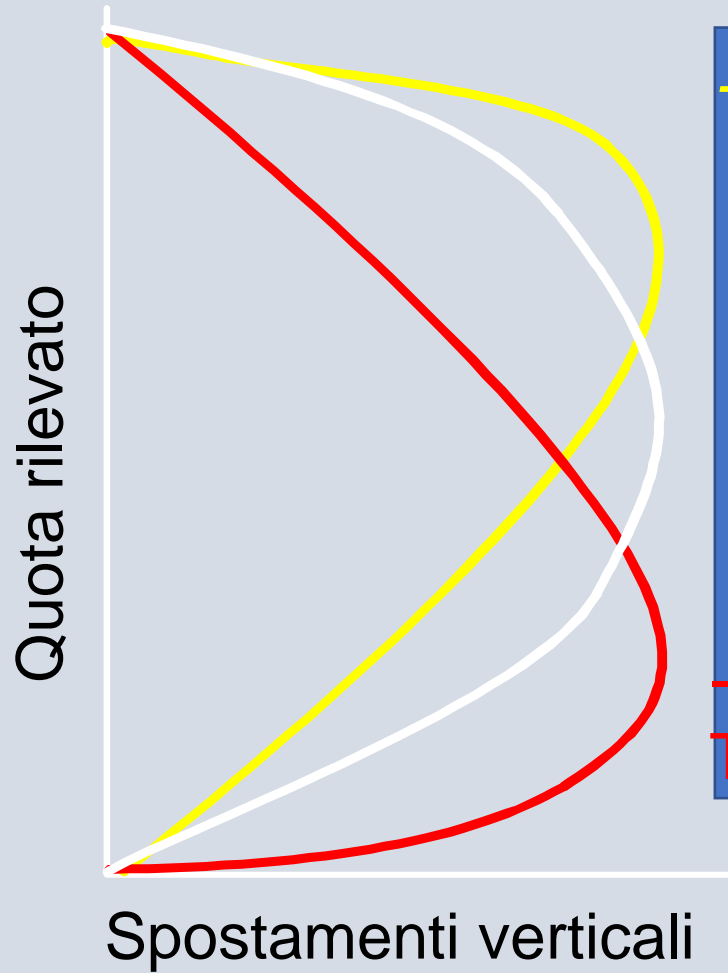
Misure di spostamenti

CEDIMENTI

DURANTE LA FASE COSTRUTTIVA – fondazione rigida



CURVE ASSESTIMETRICHE

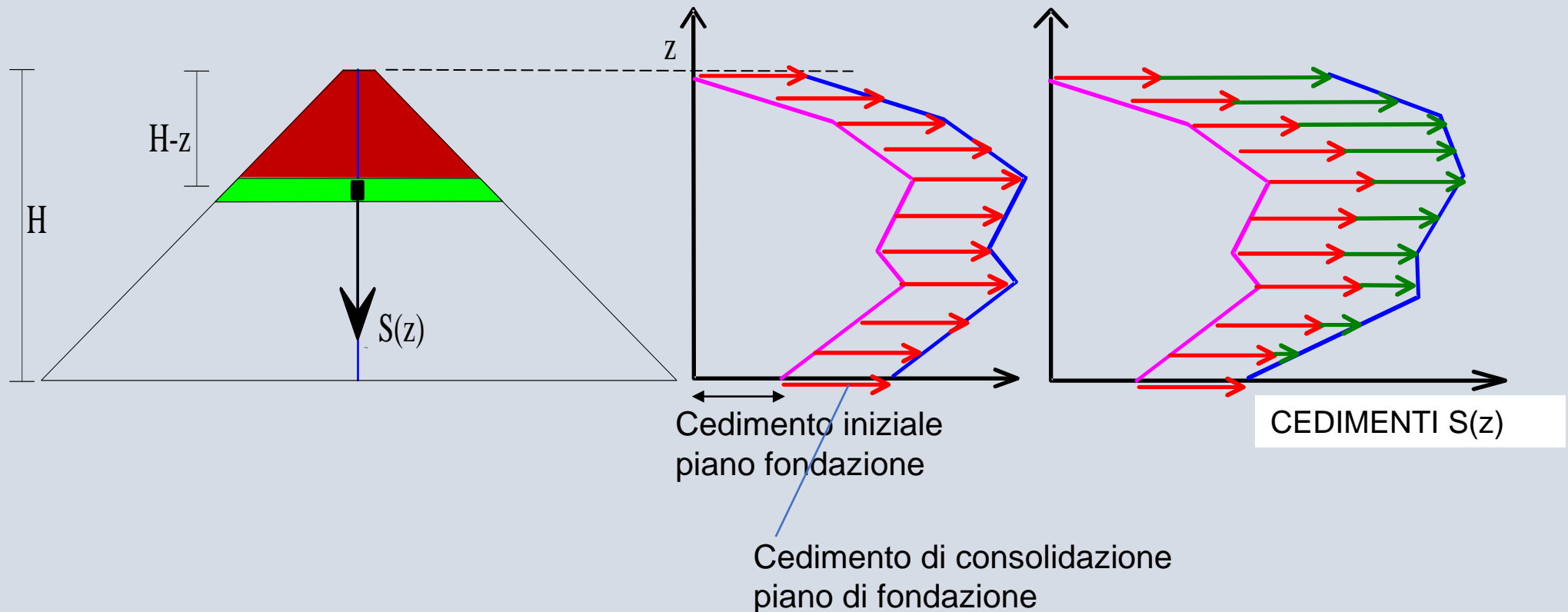


-Perdita di confinamento con la quota
Effetti arco modesti o assenti

-Perdita di confinamento ed effetti arco si
compensano

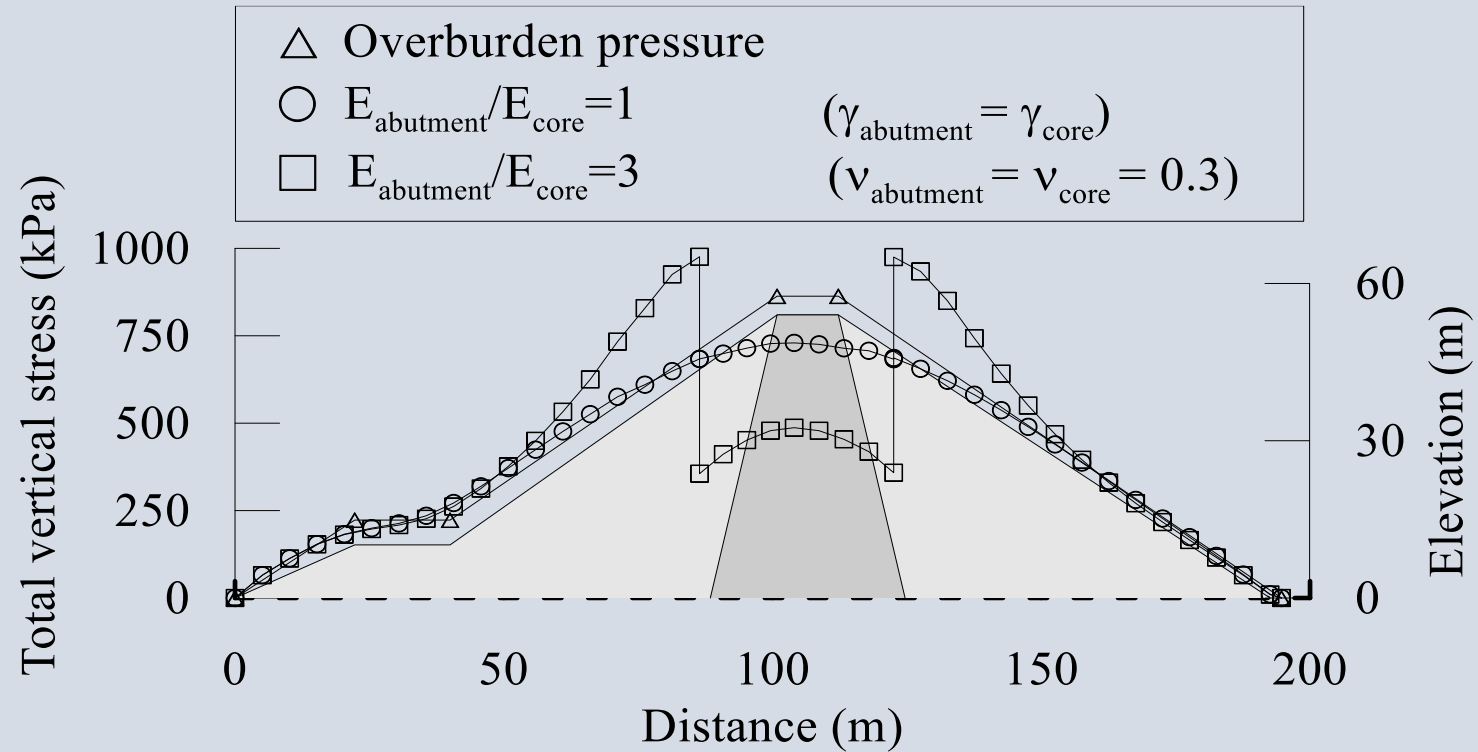
-Effetti arco significativi
Tensioni verticali e pressioni interstiziali modeste

CEDIMENTI IN FASE DI COSTRUZIONE E DURANTE LA SUCCESSIVA CONSOLIDAZIONE fondazione deformabile



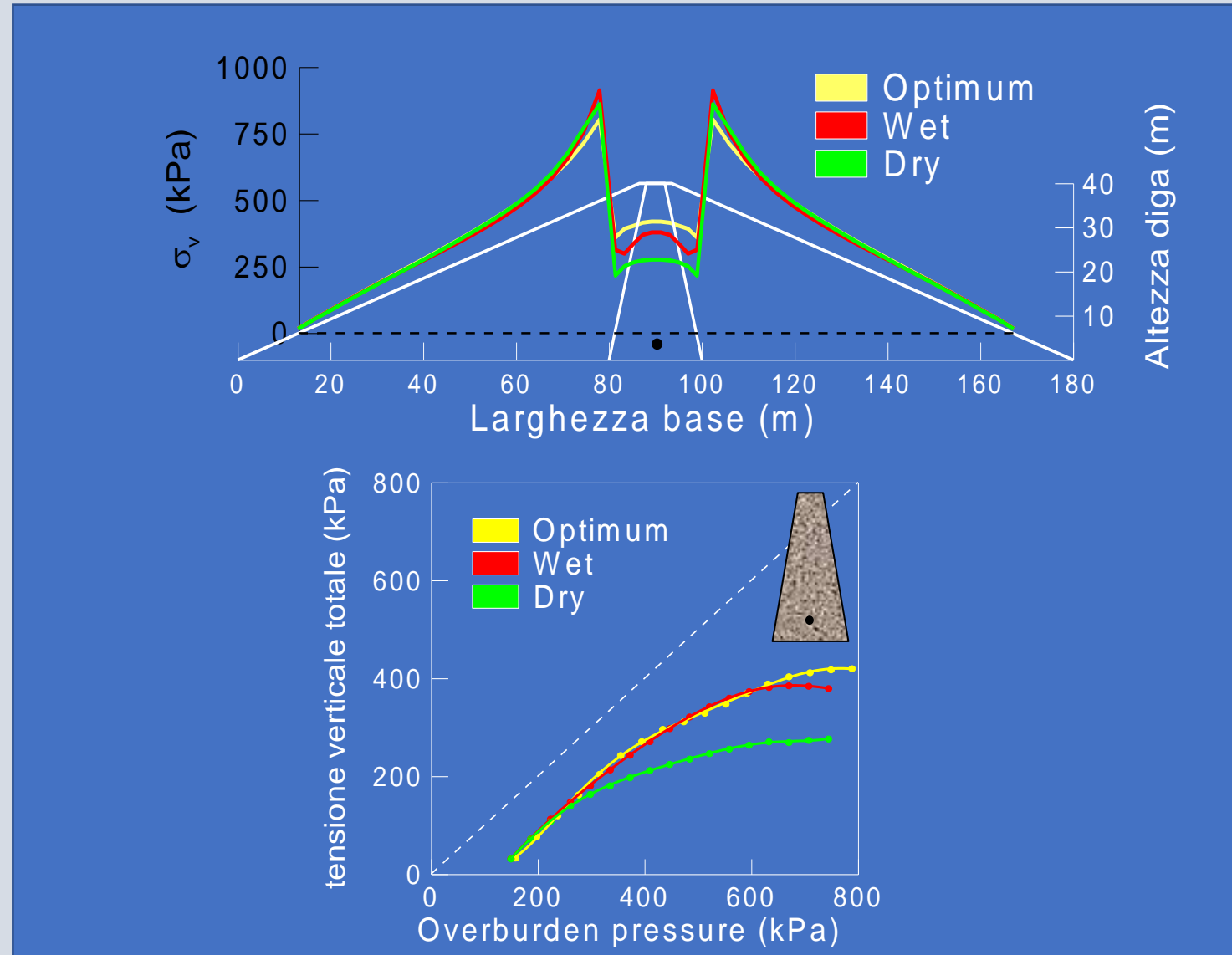
Misure di tensione

TENSIONI VERTICALI AL PIANO DI FONDAZIONE

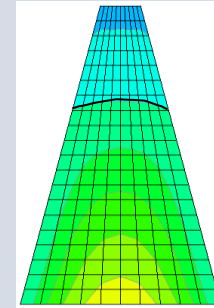
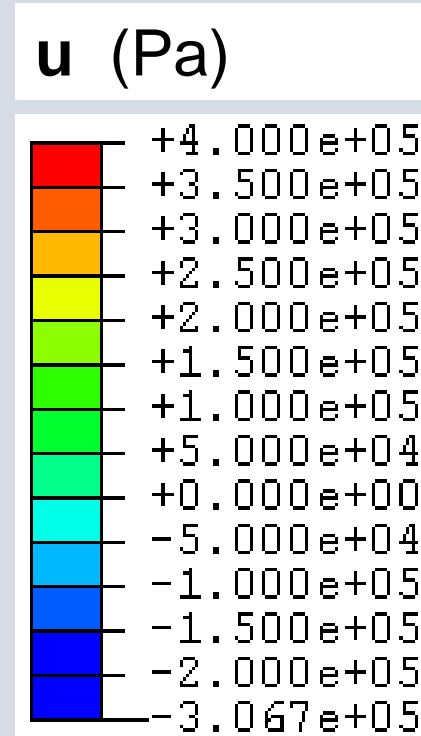


Beliche Dam: vertical total stress computed
along a horizontal plane (dashed line)

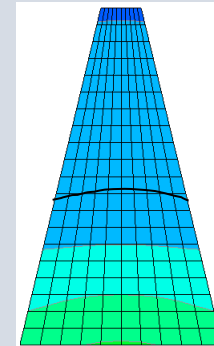
TENSIONI VERTICALI AL PIANO DI FONDAZIONE: **IMPORTANZA DELLA SATURAZIONE**



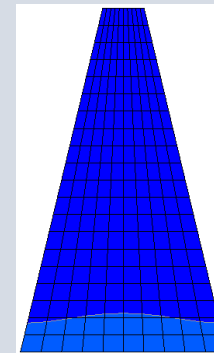
PRESSIONI INTERSTIZIALI A FINE COSTRUZIONE: importanza della saturazione iniziale



WET

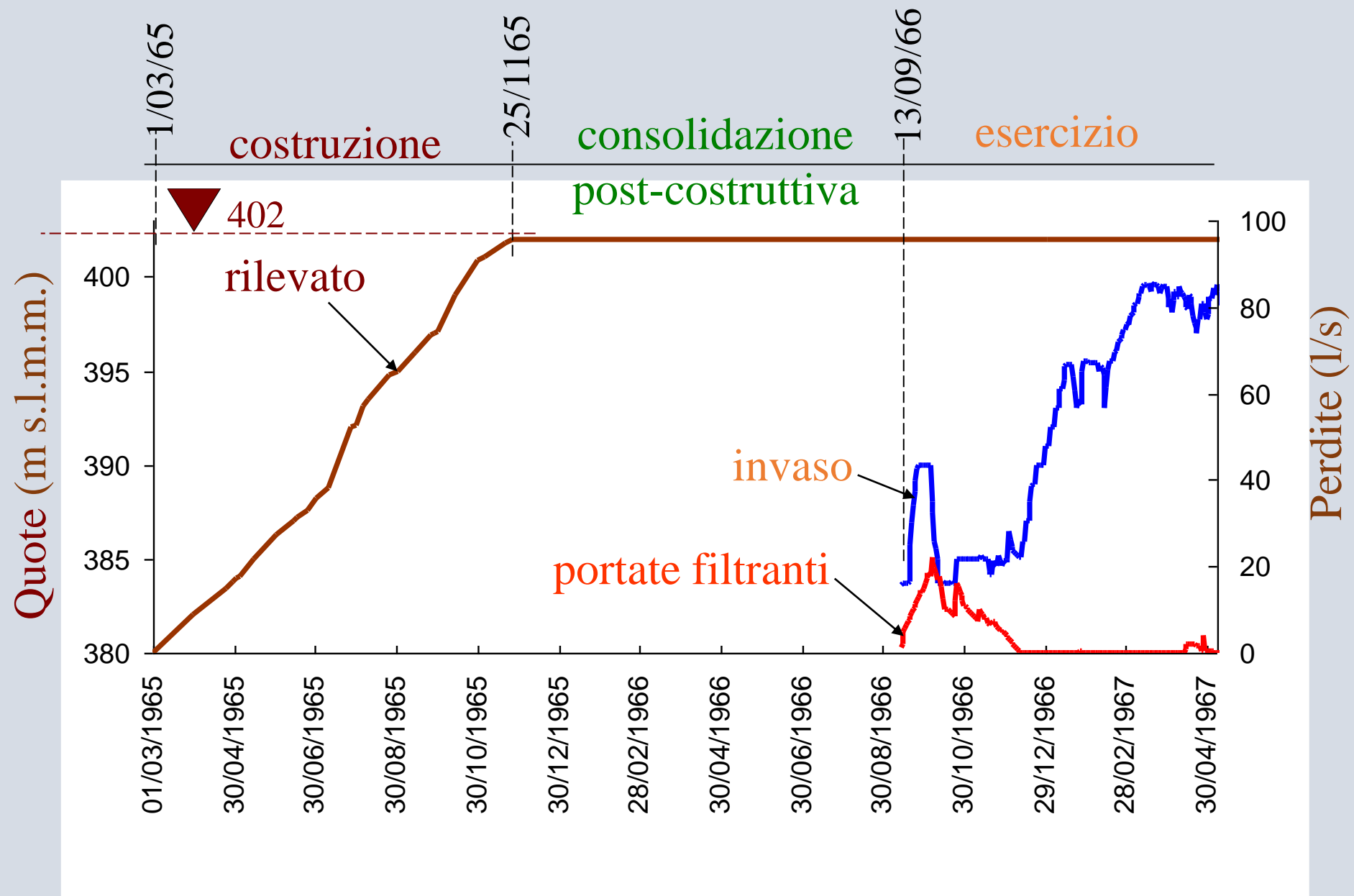


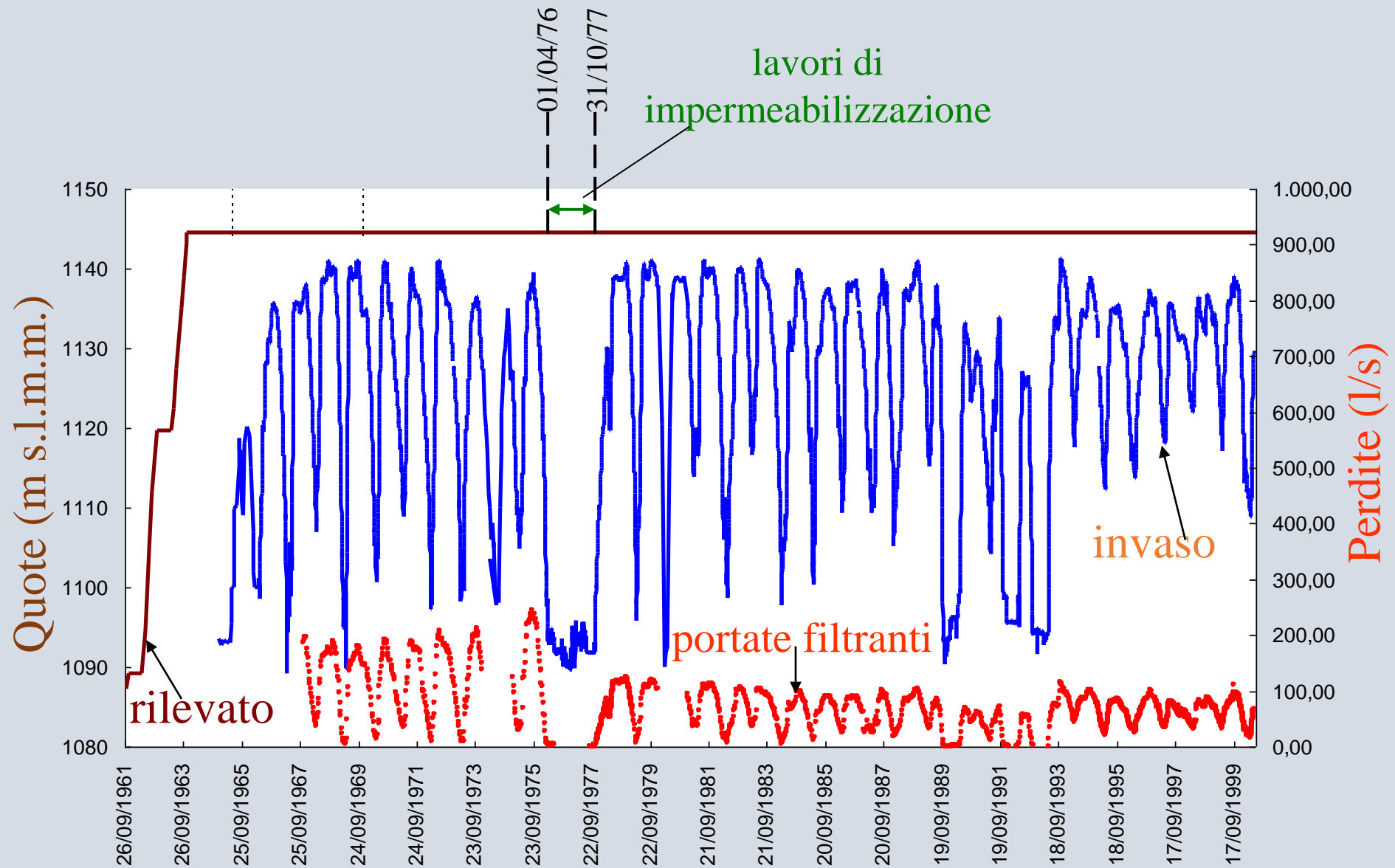
OPTIMUM



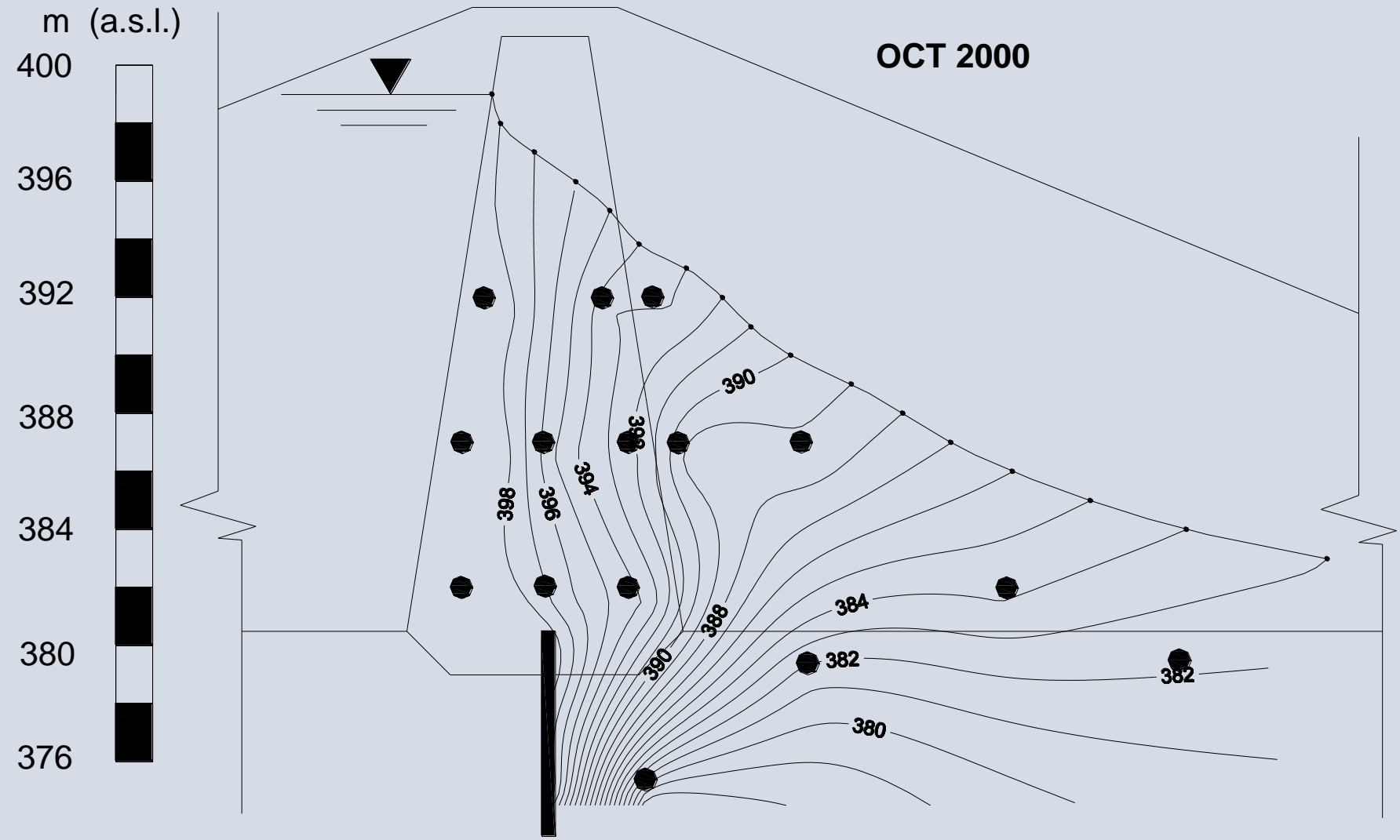
DRY

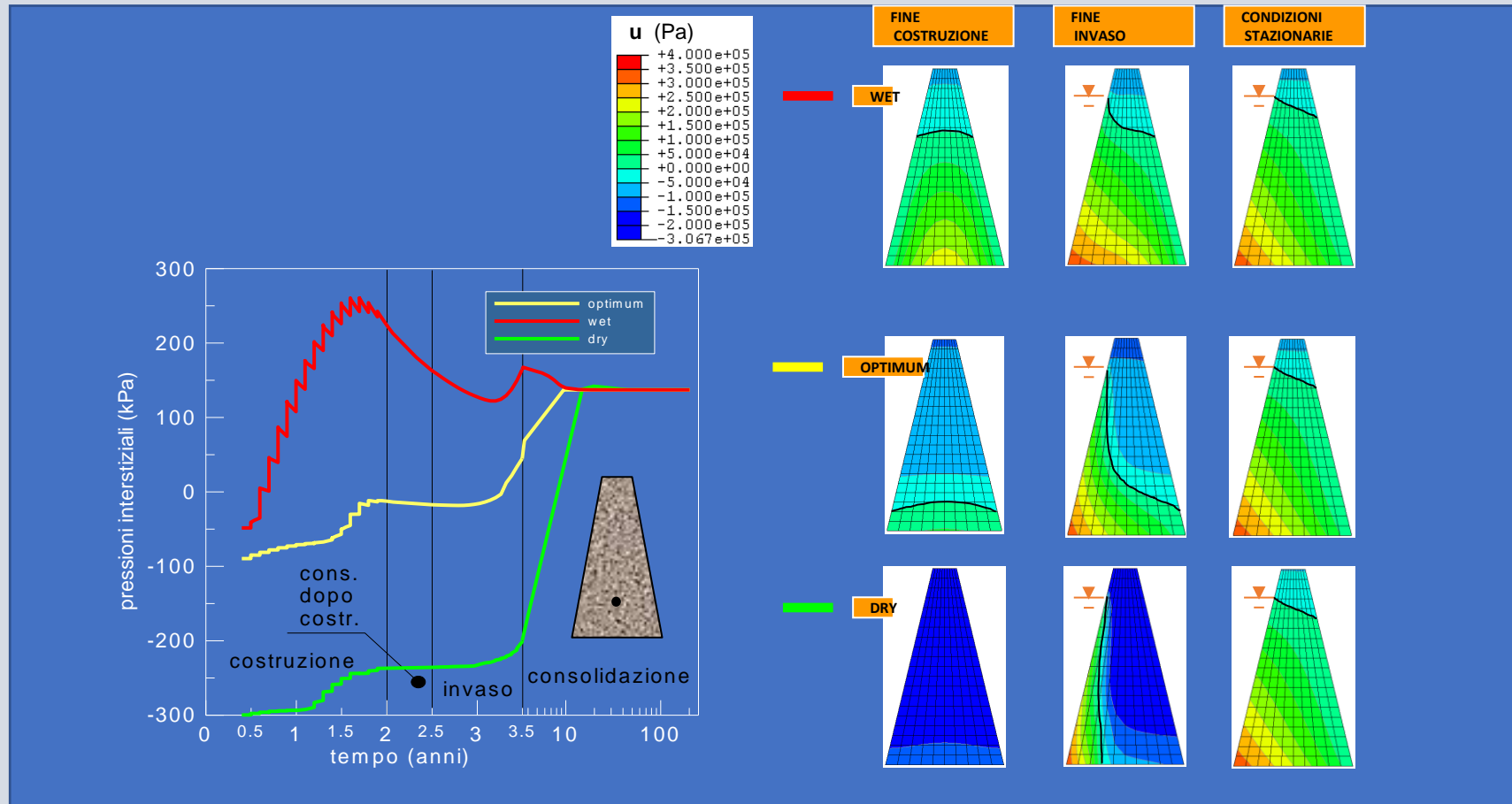
Misure di pressione e portate filtranti





Elaborazione di misure piezometriche





La diga di Bilancino

Già sul finire degli anni cinquanta si fece strada l'ipotesi di creare uno sbarramento sul fiume [Sieve](#), in località Bilancino, onde limitare i rischi di alluvione nella piana dell'[Arno](#) e sopperire al bisogno idrico di [Firenze](#) e [Prato](#).

Dopo l'alluvione di Firenze (novembre [1966](#)) uno studio di ingegneria di Milano (Franco Cambi - Renato Sacchi) elaborò un progetto di massima per uno sbarramento sul fiume Sieve proprio in località Bilancino. Lo scopo del progetto era, nell'immediato, l'imbrigliatura delle acque del fiume e, in prospettiva, l'utilizzo delle stesse per uso potabile e per la produzione di energia elettrica. Tale progetto fu poi sottoposto all'esame degli Enti locali nel [1968](#).

Fu solo nel [1978](#) tuttavia che si costituì il "Consorzio per le risorse idriche. Schema 23 Firenze", formato da 10 comuni della piana (attuali province di [Firenze](#) e [Prato](#)). Gli studi di progetto vennero affidati agli ingegneri [Giuseppe Baldovin](#), [Arrigo Forasassi](#) e [Giorgio Hautmann](#) e ad Alessandro Martelli (ingegnere capo del Consorzio Schema 23); gli elaborati furono presentati nel [1982](#) e nel [1984](#) venne stipulata una convenzione tra la Regione Toscana, il comune di Barberino, la Comunità Montana e la Provincia di Firenze che prevedeva la trasformazione dell'invaso in un vero e proprio lago, con la conseguente creazione di aree attrezzate e di recupero lungo le sponde: in particolare vennero previste 5 aree comprensive di un centro permanente di ricerca e controllo per problemi ambientali, un'area faunistico-venatoria e un polo di sport acquatici.

I lavori di sbancamento e risistemazione furono avviati nello stesso [1984](#), ma se le opere relative alla diga procedevano speditamente, più complesso fu l'iter della torre di presa e della casa di guardia, per la quale i tre progettisti incaricati avevano presentato un progetto "in stile" rifiutato dalla committenza. A tal fine nel [1987](#) venne incaricato l'architetto Angelo Villa di redigere un nuovo progetto, presentato l'anno successivo e immediatamente approvato; i lavori per queste due fabbriche furono avviati nel luglio [1991](#) e conclusi ufficialmente il 21 febbraio [1996](#).

La diga è stata ufficialmente inaugurata con l'apertura al pubblico nell'ottobre [1999](#)

DIGA DI BILANCINO

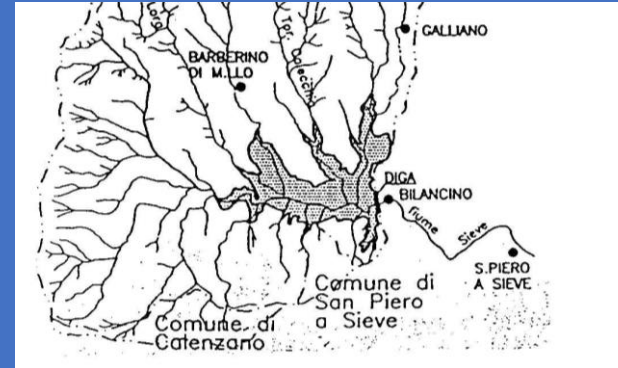
Comune di Barberino del Mugello

Altezza massima $H = 42 \text{ m}$

Larghezza massima $L = 264 \text{ m}$

Sviluppo longitudinale 710 m

Bacino imbrifero sotteso 150 km^2



Fase realizzativa della diga in terra



Opera di sbarramento completata

DIGA DI BILANCINO

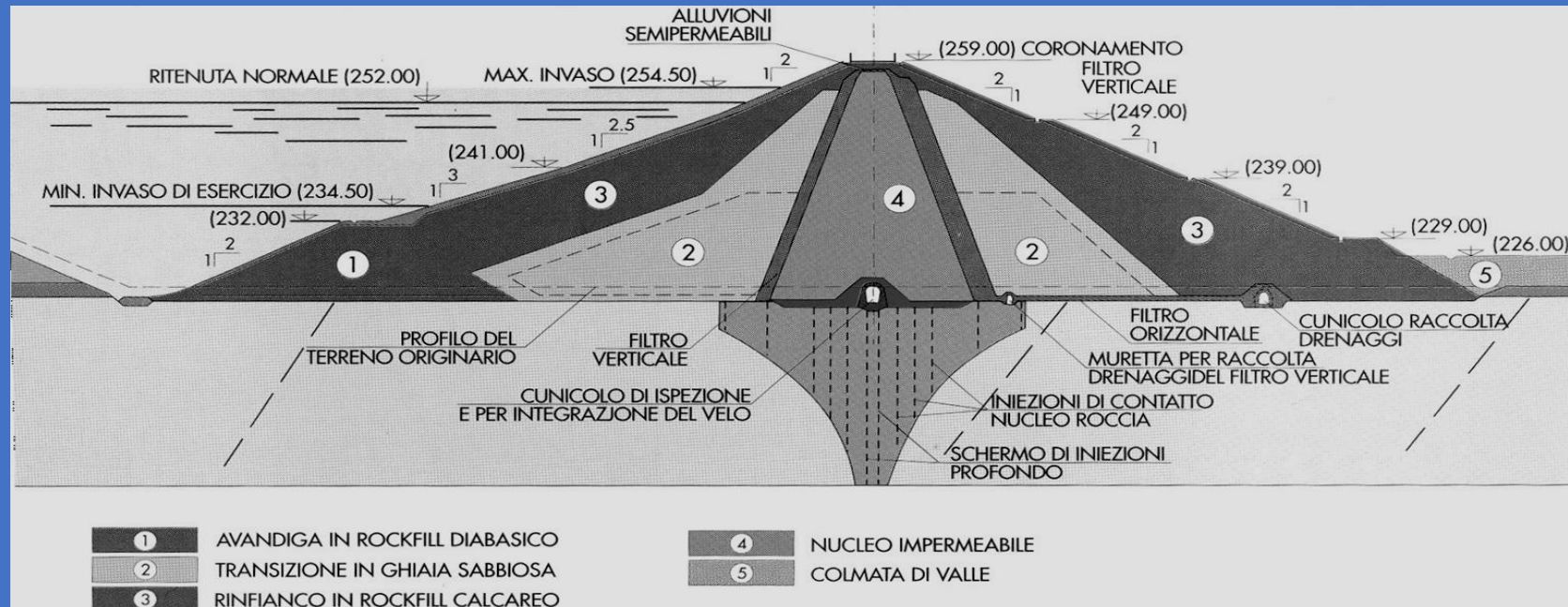
Comune di Barberino del Mugello

Altezza massima $H = 42$ m

Larghezza massima $L = 264$ m

Sviluppo longitudinale 710 m

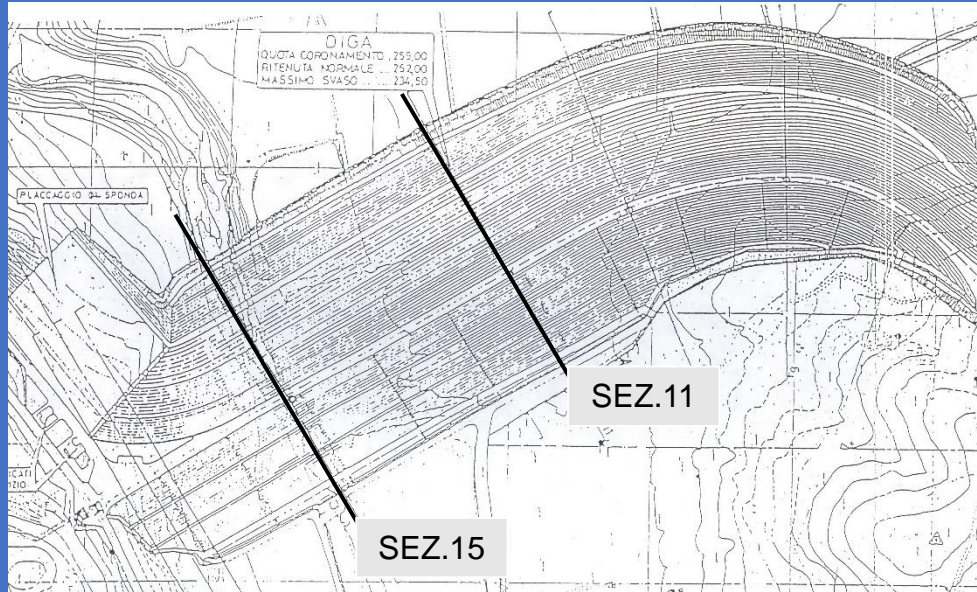
Bacino imbrifero sotteso 150 km^2



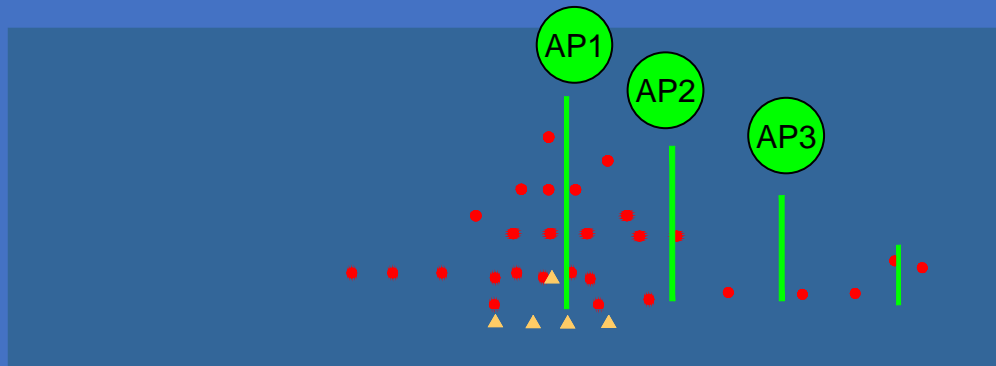
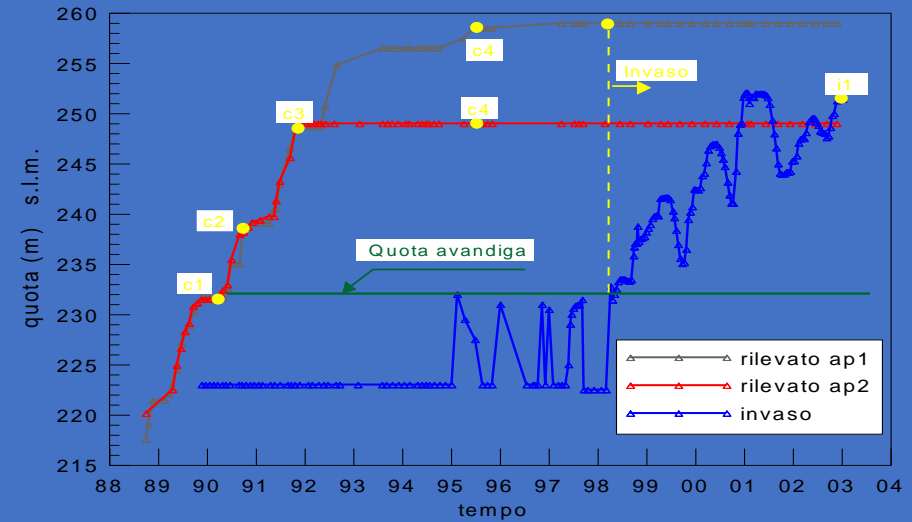
Sezione tipo e schema dei materiali costituenti il corpo diga

SEZIONI STRUMENTATE

Planimetria



Evoluzione temporale delle quote del rilevato e dell' invaso



STRUMENTAZIONE

Verticali Assestimentriche



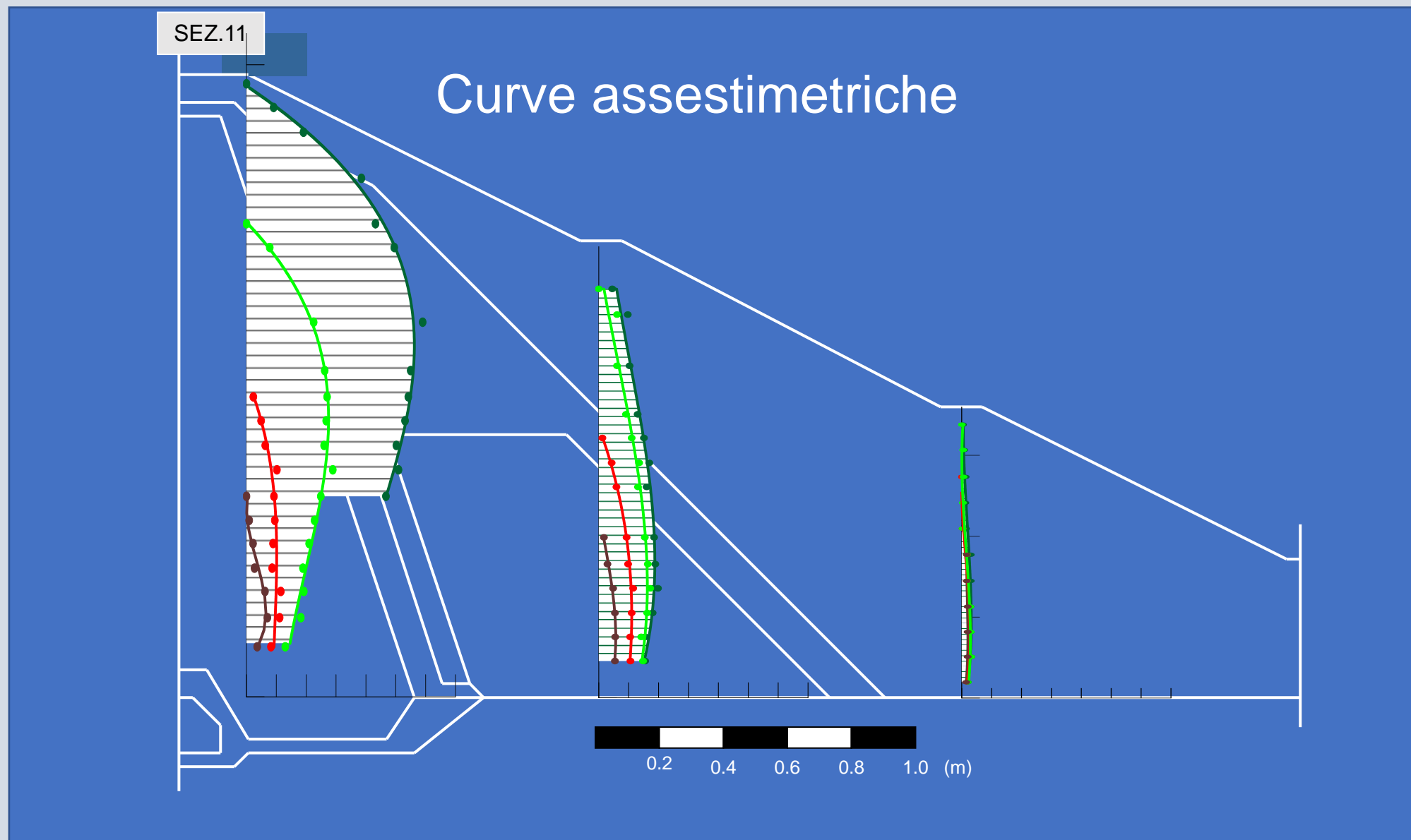
Celle Piezometriche



Celle di pressione totale

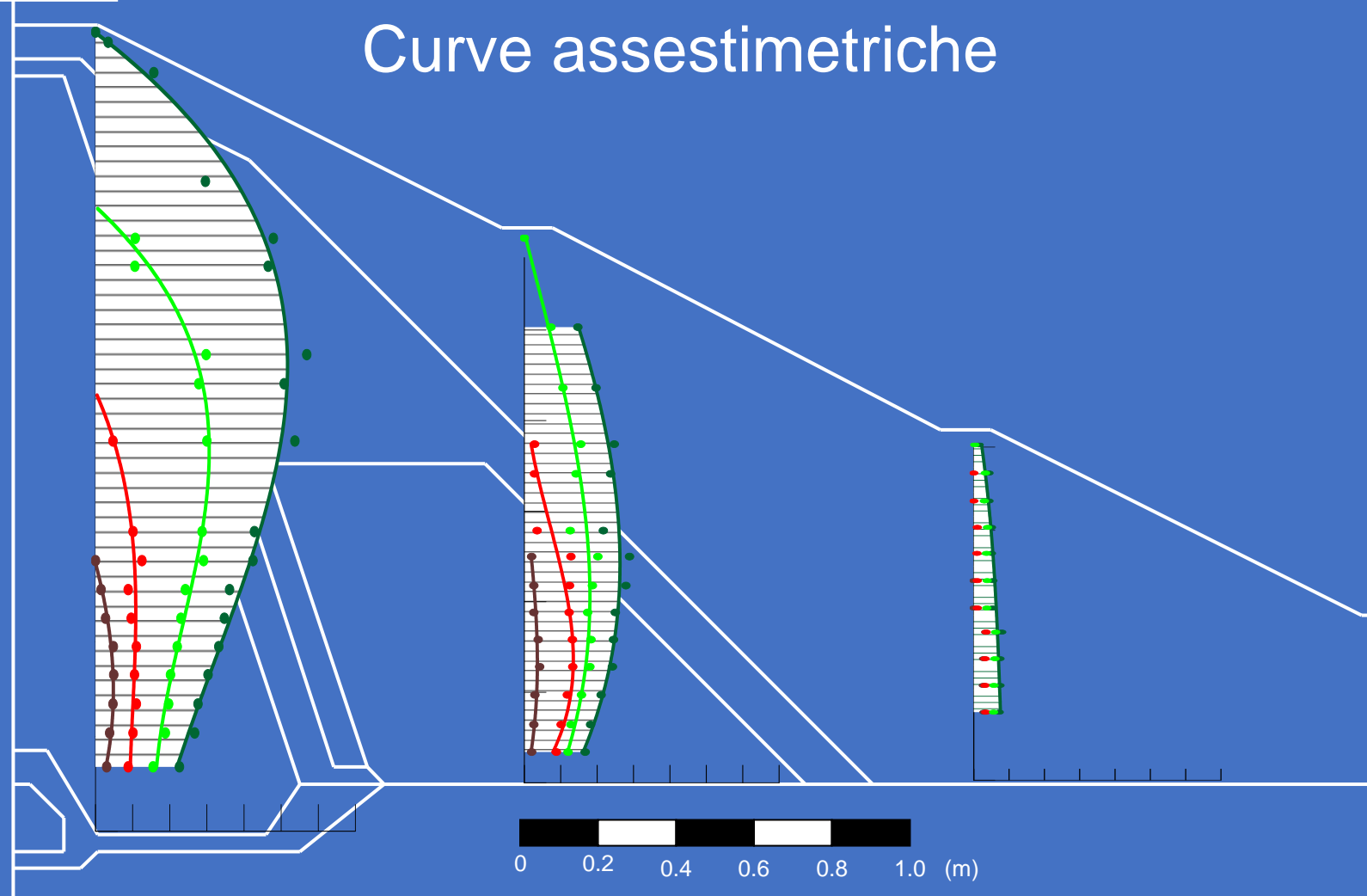


Portate filtranti e torbidità

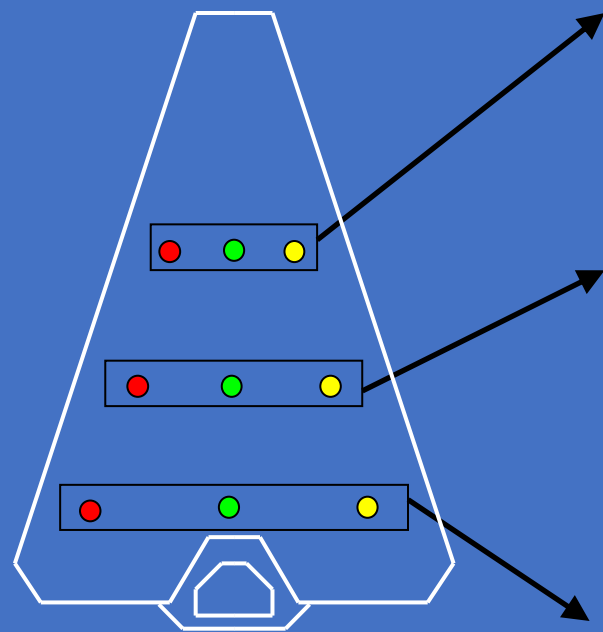


SEZ.15

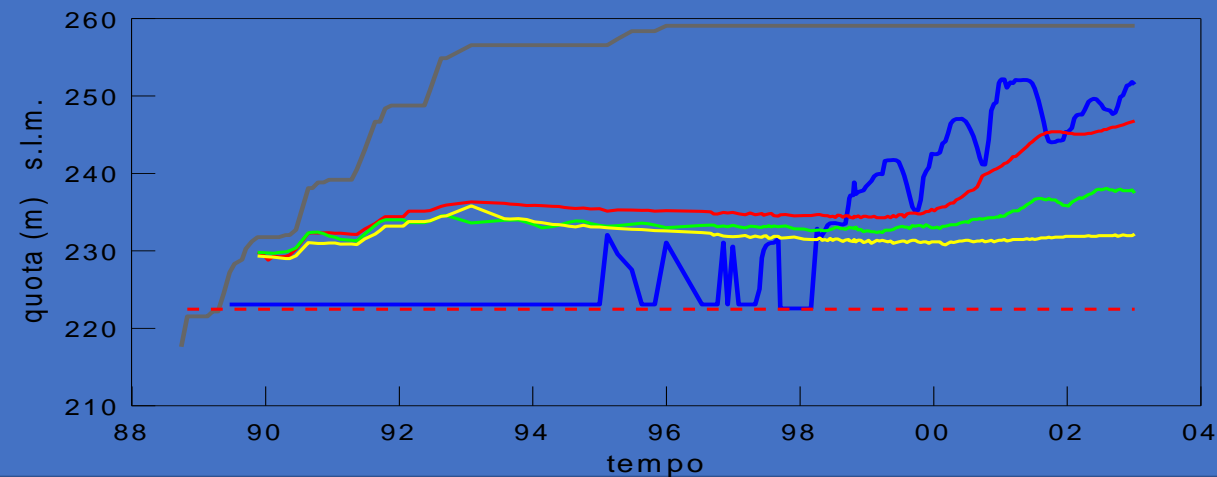
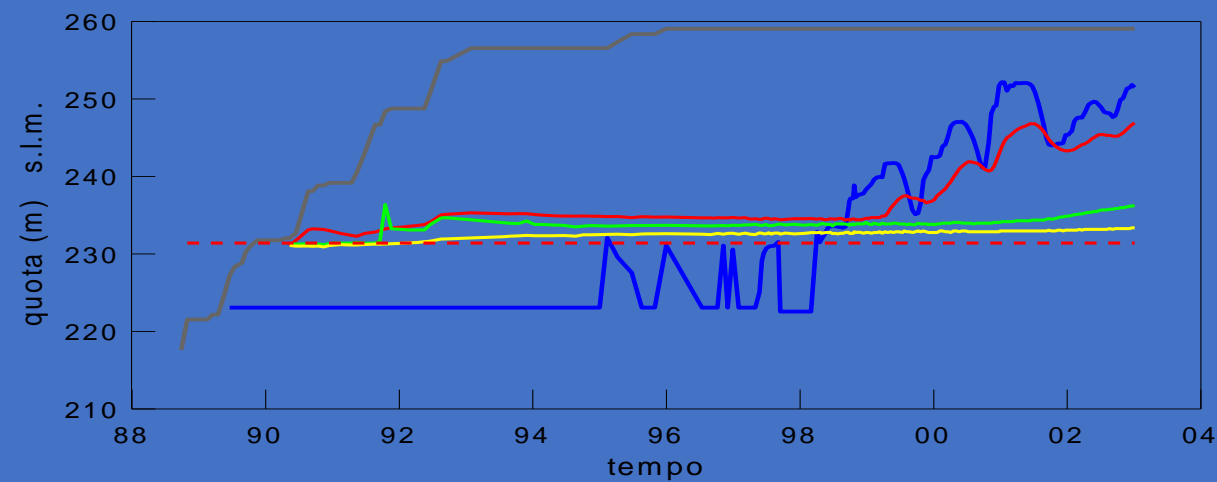
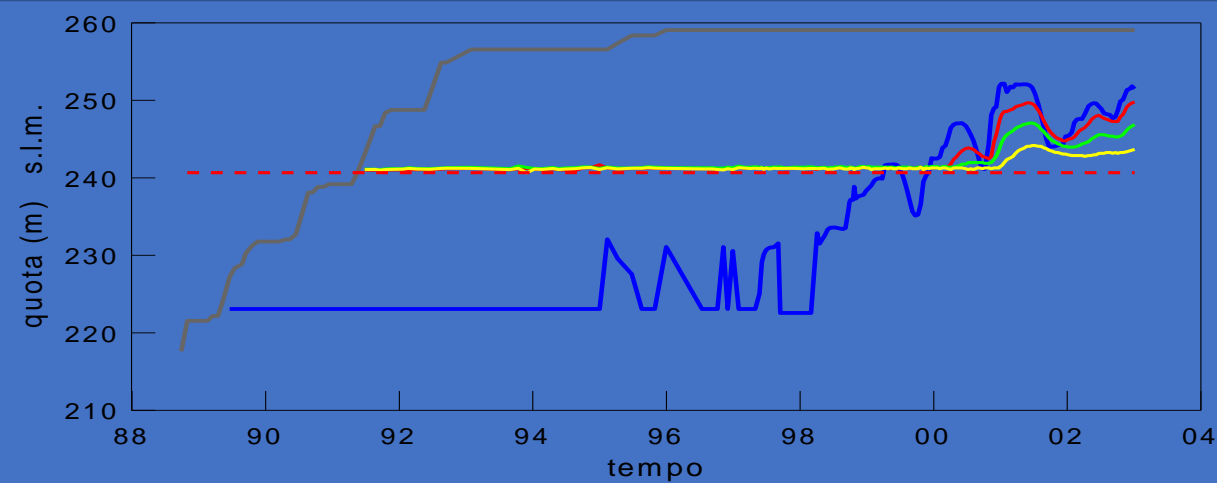
Curve assestimentriche



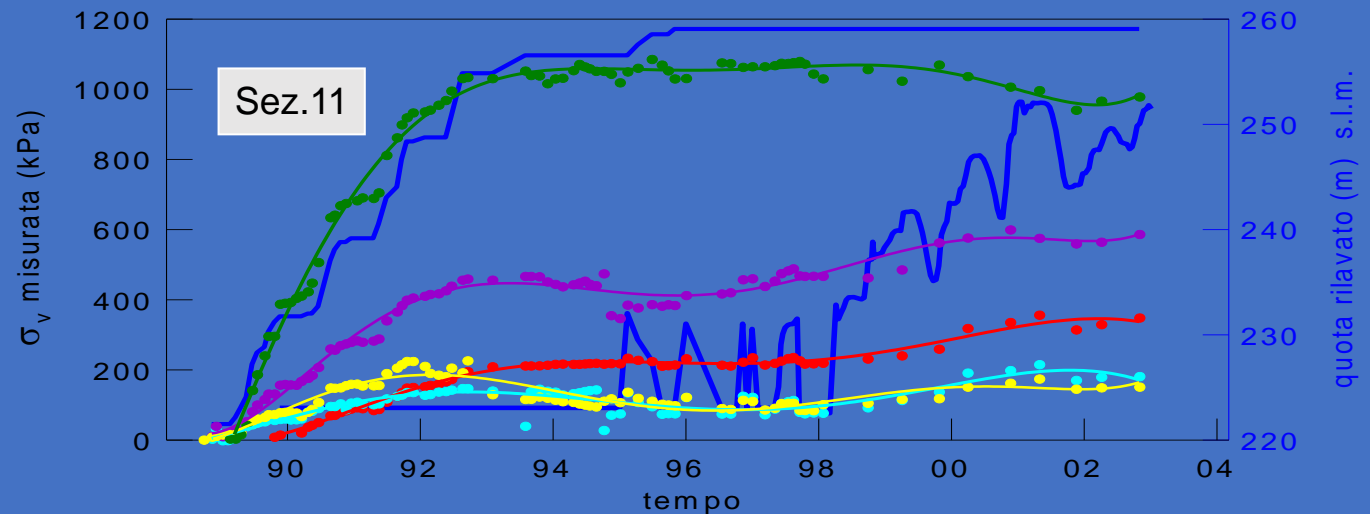
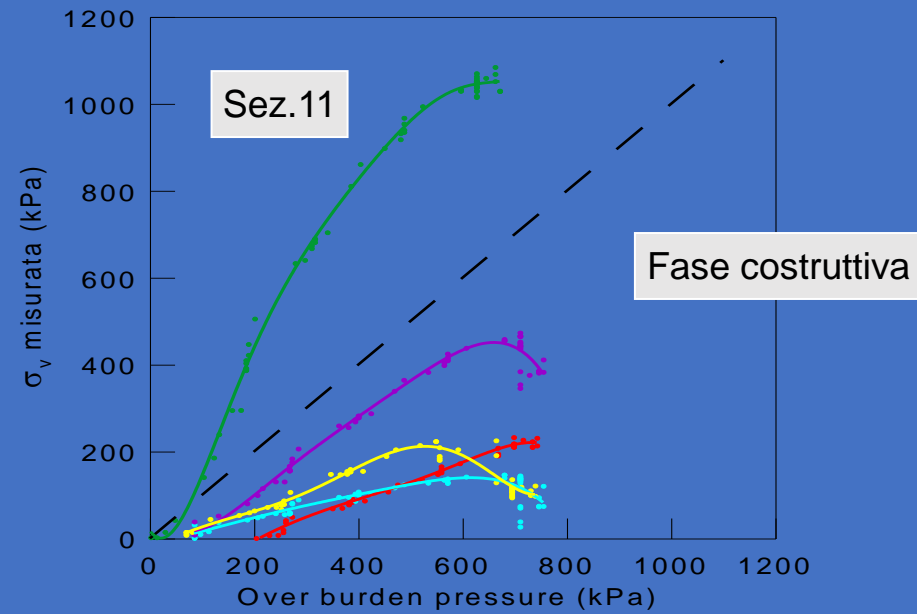
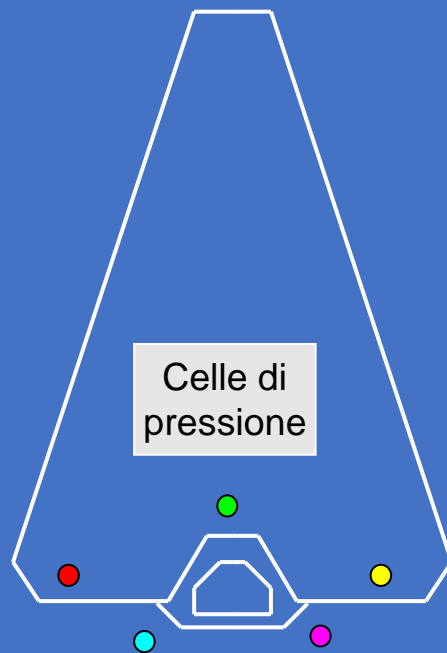
Evoluzione delle quote piezometriche in fase costruttiva e di invaso



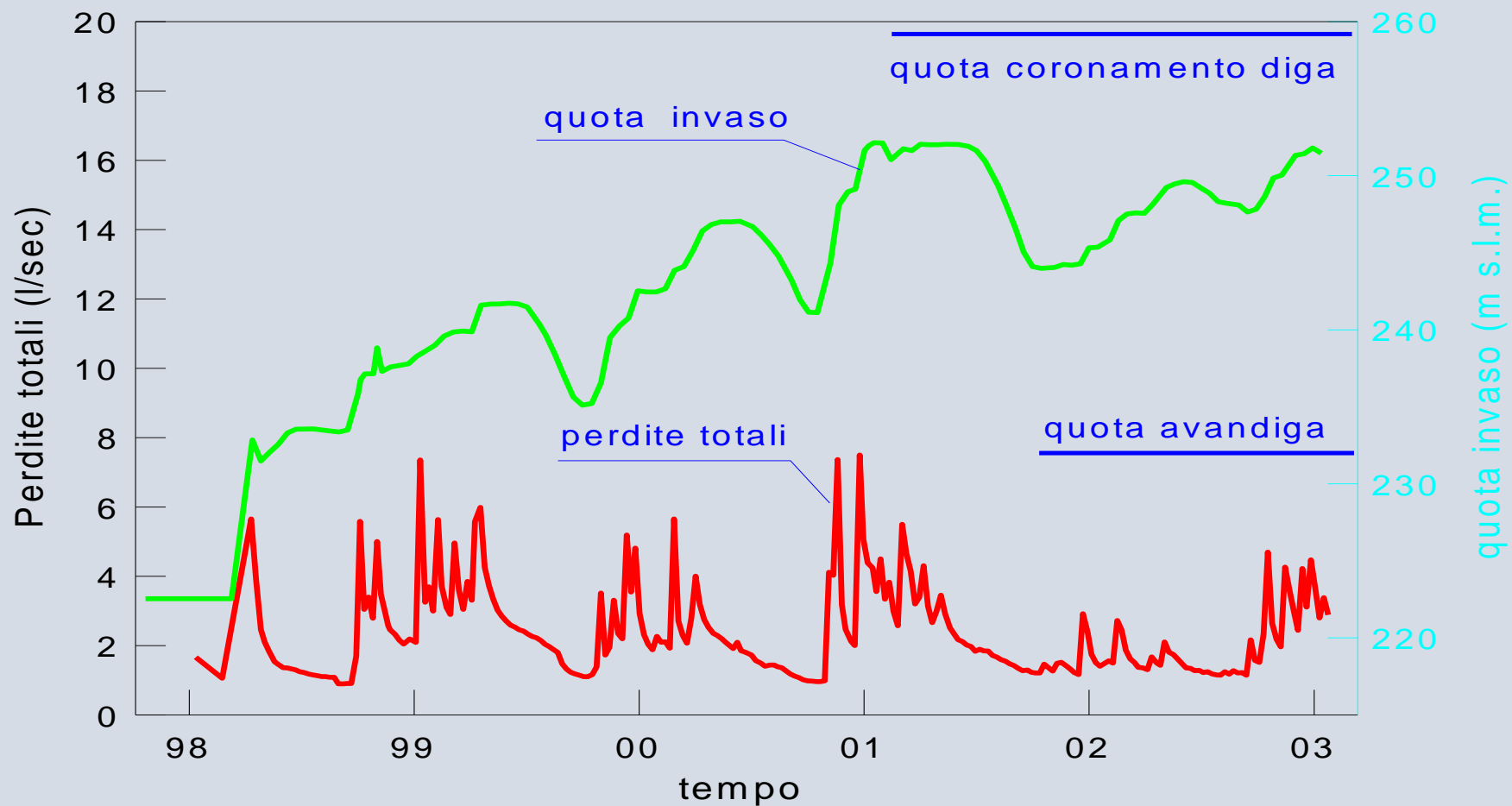
Ubicazione dei piezometri



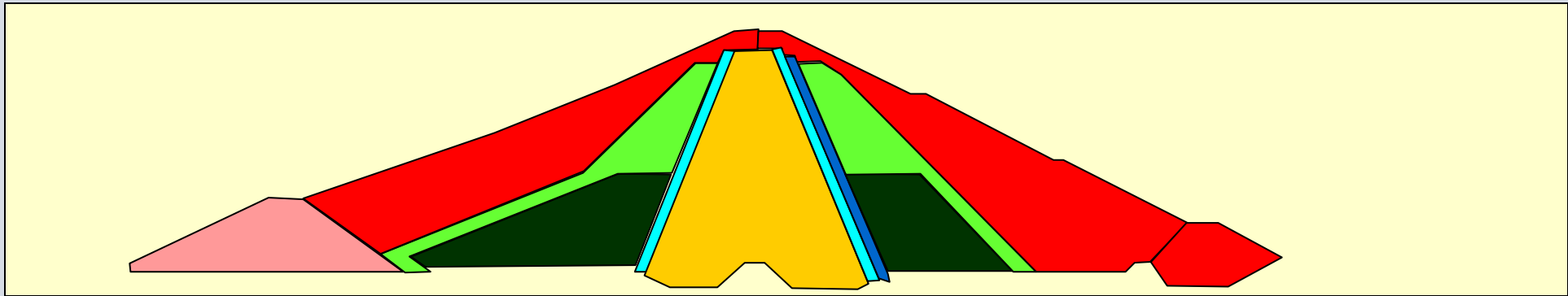
celle di pressione



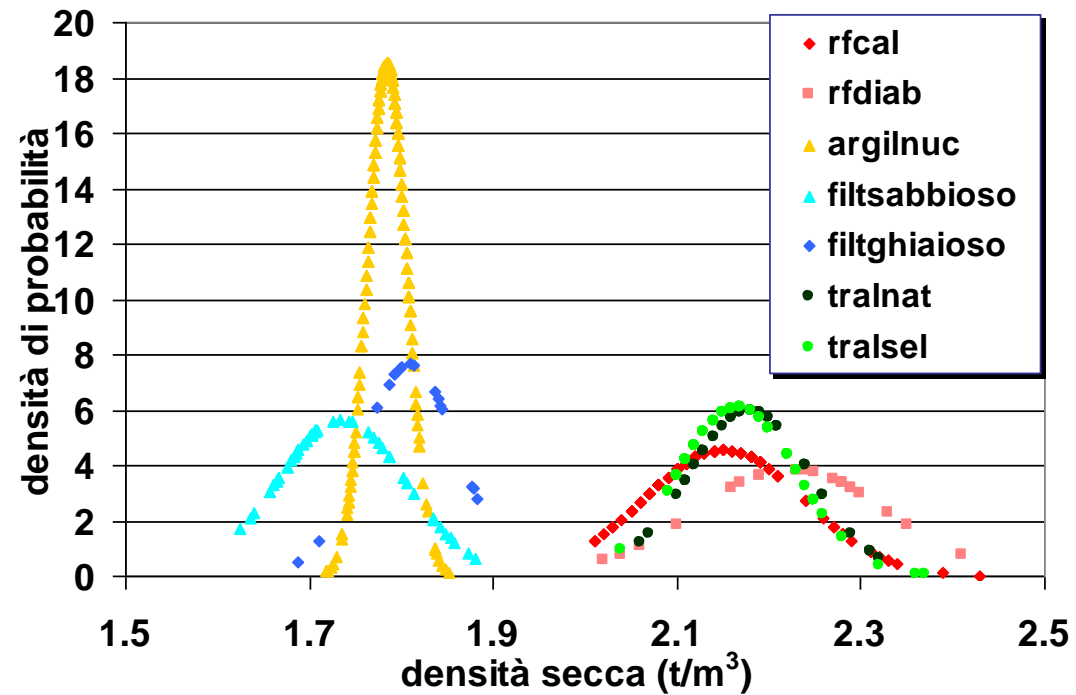
Confronto tra le portate filtranti misurate a valle della diga e l'evoluzione temporale della quota di invaso



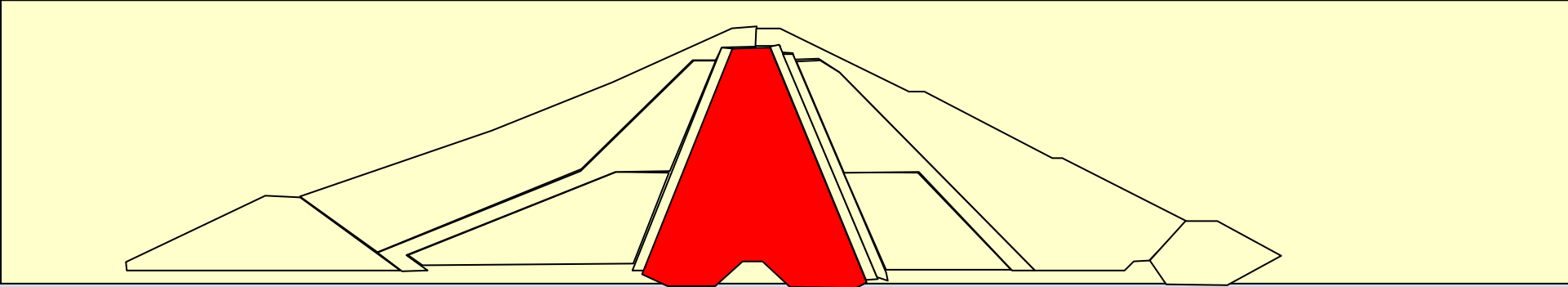
ANALISI A RITROSO: CARATTERISTICHE FISICHE DEI MATERIALI



γ_d

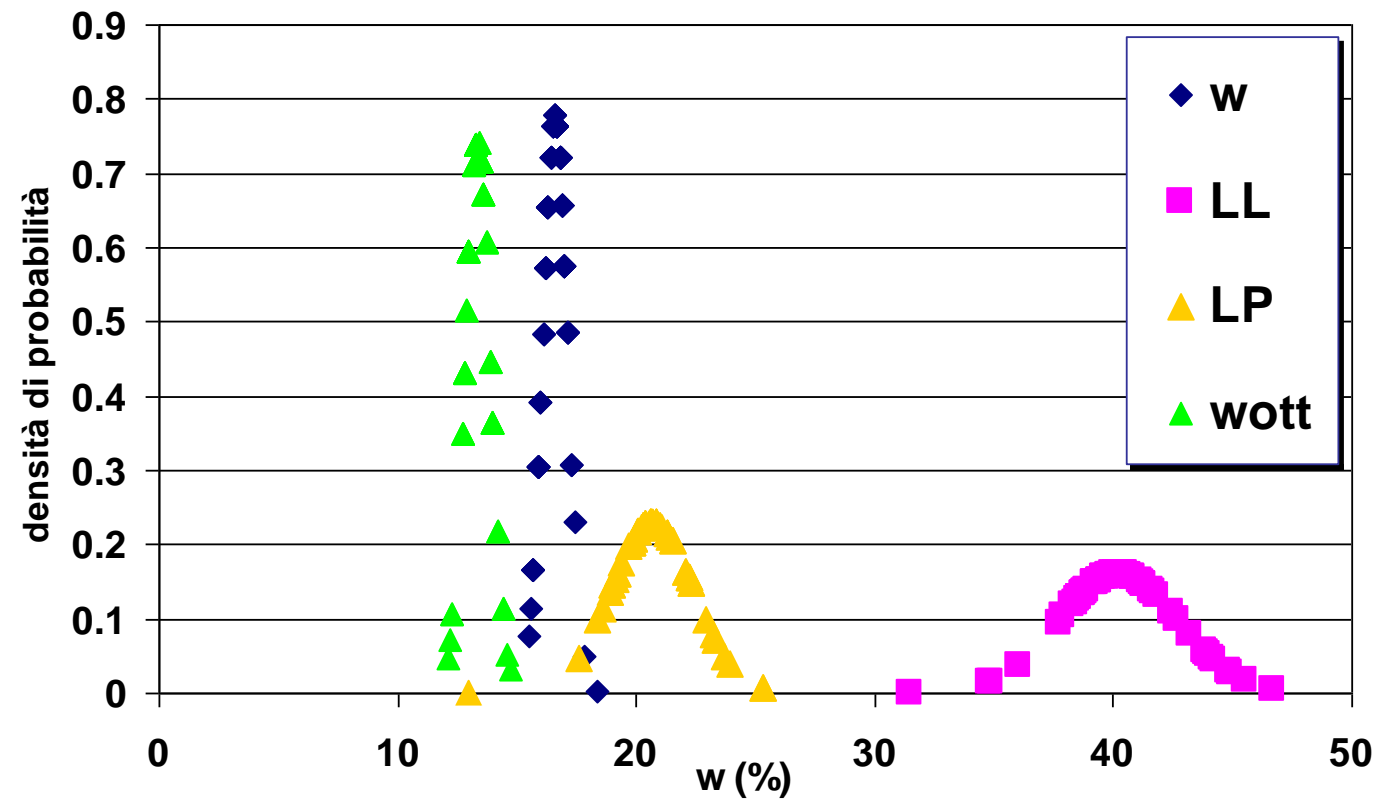


ANALISI A RITROSO: CARATTERISTICHE FISICHE NUCLEO



$W - W_{OTT}$

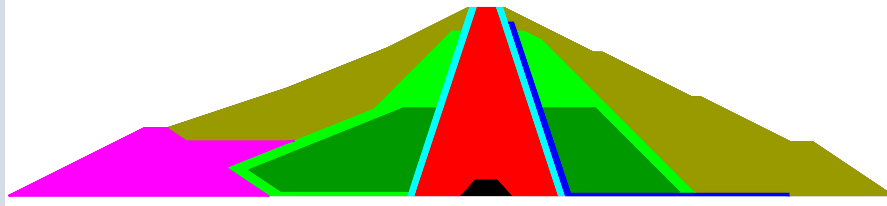
$W_L - W_P$



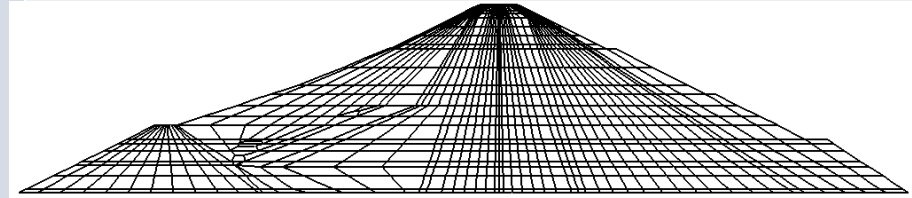
ANALISI A RITROSO: CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE NUCLEO

	N°sag.	esecuz.	media	dev.st.	c.var	max	min
γ_d (t/m ³)	345	cantiere	1.784	0.022	0.012	1.852	1.718
w (%)	345	cantiere	16.6	0.6	0.035	19.7	14.5
γ_s (t/m ³)	12	lab.NA	2.700	0.001	0.001	2.702	2.698
γ (t/m ³)	12	lab.NA	2.036	0.048	0.024	2.102	1.924
e	345	calcolati	0.513	0.018	0.036	0.572	0.458
S	345	calcolati	0.872	0.032	0.037	0.998	0.739
LL (%)	69	cantiere	40.2	2.476	0.062	46.7	31.5
LP (%)	69	cantiere	20.665	1.733	0.084	25.3	13.0
w _{ott} (%)	69	cantiere	13.359	0.537	0.040	14.7	12.1
C _c	4	lab.	0.214	0.035	0.163	0.266	0.190
k _w (cm/s)	6	lab.	1.2E-8	4.8E-9	0.393	1.9E-8	4.2E-9
Φ' (gradi)	4	lab.	25.5	1.3	0.1	27	24
c' (kg/cm ²)	4	lab.	0.20	0.10	0.50	0.25	0.05

Schematizzazione geometrica



Discretizzazione agli elementi finiti

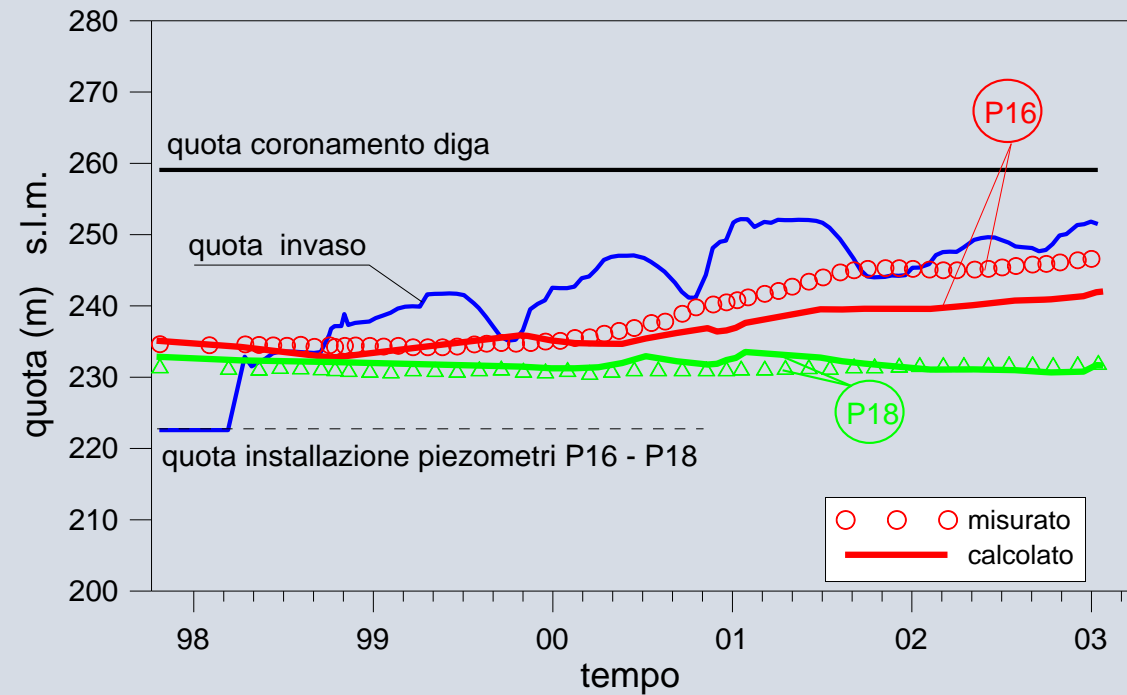
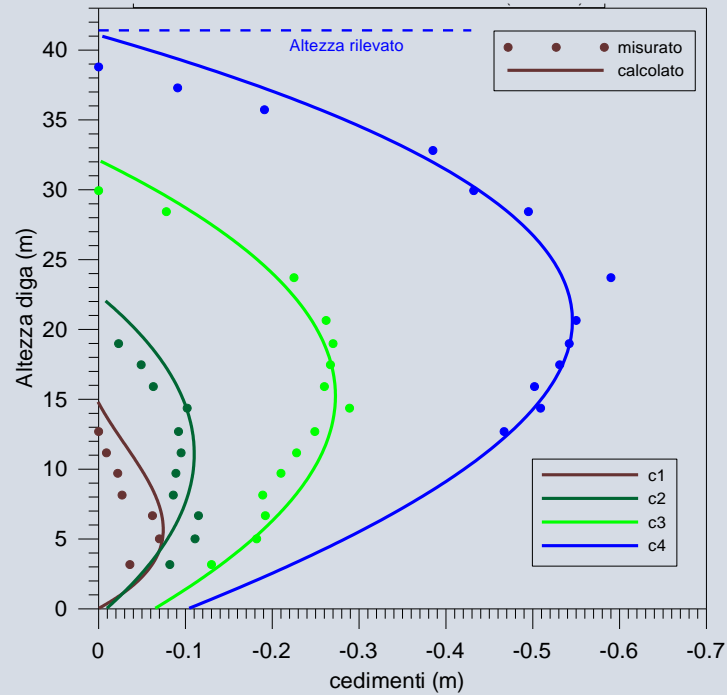


BILANCINO
ODB: bilal.odb ABAQUS/Standard 6.4-1 Sun Jun 13 12:24:07 ora legale Europa occidental

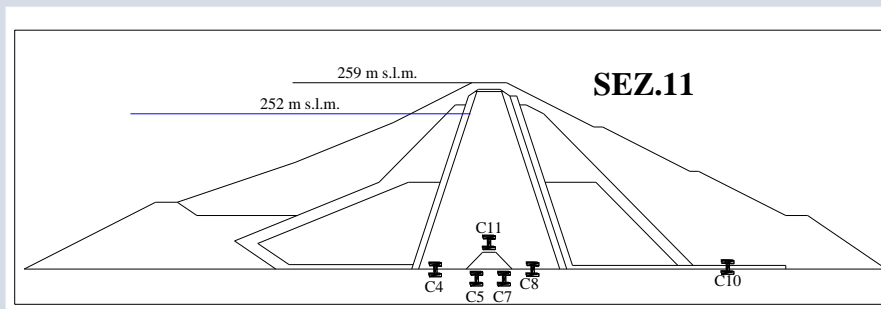
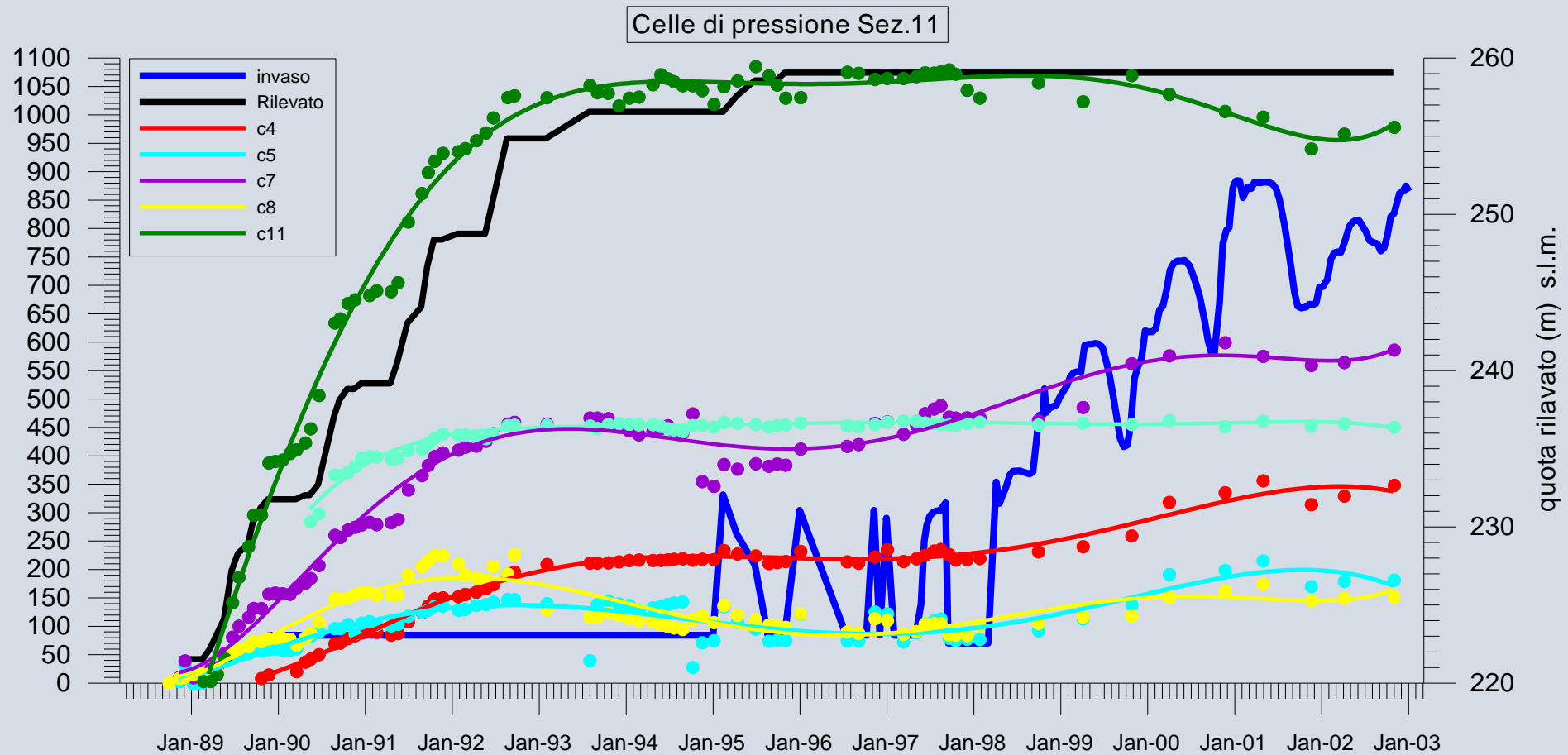
parametri utilizzati
nella analisi
numerica

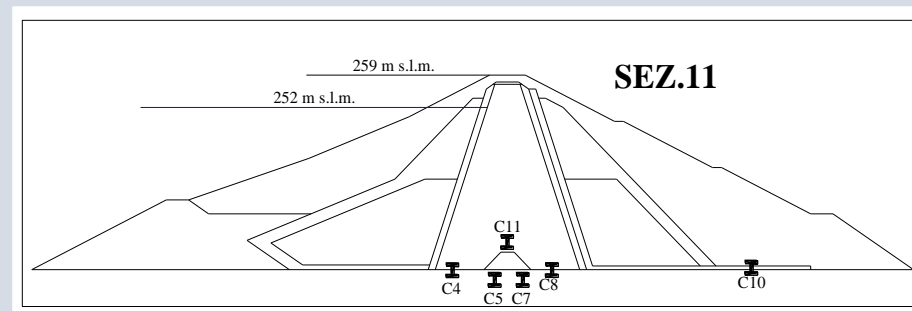
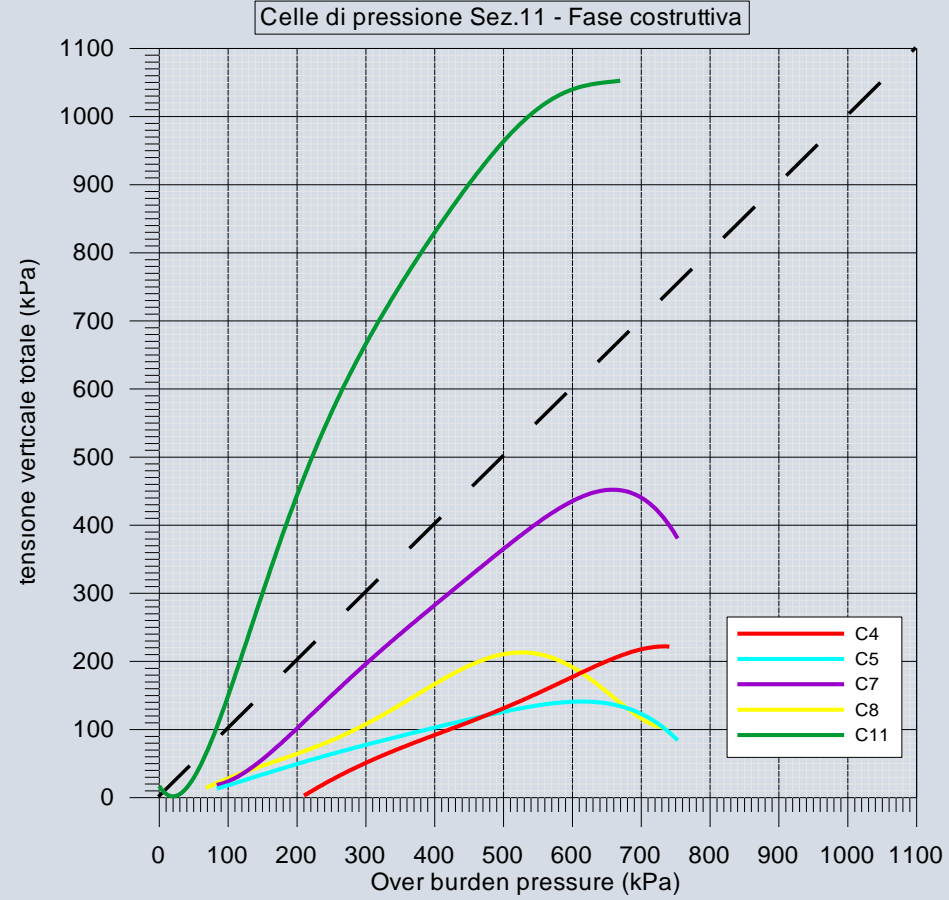
NUCLEO	Analisi accoppiata	γ_d (kN/m ³)	17,84
		indice dei vuoti iniziale e	0,51
	Cam-Clay modificato esteso ai terreni parzialmente saturi	grado di saturazione iniziale S_r	0,87-0,96
		coeff. permeabilità K (m/s)	1,00E-10
		stato critico M	1
		primo carico λ	0,1
		scarico carico k	0,01
		coeff. di Poisson	0,3
		G_s	2,5
		suzione iniziale s (kPa)	20-90
		tens. precons. media efficace p'_c (kPa)	300
FILTRI	Analisi disaccoppiata Elasticità lineare	Modulo di Young E (MPa)	45
		coeff. Di Poisson	0,3
		γ_d (kN/m ³)	18
MATERIALE DI TRANSIZIONE	Analisi disaccoppiata Elasticità lineare	Modulo di Young E (MPa)	45
		coeff. Di Poisson	0,3
		γ_d (kN/m ³)	21,5
ROCKFILL	Analisi disaccoppiata Elasticità lineare	Modulo di Young E (MPa)	100
		coeff. Di Poisson	0,3
		γ_d (kN/m ³)	22,2
cunicolo (CLS)	Analisi disaccoppiata Elasticità lineare	Modulo di Young E (MPa)	30000
		coeff. Di Poisson	0,25
		γ_d (kN/m ³)	25

Confronti tra misure e risultati del modello



Confronti tra misure e risultati del modello







Comportamento di dighe in terra in campo statico

Il monitoraggio, la strumentazione di monitoraggio e l'interpretazione delle misure di monitoraggio sono la pietra d'angolo per la comprensione e la descrizione dei comportamenti e per la valutazione delle condizioni di sicurezza