



**Master Universitario di II Livello
IV Edizione
Anno Accademico 2014/2015
Direttore: Prof. Ing. Salvatore
Miliziano**

Seminari Maggio 2015

1) Introduzione generale alla ingegneria delle dighe e degli impianti idroelettrici

Lezione 2 : CRITERI PER LA PROGETTAZIONE DI UN RILEVATO IN ROCKFILL

STUDIO PIETRANGELI

Roma, 19 maggio 2015

INTRODUZIONE

La scelta del tipo di diga (sia in materiali sciolti che rigida) per un sito dipende principalmente (ma non solo) da:

- Materiali disponibili per il rilevato
- Caratteristiche meccaniche delle fondazioni

Quando sono possibili diversi tipi di diga, è necessario compararli in termini di costi, rapidità di costruzione e sicurezza.

Le dighe in rockfill sono convenienti quando :

- Sono disponibili grandi quantità di pietrame, ricavato da cave in prossimità della diga oppure dallo scavo di parti del progetto come lo sfioratore
- Il progetto deve essere realizzato in tempi brevi, essendo la diga in rockfill più veloce da realizzare rispetto ad una diga in terra.
- I materiali fini per una diga in terra non sono disponibili e/o le condizioni climatiche (pioggia) sono sfavorevoli ad una diga in terra.

Confrontiamo le dighe in materiali sciolti in termini di sicurezza.

INTRODUZIONE
(Diga in terra, Teton (H = 100 m))



INTRODUZIONE

(Diga CFRD, Karanjukar (H = 193 m))



INTRODUZIONE

Per quanto riguarda la sicurezza, esaminiamo le statistiche sugli incidenti e collassi e avvenuti su grandi dighe in materiali sciolti : in terra (earthfill) o in pietrame (rockfill).

Le cause principali di collasso di dighe in materiali sciolti (Foster et. al. 1998) sono:

- 46 % tracimazione o danneggiamento scarichi (i.e. idraulica)
- 48 % sifonamento del rilevato o in fondazione (i.e. geotecnica)
- 6 % terremoti e frane superficiali

Suddividendo per tipo di diga collassi ed incidenti per piping (rilevato/fondazioni):

	Collassi	Incidenti
• Dighe in terra omogenee	16 / 3 ‰	9 / 11 ‰
• Dighe in terra zonate	1.2 / - ‰	7 / 7 ‰
• Dighe in rockfill	<1 / - ‰	3 / - ‰

Le dighe in rockfill sono sensibilmente più sicure delle dighe in terra.

Negli ultimi anni, le grandi dighe in materiali sciolti sono spesso in rockfill e, più raramente, in terra.

DIGHE IN ROCKFILL - ELEMENTO IMPERMEABILE

Le dighe in rockfill includono un elemento impermeabile sul paramento di monte, che prende il nome di manto, o nel corpo del rilevato. Le opzioni più comuni oggi sono:

- Manto in calcestruzzo (Concrete Face Rockfill Dam)
- Manto o Nucleo bituminoso (Bituminous Face Rockfill Dam o Bit. Core Rockfill Dam)
- Geo-membrana interna

Negli ultimi anni, le grandi dighe in rockfill sono spesso del tipo CFRD.

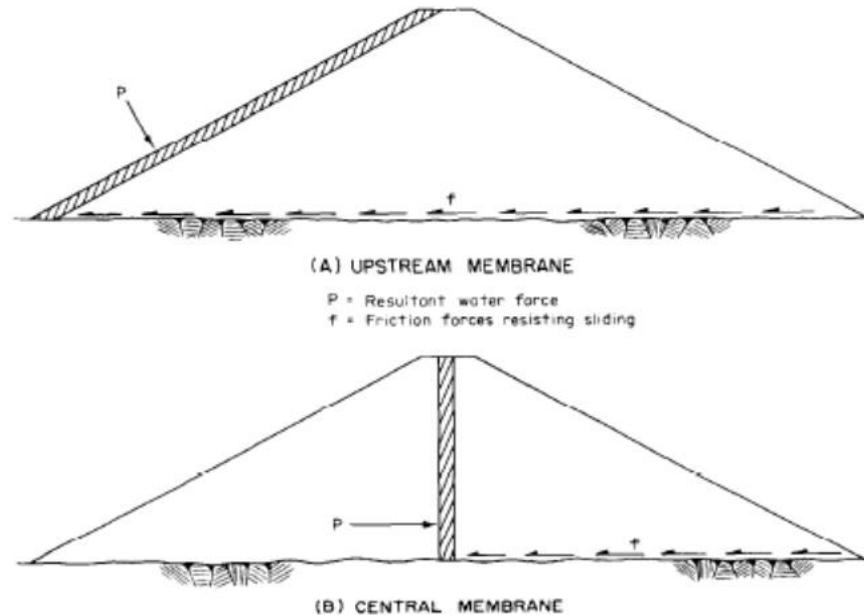


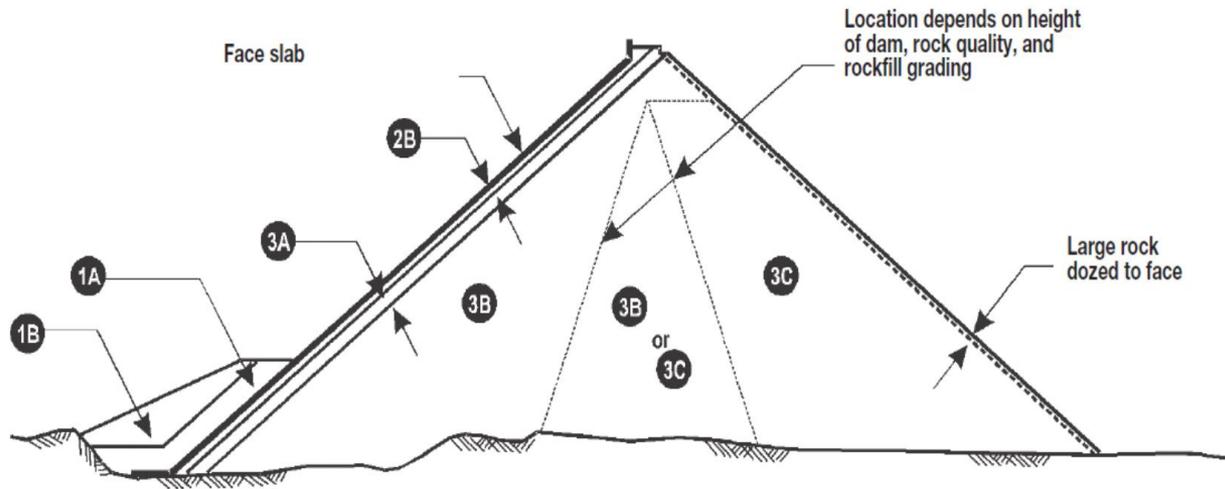
Figure 7-1.—Resistance to sliding for embankments. 288-D-2796.

Dighe in rockfill con manto o membrana interna: forze agenti (figura da: Small Dams)

ZONATURA (DIGA CFRD)

Le dighe in CFRD sono realizzate con un rilevato zonato.

La figura seguente mostra una zonatura standard per una grande diga in CFRD.

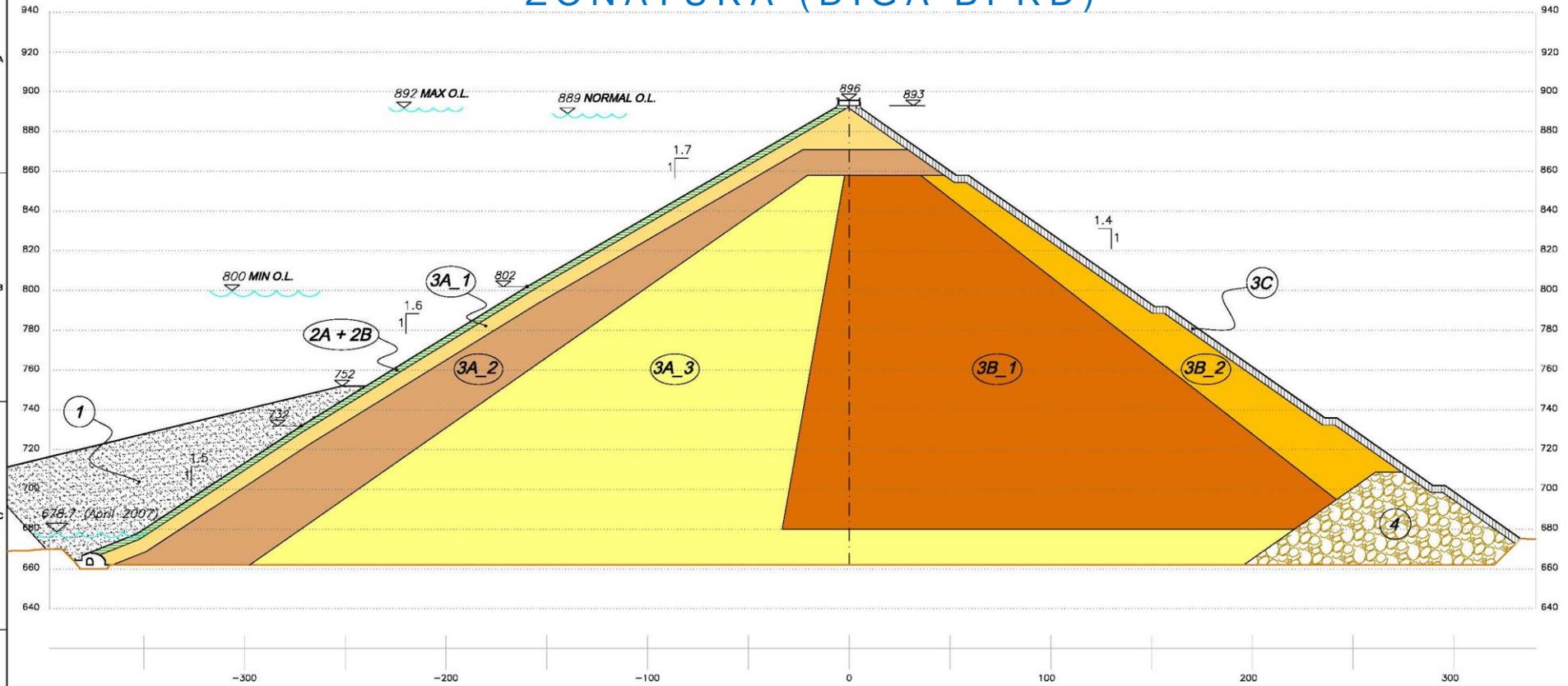


Dam Section

1A	Cohesionless fine-grained soil
1B	Random fill
2A	Perimeter zone filter
2B	Processed minus 75 mm
3A	Selected rockfill - 0.4 m layers
3B	Quarry run rockfill - 1 m layers
3C	Quarry run rockfill - 2 m layers

Zonatura tipo di una grande diga in rockfill con manto in calcestruzzo, CFRD (da ICOLD, 2013)

ZONATURA (DIGA BFRD)



LEGEND

ZONE	MATERIALS	SOURCE N 1	LAYERS	PASSES	D100	NOTES
			N 4 m	N 2 + N 4 #	N 3 + N 4 mm	
1	FILLING	SM	0,4	6	-	
2A + 2B	FILTER + TRANSITION	sel BASALT	0,4	6	-	
3A_1	u/s ROCKFILL, high FF Modulus, N 5	ALL (Alluvium) AA (Ancient Alluvium)	0,4	6	<300	
3A_2	u/s ROCKFILL zone	BASALT	0,4	8	<300	
3A_3	u/s ROCKFILL zone	BASALT	0,6	8	<450	
3B_1	d/s ROCKFILL zone	B_vac. + Trachyte	0,8	8	<600	
3B_2	d/s ROCKFILL zone	sel BASALT	1	6	<750	
3C	FACE	sel BASALT				
4	d/s TOE	sel BASALT	1	6	<750	

MODULO DI COMPRESSIBILITA'

Il modulo di compressibilità (E) del rockfill dipende:

- dalle caratteristiche del materiale : tipo di roccia, dalla sua resistenza meccanica, dalla forma, dalla granulometria
- dalle modalità di posa : spessore degli strati, tipo e dimensioni del rullo, numero di passate, quantità di acqua durante la compattazione, etc.

Il valore del modulo di compressibilità del rockfill utilizzato per il calcolo delle deformazioni nel rilevato durante la compattazione è il seguente (Fitzpatrick et. al. 1985)

- $E_{rc} = \gamma H d_1 / \bar{\delta}_s$
 - E_{rc} = Modulo di compressibilità (Mpa)
 - γ = Peso unitario del rockfill (kN/m³)
 - $\bar{\delta}_s$ = Cedimento dello strato di spessore d_1 per compattazione dovuta al peso dello strato superiore di spessore H

ROCKFILL, MATERIALI : ESEMPI



Due alternative per il rilevato della diga: basalto colonnare (a sinistra) e alluvioni (a destra)

MODULO E COMPATTAZIONE DEL ROCKFILL



*Compattazione del rilevato in pietrame della diga del Gilgel Gibe
(Studio Pietrangeli)*

MODULO E COMPATTAZIONE DEL ROCKFILL

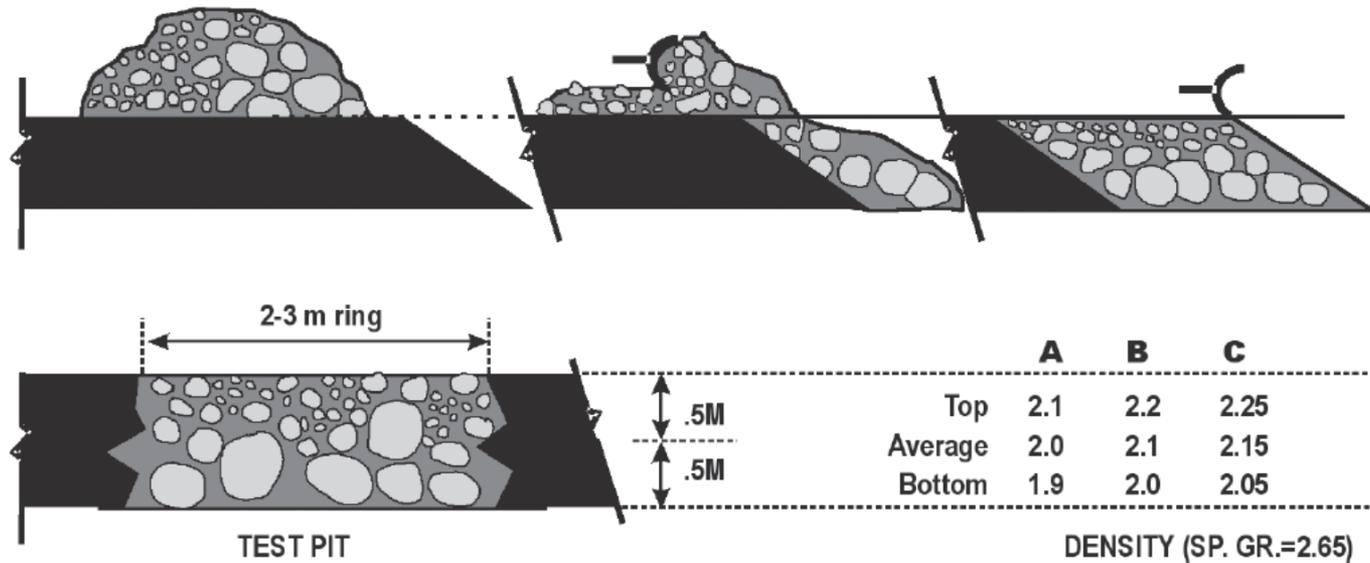
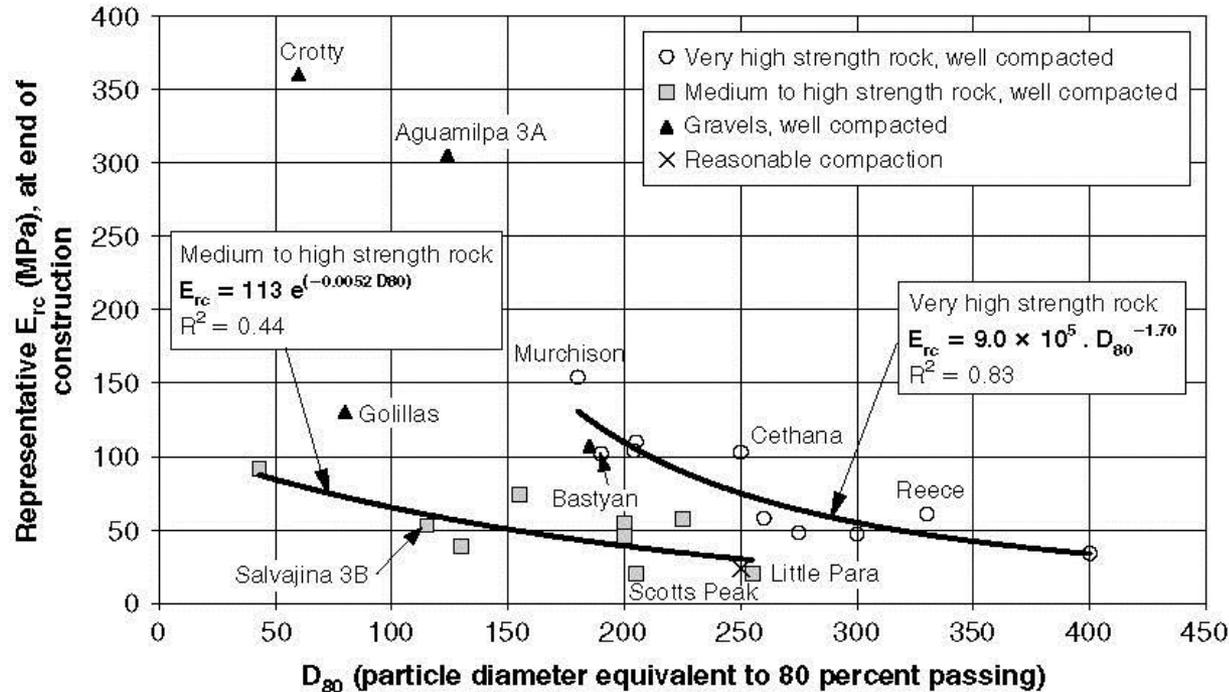


Fig. 3
Placement and section of compacted rockfill
(Cooke, 1991, 1997)

Posa del rilevato in pietrame (ICOLD, 2013)

MODULO DI DEFORMABILITA' DEL ROCKFILL



Modulo di compressibilità del rockfill dopo la compattazione, funzione delle caratteristiche del pietrame

(da : Hunter 2003, Hunter and Fell, 2002, 2003 – Geotechnical engineering of dams)

Il grafico mostra una relazione empirica per stimare in fase di progettazione la deformabilità del rilevato, esprimendo il modulo (E_{rc}) in funzione di:

- Dimensioni del pietrame (D_{80})
- Resistenza della roccia intatta

DEFORMAZIONE DEL RILEVATO

Analizziamo il cedimento che avviene durante la posa e compattazione del rilevato.

Il cedimento di uno strato alla base di una diga in CFRD di altezza pari a 100 m risulta essere:

- $d_1 = 20 \text{ m}$ $E_{rc} = 100 \text{ Mpa}$
- $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$ $H = 20 \text{ m}$
 - $\rightarrow \bar{\delta}_s = 0.09 \text{ m}$

Il cedimento massimo si ottiene a mezz'altezza del rilevato, avendo $\bar{\delta}_s = 2.2 \text{ m}$

La figura mostra i cedimenti dopo la costruzione (e quindi il cedimento durante il primo riempimento del serbatoio) per la diga di Foz do Areia (150 m) in Sud America.

DEFORMAZIONE DEL RILEVATO - COSTRUZIONE

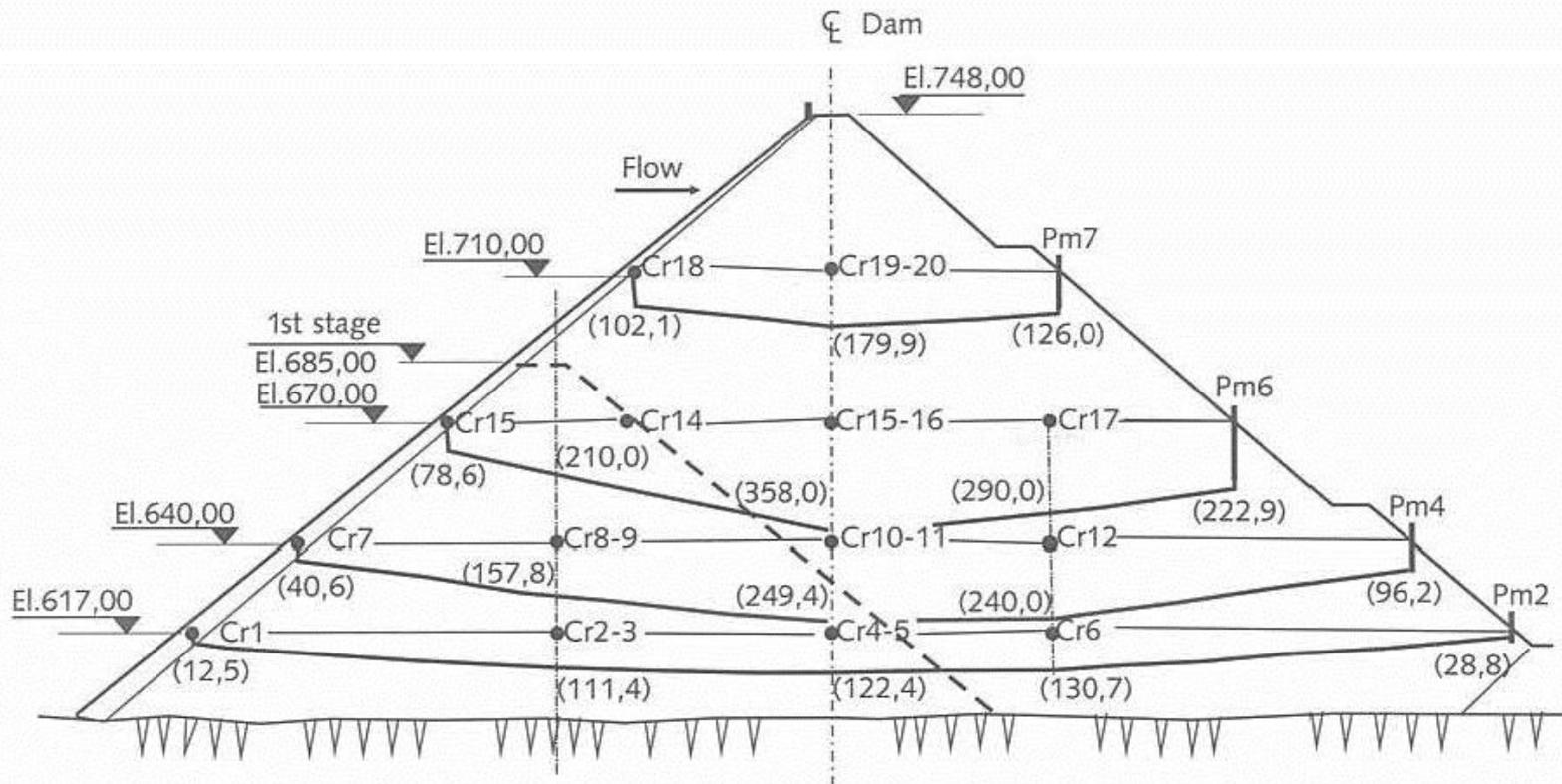


Figure 10.5 Foz do Areia Dam: settlement before reservoir filling (cm)
(Pinto, Materón & Marques Filho, 1982).

DEFORMAZIONE DEL RILEVATO

Visual inspection showed the occurrence of fissures, cracks and ripples in extensive areas of the upstream face corresponding to about 35 % of the total surface.

A detailed survey was carried out in order to classify areas affected by different types of ageing phenomena, as follows:

- Cracks – Large and deep cracks crossing the entire impervious layer, or penetrate deeper than half of the layer thickness were detected over an area of about 1000 m². Repair works were considered necessary to restore the functionality of the lining in these areas
- Fissures - Fissures penetrating less than 2 cm into the layer were detected over an area of about 15000 m². Repair works were also deemed necessary to assure the long term performance of the lining in these areas
- Superficial Fissures – Patterns of surface fissures were present over almost the entire dam facing. In these areas the treatment could be restricted to the application of the sealing coat.



Figure 3-Impervious facing at the end of the interruption period

Bumbuna, cedimenti e crack nel manto (SP, 2010)

PENDENZA DEI PARAMENTI

La pendenza del paramento, specialmente per le grandi dighe, deve essere ottimizzata per:

- ridurre il volume del rilevato
- garantire la stabilità dei paramenti del rilevato
- permettere la costruzione del manto

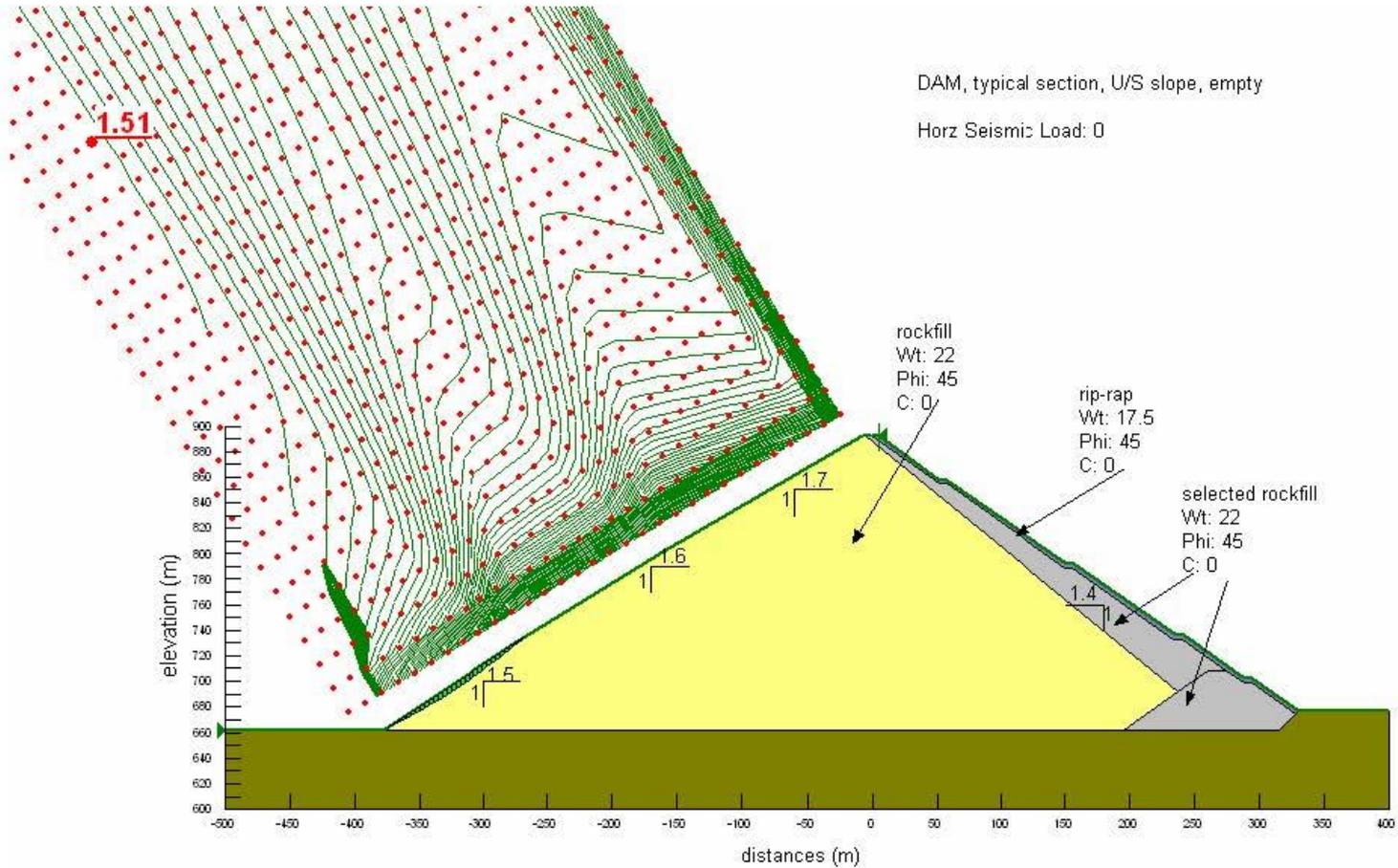
Per una grande diga in CFRD, con buone fondazioni in roccia, le pendenze tipo del rilevato possono raggiungere:

- 1.3....1.4 : 1 H:V rockfill di buona qualità: roccia resistente e ben compattata
- 1.5....1.6 : 1 H:V rockfill di qualità mediocre: roccia alterata, non ben drenante

Utilizzando un paramento in BFRD, la pendenza del paramento di monte è più bassa per consentire la realizzazione del manto (1.5 1.7 H:V).

Nel caso in cui le fondazioni non siano in roccia, le pendenze possono essere inferiori.

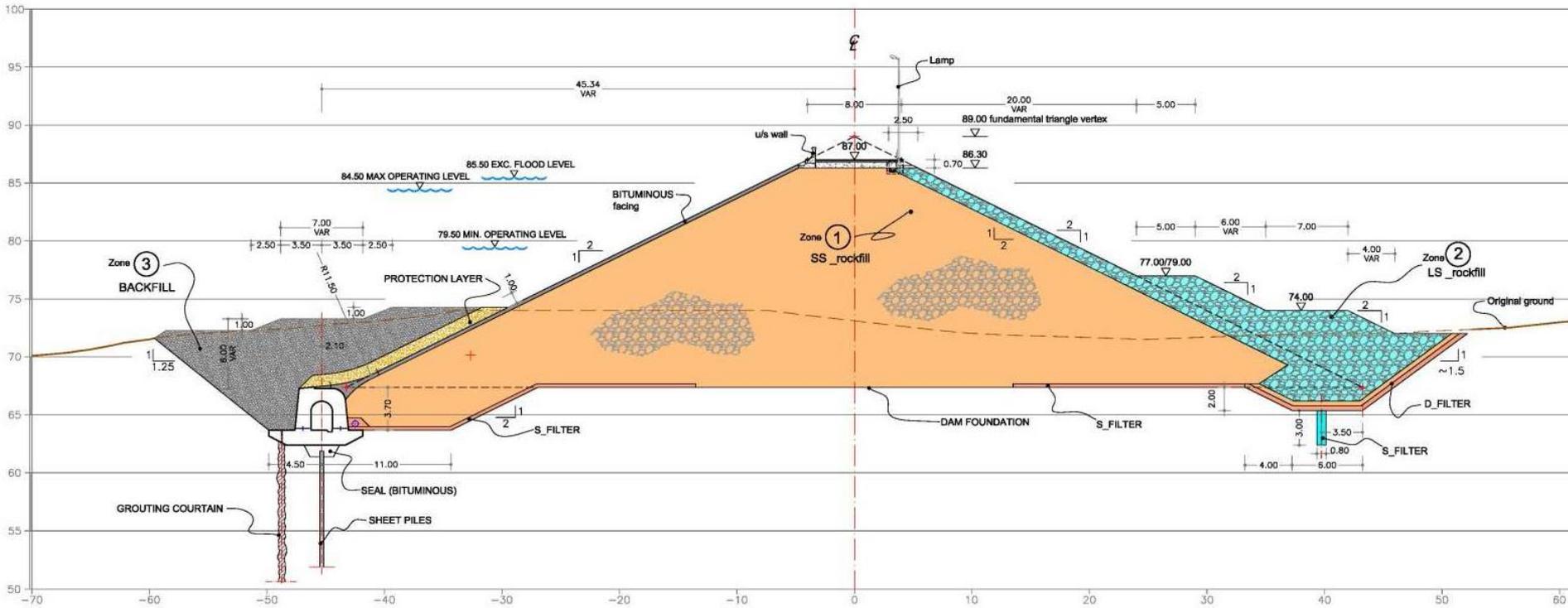
PENDENZA DEI PARAMENTI



Calcolo di stabilità del paramento di monte, esempio (SP, 2012)

PENDENZA DEI PARAMENTI

TYPICAL CROSS SECTION
(0+300)



KIDUNDA HPP, Tanzania

Bituminous Face Rockfill Dam (H=21 m)