

Italian Dam Engineering Abroad
Aggiornamento 2021

CONTRIBUTI INNOVATIVI ITALIANI ALLA INGEGNERIA DELLE DIGHE

Pietro Groppo Sembenelli



SCAVI A PARETI VERTICALI SOSTENUTI DA FANGO BENTONITICO

- Nel 1953 l'impresa ICOS eseguì il primo scavo per un palo, senza utilizzare il tubo di rivestimento. Le pareti vennero sostenute riempiendo il cavo con una miscela di acqua e bentonite. Il getto del calcestruzzo nel cavo finito venne eseguito con un tubo getto (tremie) disceso fino al fondo del palo.
- I diaframmi di intercettazione in fondazioni permeabili, fino ad allora realizzati con pali accostati, scavati entro una camicia metallica, risultavano spesso discontinui per crolli delle pareti o vuoti nel getto.

1953
UN PALO, NEPPURE TANTO
REGOLARE, APRIVA LA
STRADA A SVILUPPI
IMPENSATI.



- Come sempre, la tecnologia si impadronisce di un nuovo procedimento e rapidamente lo perfeziona creando strumenti più efficienti e migliorando la qualità del manufatto.
- I pali accostati vennero rapidamente sostituiti da pannelli rettangolari scavati con speciali benne guidate dalle pareti dello scavo sovrastante.
- La benna si carica di materiale approfondendo il pannello e, una volta riempita, deve venire estratta per scaricare il materiale scavato.

BENNA IDRAULICA A FUNI E CASSONE DI GUIDA



- Per operare anche in terreni compatti e in roccia le Benne furono sostituite da Frese con ruote a scalpelli, contro-ruotanti. Gli scalpelli sono di forma diversa per massimizzare la resa in un dato materiale.
- Il percorso della fresa è rilevato con inclinometri e l'operatore può correggere progressivamente l'assetto dell'utensile agendo su piastre mobili poste sui 4 lati dell'attrezzo.
- Per la estrazione dei detriti non è più necessario sollevare la fresa. I frammenti vengono trascinati in superficie, con circolazione inversa, da fango bentonitico mosso da una pompa posta tra le ruote dentate.
- Fango e detriti passano in un impianto di separazione SOTRES, che estrae i detriti. Il fango viene rigenerato e torna nel cavo.

FRESA
E CASSONE
DI GUIDA



DETTAGLIO
DELLE 4
RUOTE
DENTATE

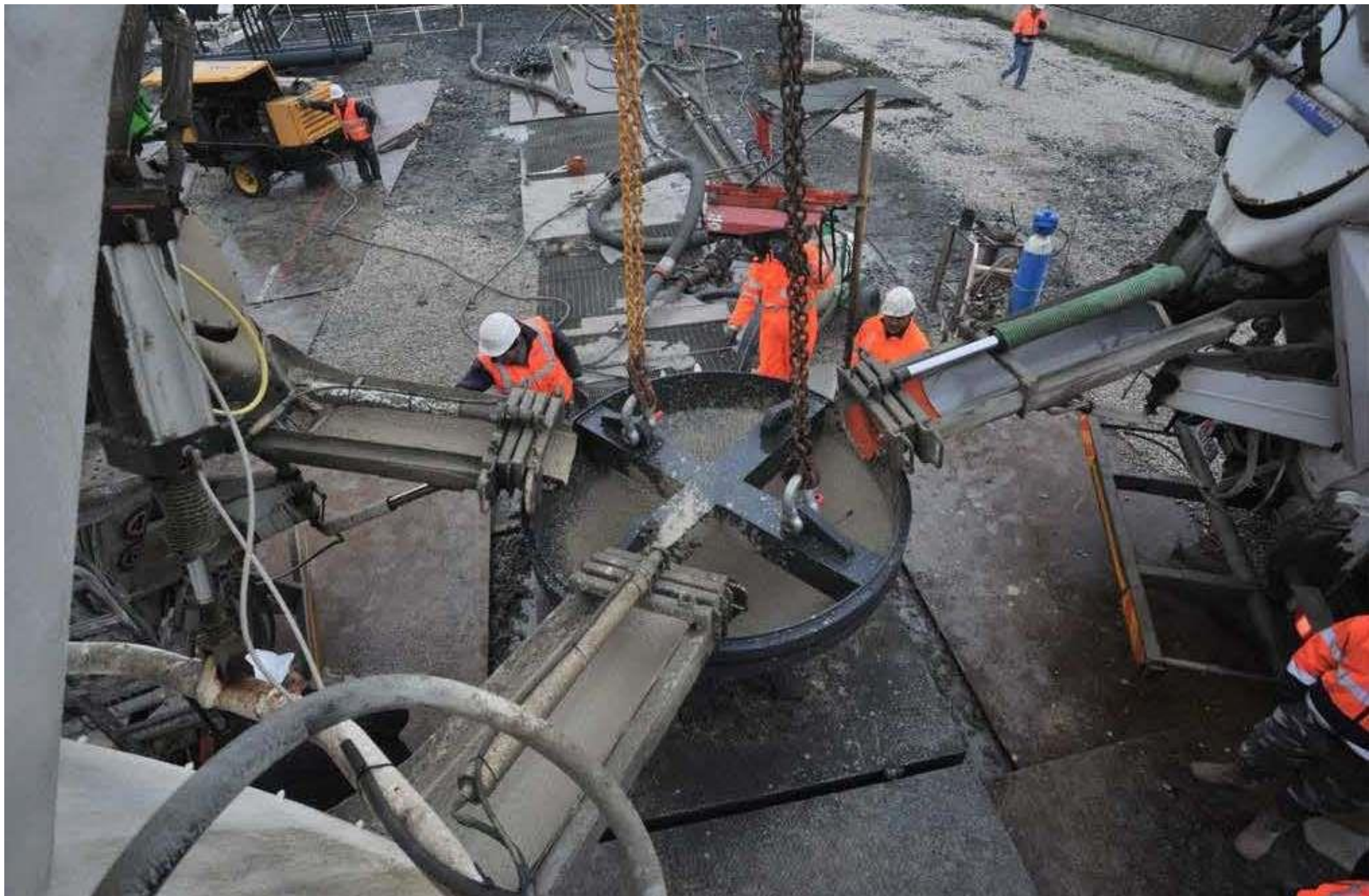


- Grazie a TREVI-SOILMEC la tecnologia delle frese è oggi progredita fino a offrire macchine capaci di scavare pannelli fino a 6.5 m² di sezione e di raggiungere profondità di 250 m.
- Le immagini che seguono illustrano:
 - 2 frese per pannelli super-profondi sviluppate da SOILMEC e testate con successo.
 - la fase di getto di un pannello profondo 250 m (nel calcestruzzo usato per il getto della metà inferiore del pannello fu reimpiegato parte del fango di perforazione)
 - una carota estratta dalla zona gettata con calcestruzzo contenente fango di perforazione.

IDROFRESE DA 250 e 200 m



GETTO DEL PANNELLO 2 * 3.2 m PROFONDO 250 m



CAROTA ESTRATTA DAL PANNELLO A 205 m DI PROFONDITÀ



APPROFONDIMENTI

Chi fosse interessato a maggiori dettagli può scaricare dal Sito ITCOLD www.itcold.it la pubblicazione:

P. Sembenelli, S. Trevisani, D. Vanni 2013 - «Super-Deep Cut-Offs...» – III Int. Symp. on Rockfill Dams, Kunming PRC
pag.791-801

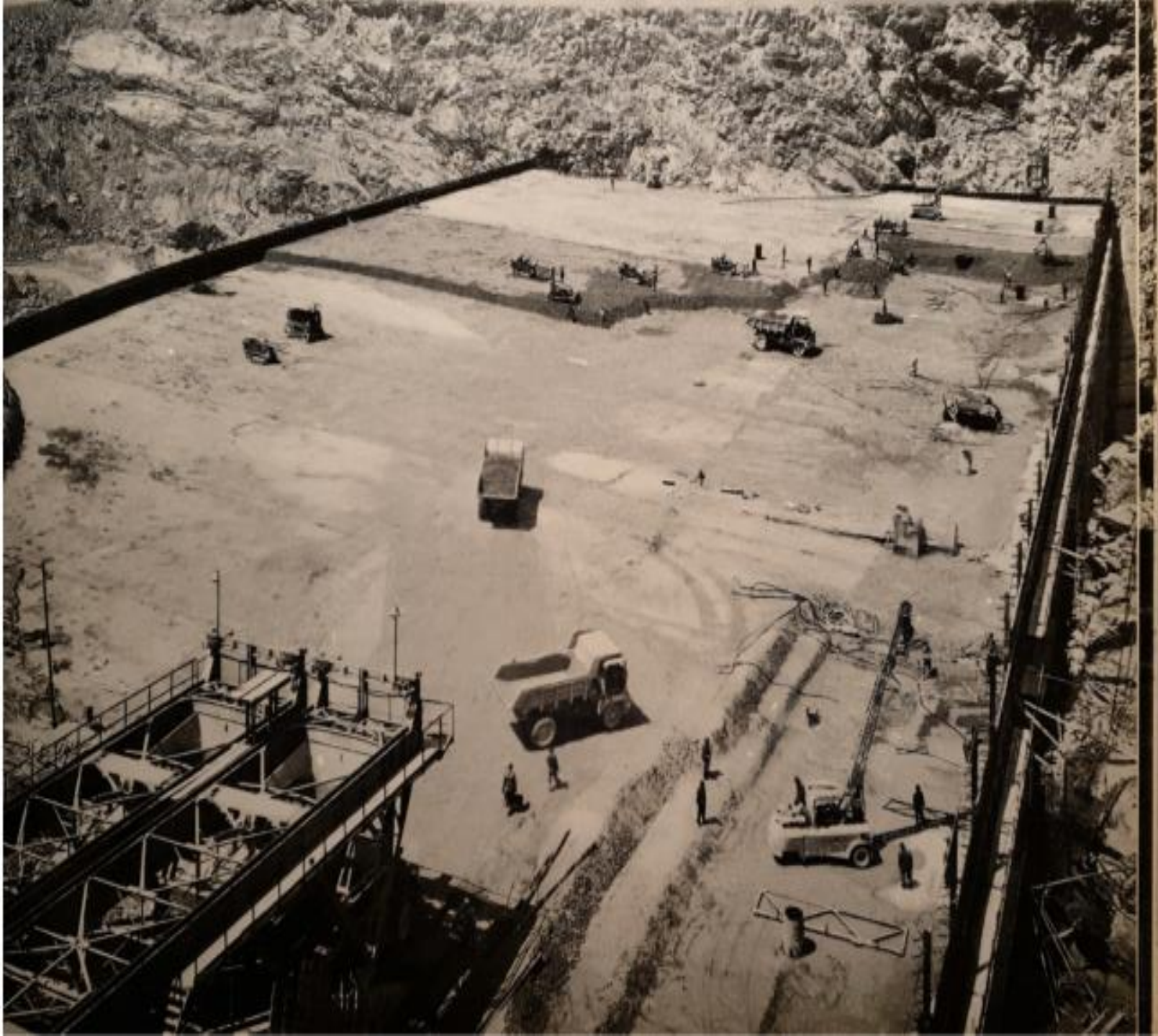
RCC - ROLLER COMPACTED CONCRETE

CALCESTRUZZO RULLATO

- Nell' agosto 1961 iniziarono i getti per la diga a gravità di Alpe Gera progettata dall' ing. Giulio Gentile di SIP (Società Idroelettrica Piemontese). La diga è alta 175 m ed il volume di calcestruzzo sarà 1 716 000 m³. Un'opera importante e straordinaria sia per il tipo di calcestruzzo sia per la modalità di getto.
- Il calcestruzzo è ottenuto con aggregati inferiori a 130 mm in 5 classi e basso dosaggio: 115 Kg/m³ di cemento 600 di altoforno. Resistenze: $R_{ck28} = 180 \text{ Kg/cm}^2$ e $R_{ck365} = 280 \text{ Kg/cm}^2$, steso e compattato per 12 ore con 490 passaggi di dumper da 16 t $R_{ck34} = 193 \text{ Kg/cm}^2$.

- Il cassero a monte è una lastra continua di acciaio spessa 3 mm che rimane in opera, irrigidita con profilati in corrispondenza dei futuri giunti. Dai profilati escono 2 ferri a V che abbracceranno il giunto. A valle casseri montanti.
- Il calcestruzzo viene trasportato al piano di getto da 2 tramogge da 12 m³ ciascuna e caricato su dumpers. Steso in strati di 0.8 m viene vibrato con vibratorii montati sulla lama di dozers: spessore finale 0.7 m.

PIANO DI POSA AD ALPE GERA



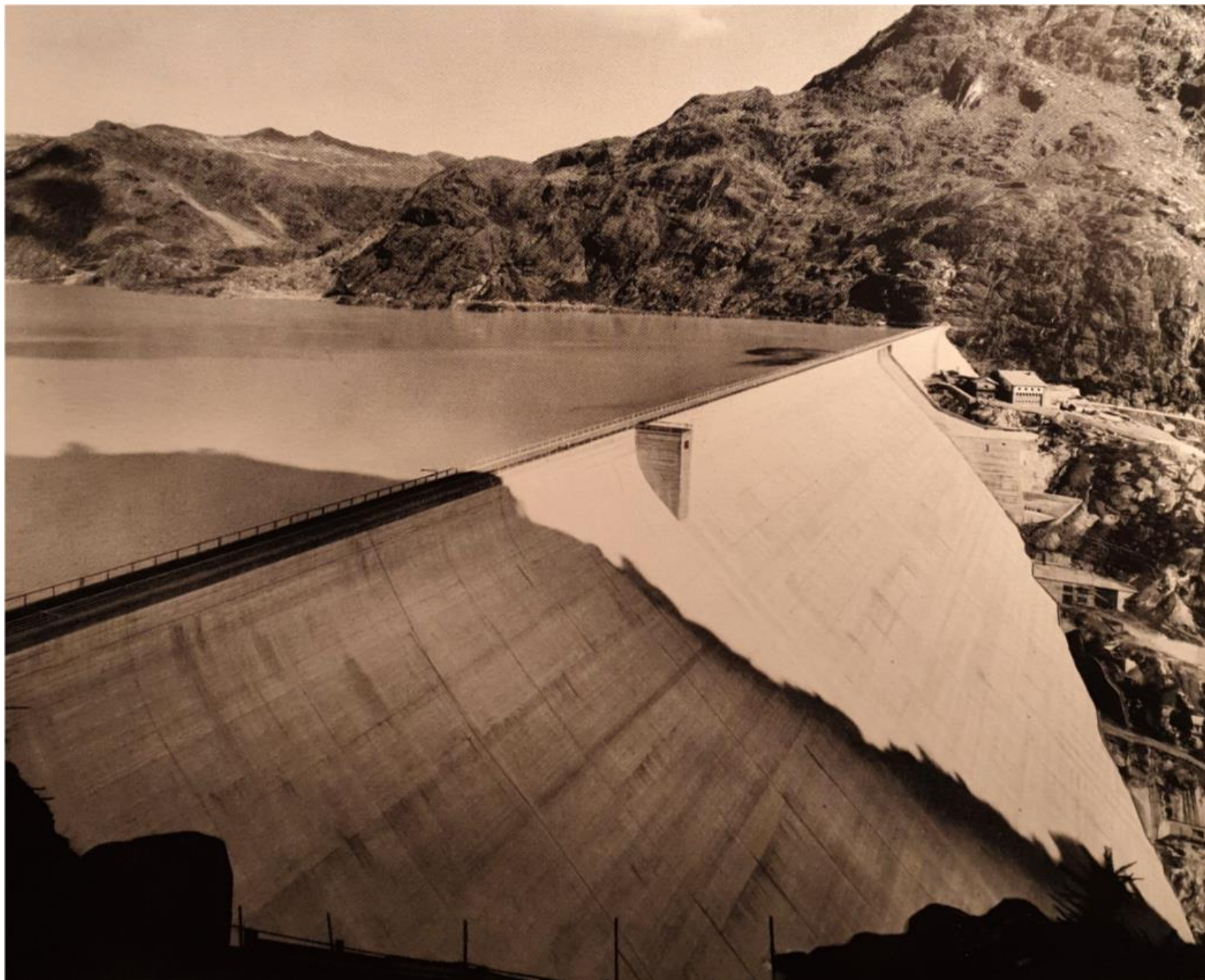
- I giunti vengono tagliati dopo la compattazione, con una lama lunga 3 m di spessore 40 mm, vibrante a 50 Hz e interrotti poco prima degli irrigidimenti del cassero di monte.
- Per la continuità con lo strato successivo la superficie del calcestruzzo viene semplicemente ravvivata con un getto di acqua in pressione.

MACCHINA
TAGLIA GIUNTI
AD ALPE GERA



- La costruzione del corpo diga inizia nell'agosto 1961 ed è completata nel settembre 1964, con 3 interruzioni per i 6 mesi invernali.
- Il volume messo in opera arriva a 7116 m³/giorno nel settembre 1962 ed a 146 695 m³/mese nel luglio 1963.
- Era nato l'RCC

ALPE GERA INVASATA



- Nel 1974 alla diga Tarbela (Pakistan), durante una piena eccezionale dell'Indo, 60 m di uno dei 4 condotti di scarico, tra l'opera di presa ed il portale dove il condotto entra nella spalla destra, collassarono. Con il calcestruzzo del rivestimento furono erosi e trasportati a valle, attraverso al tunnel, circa 390 000 m³ del corpo diga, che copriva i condotti.
- La breccia fu riempita con calcestruzzo magro steso in strati e rullato (rollcrete). In un setto centrale, largo 17 m, fu steso materiale non cementato del corpo diga, successivamente rimosso e sostituito da un nuovo condotto in calcestruzzo. Tutta l'operazione fu completata in meno di 6 mesi.

- Nel 1997 ho partecipato al progetto e seguito la costruzione della diga Jiangya (Hunan PRC). A Jiangya vennero introdotte, nella tecnica dell'RCC, migliorie importanti che oggi fanno parte degli standards esecutivi:
 - l'arricchimento della pasta con boiaccia vibrata (EVRCC Enriched-Vibrated RCC). Punti di applicazione: sul paramento di monte; sulle spalle; attorno a gallerie/pozzi nel corpo diga;
 - la posa per strati inclinati per ridurre il numero dei giunti freddi (SLM Sloping Lifts Method).

CAROTE LUNGHE PIU DI 4 m ESTRATTE DALLA ZONA GETTATA CON 'SLOPING LIFTS'



- A Jiangya venne anche utilizzato per la prima volta il trasporto del calcestruzzo 'per caduta': dall'impianto di betonaggio, posto sopra al coronamento, fino al piano di posa (150 m più in basso).
- Il calcestruzzo scende in un semi-tubo metallico foderato con un foglio di gomma, per 'pacchetti confinati' senza segregazione (Vacuum Chute).
- A Jiangya la parte inferiore dell'avandiga di monte (alta 36 m) fu uno dei primi esempi di diga ad arco realizzata in RCC .

TRASPORTO DEL CALCESTRUZZO AL PIANO DI POSA CON LE TUBAZIONI 'VACUUM CHUTE'



GFRD - GEOMEMBRANE FACED ROCKFILL DAMS

IMPERMEABILIZZAZIONI CON GEOMEMBRANE SU DIGHE IN PIETREME

- Una tecnologia sviluppata, nonostante i moderati riconoscimenti, per oltre 60 anni durante i quali la pratica internazionale di progettazione e costruzione di dighe in materiali granulari seguì schemi e soluzioni differenti, generalmente con successo. Soluzioni però che, all'aumentare dell'altezza delle dighe, mostrarono i propri limiti con incidenti gravi.
- Gran parte dell'affermarsi delle soluzioni di dighe con impermeabilizzazione flessibile sono dovute alla ingegneria ed alla industria italiane.

PREMESSA

- La evoluzione delle macchine per i movimenti di terra e la loro applicabilità in una più vasta gamma di situazioni ha reso terra e roccia competitive con il calcestruzzo. Da molti anni le dighe in terra e roccia costruite superano largamente il numero delle dighe in calcestruzzo.
- La spinta a minimizzare i volumi ha portato gradualmente ad un maggior uso di pietrame nella corpo diga. La relativa insensibilità alle piogge e le migliori prestazioni del pietrame, steso in strati e compattato con rulli vibranti (Cougar dam 1964), ne hanno spinto l'uso fino alla soluzione di massima semplicità: diga integralmente in pietrame con elemento di tenuta sul paramento di monte (CFRD Concrete Faced Rockfill Dam).

- La soluzione CFRD corpo diga uniforme in pietrame e lastra di calcestruzzo armato sulla faccia di monte, si è affermata sia per ragioni tecniche che per meriti economici. Per anni è stata, va pur detto, la soluzione 'di moda' adottata in molti casi senza motivo.
- Come per tutti i tipi di diga la soluzione è stata applicata a opere di altezza progressivamente crescente.
- Le ottime prestazioni delle prime realizzazioni hanno imbaldanzito i pionieri (non che nelle dighe in esercizio mancassero i problemi tipo fessure del calcestruzzo, dislocazione e tenuta dei giunti) e indotto gli epigoni a mantenere geometrie identiche per altezze più che doppie.

- Il fenomeno ignorato è stata la notevole **rotazione degli assi delle sollecitazioni principali che il carico idrostatico dell'invaso, sul paramento di monte, induce nei materiali del corpo diga.**
- In relazione alle caratteristiche meccaniche del pietrame ed ai livelli delle sollecitazioni inter-granulari nel corpo diga, dovute al peso proprio, il nuovo assetto di sollecitazione può essere trascurabile per dighe di altezza moderata. Per dighe molto alte può produrre ulteriori rotture dei contatti tra i grani con conseguenti importanti assestamenti post-invaso e deformazioni progressive.
- Questi assestamenti post-invaso trascinano la sottile copertura in calcestruzzo e la lesionano togliendo l'impermeabilità della diga.

LESIONI METRICHE SUL CONCRETE FACING DI CAMPOS NOVOS (BR) ALTA 220 m



PERDITE IMPONENTI ($>10 \text{ m}^3/\text{s}$) AL PIEDE DI TURIMIQUIRE (VE) DOVUTE A DANNI DEL CONCRETE FACING



- Il numero delle dighe in pietrame (rockfill) impermeabilizzate con lastre di calcestruzzo armato sul paramento di monte che hanno subito incidenti gravi è ormai troppo alto, a partire da Paradela 1958 (Portogallo) fino a Guavio 2018 (Colombia).
- L'analisi di numerosi incidenti porta solo ad una conclusione:
una diga in pietrame di notevole altezza, o di pietrame di qualità meccaniche mediocri, non è compatibile con una impermeabilizzazione rigida, pur se giuntata.
- La risposta è solo in un elemento di tenuta impermeabile e deformabile.

FINE DELLA PREMESSA

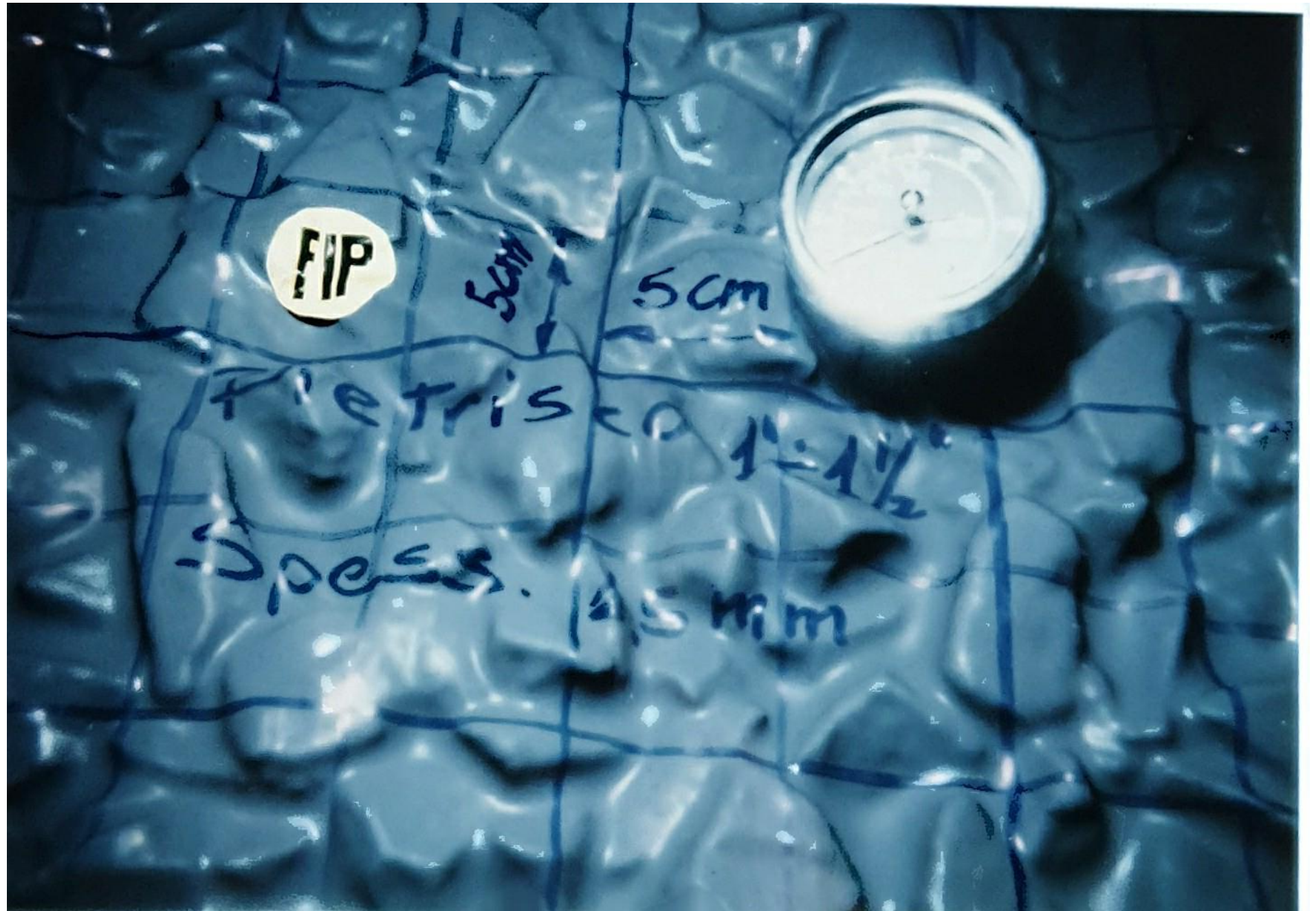
GFRD

- Negli anni 50 l'Italia era tra i leaders nel campo dei polimeri e delle macchine per la loro produzione.
- Nel 1958 l'ing. Tito Silvestri progettò, per la Società Meridionale di Elettricità, la diga Contrada Sabetta, in pietrame compattato con getti d'acqua, impermeabilizzata a monte da lastre in calcestruzzo rivestite con un foglio di Isobutilene.

- Dai primi anni 70 iniziarono in Italia (Sembenelli – FIP) programmi di prove di resistenza e tenuta (in camere ad alta pressione) su vari polimeri in fogli sottili (Isobutilene, Hypalon, PVC), posati su supporti granulari di diversa pezzature ed aggressività.
- Alla fine degli anni 70 l'ing. Flaminio Monari (CARPI) per ENEL, impermeabilizzò, con fogli di PVC, alcune dighe ammalorate, in muratura: Lago Miller (1976) e Lago Nero (1980), fortemente permeate dopo anni di servizio.

HYPALON

- FOGLIO DI 1.5 mm,
- POSATO DIRETTAMENTE SU PIETRISCO ANGOLARE < 40 mm,
- SOTTO UN CARICO D'ACQUA DI 100 m



- Nel 1992 fu progettata la diga Bovilla, in pietrame e ghiaia, alta 58 m sopra un tampone in calcestruzzo, impermeabilizzata con un 'geocomposito' (2.5 mm di PVC accoppiato ad un Geotessile nontessuto -agugliato- da 500 g/m²), posato sulla faccia di monte del rilevato (pendenza 1.55H/1V) in sostituzione delle previste lastre di calcestruzzo (Sembenelli - Italstrade).
- Fu una delle prime impermeabilizzazioni flessibili in polimeri su un 'rockfill' di notevole altezza.
- Il geocomposito fu protetto con piastre indipendenti di calcestruzzo di spessore 0.2 e 0.3 m.

**BOVILLA 1994
(ALBANIA)**

**POSA DEL PRIMO
ROTOLO DI
COMPOSITO
(PVC+GEOTESS') SUL
PARAMENTO DI UN
ROCKFILL DI 58 m.**

**PIANO DI APPOGGIO:
GHIAIA < 50 mm,
LEGATA CON
CEMENTO,
DRENANTE.**



- Nei 20 anni seguenti furono numerose le applicazioni su rilevati di varia natura (da sabbia a pietrame) e di altezze crescenti. Le progettazioni vennero sempre appoggiate a prove di laboratorio in camere ad alta pressione.
- Con ogni realizzazione si misero a punto migliori soluzioni progettuali e più affidabili tecniche di posa.
- In anni recenti, polimeri moderni e accoppiamenti collaudati (geocompositi), assieme alle tecniche di posa, saldatura e controllo, hanno permesso di impermeabilizzare dighe in materiali granulari grossolani (genericamente 'rockfills') di altezza oltre i 100 m, con ottimi risultati.

NAM OU 6 (LAOS) DIGA IN PIETRE MEDIOCRE ALTA 88 m IMPERMEABILIZZATA CON FOGLI DI PVC DI (3.5 mm) TERMOSALDATI A GEOTESSILE AGUGLIATO (750 g/m²)



- A oggi sono in soddisfacente esercizio oltre 50 dighe in terra e roccia con impermeabilizzazione flessibile GFRD.
- Di queste la maggior parte sono di progettazione e di realizzazione (per l'elemento di tenuta) italiane.
- Oggi dighe GFRD sono state realizzate, o sono in costruzione, in almeno 15 paesi nel mondo con altezze che superano i 100 m.
- CARPITECH, succeduta a CARPI nel 1987 ha realizzato la maggior parte delle impermeabilizzazioni oggi esistenti utilizzando materiali prodotti in Italia e soluzioni proprietary.

APPROFONDIMENTI

Chi fosse interessato a maggiori dettagli può scaricare dal Sito ITCOLD www.itcold.it la pubblicazione:

P. Sembenelli, 2016 -«The Advent of Geomembrane Faced Earth and Rock Dams (GFRD)» – VI European Geosynthetics Congress, Lubiana SLO pag. 403-425