

PROF. ING. GIOVANNI CALABRESI

*Ordinario ~~fr.~~ di Geotecnica nella Facoltà di Ingegneria
Università di Roma "La Sapienza"*

Consorzio di Bonifica della Basilicata
Via Annunziatella 64
75100 Matera

Roma, 12 maggio 2021

Diga di Abate Alonia. Studio interpretativo del comportamento dello sbarramento.
Lettera Prot. 2281/2021 del 16/02/2021

La nota della Direzione Generale Dighe del 05/01/2021, cui fa riferimento la lettera in oggetto, fornisce indicazioni tecniche in merito ad elementi da approfondire o sviluppare ai fini della prosecuzione dell'iter tecnico e progettuale.

Tra gli elementi da acquisire sono comprese elaborazioni ed esplicitazioni dello Studio interpretativo già presentato e illustrato alla Direzione Generale Dighe, che si possono ottenere dai dati e documenti acquisiti, sulla base dei modelli di analisi numerica già sviluppati dal gruppo di ricerca del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Perugia, ampiamente descritti negli allegati alla Relazione conclusiva.

Gli argomenti sviluppati e i relativi risultati sono illustrati nella nota presente seguendo l'impostazione e l'ordine esposti nella citata nota della Direzione Generale Dighe al paragrafo intitolato "chiarimenti / integrazioni dello Studio interpretativo".

1- Esplicitazioni, per le analisi tenso-deformative più significative, dei campi di stato tensionale e delle zone eventualmente plasticizzate, con commenti, in assenza di esse, della compatibilità - ancorché qualitativa - tra risultati delle analisi e stato fessurativo e/o zone di scarso addensamento osservate. al fine anche di motivare ulteriormente le considerazioni seguenti:

- a) "le conseguenti deformazioni verticali e orizzontali potrebbero aver favorito la fessurazione al contatto tra contronuclei e nucleo più rigido, come appare dai risultati della modellazione numerica" (Rel. consulenza p.16.)*
- b) Nel corpo diga dalle indagini geofisiche 2020 "risalta un'ampia zona di minore velocità, estesa longitudinalmente dalla spalla sinistra fino alla sezione strumentale 4 e oltre, e in profondità dal coronamento per oltre metà altezza diga". "Tenuto conto del processo di costruzione del corpo diga per stesa di livelli orizzontali, si deve presumere che la presente situazione sia stata generata da fenomeni occorsi dopo la costruzione" - Rel. consulenza p. 20;*

- c) *“ha la massima rilevanza la deformazione volumetrica dei contronuclei prodotta dalle variazioni di invaso, che non è totalmente reversibile, ma si incrementa leggermente, sia pure in modo decrescente, ad ogni ciclo. Le componenti orizzontali delle deformazioni accumulate producono uno spostamento graduale dei contronuclei dal nucleo più rigido, in direzione opposta, producendo le condizioni per la possibile formazione di tension cracks” Rel. consulenza p.25.*
- d) *“I risultati delle analisi numeriche atte a riprodurre i diversi cicli di invaso e svaso segnalano il raggiungimento di deformazioni del corpo diga che sembrano seguire una diversa tendenza a monte rispetto a valle” Rel. UniPG p.192 e poi più estesamente p.194-200.*
- e) *“a fronte della variazione del livello di invaso, il comportamento della porzione di monte e quello della porzione di valle risultano differenti: la porzione sommitale, il coronamento e la parte a valle tendono a spostarsi verso valle, mentre la porzione di monte che è sempre a contatto con l’invaso tende a muoversi verso monte. Ne risultano spostamenti maggiori nel lato valle compatibili con l’insorgere del quadro fessurativo osservato” Rel. UniPG p.209.*
- f) *“Le analisi numeriche preposte a simulare l’effetto dei diversi cicli di invaso-svaso successivi alla costruzione sembrano confermare questa evidenza; i risultati segnalano infatti lo sviluppo di deformazioni verticali e orizzontali, queste ultime indotte da un campo di spostamenti di segno opposto nei contronuclei di monte e valle, che potrebbero aver favorito lo sviluppo delle fessure o tension cracks al contatto con il nucleo caratterizzato da una maggiore rigidità” Rel.UniPG p.212.*

Relativamente a questo primo punto, nell’Appendice allegata alla presente nota sono esplicitati alcuni risultati estratti dall’output delle analisi numeriche tenso-deformative – già condotte nell’ambito dello studio interpretativo - per alcuni eventi/fasi ritenute significative. Nello specifico, i risultati riportati in allegato, elaborati dal gruppo di ricerca dell’Università di Perugia fanno riferimento ai seguenti eventi:

- 1° ciclo di invaso/svaso sperimentale (settembre 1956 – maggio 1958)
- ciclo «completo» di svaso e successivo invaso (aprile 1976 – maggio 1978)
- evento di piena gennaio 2003 e successivo svaso rapido febbraio 2003.

I risultati sono elaborati in termini di campi di stato tensionale, stato deformativo, campo di spostamenti verticali e orizzontali, assoluti e incrementali.

Si precisa che le elaborazioni sono riferite alla sola sezione trasversale 4-A (v. §3.1 Rel. UniPG), in prossimità della sezione "A" degli Atti di Collaudo del 1973, che può essere ritenuta rappresentativa del comportamento in sinistra idraulica della diga.

2- Esplicitazioni, per le analisi di filtrazione più significative, dei campi di gradiente di filtrazione e approfondimenti (ulteriori rispetto alle considerazioni espresse al § 7.2.2, "Analisi in condizioni transitorie", della Rel. UniPG p.174) delle analisi in condizioni transitorie limitate a singole fasi estreme (per tempistica e condizioni al contorno) di svasso o invaso rapidi e con valutazione sulle condizioni di stabilità ad esse associate.

In merito a questo punto, si è ritenuto di poter utilmente fare riferimento alle analisi delle condizioni transitorie relative all'evento significativo di piena (gennaio 2003) e successivo svasso rapido (febbraio 2003). Pertanto, con riferimento alla medesima sezione trasversale 4-A, nella sua configurazione post intervento di adeguamento, sono state condotte due analisi transitorie con il codice di calcolo Seep/W; i risultati di queste analisi sono rappresentati nell'Appendice allegata.

3- Esplicitazione delle valutazioni che hanno portato a escludere o comunque non considerare potenziali diverse cause o concause delle fessurazioni, quali ad esempio (oltre agli aspetti di stabilità del corpo diga considerati nel progetto di consolidamento del 1996 alla luce degli elementi raccolti nella nuova indagine geotecnica):

- a) assestamenti differenziali per incremento delle tensioni totali (e delle tensioni efficaci dopo la consolidazione) nelle diverse fasi costruttive tenuto conto della differente permeabilità e deformabilità di nucleo e contronuclei (considerata la verosimiglianza "dell'ipotesi che le fessure comparse alla superficie del coronamento corrispondessero a discontinuità formatesi nella parte più alta del corpo diga, tra il nucleo e i contronuclei, per effetto di deformazioni differenziali di corpi costituiti da materiali che hanno una diversa rigidità");*
- b) fratturazione idraulica conseguente ad 'effetto arco' tra nucleo e contronuclei;*
- c) fenomeni di erosione interna / soffusione connesse a gradienti critici in fase di svasso o invaso rapido, favoriti dalla presenza di terreni incoerenti in parte della fondazione della diga, in collegamento con l'invaso;*

- d) effetti locali e tridimensionali dovuti alla disuniformità longitudinale dei terreni di fondazione e dell'altezza stessa della diga;*
- e) indicazione di ulteriori elementi necessari per escluderle.*

La fessura trasversale improvvisamente apparsa presso la spalla sinistra della diga nel 1986 e quelle longitudinali forma-tesi sul coronamento nel 1987, in progressiva estensione negli anni seguenti sulle tracce delle superfici di contatto tra nucleo e contro-nuclei, hanno segnalato l'esistenza di fenomeni deformativi in atto nel corpo diga. La localizzazione delle fessure e l'assenza di altre e diverse osservazioni sperimentali, hanno orientato le indagini sperimentali, sia quelle estese nel 1988-92 sia quella molto limitata nel 2005-2006, e i diversi studi del problema, verso la zona centrale del corpo diga, nucleo e parti adiacenti dei contronuclei.

Le caratteristiche fisico-meccaniche delle terre limo-argillose impiegate nella costruzione e quelle geometriche delle discontinuità hanno fatto presumere deformazioni dei contronuclei rispetto al nucleo, favoriti dalle diverse deformabilità e permeabilità e innescati dalla filtrazione nel corpo diga e nei terreni di fondazione.

Nel 1989 un rigonfiamento apparso nel paramento di valle fu interpretato come rottura incipiente di una limitata parte del contro-nucleo di valle compresa tra il coronamento e la berma, ma l'ingegnere del Servizio Dighe che effettuò un sopralluogo dopo l'evento lo ritenne uno spostamento superficiale indotto dalla chiusura della profonda cunetta presente sulla berma a raccolta delle acque superficiali.

Nell'esame al Consiglio Superiore LLPP del primo progetto del prof. Cotecchia del 1992 si avanzò l'ipotesi che le deformazioni sul paramento di valle e la lesione al coronamento potessero trovare spiegazione e giustificazione se si fosse preso in considerazione il fenomeno della consolidazione del rilevato sotto l'azione del peso proprio e delle sollecitazioni trasmesse dal serbatoio. Furono infatti richieste indagini e analisi supplementari, perché avrebbero forse potuto fornire una spiegazione alternativa e meno preoccupante dell'ipotesi di incipiente rottura generale avanzata in progetto.

L'ipotesi d'insufficiente fattore di stabilità del corpo diga è comunque alla base della versione finale dell'intervento progettato dal prof. Cotecchia, realizzato tra il 1997 e il 2002, ma il voto della IV Sezione del Consiglio Superiore che nel 1996 approva finalmente il progetto rileva che "i motivi del manifestarsi dei fenomeni a distanza di oltre trent'anni dalla costruzione rimangono a livello di ipotesi (sisma, effetti termici, essiccamento, vie preferenziali di filtrazione ecc.)" e si raccomanda perciò di "approfittare delle fasi iniziali di esecuzione degli interventi stessi per compiere osservazioni e disporre strumentazioni dirette ad acquisire ulteriori elementi di conoscenza per giungere ad una corretta e

sufficientemente approssimata interpretazione dei fenomeni verificatisi". Il riprodursi dopo l'intervento delle lesioni longitudinali sul coronamento, nonostante la modifica della forma geometrica e della costituzione materiale del rilevato e il significativo incremento del fattore di stabilità, dimostrò poi che l'effettiva origine dei fenomeni deformativi non era stata identificata.

Tutto ciò premesso, la ricerca delle cause del fenomeno deformativo che ha interessato il corpo diga, i cui risultati sono illustrati nella Relazione del 24 ottobre 2020, ha tenuto conto delle diverse ipotesi interpretative avanzate dopo la comparsa nel 1986 della fessura trasversale, in prossimità della spalla sinistra, seguita da quelle longitudinali poco dopo.

L'unica ipotesi interpretativa compiutamente formulata e analizzata in termini quantitativi è quella avanzata dal prof. Cotecchia su richiesta del Consorzio concessionario per produrre la prima proposta d'intervento nel 1996, rielaborata in successive varianti fino alla redazione del progetto realizzato tra il 1998 e il 2001. Tanto questa ipotesi, quanto le soluzioni progettuali che ne sono derivate, sono state oggetto di valutazioni critiche da parte degli organi istituzionali, come è esaurientemente esposto nella Relazione Tecnica della Commissione di Collaudo del 28 dicembre 2005.

Diverse ipotesi interpretative sono state avanzate, anche informalmente, in discussioni e occasioni diverse, soprattutto nell'ambito delle funzioni di controllo svolte dai servizi istituzionalmente preposti e sono descritte nella nota riassuntiva del Servizio Nazionale Dighe del febbraio 2006, con il parere dell'Ufficio Geotecnica. Infine altre ipotesi, con suggerimenti di approfondimenti investigativi e di indagini suppletive, sono state avanzate in differenti occasioni di dibattito, anche recentemente, dopo la presentazione dei risultati dello Studio Interpretativo, di cui si discute.

Le diverse ipotesi interpretative si possono valutare confrontando gli effetti potenzialmente prodotti, in base ai principi di meccanica delle terre ai quali si ispirano, con le caratteristiche geometriche e cinematiche dei fenomeni fessurativi effettivamente rilevati, descritte di seguito.

La fessura trasversale comparsa sul coronamento nel 1986 attraversava il contronucleo di monte, il nucleo e il contronucleo di valle seguendo una traccia leggermente ondulata con un'apertura di 2-3 cm, senza rigetto. Fu esaminata visualmente eseguendo un pozzo profondo circa 3 m, che rilevò l'irregolarità delle superfici di distacco e l'assenza di scorrimenti tangenziali. L'apertura totale della fessura diminuiva sensibilmente con la profondità. Fu sigillata superficialmente e non ebbe alcuna evoluzione negli anni successivi.

Le fessure longitudinali comparse nel 1987 si ampliarono gradualmente in apertura negli anni successivi, fino a 3-4 cm, e si estesero con andamento rettilineo dalla spalla sinistra verso il centro e la destra, sulle tracce delle superfici di contatto tra il nucleo e i contronuclei di monte e di valle. Anche di

queste fessure si esaminò il tratto superiore con un pozzo e apparvero prodotte da una estensione perpendicolare alla superficie di discontinuità. L'assenza di scorrimenti tangenziali trovava conferma nell'assenza di differenze di quota tra i bordi superficiali: solo irregolarmente si trovano segnalate differenze di valore trascurabile, attribuibili alla sovrastruttura stradale. Le fessure longitudinali ricomparse già nel corso degli invasi sperimentali del 2002, dopo l'intervento del 1998-2001 e l'innalzamento del coronamento, seguono le tracce delle precedenti e hanno simili caratteristiche.

L'indagine geosismica tomografica effettuata nel 2006, con tre perforazioni in prossimità della sezione 2, ha fornito informazioni significative sulle loro caratteristiche geometriche: le elaborazioni dei risultati in termini di velocità di compressione e di attenuazione mostrano concordemente che la discontinuità diminuisce progressivamente con la profondità e la sua presenza non risulta più rilevabile a una profondità di 5-6 m dal coronamento. La nuova indagine geosismica tomografica eseguita nel corso dello studio interpretativo 2019-2020 ha confermato l'indagine precedente.

In conclusione è apparso chiaramente dalle osservazioni dirette ed è confermato dalle indagini geosismiche che tutte le fessure rilevate nel corpo diga derivano da sforzi di trazione, non di taglio, e hanno una sezione in forma di diedro: l'apertura decresce gradualmente con la distanza dal coronamento della diga e appare non più rilevabile a una profondità superiore a 5-6 m. Le misure ripetute a 15 anni di distanza mostrano che l'incremento di apertura rilevato in superficie non ha modificato la natura del fenomeno di deformazione.

Si può dire perciò che nella parte superiore del corpo diga le fessure longitudinali separano il nucleo dai due contronuclei, i quali sembrano distaccarsi nel tempo dal nucleo comportandosi come corpi rigidi in un moto di rotazione opposto, o come solidi deformabili per una compressione tridimensionale.

Per spiegare i fenomeni deformativi, fin dagli iniziali studi e dalle indagini del 1989-92 del prof. Cotecchia sui cui risultati si fondano successive versioni del "Progetto di ripristino e adeguamento funzionale della diga", si è ipotizzata una insufficienza delle condizioni di sicurezza statica del corpo diga, per instabilità dei contronuclei in condizioni idrauliche sfavorevoli, come quelle di svasso rapido.

A supporto di questa ipotesi la relazione di progetto include analisi di stabilità effettuate per una superficie di scorrimento che coincide a monte con il piano di fessurazione e si sviluppa a valle lungo un profilo sub-orizzontale, supponendo la presenza di una inclusione argillosa. Tuttavia per ottenere condizioni d'instabilità di pendio occorre attribuire a questo strato (mai rilevato nelle indagini) un valore di resistenza al taglio (17°) del tutto improbabile, perché molto inferiore a quello minimo ipotizzabile per le argille plioceniche presenti nell'area. Da questa ipotesi, in assenza di altre, discende il progetto

dell'intervento 1998-2001, che con la diminuzione della pendenza dei paramenti e la sostituzione di gran parte del materiale limo-argilloso dei contronuclei con altro di natura granulare e molto permeabile, aveva lo scopo di incrementare il coefficiente di sicurezza del corpo diga, come ha effettivamente ottenuto. Il ripetersi dei fenomeni deformativi dopo l'intervento ha mostrato però l'invalidità dell'ipotesi interpretativa assunta.

Indipendentemente da ciò si deve tuttavia rilevare l'incongruenza tra il meccanismo dei supposti fenomeni d'instabilità e le caratteristiche geometriche e cinematiche delle fessure, quali sono emerse dalle indagini tomografiche effettuate 15 anni dopo, al tempo non disponibili.

Altre ipotesi interpretative della formazione delle fessure, avanzate nelle discussioni del Progetto al Consiglio Superiore e in successive diverse occasioni, come sopra ricordato, ne attribuiscono la causa a deformazioni per consolidazione del corpo diga e del terreno di fondazione, indotte dal peso proprio o dal carico applicato dalla modifica progettuale, e a diversa deformabilità del nucleo e dei contronuclei.

I cedimenti del corpo diga risultanti dalle misure assestimentriche e topografiche effettuate fin dal 1954 sono riportati e commentati nella Relazione dell'Università di Perugia. Dal confronto delle misure assestimentriche effettuate nel 1957 e nel 1990 nella sezione strumentata più rappresentativa, Sezione 4A, risulta che circa la metà delle deformazioni per consolidazione del corpo diga e del terreno di fondazione è avvenuta nel tempo di costruzione. Anche gli effetti del sovraccarico indotto dall'intervento 1998-2001 hanno un simile andamento nel tempo.

Le misure assestimentriche mostrano che in direzione trasversale i cedimenti al piano di fondazione sono maggiori in prossimità dell'asse della diga e minori ai bordi, coerentemente con la distribuzione del carico verticale. Dal fatto che le differenze tra asse e bordi, per quanto significative, non sono confrontabili con quelle tra i valori del carico applicato in fondazione si deduce che l'influenza delle intercalazioni limo-argillose dei depositi alluvionali è modesta e che gli spostamenti misurati derivano principalmente dalla deformazione dello strato argilloso profondo.

Le misure topografiche degli abbassamenti del coronamento eseguite dopo l'intervento 1998-2001 confermano le deduzioni tratte dalle misure assestimentriche riguardo al decorso nel tempo e all'entità delle deformazioni. Più precisamente i cedimenti medi di 2-3 cm misurati tra il 2001 e il 2003 si sono incrementati degli stessi valori tra il 2004 e il 2007 e ulteriormente di 1 cm dal 2007 al 2010. Nei cedimenti del coronamento non si rilevano differenze tra la parte centrale e quelle marginali, in accordo con l'assenza di rigetto tra i lembi delle fessure.

Considerato quanto precede, l'ipotesi che i fenomeni deformativi del corpo diga possano mettersi in relazione con i processi di consolidazione del corpo diga e del terreno di fondazione appare in contrasto tanto con le caratteristiche geometriche cinematiche delle fessurazioni, quanto con l'insieme delle misure di abbassamento e di deformazione e la loro evoluzione temporale.

Le ipotesi sull'origine dei fenomeni deformativi informalmente avanzate da funzionari del Servizio Dighe in diverse occasioni come negli incontri in videoconferenza del 2 e 11 dicembre 2020 successivi alla presentazione dello Studio Interpretativo, e quelle addotte in una nota dell'8 dicembre 2020 dall'ing. Paolo Paoliani, già dirigente del Servizio Nazionale Dighe, componente della Commissione di Collaudo dell'intervento del 1998-2001, membro della Commissione che nel 2004 ha dichiarato la non collaudabilità e autore della relativa Relazione tecnica, prendono in considerazione gli effetti prodotti su stato tensionale e deformazioni del corpo diga dai moti di filtrazione entro i contro-nuclei, il nucleo e i terreni di fondazione.

Nella sua nota l'ing. Paoliani considera accertato il nesso di causa-effetto tra fasi di svaso e comparsa o peggioramento dei fenomeni fessurativi e alla speciale condizione di svaso rapido. Ciò premesso, dalla ripetuta coincidenza della comparsa delle fessurazioni con gli eventi di svaso, la nota pone l'attenzione sulla permeabilità dei depositi alluvionali sovrastanti la formazione plio-pleistocenica argillosa per i possibili effetti sui moti di filtrazione interessanti la diga e le condizioni che ne conseguono nello svaso. Si fa soprattutto riferimento alla condizione di svaso rapido, potenzialmente critica per la stabilità del paramento di monte, nella quale si assume che nel corpo diga di terra argillosa, poco permeabile, rimangano temporaneamente invariate le condizioni idriche indotte dal pieno invaso. Per la diga sul Rendina, a causa della natura delle terre che formano i contro-nuclei, ogni svaso è di fatto uno svaso rapido.

In particolare si suppone che a causa della permeabilità delle intercalazioni granulari presenti nei depositi alluvionali che in fondazione ricoprono la formazione pilo-pleistocenica argillosa e di quella del nucleo-taglione, maggiore di quella dei contronuclei, il campo di pressione interstiziale indotto nel contronucleo di monte in condizioni stazionarie d'invaso, in caso di svaso rapido possa determinare elevati gradienti di filtrazione, in grado di trascinare parti fini incoerenti o causare fenomeni di instabilità di pendio, o stati di deformazione come quelli osservati.

Alla base dell'ipotesi interpretativa dell'ing. Paoliani è *“la presenza in fondazione, nella zona prossima alla spalla sinistra, di un potente strato di alluvioni costituito da sabbie e ghiaie. Le indagini indicano per questo strato una permeabilità molto elevata, dell'ordine di 10^{-1} cm/s”* e più oltre afferma che *“in sponda sinistra, dove lo strato di sabbie permeabili è presente con spessori fino a 18-20 metri”*. Si tratta tuttavia di dati che non coincidono con quelli raccolti nella ricerca svolta per lo studio interpretativo.

Negli studi e le indagini di progetto i depositi alluvionali sono stati oggetto di particolare attenzione, come appare dalla relazione di collaudo del 24/04/1973. Infatti (pag. 4) *“furono eseguiti una quarantina di sondaggi di 10-20 m”* e (pag. 17-18) *“I sondaggi esplorativi eseguiti confermarono le previsioni di progetto e cioè una base impermeabile di argille azzurre del pliocene che seguivano l’andamento del piano di campagna ad una profondità di circa 3 metri in sponda sinistra e di circa 7 metri lungo la parte bassa della valle del Rendina e di circa 11 metri, in media, in sponda destra con un massimo di 17 metri. Sul fondo valle esisteva un banco continuo di alluvioni dello spessore medio di circa 4 metri coperto da una coltre dello spessore di circa 3 metri di limo sabbioso e terreno vegetale. Detto banco alluvionale era sede di una falda freatica che lo occupava quasi completamente. I sondaggi chiarirono che la falda stessa, fino a 400 m a monte della diga, non era in comunicazione con l’alveo del Rendina. Con le prove di pompaggio eseguite venne calcolato un coefficiente di permeabilità di 10^{-1} cm/sec circa.”* Durante la messa a punto del progetto esecutivo, tra il 1952 e il 1954, si eseguirono altri accertamenti e (pag. 38): *“una serie di sondaggi e pozzi esplorativi lungo l’asse longitudinale della diga fino alle argille del pliocene; detti sondaggi confermarono le previsioni di progetto”*. Ha trovato ovunque conferma la stratificazione del banco alluvionale, nel quale lo strato ghiaioso molto permeabile, quando presente, non è affiorante ma coperto da un livello di terreno fine (limo-sabbioso).

In fase esecutiva (pag. 58-59) *“uno studio particolare è stato inoltre effettuato sui terreni alluvionali rinvenuti nell’assise della diga. In essi aveva sede una falda subalvea, per studiare la quale furono installati un gran numero di piezometri a monte e a valle della diga e alcuni idrometri lungo il corso del Rendina. Inoltre sono stati realizzati due dispositivi costituiti da un pozzo centrale di pompaggio e da una rete di tubi piezometrici allo scopo di determinare la permeabilità delle alluvioni. Dall’analisi degli elementi raccolti è risultato che in corrispondenza della diga la falda subalvea non era in immediata comunicazione con la corrente del fiume; ciò si verificava solo circa 400 m a monte. In secondo luogo dalle prove di pompaggio si è ricavato il coefficiente di permeabilità delle alluvioni e si sono ottenuti valori compresi tra $5 \cdot 10^{-2}$ e $10 \cdot 10^{-2}$ cm/sec.”*

Comunque tra diverse alternative progettuali fu scelto di spingere il taglione sottostante il nucleo fino a raggiungere la formazione pliocenica argillosa per assicurare la tenuta dello sbarramento e lo scavo del taglione permise di accertare lo spessore totale dei depositi alluvionali e delle intercalazioni sabbio-ghiaiose permeabili, che lungo il suo profilo longitudinale non sono omogenee, né mai affioranti. A copertura di queste risulta sempre presente lo strato limo-sabbioso poco permeabile di circa 3 m di spessore, già ricordato, che dalle indagini eseguite prima della costruzione sembra isolare la sottostante falda freatica rispetto ai livelli idrometrici del fiume. L’isolamento idraulico dovrebbe essere aumentato negli oltre 60 anni di vita della diga a causa dei sedimenti limo-

argillosi non rimossi, che nel bacino hanno ormai raggiunto uno spessore di alcuni metri.

L'ipotesi che attraverso le intercalazioni alluvionali in fondazione, il taglione e il nucleo (la cui permeabilità parrebbe maggiore di quella dei contro-nuclei), le variazioni del livello di invaso abbiano influenzato significativamente le pressioni interstiziali e il comportamento del corpo diga trova deboli supporti sperimentali. Se in effetti, come si osserva nella nota, in una sezione strumentale (sez. 4-A) un piezometro idraulico in fondazione, posto a monte del taglione e sotto il suo ampliamento di base, segue le variazioni di invaso misurando una quota piezometrica circa 5 m inferiore, tutti gli altri strumenti simili, a poca distanza e a contatto con il nucleo non rilevano alcuna variazione.

Nella nota si ipotizza tuttavia che le condizioni idrauliche indotte dai gradienti dei moti di filtrazione nel corpo diga e nei terreni di fondazione siano la causa dei fenomeni fessurativi verificatisi dopo fasi di svasso del bacino.

La modellazione numerica dei moti di filtrazione messa a punto nello studio interpretativo si sono ancora utilizzati per confrontare gli effetti di diversi coefficienti di permeabilità isotropa e anisotropa del nucleo, dei contro-nuclei e dei terreni di fondazione, per le più sfavorevoli condizioni al contorno. Data l'incertezza sull'effettiva permeabilità del materiale del nucleo causata dalle differenze tra misure in laboratorio e in sito, si sono confrontati gli effetti di coefficienti compresi in un campo molto esteso di valori, ma rilevando una limitata influenza sui massimi gradienti idraulici, che risultano comunque modesti.

Riguardo alle caratteristiche fisiche delle terre dei contro-nuclei e in particolare al loro potenziale trascinamento da un moto di filtrazione, nei campioni prelevati sistematicamente dalle carote dei sondaggi, per avere dati statistici sulle eterogeneità dei materiali del corpo diga, non si sono mai rilevate frazioni incoerenti fini, mono-granulari, distinte dalla massa. D'altra parte l'origine e la natura dei terreni prelevati per la costruzione e le modalità esecutive dei contronuclei portano ad escludere tanto la presenza di sabbia, quanto l'estensione e la continuità orizzontale delle eterogeneità.

Nelle stratificazioni granulari nei depositi alluvionali di fondazione fenomeni di trascinamento sembrano poco probabili, perché nelle parti in cui nelle fasi di svasso rapido sarebbero possibili elevati gradienti transitori, mancano recapiti per la terra trascinata. Inoltre, se si considerano gli spostamenti che potrebbero essere prodotti nel corpo diga dal trascinamento di particelle fini in moti di filtrazione, si costata la loro incongruenza rispetto alle caratteristiche geometriche e cinematiche delle fessurazioni. In conclusione non sembra che si possano attribuire gli stati deformativi della diga a fenomeni di trascinamento di materiale incoerente, prodotti da moti di filtrazione nel corpo diga, o nei terreni di fondazione.

Riguardo ai fenomeni d'instabilità di pendio valgono le osservazioni già svolte sulla ipotesi alla base dell'intervento del 1998-2001. Sembra anche poco probabile che le sole condizioni idrauliche prodotte da uno svaso rapido siano in grado di determinare uno stato di deformazione del contronucleo di monte coerente con gli spostamenti al contorno delineati dalla fessurazione e con i risultati dell'indagine geosismica tomografica.

E' forse utile ricordare che fenomeni di rottura nei pendii, cui si fa riferimento nelle varie ipotesi avanzate per interpretare i dissesti della diga, considerano lo scorrimento di una parte rispetto alla massa restante lungo una superficie nella quale lo sforzo di taglio sia pari alla resistenza allo scorrimento. Si presuppone che il mezzo interessato abbia a rottura un comportamento perfettamente plastico, o *strain-softening*, incompatibile con le caratteristiche meccaniche del corpo diga del Rendina.

La terra limo-argillosa costipata, ma poco addensata, che forma i contro-nuclei è invece assimilabile a un mezzo plastico incoerente, molto deformabile. Esclusa dunque l'ipotesi di rottura, si potrebbe teoricamente supporre che le fessurazioni siano state prodotte da deformazioni di massa, conseguenti alle variazioni tensionali indotte dalle fasi d'invaso e svaso, come ipotizza la nota dell'ing. Paoliani, ma quest'ipotesi non trova conferma nelle analisi tenso-deformative.

Nelle analisi, di cui sono esposte nuove elaborazioni, il corpo diga è assimilato a un mezzo elasto-plastico incoerente, i cui parametri di comportamento meccanico sono dedotti indirettamente dalla limitata indagine geotecnica eseguita nel tempo disponibile per lo studio interpretativo. Mancando adeguate osservazioni sperimentali, le proprietà di ritenzione idrica (*soil water retention curves*) dei materiali in condizioni di parziale saturazione sono state assunte in base alle loro caratteristiche granulometriche. Nonostante la semplicità dei modelli costitutivi impiegati e le approssimazioni di alcuni dati di input, i risultati delle analisi nuovamente rielaborate esposti nell'allegato descrivono qualitativamente in modo corretto il comportamento della diga nelle varie fasi d'invaso e svaso esaminate. Essi mostrano che, dopo le significative deformazioni della fase costruttiva, invaso e svaso inducono deformazioni piccole e totalmente reversibili, incompatibili con i fenomeni fessurativi osservati.

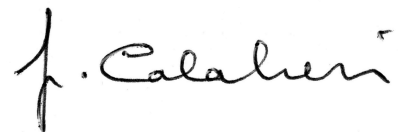
In realtà, come già esposto nella Relazione conclusiva dello studio, le deformazioni osservate sono volumetriche e maggiori nella parte alta del contro-nucleo di monte, soggetto alle maggiori variazioni relative di sforzo rispetto allo stato medio, e possono solo spiegarsi con fenomeni di ritiro per de-saturazione, purtroppo non rappresentabili con i modelli numerici ordinari e in mancanza di dati ottenibili con prove sperimentali sofisticate.

Pertanto se, superando la tradizionale impostazione delle analisi di meccanica delle terre sature, si prende in considerazione anche solo qualitativa-

mente il comportamento di terre coesive costipate, e perciò parzialmente sature, come quelle che costituiscono i contronuclei della diga, e si può comprendere l'interpretazione dei fenomeni fessurativi sostenuta nella Relazione che conclude lo studio.

E' da questa interpretazione che discende il tipo d'intervento proposto, che separando la funzione di tenuta idraulica da quella di sicurezza statica della diga permette sicuramente di evitare la dismissione dell'opera. Il progettista che sarà incaricato di redigere lo studio di fattibilità potrà ovviamente e liberamente assumere posizioni diverse.

Roma, 12 maggio 2021

A handwritten signature in black ink, appearing to read "G. Calabresi". The signature is written in a cursive, flowing style with a large initial "G" and a distinct "Calabresi" following.