

La deformazione gravitativa di Beauregard e la sua interazione con una grande diga ad arco gravità

G. Barla*, S. Ballatore[†], G. Canella[†], R. Amici[‡], A. Chiappone[‡]

**Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica - Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi 24
10129 - Torino*

*[†]C.V.A. (Compagnia Valdostana delle Acque) S.p.A.
Via Stazione 31
11024 - Chatillon (AO)*

*[‡]Geodes s.r.l.
Piazza Arturo Graf 124
10126 - Torino*

SOMMARIO: Nella presente memoria viene descritta la deformazione gravitativa profonda di Beauregard, sul versante in sinistra orografica del Torrente Dora di Valgrisenche, a monte del comune di Valgrisenche (AO). L'attenzione è rivolta alla interazione del versante con una grande diga ad arco gravità costruita negli anni '50 del secolo scorso. Dopo una breve descrizione della diga e dell'impianto, viene riportata una sintesi delle problematiche geologiche analizzate ed affrontate nel corso degli studi che precedettero e seguirono la costruzione dell'opera nelle sue varie fasi. Vengono quindi presentati i risultati degli studi più recenti (2002-2005) che, sulla scorta delle conoscenze pregresse e grazie alle moderne tecnologie di indagine ed ai più avanzati strumenti interpretativi, hanno consentito di approfondire il quadro delle conoscenze, delineando un modello geologico-geotecnico interpretativo completo per il versante sinistro e chiarendo molti aspetti sul fenomeno di interazione versante-diga. L'analisi e l'interpretazione dei dati storici di monitoraggio (del versante e del corpo diga), oltre a quelli relativi alle misure su strumentazione di recente installazione, hanno costituito una fase fondamentale nella comprensione del fenomeno in esame. Sulla base del modello interpretativo così delineato sono state condotte analisi tensio-deformative del versante, al fine di valutare, in termini quantitativi, lo stato tensionale e deformativo nell'ammasso e le conseguenti condizioni di stabilità.

1. Introduzione

La deformazione gravitativa profonda che interessa il versante in sinistra orografica del Torrente Dora di Valgrisenche, a monte del comune di Valgrisenche, in Valle d'Aosta (Figura 1), e la sua interazione con la grande diga ad arco gravità di Beauregard (Figura 2) costituiscono una problematica assai complessa per le importanti implicazioni negli ambiti di protezione civile, gestione dell'energia, del territorio e dell'ambiente.

L'impianto idroelettrico, progettato e costruito a cura della Società Idroelettrica Piemontese (S.I.P.) negli anni '50 del secolo scorso, è stato gestito dall'ENEL e successivamente, nel luglio 2001, acquisito, nell'ambito della riforma della gestione dell'energia elettrica, dalla C.V.A. S.p.A. (Compagnia Valdostana delle Acque S.p.A., già GEVAL S.p.A.), attuale gestore-concessionario.

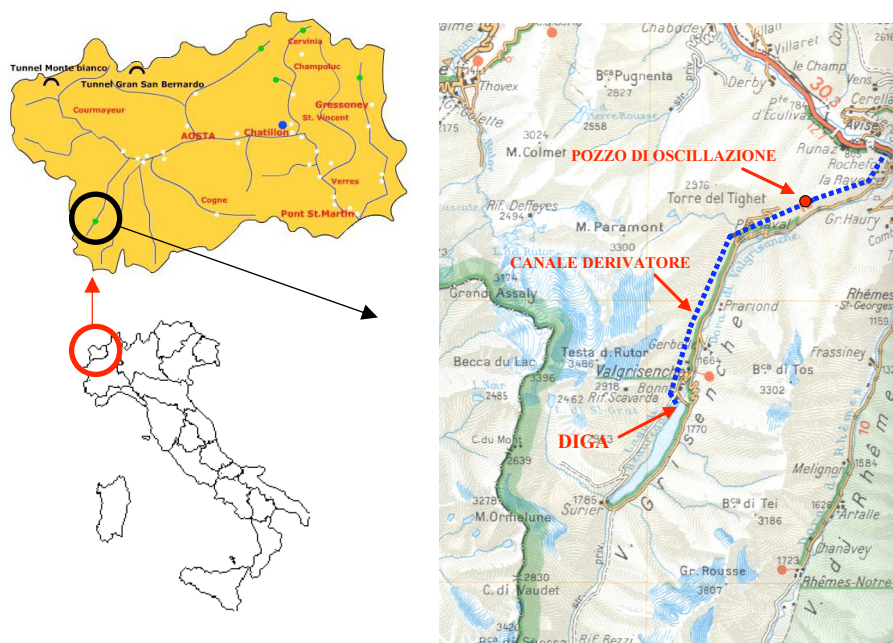


Figura 1. Ubicazione dell'area di studio e dell'impianto di Avise.



Figura 2. *Vista aerea della diga e del lago di Beauregard, da Nord-Nord/Est verso Sud-Sud/Ovest.*

Le problematiche geologiche della spalla sinistra della diga e la necessità di prevedere importanti consolidamenti dell'imposta costituirono gli aspetti di maggiore approfondimento degli studi condotti per la progettazione e la costruzione dell'opera. L'accelerazione della deformazione gravitativa nel periodo degli invasi sperimentali portò la Commissione di Collaudo, nel 1969, a prescrivere significative limitazioni di invaso rispetto a quanto stabilito da progetto. Nel corso degli anni il comportamento deformativo del versante e della struttura è stato ed è tuttora oggetto di continuo ed attento monitoraggio.

Nel seguito, dopo aver richiamato le caratteristiche dell'impianto, si ripercorrono le principali fasi della storia dell'opera, con particolare riferimento alle problematiche di tipo geologico-geotecnico. Si presentano quindi i risultati degli studi di approfondimento condotti negli ultimi anni, dal 2002 ad oggi, per la messa a punto del modello geologico-geotecnico interpretativo del versante in esame, che viene infine illustrato.

Le complessità del problema affrontato e le caratteristiche di multidisciplinarietà che lo contraddistinguono sono tipiche di uno dei settori di ricerca che Arturo Pellegrino ha più amato. Ne è sicura testimonianza la Sua mirabile lezione “*La conoscenza dell'ambiente fisico per l'analisi dei fenomeni franosi*”, tenuta nel 2003, durante il corso di Cultura Geotecnica di Napoli, organizzato dall'Associazione Geotecnica Italiana in collaborazione con l'Ordine dei Geologi della Regione Campania.

2. La diga di Beauregard e l'impianto di Avise

L'impianto idroelettrico di Avise utilizza le acque dell'alta Dora di Valgrisenche, affluente destro della Dora Baltea, e si sviluppa tra il serbatoio artificiale costruito a monte del comune di Valgrisenche e la centrale di Avise, sulla Dora Baltea (Figure 1 e 3).

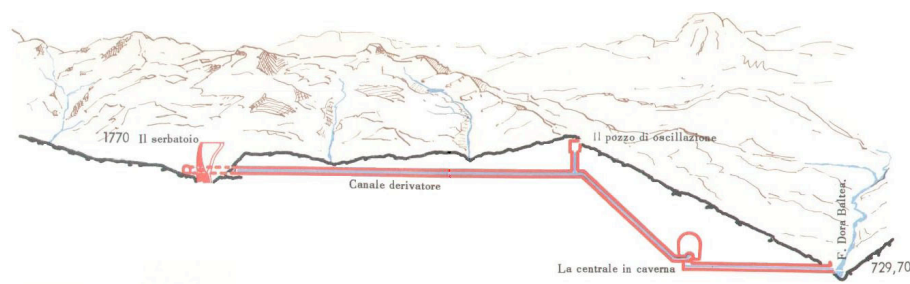


Figura 3. *Profilo schematico dell'impianto.*

Il serbatoio artificiale è creato dalla diga di Beauregard (Figura 2), dal nome di uno dei villaggi in sinistra orografica sommerso a seguito della creazione del serbatoio stesso. Dal serbatoio artificiale si diparte (Figure 1 e 3), in sponda sinistra, una galleria di derivazione in pressione che raccoglie lungo il percorso le immissioni di tre derivazioni sussidiarie. Al termine della galleria si colloca il pozzo piezometrico su cui si innesta la condotta forzata, che scende in galleria parallelamente al piano inclinato utilizzato per il trasporto di materiali.

L'incisione del Torrente Dora di Valgrisenche dove è realizzata l'opera è costituita dagli scisti cristallini della serie del Gran San Bernardo, con micascisti, micascisti gneissici, gneiss e intercalazioni di prasinite. I due lati della stretta hanno caratteristiche diverse: in sponda destra la roccia è sana e massiva, in sponda sinistra essa è fratturata, cataclasata e milonitizzata. La superficie del bacino imbrifero sotteso è di 109,8 km², di cui 18,71 coperti dai ghiacciai.

L'opera in esame è una diga ad arco gravità a doppia curvatura e a struttura simmetrica, costruita in calcestruzzo di cemento pozzolanico ed inerti alluvionali estratti a monte della diga stessa. Gli studi e le indagini per la progettazione della diga risalgono al periodo 1935-1955. I lavori di costruzione dell'opera iniziarono nel 1951. Il Nuovo Progetto Esecutivo è datato luglio 1954; il corpo diga fu ultimato nell'ottobre 1957. Estesi furono gli interventi di consolidamento ed impermeabilizzazione della sponda sinistra, eseguiti nel periodo 1953-1962. L'anno

di fine costruzione dell'impianto, riportato nel Foglio di Condizioni per l'Esercizio e la Manutenzione della diga, è il 1960. Il Collaudo è del 1969.

L'altezza massima dell'opera è di 132 m, essendo il punto più depresso della fondazione a quota 1640 m s.l.m. ed il piano di calpestio del coronamento a quota 1772 m s.l.m. (Figura 4). Lo sviluppo del coronamento è di 408 m; lo spessore massimo alla base è di 45,6 m, lo spessore minimo al coronamento è di 5 m. La quota di invaso prevista è di 1770 m s.l.m., corrispondente ad una capacità del serbatoio di 70.000.000 m³ e ad una potenziale produzione dell'impianto di 286,410 GWh. La portata massima della derivazione è di 16,5 m³/s. Il serbatoio consente di accumulare i deflussi estivi e di renderli nel periodo invernale.

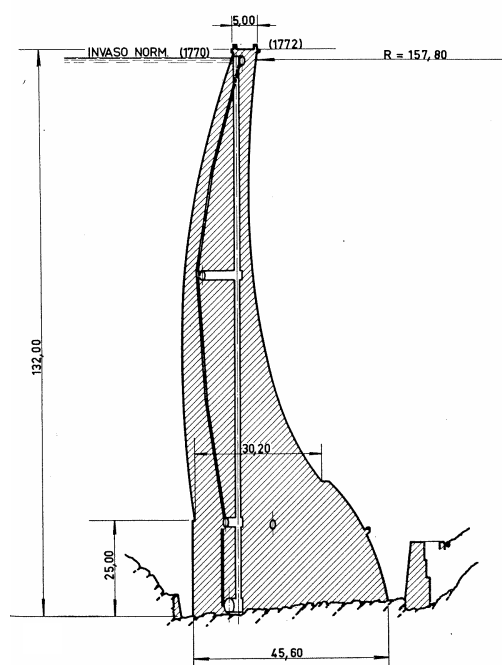


Figura 4. Sezione sul punto più depresso delle fondazioni (concio 0).

Nel periodo 1958-1968 furono condotti invasi sperimentali, come segue:

- anno 1958: invaso a 1730 m s.l.m.;
- anni 1959-1964: invaso a 1770 m s.l.m.;
- anni 1964-1968: invaso a 1730 m s.l.m.

A causa della deformazione gravitativa in sponda orografica sinistra e dei movimenti registrati nel corso delle verifiche di collaudo, in relazione alle differenti quote di invaso, dai capisaldi topografici installati sul versante, fu decretato (Certificato di Collaudo del 19 aprile 1969) che il livello massimo dell'invaso non dovesse mai superare la quota di 1710 m s.l.m. (solo in casi del tutto occasionali - piene di elevata intensità - questa quota poteva essere superata di 5 m) e che il monitoraggio del versante e della diga dovesse essere condotto senza soluzione di continuità. Con livello massimo alla 1710 m s.l.m. la capacità utile di invaso si ridusse a 6.800.000 m³, circa un decimo della capacità reale del serbatoio.

L'ENEL di Torino, prima, e la C.V.A., successivamente, hanno condotto il monitoraggio della diga e del versante sinistro vallivo sulla strumentazione installata e via via integrata nel corso degli anni. Il monitoraggio ha consentito di tenere sotto controllo la lenta deformazione gravitativa in sponda sinistra ed il conseguente comportamento deformativo della diga.

Nel 1998 il R.I.D. (Registro Italiano Dighe, all'epoca S.N.D.: Servizio Nazionale Dighe) ha imposto ulteriori limitazioni sul livello di invaso, prescrivendo come quota massima la 1705 m s.l.m. e, solo in caso di piene di eccezionale entità, la 1710 m s.l.m.

3. Le problematiche geologiche della sponda sinistra

L'ammasso roccioso in corrispondenza della diga è costituito da micascisti, micascisti gneissici e gneiss e si presenta prevalentemente sano sul fianco destro della valle, fratturato e cataclasato sul fianco sinistro. Le opere di consolidamento richiesero l'esecuzione di cunicoli, iniezioni e sottomurazioni fino a circa 200 m all'interno del versante sinistro. Sul contorno dell'opera, e per una profondità di oltre 100 m, è inoltre stato realizzato un diaframma impermeabile con iniezioni cementizie.

Le scadenti condizioni dell'ammasso roccioso in sponda sinistra costituirono l'aspetto di maggiore approfondimento degli studi condotti per la costruzione dell'opera. L'intercettazione, al di sotto della spalla sinistra, di terreni detritici sciolti indussero per primo il prof. G. Dal Piaz, incaricato per gli studi geologici dall'impresa realizzatrice, a parlare di una "sacca" (termine da allora ricorrente nei documenti di progetto) di terreni sciolti che *"si spinge all'interno del versante fino a 80-90 m dall'estremo dell'imposta, ad una profondità massima dal piano campagna di circa 150 m"*. La presenza di questi terreni rappresentò infatti, fin dall'inizio delle attività di scavo dell'imposta, un problema complesso con implicazioni, dapprima, per la tenuta dell'invaso e, successivamente, anche per la stabilità dell'imposta e della stessa diga. Per la costruzione della diga, il materiale della "sacca" fu interamente sostituito con calcestruzzo a seguito di complessi lavori di scavo e svuotamento in sotterraneo e successiva sostituzione con strutture in calcestruzzo a

formare sostegni e archi di volta rinforzati con puntoni per contrastare le spinte della roccia. La Figura 5 (tratta da Desio, 1973) riporta uno schema trasversale delle condizioni geologiche della valle in corrispondenza della diga.

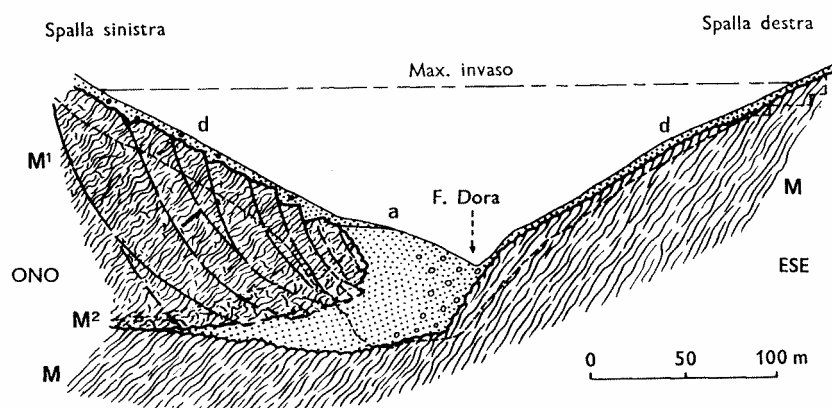


Figura 5. Sezione geologica della Valgrisenche in corrispondenza della diga di Beauregard secondo l'interpretazione di A. Desio (1973).

Le indagini e gli approfondimenti condotti durante la costruzione dell'opera contribuirono a chiarire la geometria della "sacca", mentre, sulla sua natura e soprattutto sulle implicazioni per la stabilità dell'opera e per la sicurezza dell'impianto e della valle, permasero dubbi e si intrapresero discussioni tra i tecnici che seguirono l'opera, come testimoniato dalla imponente documentazione d'archivio. Vale a tal proposito richiamare quanto riportato da Desio (1973): "...era stato supposto, al tempo delle indagini e dei lavori, che si trattasse di una sacca alluvionale, ossia di una incisione laterale del corso d'acqua riempita da materiali alluvionali; ma il grande sviluppo in lunghezza e profondità della cavità, come pure un calcolo delle condizioni di stabilità del soprastante micascisto molto sconnesso per potersi reggere a tetto per un tale importo metrico, rendono inaccettabile una interpretazione del genere. Conseguenza di questa situazione è la incertezza sulla reale stabilità della spalla sinistra che sembra abbia subito anche qualche spostamento."

Nel seguito si riportano in sintesi alcune delle principali problematiche emerse e delle considerazioni esposte dai vari esperti e tecnici che nel corso degli anni seguirono le indagini e gli studi per l'opera. Queste ultime sono di sicuro interesse e rappresentano anche le difficoltà incontrate nel tempo a delineare un quadro completo della situazione. Esse sono riportate in questa sede per ricordare un

importante insegnamento di Arturo Pellegrino, che ha sempre ritenuto indispensabile lo studio attento e meticoloso della “documentazione pregressa”, come premessa di ogni lavoro, in particolare nello studio dei grandi movimenti di massa.

1940-1949: gli studi condotti da Rodio, dal dott. Casasopra, dal prof. Testa, dai dott.ri Catalisano e Redini

Le indagini e gli studi svolti nel periodo 1940-1941 (da Rodio e dal dott. Casasopra) per conto di S.I.P. individuavano, in particolare nel fianco sinistro vallivo, la presenza di fasce milonitiche di *"argilla plastica"*, caratterizzate da *"melma argillosa"* contenente *"frammenti eterogenei e di varia grossezza"*, oltre a tracce di numerosi piani di scivolamento coincidenti con le suddette fasce milonitiche. Gli studi mettevano in evidenza la presenza di uno *"spostamento delle parti superiori di una massa omogenea lungo orizzonti congeniti, che vengono a trovarsi in posizione inclinata rispetto alla giacitura iniziale, anteriore al metamorfismo dislocativo"*. Il fianco sinistro della valle presentava condizioni differenti rispetto al fianco destro per la presenza di *"una massa in sé compatta ma, nello stesso tempo, talmente sollecitata da azioni tettoniche, da perdere la continuità primitiva"*. In conclusione, pur escludendo lo scoscendimento *"in corpore"* del promontorio di Bonne, *"resta fuori dubbio che la stabilità della zona micascistosa di tale fianco presenta motivi di incertezza"*; *"sarà da tenersi presente l'effetto d'improvvisa trascinazione del serbatoio o di rapido sopravvento di pressione idrodinamica in seguito all'immersione di eventuali scoscendimenti o di valanghe nel bacino stesso"*. Si ritenevano pertanto necessari interventi atti a garantire la stabilità dell'opera, indagini approfondite con scavo di cunicoli e sondaggi, e trattamento mediante iniezioni di consolidamento.

Altri studi degli anni '40 evidenziano le problematiche geologiche della sponda sinistra. Il prof. Testa (1941), per conto del Servizio Dighe, segnala l'esistenza in sponda sinistra di *"grandi frane"* e *"lavine"* per alterazioni profonde, pieghe e fratture collegate a fenomeni non facilmente accertabili a causa della presenza, lungo il fianco stesso, di ricoprimenti di sabbia, limo e blocchi fluvio-glaciali, di diverse decine di metri di potenza. Il prof. Testa constata inoltre, sulla base dei risultati dei sondaggi praticati nel fianco sinistro vallivo, che i depositi fluvio-glaciali presentano spessori compresi tra 15 e 50 m e afferma che movimenti relativi della massa rocciosa, ripetuti durante le epoche remote, sono ancora in atto.

I dott.ri Catalisano e Redini (1949), del Servizio Geologico del Corpo delle Miniere, ritengono che la sezione prescelta non sia la migliore possibile e osservano al proposito che nelle numerose gallerie d'assaggio da loro ispezionate risultano evidenti fenomeni derivanti da forti distacchi tettonici che hanno dato luogo a molteplici, sovrapposti piani di scorrimento con milonitizzazione, più o meno spinta, della roccia che non avrebbero offerto una sufficiente garanzia dal lato statico

consigliando lo spostamento verso monte, in corrispondenza della località Sevey circa 500 m a monte di Bonne ⁽¹⁾.

1951: la Commissione di Esperti istituita presso la Regione Valle d'Aosta

Nel 1951 fu istituita presso la Regione Valle d'Aosta una Commissione di Esperti, che avrebbe dovuto esprimere un parere sull'opera, composta da: il prof. Parejas dell'Università di Ginevra, il prof. Peretti e il prof. Albenga del Politecnico di Torino, sostituito dopo la sua morte dal prof. Dardanelli. Le notizie che si hanno sui risultati a cui giunse la Commissione sono indirette, dal momento che la Regione Valle d'Aosta decise di non renderli pubblici. Tuttavia alcune notizie si trovano, ad esempio, nella nota del 19 gennaio 1960 dell'Ingegnere Capo Carlo Moscati del Genio Civile di Aosta in relazione all'interrogazione n. 2347 dell'Onorevole Caveri concernente la diga di Valgrisenche, in cui si riportano i risultati conclusivi del lavoro della Commissione di Esperti premettendo che *“gli esperti, anziché formulare un giudizio unico globale sulla diga di Valgrisenche, hanno presentato all'Amm.ne Regionale ognuno un proprio parere. Il prof. Parejas, con esposto 6/12/1956, ha riferito che la sacca riscontrata è dovuta a una erosione torrenziale laterale, particolarmente attiva in zona fortemente milonitizzata e che i lavori fatti di riempimento sembrano sufficienti per restituire alla sacca la sua solidità originaria Il prof. Peretti con esposto 1/5/1958 ha espresso un giudizio pienamente rassicurante e senza riserva dal punto di vista geologico e geotecnico circa l'efficacia dei lavori eseguiti per il consolidamento della spalla sinistra della diga di Beauregard e di conseguenza anche sulla stabilità generale e tenuta di tutta l'imposta della diga stessa. Il prof. Dardanelli con suo esposto 1/6/1959 ha ritenuto che i lavori di consolidamento della sacca rilevata in sponda sinistra sono stati realizzati adottando concetti d'impostazione e modalità di esecuzione che assicurano completamente l'esito dell'opera eseguita a tutti gli effetti, soprattutto risultano pienamente atti a dare ogni affidamento di sicurezza per la fondazione della diga”*. Nella stessa nota in risposta all'interrogazione dell'Onorevole Caveri viene citata una relazione redatta dal prof. Sacco dell'Università di Torino che avrebbe *“sconsigliato la costruzione della diga”*. Tuttavia la nota del prof. Sacco non risultava agli atti e non risulta essere mai stata in alcun elenco ufficiale di documenti della diga di Valgrisenche.

(1) Nel resoconto dell'Adunanza n. 1984 del 17 dicembre 1954 della IV Sezione del Consiglio Superiore dei LL. PP. si ritrova il riferimento alle indagini compiute lungo la sezione consigliata dai dott. Catalisano e Redini. Il ritrovamento in destra di un materasso alluvionale di oltre 60 m di spessore consigliò l'abbandono delle indagini.

1954: l'approfondita analisi della documentazione progettuale condotta dall'ing. Sensidoni (Servizio Dighe)

In data 24 settembre 1954 l'ing. Sensidoni, responsabile del Servizio Dighe presso la Quarta Sezione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, compilò un'approfondita relazione sul Nuovo Progetto Esecutivo della diga del luglio 1954, a supporto della procedura di approvazione presso il Ministero dei Lavori Pubblici. Di sicuro rilievo ai fini della problematica del versante in sinistra orografica è l'analisi approfondita ed estremamente puntigliosa che Sensidoni compie di tutta la documentazione pregressa e di cui evidenzia le problematiche geologiche.

All'analisi della documentazione relativa al progetto ed alle visite compiute da parte dei vari esperti che nel tempo si erano alternati nello studio, Sensidoni aggiunge alcune proprie considerazioni maturate a seguito di una visita compiuta agli scavi in data 12 maggio 1952. In particolare Sensidoni si sofferma sull'osservazione compiuta alla progressiva 95 m della galleria di accesso alla camera valvole oltre la quale sembra essere presente roccia di migliori condizioni rispetto a quella milonitizzata, interessata da innumerevoli piani di scorrimento e materiali di frizione, che caratterizza il tratto precedente alla progressiva 95 m. L'ing. Sensidoni afferma che *“la roccia sul fianco sinistro farebbe parte di un grande franamento di massa disceso dall'alto del versante con fenomeno di lento carreggiamento e insieme di sfogliamento dei micascisti, sul fianco gneissico della valle glaciale. Le caratteristiche morfologiche della falda sinistra della valle mostrerebbero sicuri segni di conferma”*. A seguito di quella visita Sensidoni richiese che venissero eseguiti diversi sondaggi verticali a rotazione per verificare la situazione.

Sensidoni acquisisce successivamente il rapporto dell'1 maggio 1953 di Dal Piaz sui sondaggi eseguiti in sponda sinistra ed evidenzia le conclusioni cui lo stesso Dal Piaz era pervenuto: *“il fianco sinistro della sezione è colpito da un processo di frantumazione e di milonisi di origine indiscutibilmente profonda, che si estende verso l'interno del versante fino a una distanza indefinita”*.

Sensidoni constata che i risultati dei sondaggi sono in accordo con quanto da egli stesso osservato nel corso dei sopralluoghi e confermerebbero la *“continuità del micascisto sul fondovalle ancora coperto da alluvioni sul fianco sinistro al di sotto della roccia di imposta intensamente fessurata, milonitizzata, divisa e sbloccata da diffusi liscioni prodotti da lento scivolamento sulla roccia del substrato in seguito a una frana di vaste proporzioni”*.

Nell'analizzare la nota che Dal Piaz scrive il 23 aprile 1953, a seguito di ulteriori approfondimenti svolti relativamente alla problematica della *“sacca”* e del fianco sinistro vallivo, Sensidoni constata che Dal Piaz giunge a *“non escludere che possa essersi verificato un certo movimento di adagiamento dei banchi dello scisto sul deposito alluvionale”*. Sensidoni, sulla base di queste valutazioni, rafforza la propria tesi sulla presenza di un grande franamento sul versante sinistro vallivo.

A rafforzare ulteriormente la suddetta tesi, giunge un ulteriore rapporto di Dal Piaz, a seguito della visita del 13 novembre 1953. Sensidoni evidenzia che Dal Piaz, in tale rapporto, dopo aver constatato la grande estensione in senso trasversale al versante della sacca, è costretto ad *“ammettere un fenomeno di scivolamento in blocco della sovrastante massa rocciosa per un'estensione senza dubbio considerevole, che ritiene interessi tutta la parte inferiore del fianco sinistro, compresa tra la varice valliva a monte di Beauregard e l'allargamento della valle presso Valgrisanche”*.

L'ultima constatazione di Sensidoni riguarda la relazione del prof. Maddalena a seguito di un sopralluogo compiuto in data 19-20 maggio 1954. Secondo Sensidoni Maddalena *“riconosce la situazione geognostica delle imposte della diga riconosciuta dal Servizio Dighe e alle quali è infine addivenuto anche il geologo prof. Giambattista Dal Piaz. In definitiva il fianco sinistro è costituito da una pila di banchi discesa dall'alto, sia pure senza sconnettimenti eccessivi, contemporaneamente o successivamente al ritiro del ghiacciaio quaternario. Scoscendimento preceduto, con molta probabilità, secondo il prof. Maddalena, dalla formazione di un lago di sbarramento di frana, della valle. La zona o il piano di distacco sono tuttora incogniti e il rintracciamento è ritenuto necessario anche dal prof. Maddalena il quale conferma altresì la necessità di sostituire con calcestruzzo i terreni fluvioglaciali che ora riempiono la sacca”*.

Le osservazioni finali di Sensidoni comprendono quindi, nei confronti delle tematiche del versante sinistro vallivo, la constatazione che i pareri dati precedentemente erano stati ottimistici, a seguito degli studi e delle indagini preliminari riportate da chi aveva eseguito tali studi, e che il Servizio Dighe era stato tenuto all'oscuro delle ricerche compiute tra il 1941 e il 1951. La tardiva constatazione delle problematiche presenti in sponda sinistra valliva comportava la necessità di approfondire ulteriormente le conoscenze sulla frana verificando il piano di scorrimento approfondendo il cunicolo previsto per l'esecuzione del setto impermeabile. Solo al termine di tali ulteriori approfondimenti Sensidoni dice che si sarebbero potuti trarre elementi per *“concretare definitivamente il limite delle iniezioni di risanamento”*.

Nonostante l'ampio spazio dedicato all'analisi approfondita delle problematiche geologiche della sponda sinistra valliva e i numerosi dubbi e le questioni ancora aperte, l'ing. Sensidoni conclude la lunga relazione di commento al progetto affermando che lo stesso poteva essere approvato integralmente ⁽²⁾.

⁽²⁾ Appare assai curioso un tale comportamento se si considera il tono con cui Sensidoni prende le distanze dalla fase di studio precedente il progetto esecutivo che era stata *“tenuta nascosta al Servizio Dighe”* e soprattutto all'importanza che egli attribuisce alla presenza di una frana sul versante sinistro vallivo via via che la sua analisi della documentazione avanza. La rapida conclusione con l'approvazione di fatto incondizionata del progetto vanifica l'analisi, estremamente approfondita, compiuta sulla

1953-1954: le note tecniche di Dal Piaz sulla “sacca”

La formazione della “sacca” fu inizialmente e per lungo tempo attribuita ad un processo di sottoescavazione ed erosione del piede del versante ad opera del ghiacciaio prima e delle acque dopo, con successivo riempimento di materiali alluvionali depositi dalla stessa Dora di Valgrisenche. Tuttavia gli elementi geologici a disposizione ed a supporto della suddetta interpretazione erano tutt’altro che univoci. Infatti le descrizioni dei sondaggi spinti fino alle profondità della “sacca”, riportano sempre le seguenti definizioni: “*micascisto milonitizzato, materiale detritico fine, materiale detritico più o meno fine con blocchi*”. Anche dalle note tecniche e dai rapporti geologici redatti dal prof. Dal Piaz negli anni ’50 a seguito dei sopralluoghi da lui compiuti presso il sito di imposta della diga appare chiaramente che gli elementi a favore dell’interpretazione del materiale come alluvionale sono estremamente scarsi; lo stesso Dal Piaz, in alcuni rapporti, indica inizialmente come attribuibili a miloniti i depositi presenti all’interno della sponda sinistra valliva.

Nel “*Rapporto geologico sulla visita compiuta il 23 aprile 1953 alla zona della costruenda diga di Beauregard*” Dal Piaz riporta infatti diversi elementi contraddittori circa la natura dei materiali della “sacca”; questi infatti vengono definiti alluvionali, morenici o milonitici. Dalle descrizioni risulterebbe un’alternanza di sabbie e ghiaie (in senso puramente “granulometrico”) in letti ben stratificati. Gli elementi ciottolosi vengono descritti come arrotondati o a spigoli vivi o subarrotondati o appiattiti. Lo strato superiore è molto duro tanto da dover essere scavato con l’ausilio di mezzi meccanici ed è riportata anche la presenza di argille di colore verdastro al contatto con la roccia (sia alla base che alla sommità) e la presenza, molto rara, di elementi rocciosi arrotondati.

Lo stesso Dal Piaz, nel “*Rapporto petrografico su alcuni campioni di materiali sciolti estratti dai sondaggi geognostici eseguiti sul fianco sinistro della sezione d’imposta della diga di Beauregard*” del 15 giugno 1953, sia pur nell’incertezza dovuta alle difficoltà di campionamento, riferisce di “*materiali derivanti da scisti cristallini quarzoso-cloritici a muscovite*”. Nelle conclusioni di tale rapporto afferma poi che “*mancano in generale materiali che mostrino di essere stati convogliati da lontano e selezionati per grossezza e per peso da un lungo trasporto fluviale. Prevalgono invece elementi scagliosi e angolosi di varia grandezza, verosimilmente riferibili per la massima parte a miloniti, ed elementi di limo di probabile origine alluvionale e glaciale*”. Dal Piaz afferma inoltre che “*alcuni campioni hanno conservato la caotica eterogeneità di forma e di grana (che va dai ciottolotti grossolani ai limi più fini e ai fanghi), altri campioni invece appaiono impoveriti della parte più minuta, come se avessero subito un processo di dilavamento, non si può dire se operato dall’acqua dei sondaggi oppure da acque naturali infiltratesi nel sottosuolo*”; viene inoltre rilevato che “*ogni tanto qualche ciottoletto o qualche*

documentazione geologica e geognostica che lo aveva condotto a trarre conclusioni molto gravi sulla presenza di un vasto movimento franoso sul versante sinistro vallivo.

granulo sabbioso arrotondato fa ritenere che al materiale milonitico prevalente si accompagni anche un apporto di deposito alluvionale, di limo glaciale o di minuto materiale morenico rimaneggiato dalle acque”.

Nella nota del 9 gennaio 1954 (*"Rapporto geologico sulla visita sopralluogo compiuta il 13-11-53 alla località della diga di Beauregard"*) Dal Piaz descrive la visita in cui *“venne particolarmente esaminato il cunicolo esplorativo scavato sul fianco sinistro, al limite tra la sacca alluvio-morenica (e fluvioglaciale) e la sovrastante massa rocciosa”. “I materiali attraversati dal cunicolo esplorativo poterono essere studiati solo in piccola parte a causa dell’abbondante sfaticcio terroso che li rivestiva, del forte armamento dello scavo, Malgrado queste difficoltà, le osservazioni che si poterono compiere hanno fornito finalmente degli elementi di giudizio inequivocabili e in ogni caso molto più sicuri dei dati geognostici ricavati dai sondaggi esplorativi”* ⁽³⁾. Le osservazioni, evidentemente difficoltose, riferiscono di un *“grosso blocco arrotondato”* alla progressiva 28 m, e di *“sabbia frammista a ghiaia con ciottoli arrotondati e talora appiattiti, che verso l’alto fa passaggio a un limo sabbioso potente solo alcuni centimetri certamente di origine alluvionale e piuttosto fluvioglaciale e si riconosce per il suo colore gialliccio”* alla progressiva 34 m, di *“ciottoli e blocchi glaciali e in calotta la roccia in posto, fratturata, ma con una quantità poco rilevante di milonite”* alla progressiva 70 m. Al termine delle osservazioni la *“sacca”* appare molto più grande di quanto non fosse ipotizzabile e *“il grande sviluppo in senso trasversale al versante costringe ad ammettere un fenomeno di scivolamento in blocco della sovrastante massa rocciosa per una estensione senza dubbio considerevole. Tale movimento ha superato i novanta metri”*.

L’ipotesi dell’esistenza di una *“sacca”* di materiali alluvionali e/o fluvioglaciali evidentemente non era sufficiente a spiegare le dimensioni del fenomeno e soprattutto la presenza di milonite rendeva complessa l’interpretazione iniziale. Dal Piaz in tal senso ricorre alla presenza di uno scivolamento lento verso valle sul materiale della *“sacca”* *“minutissimo reso sdruciolevole da impregnazioni idriche”* che sarebbe tuttavia in ogni caso stato preceduto dalla presenza di una locale cavità dovuta all’azione della Dora o di torrenti sottoglaciali.

1954: la relazione della Quarta Sezione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici in merito al Nuovo Progetto Esecutivo della diga (luglio 1954)

In data 17 dicembre 1954 la Quarta Sezione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, nel corso dell’adunanza n. 1984, udita la Commissione relatrice composta dagli ingegneri Marchi, Penta, Supino e Piccoli, si espresse in merito al Progetto Esecutivo della diga datato luglio 1954.

⁽³⁾ È interessante notare come Dal Piaz, nonostante le difficoltà delle osservazioni, passi dall’estrema incertezza del rapporto del 15 giugno 1953 alla assoluta certezza del novembre dello stesso anno circa la natura della *“sacca”*.

Nella ponderosa premessa al parere vengono richiamate le fasi salienti del progetto e sottolineati gli aspetti più problematici da approfondire. In particolare, per quanto concerne le problematiche geologiche del versante sinistro, dopo aver richiamato le conclusioni dei diversi tecnici ed esperti che si erano succeduti negli studi a cavallo della seconda guerra mondiale, veniva evidenziato che lo stesso prof. Dal Piaz, a seguito dei sopralluoghi del novembre 1953, in particolare ai lavori di scavo della “sacca”, verificato il grande sviluppo che la stessa andava assumendo in senso trasversale al pendio, aveva ammesso che all’origine del fenomeno dovesse esserci uno *“scivolamento in blocco della sovrastante massa rocciosa per una estensione senza dubbio considerevole. Estensione che riteneva estendersi a tutta la parte inferiore del fianco sinistro, compresa tra la varice valliva a monte di Beauregard e l’allargamento della valle presso Valgrisanche”*. Per il rintracciamento del piano incognito di distacco del franamento Dal Piaz aveva consigliato di completare lo scavo del cunicolo lungo il tetto della sacca e di prolungare quello di accesso alla camera valvole oltre la stessa camera. Venivano infine riprese le conclusioni del prof. Maddalena che prospettava a sua volta l’evoluzione morfologica della valle in epoca post glaciale con scorrimento di porzioni di versante che si erano andati a sovrapporre ai depositi morenico-alluvionali sul fondovalle.

Nelle premesse si richiama ancora l’attenzione sul fatto che il Servizio Dighe avesse seguito con molta attenzione l’evolversi delle indagini eseguite negli anni precedenti e che le principali conclusioni della relazione del 24 settembre 1954 dell’ing. Sensidoni erano:

- necessità del parere del Servizio Idrografico circa la portata della piena catastrofica ($460 \text{ m}^3/\text{s}$);
- necessità di individuare il piano di scorrimento della frana sul fianco sinistro;
- necessità che la sacca fosse completamente liberata dal terreno che la *“ingombra”* e riempita di calcestruzzo.

Nella nota si legge ancora che *“nonostante le osservazioni fatte il Servizio Dighe ritiene che il progetto del 1954 della diga di Beauregard sia meritevole di essere approvato per l’altezza di m 132 prevista”*.

Nella nota si prosegue asserendo che, relativamente alle caratteristiche geologiche della stretta di Beauregard, dall’attenta analisi della documentazione e dalle risultanze della visita effettuata dalla Commissione relatrice (Marchi, Penta, Supino e Piccoli), *“si è del parere che circa i rapporti stratigrafici fra materiale sciolto – riempiente l’ampio vuoto rinvenuto – e la roccia lapidea localmente sovrastante ad esso, può escludersi un fenomeno di frana; le caratteristiche geologiche riconoscibili all’esterno, la morfologia esterna e i cunicoli esplorativi eseguiti per più che sufficiente lunghezza allo scopo di investigare direttamente in proposito, non rivelano, infatti, alcun elemento positivo in favore di tale interpretazione”*.

In conclusione, dopo aver elencato una serie di prescrizioni volte a correggere altrettante problematiche strutturali o idrauliche del progetto, la commissione relatrice approvò il progetto stesso.

1960: gli studi del dott. A. Amstutz

Nel 1960 il dott. Amstutz, geologo svizzero, libero professionista, presentò, nel corso di una seduta dell'Archivée des Science di Ginevra, una nota dal titolo "*Solifluzione nella Valle d'Aosta*", successivamente pubblicata con il titolo di "*Aperçu géologique pour le barrage de Valgrisanche (saggio geologico sulla diga di Valgrisanche)*", in cui riportava le sue considerazioni circa alcuni rilievi effettuati autonomamente nell'area e circa la presenza di un vasto scivolamento dell'intero versante sinistro vallivo. Amstutz tuttavia non si limitava a riportare le conclusioni del suo lavoro ma citava il prof. Paréjas come responsabile della scelta errata della sezione d'imposta della diga a seguito di errori di analisi e valutazione delle condizioni geologiche della zona dell'imposta. Il prof. Paréjas, pur non essendo stato in realtà autore degli studi precedenti alla realizzazione della diga, in una nota del marzo 1961, evidenziava il fatto che le obiezioni mossegli da Amstutz erano offensive del suo onore professionale e scientifico e richiedeva alla Regione Valle d'Aosta l'autorizzazione a utilizzare, per una risposta pubblica, gli argomenti del suo rapporto del 6 dicembre 1956 in cui erano contenute le risposte agli attacchi di Amstutz.

I risultati degli studi di Amstutz non risultarono graditi ai componenti della Commissione di Esperti istituita presso la Regione Valle d'Aosta e diedero luogo a una serie di polemiche che proseguirono fino al 1963.

A seguito del lavoro di Amstutz, il Presidente della Regione Valle d'Aosta, con una nota del gennaio 1960 e una seconda del settembre dello stesso anno indirizzate al Presidente della Quarta Sezione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, alla direzione generale Acque e Impianti presso lo stesso Ministero, al Genio Civile di Aosta e al Presidente della Commissione di Collaudo, richiese la nomina di una Commissione di controllo per "*procedere a nuovi accertamenti tecnici, specie sulla natura geologica della sponda sinistra dell'invaso di Beauregard*". Il Presidente richiedeva che dovesse entrare a far parte della Commissione il dott. Amstutz, riservandosi di segnalare anche il nominativo di un ingegnere.

1961-1963: la Commissione di Esperti voluta dalla Regione Valle d'Aosta e nominata dal Ministero dei Lavori Pubblici e la nota del prof. Peretti

Il Presidente della Quarta Sezione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, ing. Curzio Batini, in una nota del 21 ottobre 1963, redatta per il Ministro in risposta all'interrogazione parlamentare n. 2390 degli Onorevoli Sulotto, Todros e Spagnoli e n. 2400 dell'On.le Gex, riporta le stesse cose già riportate dall'ing. Moscati del Genio Civile di Aosta a proposito delle conclusioni dei membri della Commissione. Nella stessa nota riferisce inoltre che il Ministero dei LL.PP, con decreto 22 marzo

1961 n. 3581, aderendo alla richiesta della Regione Valle d'Aosta, nominò la Commissione di Esperti cui era domandato di riferire sul comportamento della diga costruita e già in esercizio, nonché sulla natura e caratteristiche dei terreni sui quali la diga stessa era stata costruita. La Commissione era costituita da: prof. Danusso del Politecnico di Milano - Presidente, prof. Locatelli del Politecnico di Milano, ing. Scalabrini (libero professionista), prof. Beneo (Capo dell'Ufficio geologico del Ministero dell'Industria), prof. Desio dell'Università di Milano, prof. Stucky del Politecnico di Losanna, dott. Amstutz (geologo svizzero), ing. Toti del Genio Civile addetto al Servizio Dighe. I due membri stranieri vennero inclusi *“nonostante il parere contrario di questa Presidenza a richiesta del Presidente della Giunta Amministrativa della Valle d'Aosta”*. La Commissione, per una serie di motivi, tra cui i principali erano la presenza del dott. Amstutz, che si pose fin dall'inizio in veste di accusatore ⁽⁴⁾, e la presenza contemporanea della Commissione di Collaudo ancora al lavoro, non produsse alcun risultato concreto ⁽⁵⁾.

Nel 1963 il prof. Luigi Peretti ⁽⁶⁾ analizza, in una nota tecnica, l'imposta sinistra della diga a seguito di alcune indagini effettuate dall'ENEL e attribuisce a dislocazioni orogenetiche l'intensa tettonizzazione della roccia in questo settore. Peretti condivide l'interpretazione della *“sacca”* di materiali alluvionali e morenici che avrebbero riempito sotto forte pressione idrostatica un vuoto presente al di sotto del fronte vallivo che ritiene essere *“massiccio e in posto”*. Il vuoto al di sotto di tale fronte *“è indubbiamente dovuto all'erosione torrentizia sottoglaciale, lateralmente orientata secondo una superficie suborizzontale di scorrimento tettonico...”* Tutti gli elementi disponibili e analizzati inducono Peretti a *“escludere l'ipotesi di uno scivolamento massivo della roccia della spalla sinistra”* ⁽⁷⁾.

⁽⁴⁾ Come già detto il dott. Amstutz era già entrato in polemica in precedenza con esperti italiani per aver individuato sul versante sinistro della valle una frana di grandi dimensioni.

⁽⁵⁾ La nota al Ministro del dott. Batini si conclude rimandando le decisioni alla presa visione dei risultati della Commissione di Collaudo suggerendo che, qualora ritenuto opportuno, la stessa si sarebbe comunque potuta sottoporre al giudizio di una Commissione di Esperti cui si sarebbe dovuto dare *“pieno mandato di ulteriore indagine e di giudizio, mettendo a disposizione tutti i mezzi”*. Nella stessa si sottolineava che tale Commissione avrebbe dovuto essere formata da *“soli esperti italiani”*.

⁽⁶⁾ Il prof. Peretti nella relazione cita il fatto che, essendo stato componente della Commissione istituita presso la Regione Valle d'Aosta, e non essendo stati resi pubblici i risultati di quella Commissione, non avrebbe riportato i risultati di quella perizia, ma che si sarebbe limitato a riportare elementi *“di fatto, d'interesse rigorosamente scientifico, acquisiti o confermati, del resto, all'infuori della sua attività di membro della Commissione...”*

⁽⁷⁾ Appare alquanto curioso che il prof. Peretti escluda in maniera categorica l'ipotesi di una frana sul versante sinistro vallivo quando lo stesso Dal Piaz, nei suoi ultimi rapporti (novembre 1954), sembra convinto che, all'origine della conformazione della sponda, sia pur in presenza di terreni alluvionali, ci debba essere un movimento di massa in grado di giustificare le enormi dimensioni della *“sacca”*, e in particolare la sua estensione verso

1966-1969: la Commissione di Esperti nominata dall'ENEL e la Commissione di Collaudo

Nel 1966 l'ENEL nomina una Commissione di Esperti per studiare la diga e il serbatoio di Beauregard ⁽⁸⁾. Dopo numerosi sopralluoghi, approfondimenti e studi, la commissione stende una relazione conclusiva nel mese di febbraio 1969. La Commissione descrive la "storia" della diga, elenca tutti gli strumenti installati nella diga e sul versante e riporta i risultati delle interpretazioni degli stessi. Per gli aspetti geologici del versante sinistro vallivo, la Commissione si basa sui risultati degli studi svolti dal Servizio Geologico e dal Centro Progettazioni dell'ENEL di Roma nell'autunno 1966 di cui richiama, tra le altre, le seguenti conclusioni:

- *"il fianco sinistro della valle evidenzia una conformazione molto complessa. Stabilire se questa sia dovuta allo scoscendimento di una enorme frana o allo scivolamento di un enorme masso di roccia sottoescavato dall'azione di un torrente sottoglaciale in presenza di un netto contrasto di idee tra le numerose persone che si sono interessate del problema dimostra quanto sia ancora prematuro pronunciarsi....."*
- *la massa rocciosa che forma la sponda sinistra deve quanto mai essersi mossa ed "assisa" sul materasso alluvio-morenico, subendo in ogni caso gli effetti del suo movimento (piccolo o grande che sia)*
- *le numerose indagini eseguite dimostrano senza incertezze che le caratteristiche meccaniche del suddetto ammasso roccioso sono in media veramente scadenti ..."*

Nelle conclusioni la Commissione si sofferma ampiamente *"sulla presenza di un movimento nel versante sinistro e sulle cause dei movimenti registrati dalla strumentazione a in relazione all'acqua dell'invaso, che avrebbe indotto il "turbamento" del regime della falda e avrebbe innescato una fase di movimento di riadattamento. Non vengono escluse neppure, tra le possibili cause di turbamento, gli scavi assai profondi e le massicce iniezioni eseguite per la costruzione dell'opera"*. Quale che sia la causa all'origine del movimento sul versante, la Commissione evidenzia la manifesta influenza dell'invaso sull'entità del movimento stesso dal momento che questo coincide con i periodi di maggior escursione del livello nel serbatoio. La Commissione conclude confermando in sostanza le condizioni di rischio per la diga e per l'invaso, pur non esprimendosi in maniera univoca sulla frana del versante sinistro, giungendo a considerazioni in gran parte analoghe a quelle che pochi mesi dopo stabilirà la Commissione di Collaudo:

- rinuncia al pieno esercizio del serbatoio;
- limite superiore della quota di invaso: 1730 m s.l.m.;

l'interno del versante. Tuttavia ciò si inquadra ampiamente anche nella polemica molto accesa, di cui si trova eco ancora nella nota per l'ENEL, con il dott. Amstutz che invece aveva riconosciuto la presenza di una vasta frana sul versante sinistro vallivo.

⁽⁸⁾ La commissione era composta dai proff.ri Arredi (Roma), Falconnier (Nyon) e Schnitter (Zurigo). Gli stessi componenti dichiaravano di essere stati assistiti nel loro lavoro dall'ing. Gentile, progettista dell'opera, e dagli ingg. Negri e Terracini del Centro Progettazioni e Costruzioni Idrauliche Elettriche e Civili di Torino.

- prosecuzione di tutte le osservazioni, misure e controlli, eventualmente da integrare;
- necessità di esaminare nuovamente la situazione del pendio di sinistra e della struttura dopo due anni di ulteriori osservazioni;
- necessità di riesaminare la capacità degli scarichi in relazione ad un rapido svaso, qualora la pendice o la deformazione della struttura evolvessero verso situazioni di pericolo.

La relazione allegata al Certificato di Collaudo (19 aprile 1969, approvato dal Ministero dei Lavori Pubblici con nota n. 1325 del 25-11-1969) compie una revisione completa della documentazione del progetto della diga. Molto interessante, per coprire la carenza dovuta all'assenza di alcuni documenti, sono i resoconti relativi ai lavori non più consultabili.

La relazione allegata al Certificato di Collaudo riporta, nell'ambito del verbale della visita del 31-5/1-6-1965 alla diga, una serie di considerazioni circa le condizioni della sponda sinistra e in particolare riferisce di uno studio di fotografie aeree fatto eseguire dalla stessa Commissione a tecnici del Servizio Geologico d'Italia ⁽⁹⁾. I tecnici del Servizio Geologico hanno condotto lo studio con una doppia serie di aerofotografie: una prima ad alta quota (scala approssimativa 1:65.000) con riprese del 1955 precedenti alla formazione del lago e una seconda eseguita *ad hoc* nel 1965 dall'ENEL a bassa quota (scala approssimativa 1:15.000).

Lo studio ha approfondito aspetti tettonici a grande scala per l'intera valle individuando lineamenti principali paralleli all'asse vallivo e una particolarità dell'alveo della Dora che, in corrispondenza della zona del futuro lago, risultava spostata rispetto all'andamento fortemente rettilineo dei tratti immediatamente a monte e a valle. Questo andamento della valle e la presenza di "*svuotamenti*" nei settori di monte della sponda sinistra valliva in corrispondenza del lago portavano a concludere che si trattasse di "*grandiosi cedimenti di scarpa*" o più precisamente di movimenti franosi. Da questo studio emergeva l'ipotesi di un generale collasso delle pendici in sinistra verso il fondo e la sponda destra, escludendo la formazione della "*sacca di erosione*" così come sostenuto nell'ambito della documentazione di progetto.

In conclusione la Commissione di Collaudo, a fronte della situazione geomorfologica rilevabile sulla sponda sinistra e dei movimenti registrati, in relazione alle diverse quote di invaso, dai capisaldi topografici installati sul versante, non riteneva prudente stabilire il livello di ritenuta d'esercizio alla quota prevista in progetto, limitandolo in ogni caso alla quota di 1710 m s.l.m.; solo in situazioni occasionali (piene di elevata intensità) questa quota poteva essere superata di 5 m.

A seguito di tali riscontri la Commissione di Collaudo richiese l'avvio di approfondimenti geologici sulla sponda sinistra e l'impianto di un sistema di osservazioni sistematiche da proseguire anche dopo il collaudo.

⁽⁹⁾ Lo studio è conservato presso gli archivi del R.I.D. a Roma.

1992: lo studio Piovano

Lo studio effettuato da Piovano nel 1992 affronta per la prima volta in maniera organica la problematica della stabilità complessiva del versante sinistro individuando aree in frana per circa 2.5 km² con 50x10⁶ m³ di materiale coinvolto. Le attività a supporto dello studio sono state: la revisione degli studi pregressi, l'esecuzione di rilievi geologici, geomorfologici, geologico-strutturali e di indagini geofisiche (sismica di tipo puntuale a riflessione “*single coverage*”, a rifrazione e geoelettrica). Tali attività hanno consentito di: estendere verso monte i limiti del dissesto, individuare aree interne alla frana a differente comportamento, valutare spessori della frana compresi tra 50 e 200 m, definire la “*sacca*” come composta da materiali alluvionali su cui sono scivolati volumi di roccia senza rotazione degli stessi. Piovano esegue inoltre una verifica di stabilità del versante mediante il metodo grafico di Markland, ponendo a confronto la giacitura del fronte del versante con la giacitura dei sistemi di discontinuità e delle loro intersezioni e verificando il possibile cinematismo di blocchi rocciosi delimitati dagli stessi piani di discontinuità e dal fronte. Attraverso il confronto delle osservazioni in sito e dei cinematismi individuati con il metodo di Markland, Piovano individua i piani di discontinuità lungo i quali possono essere avvenuti i fenomeni di instabilità passati. Conclude quindi che le verifiche di stabilità evidenziano che *“il versante ha acquisito nel complesso una configurazione che permette di escludere la possibilità di ulteriori movimenti di massa improvvisi e di ampie dimensioni”*.

4. Gli studi recenti (2002-2005)

4.1. Premessa

Gli studi di tipo geologico e geotecnico condotti nel periodo del progetto e della costruzione della diga, se pure molto approfonditi e particolareggiati, mostrano, allo stato attuale, le carenze tipiche del periodo in cui sono stati eseguiti, legate da una parte alla mancanza di “strumenti interpretativi”, dall'altra alla “relativa limitatezza” degli strumenti tecnologici allora disponibili, perlomeno nei settori geologico-geotecnici a servizio dell'ingegneria civile.

In campo geologico gli “strumenti interpretativi”, soprattutto per quanto riguarda la fotointerpretazione e l'interpretazione in chiave tettonico-strutturale, sono ancora molto lontani rispetto a quelli attualmente disponibili, peraltro in continua evoluzione. Le prove geotecniche riguardano prevalentemente analisi petrografiche, mineralogiche, di classificazione geotecnica e prove edometriche eseguite su campioni di materiale sciolto, prelevato alla base della diga ed in sponda sinistra, in corrispondenza di fasce milonitizzate. In relazione alla caratterizzazione meccanica alla scala del laboratorio, risultano del tutto assenti prove meccaniche condotte agli

elevati stati tensionali che caratterizzano gli strati dove ha sede il movimento gravitativo profondo, sia per l'inadeguatezza delle tecniche di prelievo di campioni indisturbati ad elevate profondità e delle attrezzature di laboratorio, sia per la mancanza di procedure standardizzate e di idonee specifiche tecniche.

La relativa carenza tecnologica, rispetto alle possibilità attuali, perlomeno in campo geotecnico, riguarda in generale anche le indagini in sito, sia dirette che indirette; basti pensare, ad esempio, alle tecniche di indagine geofisica attualmente praticate, se pure da pochi specialisti, anche in campo geotecnico (indagini tomografiche profonde; sismica a riflessione profonda), un tempo retaggio della ricerca petrolifera (per la peculiarità dei mezzi di indagine in campo e dei requisiti richiesti per l'elaborazione elettronica). È comunque degna di nota, per la valenza tecnica, se riferita al periodo di esecuzione, l'indagine geofisica, con lunghi stendimenti a rifrazione, eseguita nel 1965 dalla Fondazione Lerici, i cui risultati sono stati rielaborati nel 1986 dall'Isme di Bergamo.

Analogamente, gli studi geomeccanici alla scala dell'ammasso roccioso "soffrivano" dell'inesistenza di criteri di caratterizzazione, quali quelli, oggi standardizzati, che si basano sulla determinazione di "indici di qualità" dell'ammasso (v. ad es. Bieniawski, 1989; Hoek & Brown, 1997; ecc.) in funzione delle caratteristiche delle famiglie di discontinuità rilevabili in affioramento. Tra le indagini in sito volte a determinare i parametri dell'ammasso, eseguite per il progetto e la costruzione della diga, vale ricordare, per l'attuale validità, il pregevole studio, condotto da Oberti nel 1949-1950 per la determinazione della deformabilità dell'ammasso roccioso prima e dopo i lavori di consolidamento delle imposte.

Pur tenendo conto dei limiti che inevitabilmente emergono alla lettura dei lavori eseguiti in epoche precedenti, vale sottolineare come gli elementi contenuti nella documentazione geologico-geotecnica prodotta nel corso degli anni, relativamente alla diga di Beauregard ed alle problematiche del versante sinistro, abbiano costituito un prezioso ed indispensabile punto di partenza per il successivo lavoro di approfondimento condotto dal 2002 ad oggi.

4.2. Studi ed indagini eseguiti dal 2002 ad oggi

A partire dal 2002, il nuovo Concessionario dell'Impianto (C.V.A. S.p.A.), su richiesta del R.I.D., ha dato corso a nuovi studi ed indagini, svolti secondo le più moderne tecniche esecutive ed interpretative, allo scopo di approfondire la ricostruzione geologico-geotecnica del versante, il fenomeno di interazione versante-diga e le conseguenti condizioni di fessurazione del corpo diga. La recente campagna di indagine e studio ha compreso: l'esecuzione di rilievi e indagini di tipo geologico-geotecnico, lo studio delle condizioni strutturali del corpo diga, l'installazione di nuova strumentazione nel versante e nel corpo diga, l'analisi e l'interpretazione dei dati di monitoraggio.

Le **indagini geologiche-geotecniche** sono consistite in:

studio geomorfologico e fotointerpretativo;

rilievi geologico-strutturali, in superficie (su un'area complessiva di circa 10 km²) ed in profondità (alle finestre ed ai fronti dei cunicoli in sponda sinistra);

indagini in sito, comprendenti:

- *indagini dirette*: perforazioni di sondaggio spinte oltre la fascia di scivolamento basale del movimento gravitativo (si tratta di sondaggi in cunicolo fino a 62.7 m di profondità dal piano di calpestio e sondaggi sulla superficie del versante spinti fino alle profondità di 380.8 m e 259.3 m); prove di permeabilità; prove con martinetto piatto; prove dilatometriche;
- *indagini indirette*: stendimenti geofisici a rifrazione e riflessione (sulla superficie del versante e nel cunicolo in sponda sinistra a quota 1680 m s.l.m.), prove in foro tipo down-hole; sono stati complessivamente eseguiti 3 allineamenti sismici a riflessione per complessivi 1640 m e 5 allineamenti sismici a rifrazione tomografica per complessivi 7380 m sulla superficie topografica, oltre ad una prova down-hole fino a 380 m di profondità;

prove di laboratorio, eseguite su campioni prelevati nelle varie campagne di sondaggi, sia su materiale roccioso, sia su materiale sciolto (proveniente dalla fascia di scivolamento basale del movimento gravitativo e dalle zone cataclastiche al di sopra della stessa fascia, all'interno della zona coinvolta nel movimento gravitativo). Le prove hanno compreso:

- su provini di roccia: prove di classificazione (determinazione del peso di volume, analisi petrografiche su sezione sottile) e prove meccaniche (prove di compressione monoassiale e triassiale in controllo di deformazione, prove di resistenza a trazione indiretta - Brasiliane, prove di taglio diretto su superfici lisce ottenute per segagione, su piani di scistosità e su giunti naturali);
- su provini di materiale sciolto: prove di classificazione (analisi granulometriche, determinazione dei Limiti di Atterberg, del peso di volume totale, della densità secca, del peso specifico assoluto dei grani, analisi diffrattonometriche a raggi X) e prove meccaniche (prove triassiali tradizionali, di creep e con misura locale della deformazione, prove di taglio diretto di tipo consolidato-drenato tradizionali e di creep, prove edometriche tradizionali e tipo Huder & Amberg).

I livelli tensionali di prova sono variabili tra 0 e 30 MPa per le rocce (con maggiore concentrazione nell'intervallo 0-10 MPa) e circa 0.5-6.5 MPa per il materiale sciolto.

Lo **studio delle condizioni strutturali del corpo diga** ha compreso:

indagini in sito, consistenti in:

- *indagini dirette*: rilievi topografici di precisione delle fessure sui paramenti di monte e di valle della diga, perforazioni di sondaggio, prove di permeabilità

in foro, prove con traccianti, rilievi con sonda televisiva nei fori di sondaggio e nei pozzi dei pendoli;

- *indagini indirette*: stendimenti geofisici a rifrazione, indagini con georadar; prove di laboratorio, eseguite su campioni di calcestruzzo prelevati con le perforazioni, comprendenti: determinazioni del peso di volume, prove di compressione monoassiale, prove di trazione diretta ed indiretta.

L'analisi e l'interpretazione dei dati di monitoraggio, condotta in modo continuativo e parallelamente alla raccolta e all'interpretazione dei dati di tipo geologico-geotecnico, riguarda un'estesa rete di strumentazione installata nel versante e nel corpo diga dai tempi della costruzione ed integrata in vario modo nel corso degli anni. Tale rete di monitoraggio è costituita in sintesi da: pendoli, riscontri topografici (vale evidenziare la rete topografica ad acquisizione automatica), piezometri, estensimetri multibase, calibri estensimetrici; il monitoraggio è inoltre completato dal controllo delle deformazioni della corda di coronamento e delle perdite. A seguito delle indagini recentemente eseguite sul corpo diga, come sopra evidenziato, la rete di monitoraggio è stata integrata con installazione di strumentazione di alta precisione; in particolare sono stati installati:

- nel corpo diga: due linee estenso-inclinometriche (Trivec) e due linee estensimetriche multibase con aste in lega invar, trasduttori di spostamento a corda vibrante e sistema di acquisizione in automatico dei dati (con trasmissione in tempo reale alla casa di guardia e da qui agli uffici tecnici C.V.A. di Chatillon);
- nel versante: acquisitori in automatico del livello piezometrico, un inclinometro profondo, una linea estenso-inclinometrica (Trivec).

4.3. Interpretazione dei risultati, definizione del modello geologico-geotecnico e di interazione versante-diga

Nel seguito si riportano, in forma necessariamente sintetica, i principali risultati dello studio svolto, che ha consentito, attraverso le conoscenze pregresse ed i risultati delle indagini più recenti, di mettere a punto un approfondito modello geologico-geotecnico e di interazione versante-diga.

Modello geologico del versante

L'analisi geomorfologica e geostrutturale si è basata sui più recenti studi in materia (Dal Piaz G.V., 2004; Platt J.P., 1986; Polino et al., 1990), che mostrano come, nell'area in esame, i micascisti della falda del Gran San Bernardo siano coinvolti in una grande struttura retroflessa (retroscorrimento o *zona di taglio del Ruitor*), ribaltata sui Calcescisti Piemontesi, in origine tettonicamente sovrastanti (Figura 6).

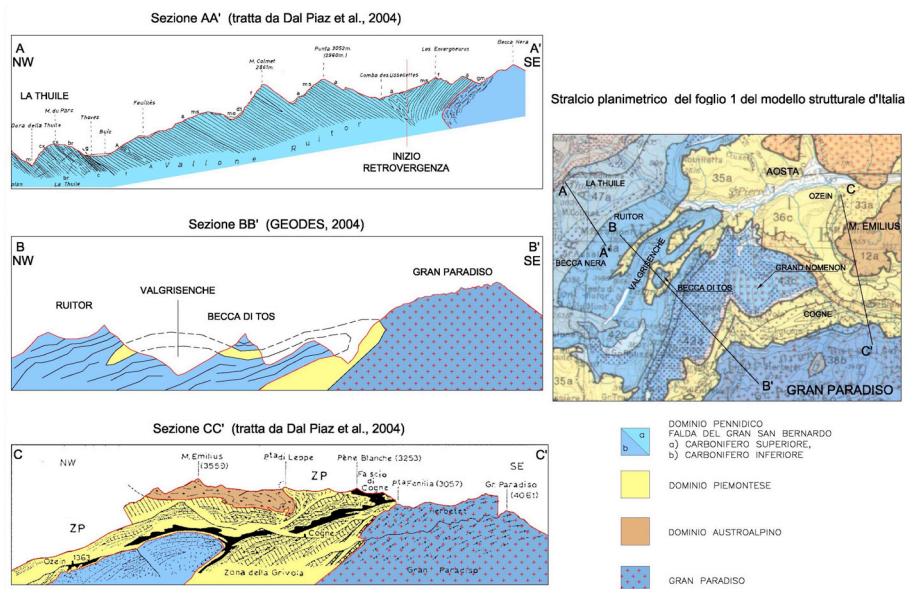
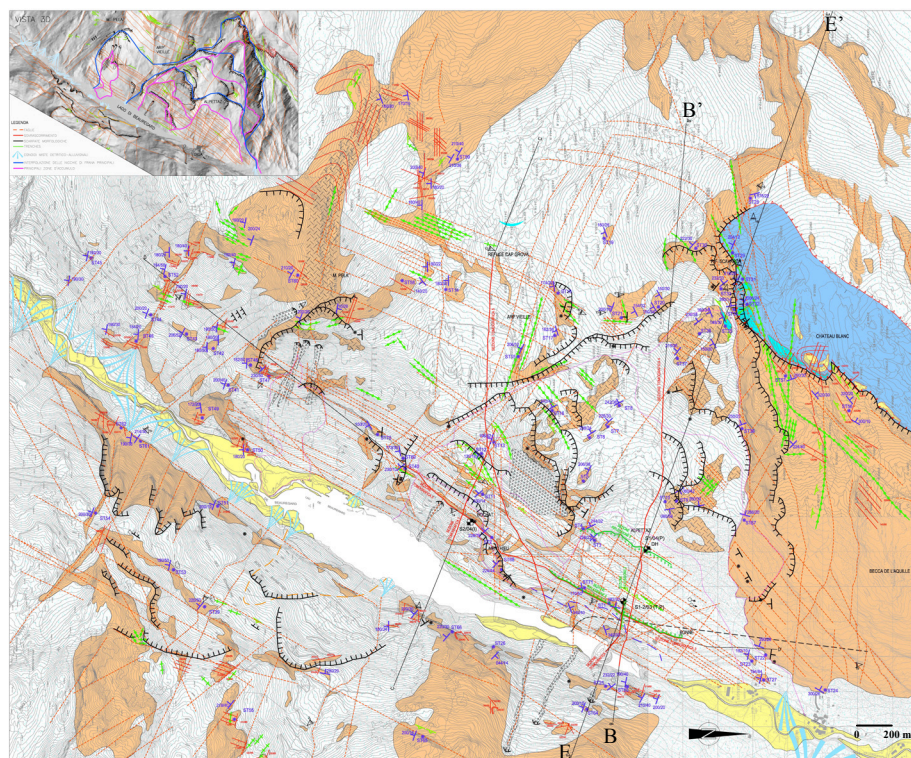


Figura 6. *Struttura retroflessa del Gran San Bernardo (scale varie).*

Per caratterizzare in modo completo la zona di versante sinistro in esame, lo studio è stato esteso, a scopo di analisi comparativa dei caratteri geologico-strutturali, ad una vasta area (Figura 7), comprendente anche la sponda destra.

Sotto l'aspetto geomorfologico l'area in studio è stata suddivisa in tre Zone, caratterizzate da una diverso grado di "stabilità" dal punto di vista gravitativo, come rappresentato in maniera schematica nella Figura 8. Il versante sinistro coinvolto nella DGPV (Deformazione Gravitativa Profonda di Versante) è stato suddiviso in diversi "settori", le cui caratteristiche rappresentano una diversa risposta del versante alle sollecitazioni subite ed all'evoluzione geomorfologica recente (Figura 8).



LEGENDA

LITOLOGIA		ELEMENTI GEOMORFOLOGICI	
QUATERNARIO	DEPOSITI QUATERNARI		TRENCHES
	DEPOSITI SUPERFICIALI INDIFFERENZIATI (COLTRE ELUVIO-COLLUVIALE, DEPOSITI DI VERSANTE E DEPOSITI GLACIALI)		TRENCHES COLMATE DI DETRITO
	DEPOSITI DI ORIGINE ALLUVIONALE (FLUVIALI E FLUVIOGLACIALI)		DEPRESSIONI CHIUSE
MESOZOICO	ACCUMULO DETRITICO A GROSSI BLOCCHI		SCARPATE MORFOLOGICHE
	FALDA PIEMONTESE S.L.		LIMITE DI CORPO DI FRANA
PALEOZOICO	COMPLESSO DEI CALCESCISTI A PIETRE VERDI:		CONTROPENDENZE
	a) CALCESCISTI IN FACIES PELITICA		ARCO MORENICO
	b) MARMI		CONOIDI MISTE DETRITICO-ALLUVIONALI
	SISTEMA PENNIDICO MEDIO DEL GRAN SAN BERNARDO		
	MASSICCIO CRISTALLINO DEL RUIOR: MICASCISTI CON SUBORDINATI GNEISS ALBITICI E PRASINITI ASSOCIATE		
	a) INTEGRO		
	b) FRATTURATO		
SIMBOLI			
	SOVRASCORRIMENTO		STAZIONI GEOLOGICO STRUTTURALI (GEODES, 2002-2004)
	RETROSCORRIMENTO		SCISTOSITA' CON VALORE DELL'ANGOLO DI IMMERSIONE ED INCLINAZIONE (RILIEVI GEODES, 2002-2004)
	FAGLIE/FRATTURE OSSERVATE DA FOTO AEREE		TRACCE DI SEZIONE GEOLOGICA
	FAGLIE/FRATTURE CON VALORE DELL'ANGOLO DI IMMERSIONE ED INCLINAZIONE (RILIEVI GEODES, 2002-2004)		TRACCE DELLA GALLERIA DI DERIVAZIONE E DEI CUNICOLI IN SPONDA SINISTRA
	STAZIONI GEOLOGICO STRUTTURALI (PIOVANO, 1992)		
	SCISTOSITA' (PIOVANO, 1992)		
	SORGENTI (PIOVANO, 1992)		

Figura 7. Carta degli elementi geomorfologici e geologico-strutturali (a scala ridotta dall'originale).

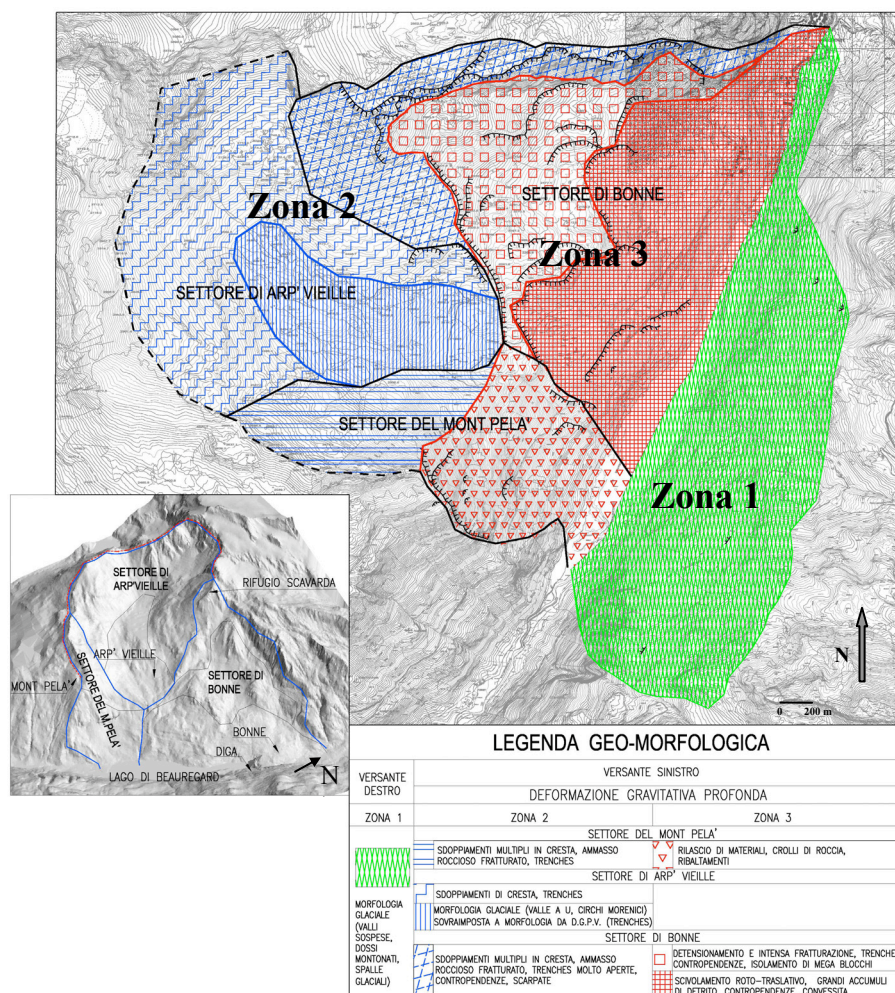


Figura 8. Schema geomorfologico dell'area in studio.

Da un punto di vista geologico-strutturale, l'interpretazione dei dati ottenuti dai recenti rilievi in sito, unitamente ai dati dei rilievi eseguiti durante la costruzione dell'opera (in particolare durante lo scavo dei cunicoli e della galleria di derivazione in sponda sinistra) e dei rilievi condotti da Piovano nel 1992, ha permesso di:

- caratterizzare, da un punto di vista geologico-strutturale, le principali famiglie di discontinuità presenti nell'area;
- evidenziare, in termini geostrutturali, le differenze tra le zone individuate mediante studio fotointerpretativo; in particolare, le diverse caratteristiche giaciturali e la differente presenza di giunti *random* hanno permesso di

confermare e meglio caratterizzare le zone con differente grado di evoluzione del movimento gravitativo delineate con lo studio fotointerpretativo (Figura 9);

- caratterizzare, mediante elaborazione di dettaglio dei dati di scistosità, le zone riconducibili alle caratteristiche medie *regionali* e le zone aventi peculiarità di giacitura rispetto alla *scistosità regionale*; in particolare, il confronto tra i dati di giacitura della scistosità rilevati in profondità (cunicoli) ed in superficie ha evidenziato una zona con caratteristiche di giacitura (a reggipoggio) analoga a quella della *zona di taglio* (retroscorrimento) *del Ruitor*; tale zona (*zona di taglio di Beauregard*), di origine tettonica ed intraformazionale, è presente al piede del versante sinistro (Figura 10).

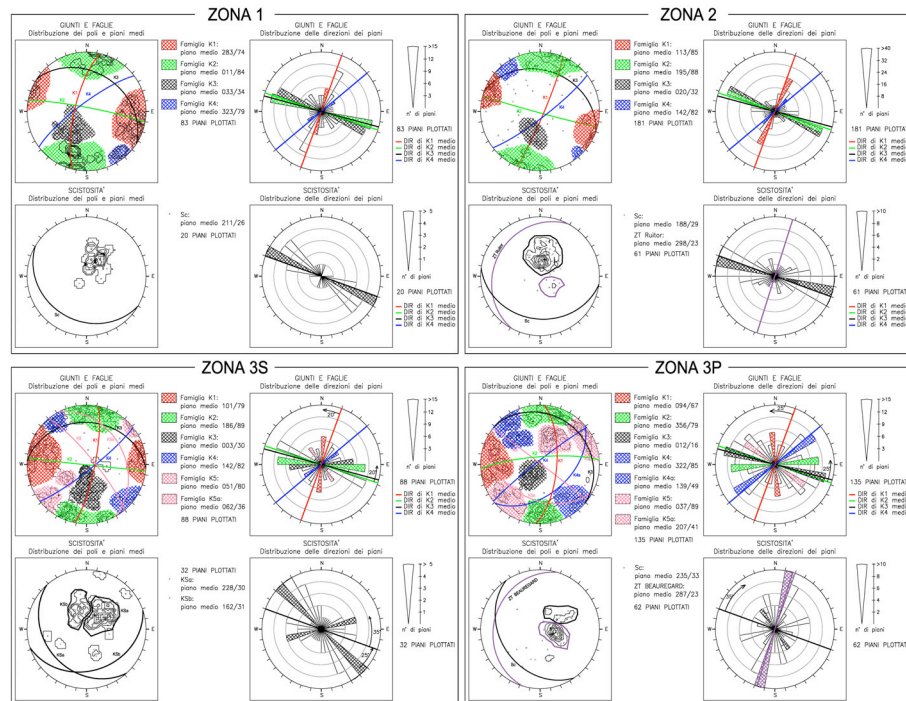


Figura 9. Interpretazione strutturale delle zone. La Zona 3 è stata suddivisa in Zona 3S (dati rilevati in superficie) e Zona 3P (dati rilevati in profondità: cunicoli e galleria di derivazione in sponda sinistra).

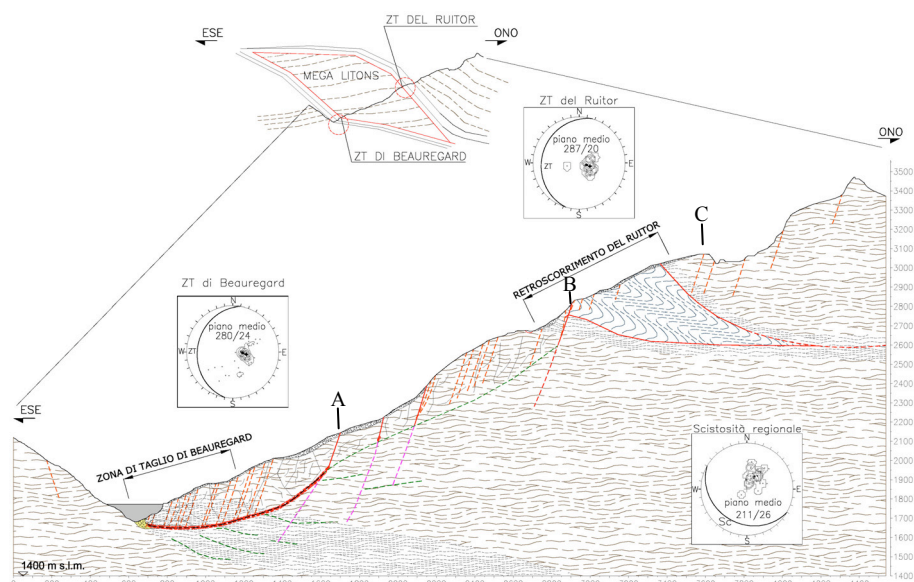


Figura 10. Schema tettonico semplificato del versante sinistro (sezione E-E'). Sono riportate le proiezioni stereografiche relative alla scistosità regionale, alla scistosità della Zona di Taglio di Beauregard (al piede del versante) e della Zona di Taglio (retroscorrimento) del Ruitor.

Le informazioni derivanti dalle indagini in sito (di tipo diretto e indiretto) hanno quindi consentito di giungere ad un'accurata ricostruzione stratigrafica del sottosuolo, individuando e caratterizzando la fascia di scivolamento basale del movimento gravitativo profondo. La Figura 11 riporta la ricostruzione effettuata, mediante interpretazione dei dati di tomografia profonda e dei dati delle indagini dirette, lungo una sezione rappresentativa in sponda sinistra in corrispondenza della diga; nella stessa figura è evidenziata la fascia basale di scivolamento. La posizione di tale fascia viene anche confermata dalle deformate dei pendoli, come meglio evidenziato nel seguito a commento dei dati di monitoraggio.

Il modello geologico del versante sinistro, ottenuto mediante l'interpretazione geologica di tutti i dati raccolti e schematizzato nelle già citate Figure 8 e 10, indica come la vasta DGPV che interessa il versante sinistro della Valgrisenche nel tratto antistante il lago artificiale sia molto articolata e complessa. Si riconosce un corpo principale in fase evolutiva avanzata mobilitato nella zona a ridosso della diga (settore di Bonne) e nel settore immediatamente a monte della stessa frazione abitata, in cui è stata individuata la superficie di scivolamento coincidente con una

fascia cataclastica di potenza variabile ma notevole (5-20 m circa), con presenza di materiali detritici ridotti fino a limo e argilla. Questa superficie si chiude contro una struttura tettonica e fuoriesce verosimilmente alla quota di circa 2250 m s.l.m. (A in Figura 10). Il corpo principale già mobilitato della frana rappresenta il piede del movimento più ampio che coinvolge l'intero versante fino alla quota di 2850 m s.l.m. circa (B in Figura 10) e che comprende una zona superficiale in fase evolutiva avanzata, di potenza variabile tra 150 e 250 m e un settore più profondo in cui l'evoluzione è molto meno avanzata. Si tratta della porzione profonda compresa tra la *zona di taglio di Beauregard* e le strutture osservate al di sopra della quota di 3000 m s.l.m. ("trenches" dei laghi Moriond) (C in Figura 10). La configurazione e la continuità di un'eventuale superficie profonda di raccordo tra questi due elementi morfologici risulta molto difficile da indagare sia con metodi diretti che indiretti a causa delle elevate coperture.

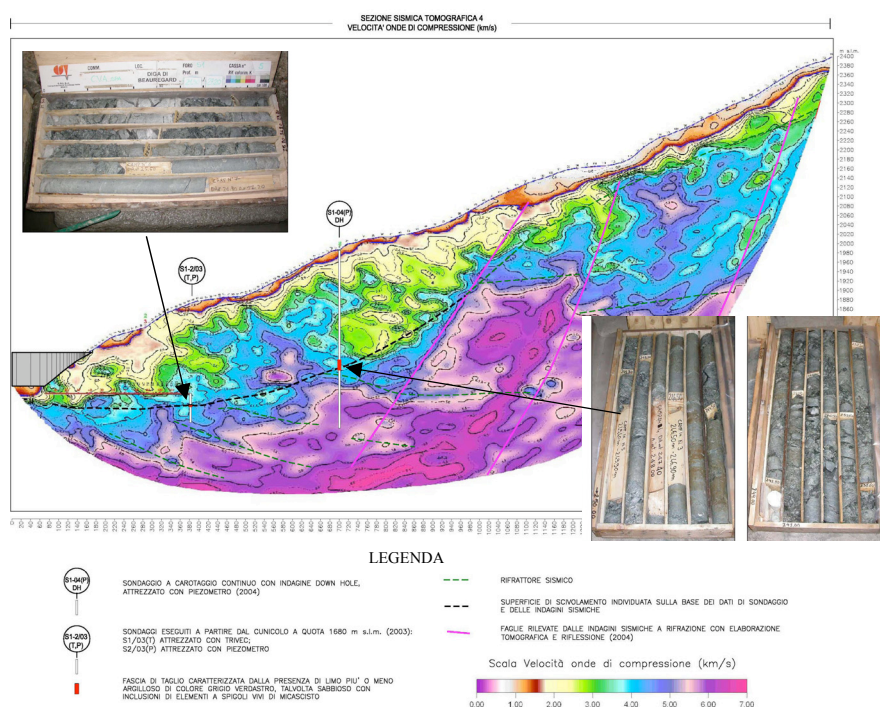


Figura 11. Interpretazione delle indagini in sito (sezione B-B', porzioni mediana e inferiore).

Sulla sezione geologica interpretativa di Figura 10, orientata circa in direzione ESE-WNW, sono evidenziati:

- il *retroscorrimento del Rutor*, affiorante nel settore Nord-occidentale dell'area studiata (settore sommitale del fianco sinistro vallivo), che ribalta le unità del

basamento del Ruitor sopra i Calcescisti a pietre verdi ed è riconoscibile per la presenza di litotipi carbonatici (marmi) sulla scarpata morfologica principale;

- la *zona di taglio di Beauregard*, intraformazionale, osservata al piede del versante sinistro (ad una quota di circa 1680 m s.l.m.) e caratterizzata in base ai dati ottenuti dai rilievi geologico-strutturali e dalle indagini (dirette ed indirette).

I domini compresi tra le suddette zone di taglio (litons alla macro scala), preservano una scistosità immergente a SW, probabilmente registrata durante le precedenti fasi deformative (a vergenza europea), caratterizzate da sollevamenti, rotazioni e deformazioni interne molto complesse.

La presenza delle zone di taglio, e in particolare di quella inferiore (*di Beauregard*), consente di avanzare alcune ipotesi circa la possibilità che essa sia associata al movimento gravitativo del versante sinistro vallivo. La presenza di una zona di “debolezza” all’interno del versante, affiorante in corrispondenza della diga, può certamente rappresentare un fattore intrinseco predisponente nei confronti di un movimento gravitativo profondo.

Modello geotecnico del versante

Sulla base dei dati derivanti dai rilievi e dalle indagini in sito ed in laboratorio sinora condotte, e del modello geologico delineato, è stato definito il modello geotecnico del versante. Coerentemente con il modello geologico, il modello geotecnico tiene conto:

- della presenza dell'ammasso roccioso, costituito da roccia intatta (gneiss e micascisti) e da discontinuità più o meno frequenti;
- della presenza di livelli, di potenza metrica, di materiali sciolti appartenenti:
 - a zone di faglia e zone di cataclasi;
 - alla fascia di scivolamento, che delimita la porzione in frana al piede del versante.

L’ammasso roccioso è stato considerato costituito da porzioni schematizzabili come “continuo equivalente isotropo” separate dalle principali discontinuità (lineamenti “primari” coincidenti con le faglie sub-verticali e la fascia di scivolamento). Per tenere conto dei sistemi di fratturazione “secondari” il comportamento di resistenza dell’ammasso roccioso, inteso come “continuo equivalente isotropo”, è stato descritto attraverso il criterio di Hoek e Brown i cui parametri sono stati ottenuti “scalando” i parametri della roccia intatta determinati in laboratorio ⁽¹⁰⁾ attraverso gli indici di qualità dell’ammasso, in particolare attraverso l’indice GSI (Geological Strength Index), valutato a partire dalle risultanze dei rilievi geologico-strutturali in sito. Anche la determinazione delle caratteristiche di

⁽¹⁰⁾ L’interpretazione dei risultati delle prove di laboratorio ha permesso di classificare e caratterizzare i materiali (alla scala del laboratorio), ricavando i parametri meccanici (di deformabilità e di resistenza) che intervengono nelle leggi costitutive. In particolare, la roccia intatta è stata descritta attraverso la legge di resistenza non lineare di Hoek e Brown, mentre, per il materiale sciolto, si è assunto il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb.

deformabilità è stata effettuata scalando, in ragione dell'indice GSI, i parametri della roccia intatta.

Le discontinuità principali (intese come giunti in roccia) sono state caratterizzate secondo la legge di Barton-Bandis e secondo la legge lineare tipo Mohr-Coulomb; la determinazione dei parametri del criterio di Mohr-Coulomb è stata effettuata mediante linearizzazione del criterio di Barton-Bandis negli intervalli tensionali di interesse.

La caratterizzazione geotecnica del materiale sciolto costituente la fascia di scivolamento è stata effettuata sulla base dei dati di laboratorio, quindi alla scala del provino. Tali risultati sono pertanto rappresentativi dei livelli a componente più fine, privi di inclusi e clasti rocciosi. Per il materiale sciolto si è assunto il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb.

Nella Figura 12 è rappresentato il modello geotecnico interpretativo, con l'indicazione delle leggi costitutive di riferimento ed il valore dei parametri che intervengono nelle stesse leggi.

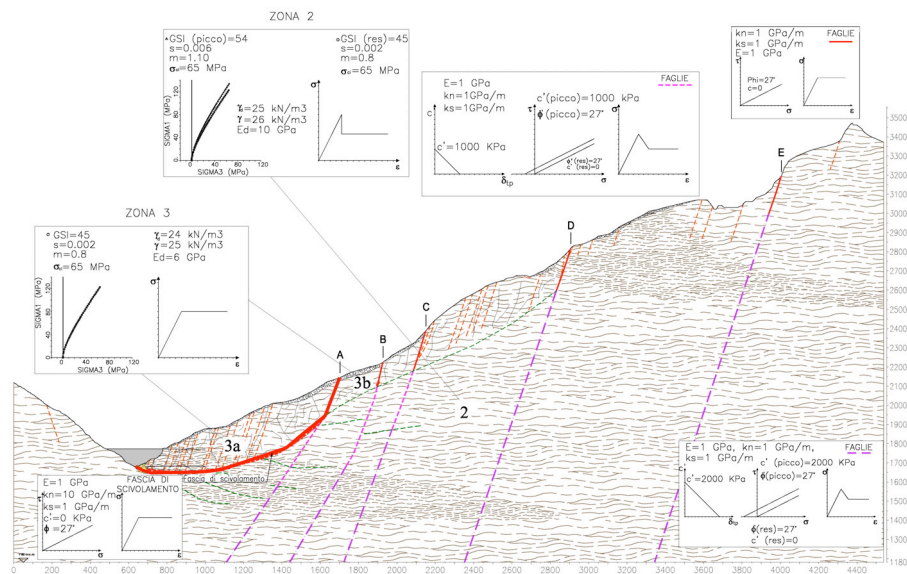


Figura 12. Modello geologico-geotecnico. Leggi costitutive e criteri di resistenza.

Ricostruzione dello stato fessurativo nel corpo diga e installazione di nuova strumentazione per il monitoraggio delle fessure

Le indagini eseguite sul corpo diga (Figura 13) hanno permesso di ricostruirne lo stato fessurativo conseguente alla deformazione gravitativa in sponda sinistra.

In particolare, sulla base dei risultati ottenuti dalle indagini indirette (tomografia, Figura 13) e dai rilievi topografici di precisione per il censimento e la localizzazione delle fessure (Figura 14), sono state tratte utili indicazioni per definire l'ubicazione delle perforazioni di sondaggio nel corpo diga. Queste ultime hanno avuto il duplice scopo di fornire un riscontro diretto alle indagini indirette tarandone e validandone i risultati e di consentire il posizionamento della nuova strumentazione di precisione (Figura 14).

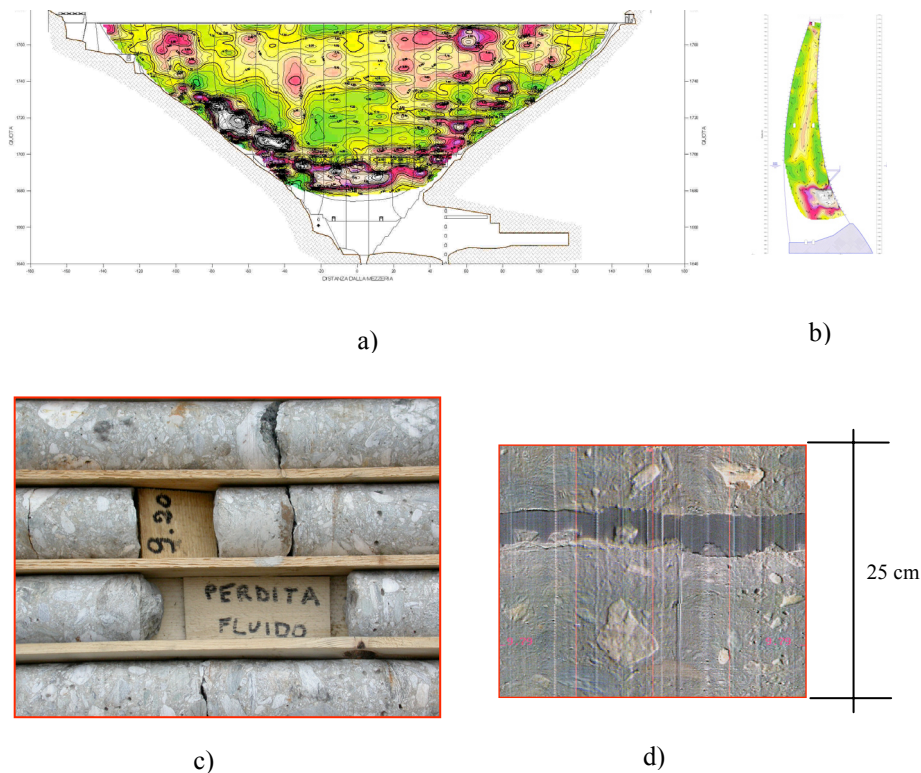


Figura 13. Indagini eseguite sul corpo diga. a) Indagini tomografiche - velocità delle onde di compressione - paramento di valle; b) Indagini tomografiche - velocità delle onde di compressione - concio 0; c) Esempio di recupero mediante perforazione; d) Esempio di fessura rilevata con sonda televisiva all'interno di un foro di sondaggio.

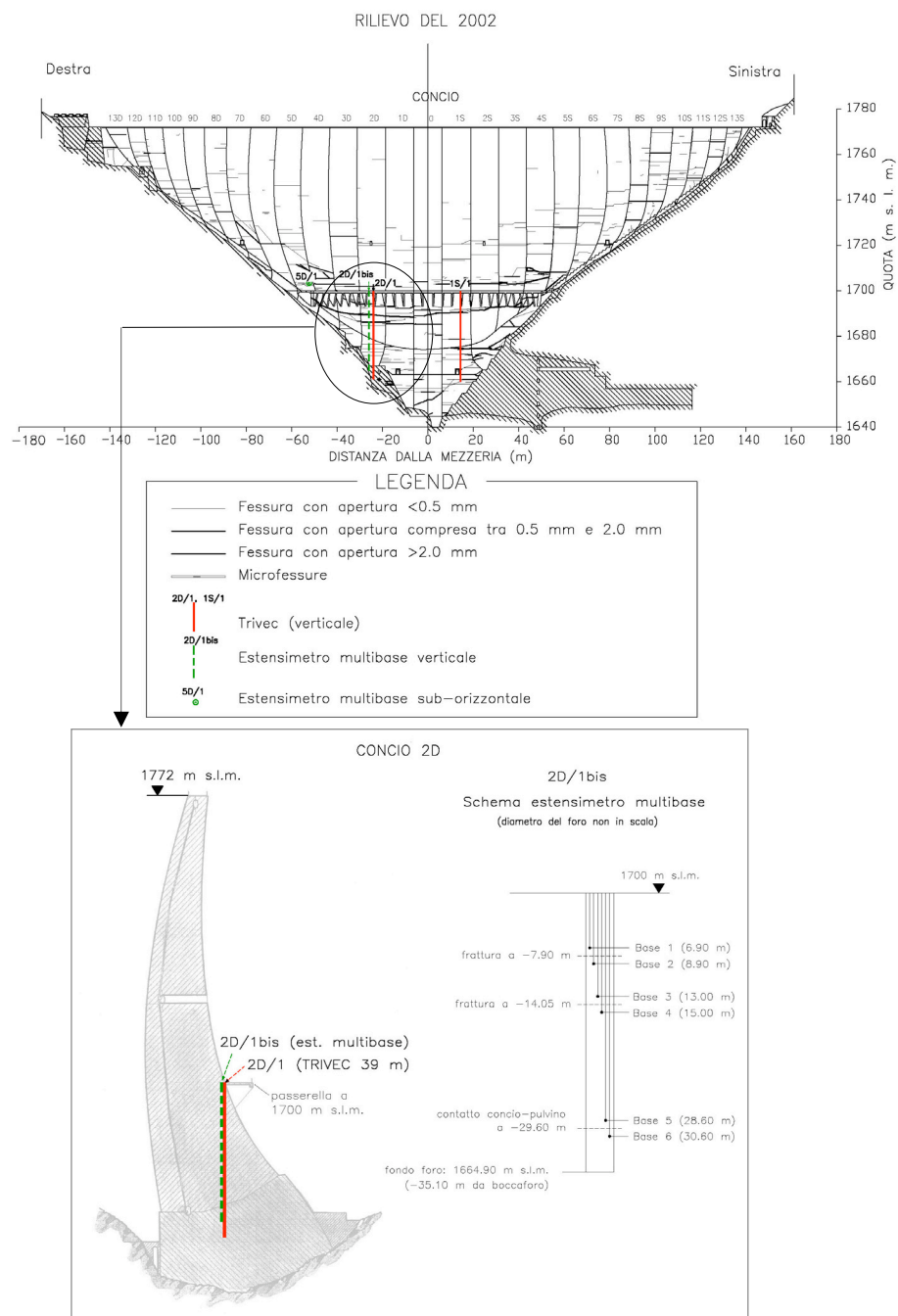


Figura 14. Rilievo delle fessure sul paramento di valle della diga e schema di installazione della strumentazione.

L'interazione versante-diga. I risultati del monitoraggio.

Grazie all'analisi e all'interpretazione incrociata dei risultati delle indagini e dei dati di monitoraggio relativi al versante e al corpo diga è stato possibile giungere ad una soddisfacente comprensione del fenomeno di interazione versante-diga.

Il versante sinistro registra un lento movimento a prevalente componente verso destra orografica e, a minor componente, verso valle idrografica (Figure 15 e 16). La deformazione gravitativa è inoltre caratterizzata da una componente verticale di spostamento (abbassamento).

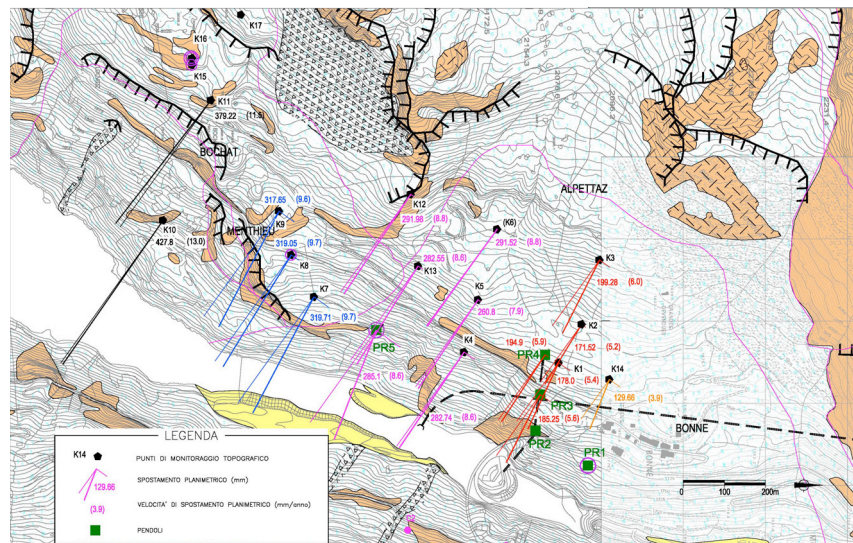


Figura 15. Misure topografiche sul versante sinistro. Planimetria con indicazione degli spostamenti planimetrici e delle velocità di spostamento (periodo:30/10/1970-22/10/2003)

Sulla base delle misure ai pendoli e delle misure topografiche, le velocità medie di spostamento del versante in spalla alla diga risultano di circa 4-6 mm/anno; velocità fino a 11-13 mm/anno sono invece registrate nelle zone idrograficamente a monte (zona Bochat). Le velocità di spostamento verticale sono mediamente circa un quinto rispetto alle velocità di spostamento orizzontale.

Lo spostamento annuale avviene prevalentemente nel periodo dello scioglimento delle nevi, all'incirca da maggio-giugno a settembre-ottobre (Figura 17); nel restante periodo dell'anno il versante non registra praticamente alcun movimento, se non, addirittura, un più o meno significativo "recupero". Le deformate dei pendoli

mostrano uno spostamento pressoché rigido della porzione di versante coinvolta nel movimento gravitativo rispetto alla fascia basale di scivolamento (Figura 18).

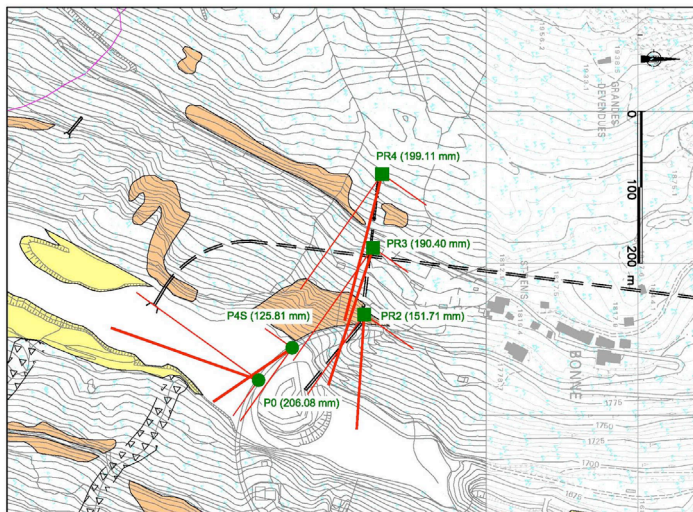


Figura 16. Misure ai pendoli sul versante sinistro e in diga. Planimetria con indicazione degli spostamenti planimetrici. Pendoli sul versante: periodo: 1969-2005; pendoli in diga: periodo 1958-2005.

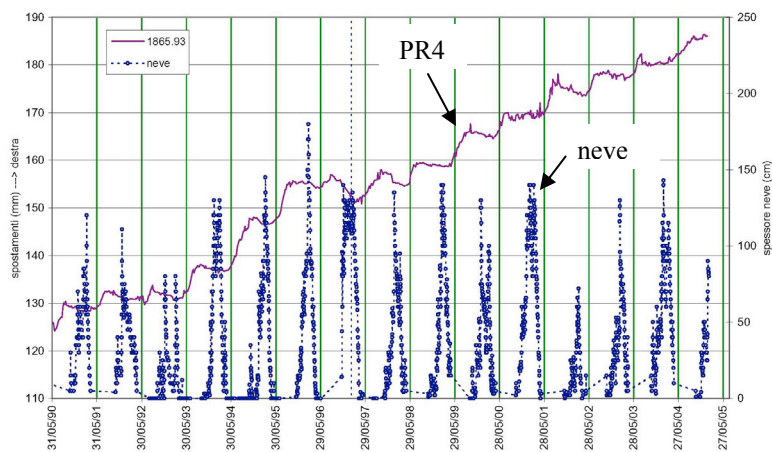


Figura 17. Pendolo PR4 – Spostamento destra-sinistra. Correlazione con lo spessore del manto nevoso.

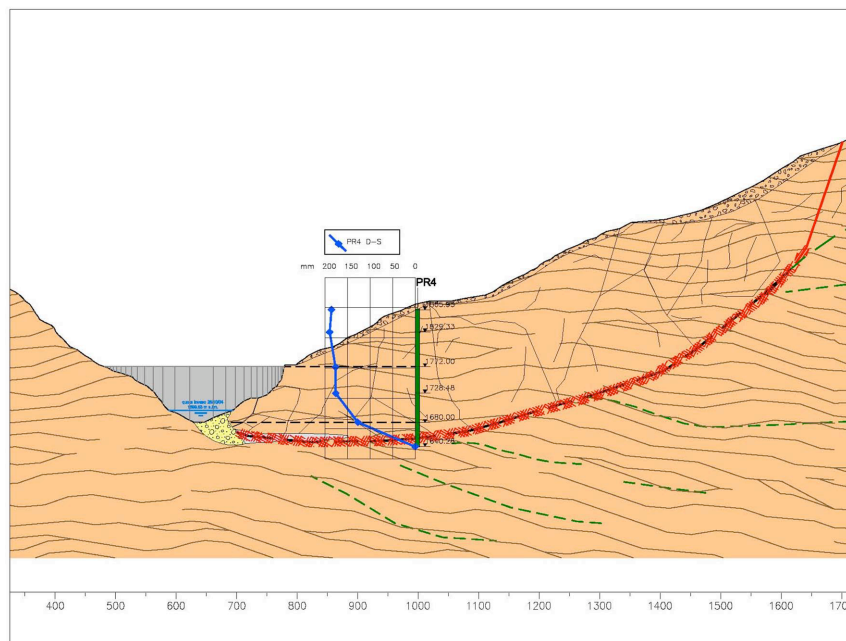


Figura 18. *Deformata destra-sinistra del pendolo PR4 (periodo: dicembre 1969 – gennaio 2005)*

I piezometri ad acquisizione automatica nel versante permettono di seguire con soddisfacente dettaglio l'escursione stagionale del livello piezometrico, consentendo di ricostruire la risposta dell'acquifero allo scioglimento delle nevi (Figura 19); sulla base dei dati disponibili, si evidenziano escursioni massime del livello piezometrico di ordine decametrico (fino a circa 14-15 m).

La deformazione della diga dipende strettamente dalla deformazione gravitativa del versante in sponda sinistra e si è sviluppata, in particolare a partire nel periodo degli "invasi bassi" (1705-1710 m s.l.m.), con visibile regolarità nel tempo.

Le misure indicano in generale un fenomeno di chiusura dell'arco della diga con spostamento verso monte del punto di chiave al coronamento. Nella già citata Figura 16 sono riportate le risultanti di spostamento misurate ai pendoli in diga (P0 e P4S) poste a confronto con le risultanti di spostamento misurate ai pendoli sul versante in sponda sinistra; i periodi di misura sono differenti poiché i pendoli nel versante e nel corpo diga sono stati installati in anni diversi. Le misure di livellazione di precisione al coronamento mostrano una generale tendenza all'innalzamento del corpo diga, con valori massimi in sinistra (circa 11-12 cm nel periodo 1969-2005) e valori prossimi allo zero in destra.

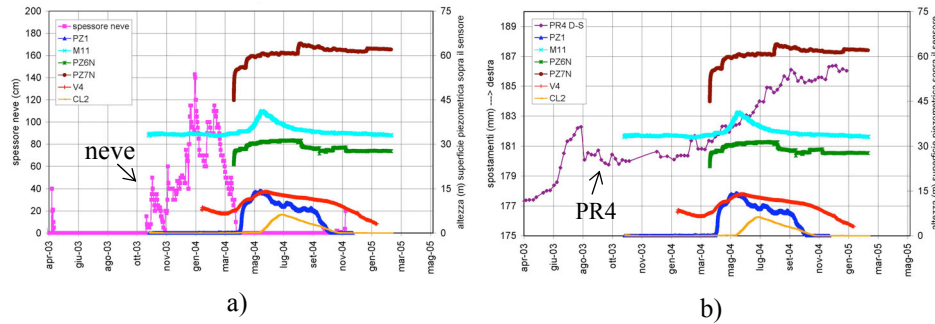


Figura 19. Grafici dei livelli piezometrici misurati dai sensori ad acquisizione automatica nel versante sinistro posti a confronto con: a) spessore del manto nevoso; b) spostamenti destra-sinistra al pendolo PR4.

Le misure dei pendoli in diga indicano inoltre una ciclicità correlabile all'escursione termica stagionale, ben visibile nei grafici di spostamento monte-valle (Figura 20). A tali spostamenti ciclici si somma un *trend*, dovuto ad un'aliquota irreversibile di spostamento, legata alla spinta del versante in sponda sinistra. Tale *trend* si traduce in uno spostamento progressivamente crescente, secondo una velocità media, calcolata su tutto l'arco di tempo considerato ("invasi alti, medi e bassi") ed in termini di risultante, di circa 4.4 mm/anno (pendolo P0 in chiave) e 2.7 mm/anno (pendolo P4S al concio 4S in sinistra). I periodi degli "invasi alti" (1770 m s.l.m.) e "medi" (1730 m s.l.m.) sono caratterizzati da velocità di spostamento maggiori rispetto al periodo successivo ("invasi bassi") (Figura 20). Con riferimento al solo periodo degli invasi bassi le velocità medie risultano di 3.0 mm/anno per il pendolo P0 e 1.8 mm/anno per il pendolo P4S.

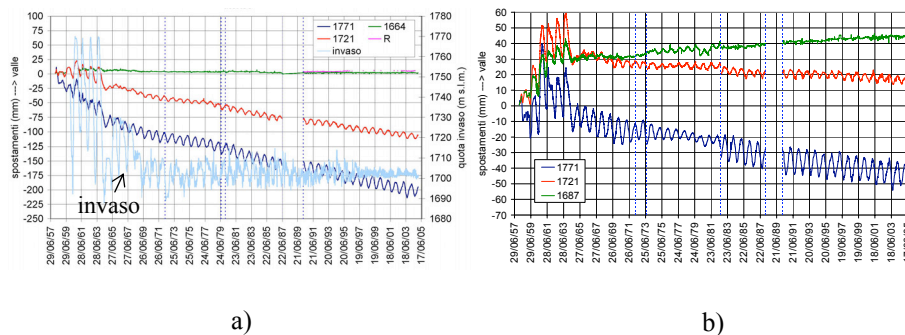


Figura 20. Grafici degli spostamenti ai pendoli in diga: a) pendolo P0 in chiave; b) pendolo P4S (concio 4S in sinistra).

Gli estensimetri multibase ad acquisizione automatica e gli estenso-inclinometri Trivec, installati nel 2003 nel corpo diga per controllare in profondità i movimenti delle principali fessure, evidenziano spostamenti ad oggi contenuti; essi hanno un andamento ciclico legato alla temperatura; nell'ambito dell'oscillazione annuale, i valori massimi in apertura ed in chiusura ad oggi registrati sono dell'ordine di alcuni decimi di millimetro (Figura 21); il probabile *trend* dovuto alla deformazione che il versante sinistro impone alla struttura non è ad oggi valutabile dato il breve periodo di misure disponibile.

Nella Figura 22 sono poste a confronto alcune grandezze significative che caratterizzano il fenomeno in atto: spostamento monte-valle del pendolo P0 in diga, spostamento destra-sinistra del pendolo PR4 nel versante, apertura-chiusura delle fessure in diga (misurata agli estensimetri multibase), variazione del livello piezometrico, variazione della temperatura.

4.4. Studio delle condizioni di stabilità del versante sinistro mediante analisi tensio-deformative

Analisi eseguite

Sulla base del modello geologico-geotecnico prima descritto sono state condotte analisi tensio-deformative del versante in sponda sinistra, al fine di valutarne, in termini quantitativi, lo stato tensionale e deformativo e le conseguenti condizioni di stabilità.

Le analisi sono state eseguite, adottando il metodo delle Differenze Finite ed il codice di calcolo FLAC ⁽¹⁾, in condizioni di deformazione piana. Il modello numerico messo a punto è relativo alla sezione (E-E') rappresentata nelle Figure 10 e 12, tracciata in corrispondenza della diga, a partire dall'asse vallivo fino a quota di circa 3470 m s.l.m. in sponda sinistra seguendo all'incirca la direzione di massima pendenza del pendio (Figura 7).

Si è fatto riferimento ad un modello geotecnico "continuo equivalente" in cui sono state inoltre introdotte, in modo esplicito, le principali discontinuità: faglie subverticali e fascia di scivolamento (Figura 12). Non sono stati introdotti nell'ammasso roccioso altri elementi strutturali in quanto le famiglie di giunti rilevate e la stessa scistosità risultano caratterizzate da giaciture non sfavorevoli alla stabilità, essendo la loro proiezione sulla sezione di analisi sub-orizzontale, come indicato dall'elaborazione di dati di rilievo strutturale. Le leggi costitutive ed i criteri di resistenza adottati per i vari "elementi" geotecnici del modello sono rappresentati in sintesi nella sopra citata Figura 12; essa riporta inoltre i valori dei parametri adottati.

⁽¹⁾ FLAC: Fast Lagrangian Aalysis of Continua, Version 4.0, 2000, Itasca Consulting Group Inc.

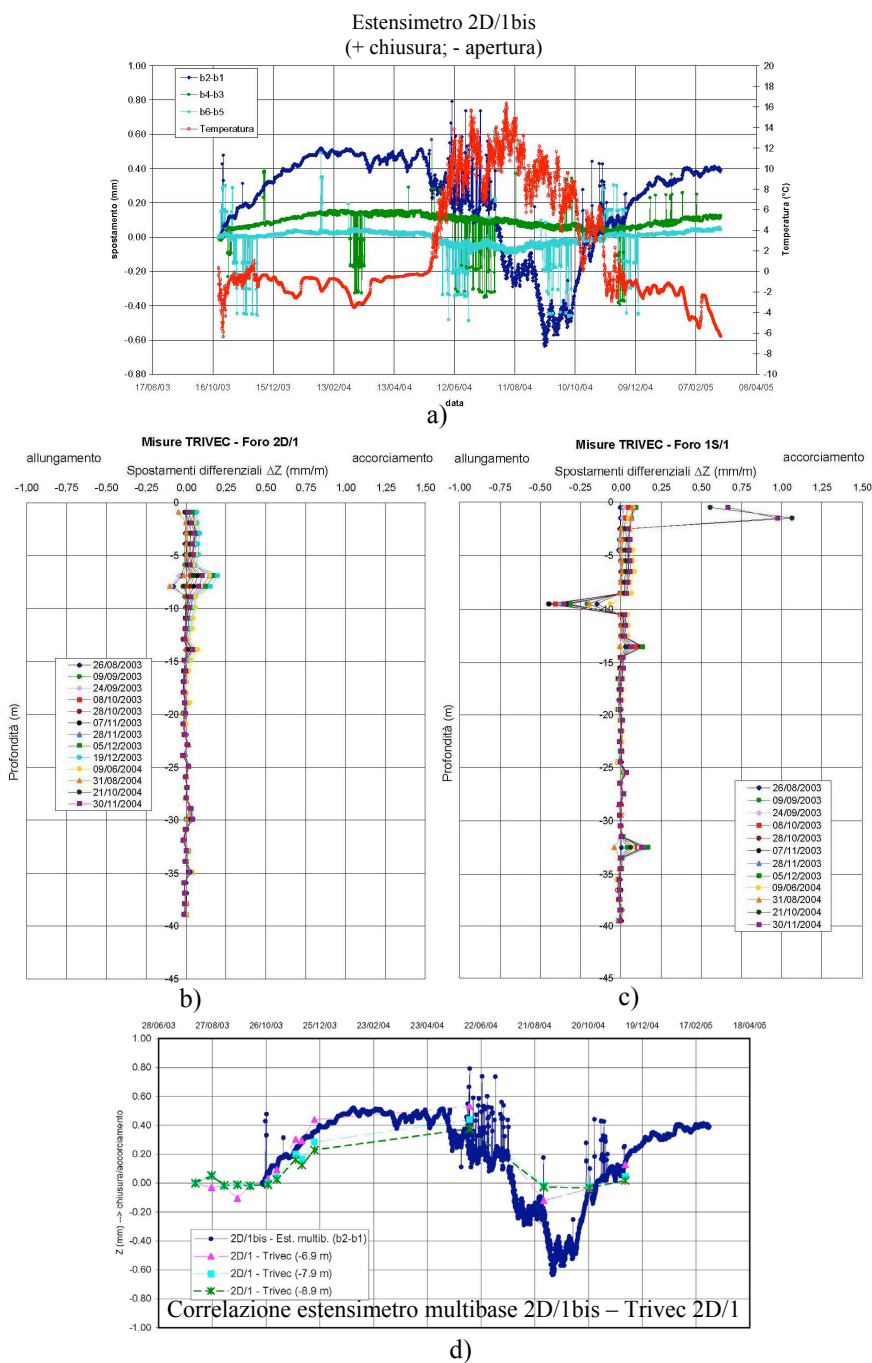


Figura 21. Misure alla nuova strumentazione in diga: a) estensimetro multibase 2D/1bis (concio 2D); b) Trivec 2D/1 (concio 2D); c) Trivec 1S/1 (concio 1S); d) correlazione estensimetro multibase 2D/1bis – Trivec 2D/1.

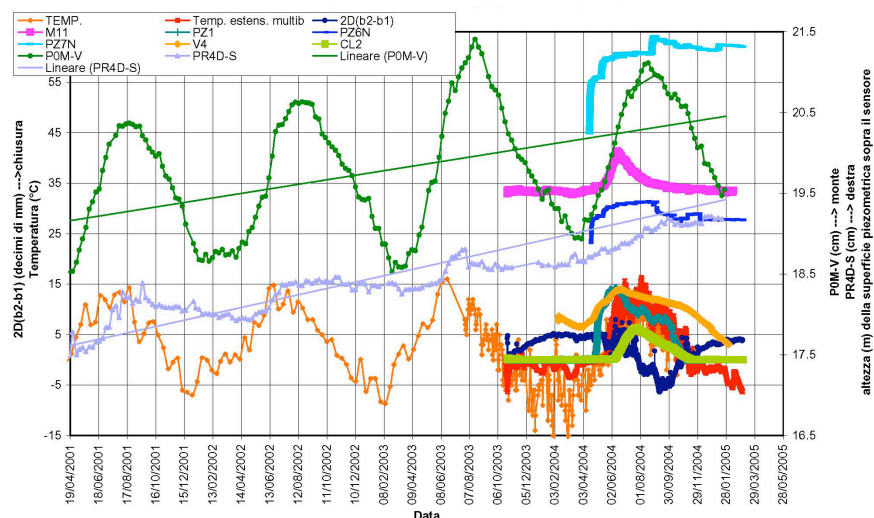


Figura 22. Misure agli estensimetri multibase in diga, al pendolo P0 in diga, al pendolo PR4 nel versante, misure piezometriche, temperatura.

Il regime delle pressioni neutre all'interno del versante è stato schematizzato mediante l'introduzione di una superficie piezometrica e svolgendo le analisi in condizioni drenate ed in termini di tensioni efficaci. La posizione della superficie piezometrica è stata definita, nella zona di piede del versante, sulla base dei dati di monitoraggio disponibili; nelle zone di monte, in assenza di dati, essa è stata estrapolata in relazione alla pendenza della superficie topografica (Figura 23).

Dopo una fase di inializzazione elastica (Fase 1), si sono condotte analisi in condizioni elasto-plastiche (Fase 2) simulando differenti condizioni piezometriche all'interno della zona in frana (Zona 3a delle Figure 12 e 23), ciascuna correlata a differenti livelli di invaso (nelle zone retrostanti del versante le condizioni della piezometrica sono state mantenute costanti). Si sono in particolare considerate le seguenti condizioni (Figura 23):

- Fase 2-1 - Piezo 1: condizione piezometrica corrispondente al minimo annuale registrato ad oggi dai piezometri ad acquisizione automatica, correlata ad una condizione di invaso di 1699-1700 m s.l.m.;
- Fase 2-2 - Piezo 2: condizione piezometrica corrispondente al massimo annuale registrato ad oggi dai piezometri ad acquisizione automatica, correlata ad una condizione di invaso di 1705 m s.l.m.;
- Fase 2-3 - Piezo 3: mantenendo la quota piezometrica di massimo annuale al piezometro PZ1, la falda è stata innalzata, nella zona di piede, fino a raccordarsi ad una quota di invaso di 1710 m s.l.m.;
- Fase 2-4 - Piezo 4: la superficie piezometrica all'interno del versante è stata innalzata fino a raccordarsi, a valle, ad una quota di invaso di 1770 m s.l.m. e

mantenendo invariata, a monte, la quota di massimo annuale registrata dal piezometro PZ1, a simulare una situazione prossima a quella degli “invasi alti”.

In un’ultima fase (Fase 3) si è simulata, a partire dal termine della Fase 2-2 (Piezo 2), l’evoluzione del movimento gravitativo riproducendo lo spostamento della Zona 3a (“zona in frana”) e valutando le condizioni tensio-deformative del versante nella stessa zona di frana ed a tergo di questa. La simulazione dello spostamento della Zona 3a è stata condotta in due modi:

- a) in modo “indiretto”, imponendo più oscillazioni (abbassamenti-innalzamenti) della superficie piezometrica, cercando di riprodurre le deformazioni dovute al fenomeno di rigonfiamento – consolidazione causato dalla variazione delle tensioni efficaci, oltre che le variazioni di resistenza al taglio a seguito delle medesime variazioni di tensioni efficaci;
- b) applicando direttamente ed in modo molto graduale una velocità di spostamento alla Zona 3a (“zona di frana”) e valutando le condizioni tensio-deformative relative a varie fasi di spostamento del piede. Coerentemente con quanto evidenziato dalle misure condotte sul versante, è stata imposta una velocità di spostamento orizzontale (v_x) pari a circa 5 volte la velocità di spostamento verticale (v_y).

Si è quindi proceduto, per le varie fasi, alla valutazione del “Fattore di Sicurezza” del versante secondo due differenti approcci:

- 1) si è valutato il “Fattore di Sicurezza” del versante in termini di “Rapporto di Mobilitazione” (RM), inteso come rapporto tra lo sforzo di taglio massimo agente e lo sforzo di taglio resistente (inverso del Fattore di Sicurezza come normalmente inteso), considerando un percorso tensionale a rottura a tensione efficace media costante;
- 2) si è valutato il “Fattore di Sicurezza” del versante inteso come fattore di riduzione dei parametri di resistenza per giungere all’instabilità della soluzione (si veda ad esempio Dawson et Al., 1999). Nel caso in esame la riduzione è stata applicata ai valori della coesione (c') e della tangente dell’angolo di attrito (ϕ') apparenti, variabili da zona a zona all’interno del modello in funzione dello stato tensionale. La resistenza a trazione è stata ridotta dello stesso fattore. Nelle analisi di valutazione di Fattore di Sicurezza la resistenza coesiva nelle zone di faglia è sempre stata assunta pari a zero, anche nei tratti dove questa non aveva ancora raggiunto (per *strain-softening*) il valore residuo nullo. L’instabilità della soluzione è evidenziata da forze non bilanciate all’interno del modello che non si stabilizzano su valori prossimi allo zero, dalla non stabilizzazione degli spostamenti e da velocità di deformazione a taglio (“*shear strain rate*”: *ssr*) maggiori di $10E-7$ (% di deformazione a taglio per *step* di calcolo) lungo bande di taglio ben organizzate all’interno del modello.

Il metodo di riduzione dei parametri di resistenza porta ad una valutazione del grado di sicurezza che, per il modo in cui viene valutato, è un indicatore dell’incertezza che sta sempre alla base della determinazione dei parametri geotecnici; il metodo della valutazione di RM porta invece ad una distribuzione areale (isolinee) del Fattore di Sicurezza e, per il modo in cui è valutato, rappresenta

la “distanza” delle condizioni correnti dalla rottura, considerando i valori dei parametri, così come definiti, non affetti da incertezze.

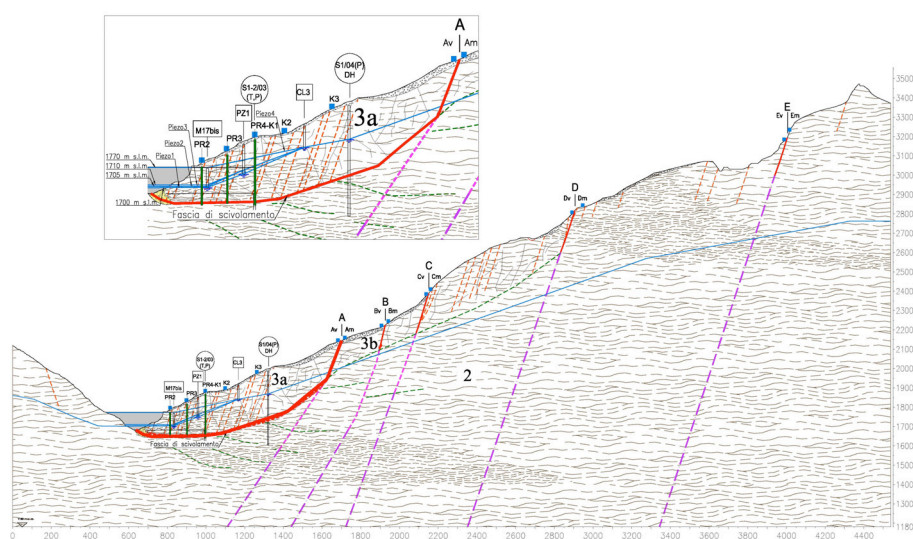
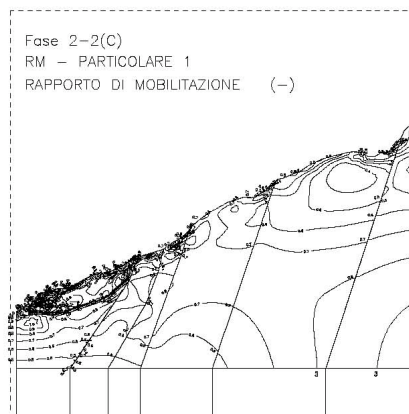
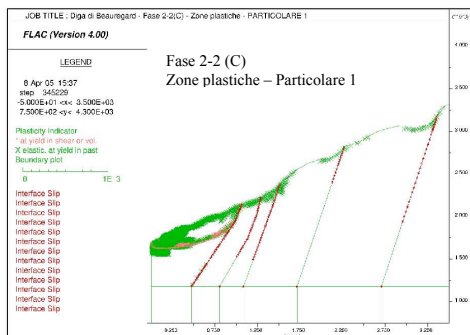


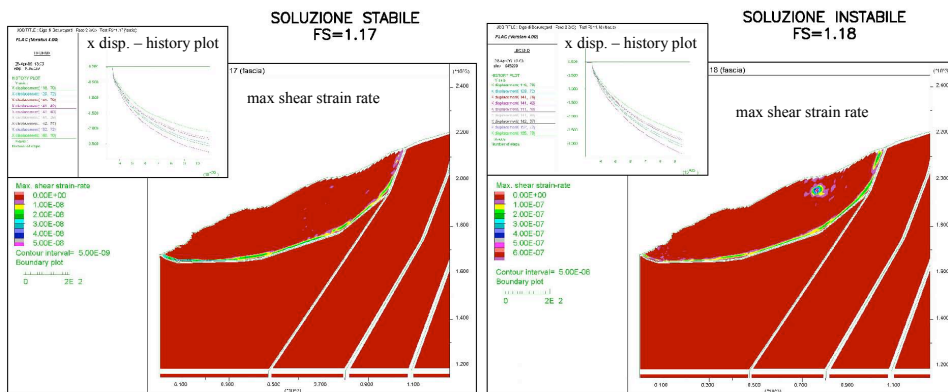
Figura 23. Condizioni piezometriche ed ubicazione dei punti di controllo.

Risultati ottenuti

I risultati ottenuti hanno evidenziato una condizione attuale di relativa stabilità globale del versante sinistro. Tale situazione vale per le condizioni piezometriche all'interno del versante ricostruibili sulla base delle misure ad oggi disponibili sui piezometri ad acquisizione automatica. In particolare, il Fattore di Sicurezza valutato come rapporto di riduzione dei parametri di resistenza per giungere all'instabilità della soluzione assume valori di circa 1.16-1.18 sulla fascia di scivolamento e per condizioni piezometriche variabili da Piezo 1 a Piezo 3, ossia per le condizioni di attuale gestione dell'invaso; esso assume invece valori di circa 1.4 relativamente all'ammasso roccioso nel versante a tergo della zona di frana (Figura 24).



DETERMINAZIONE DEL FATTORE DI SICUREZZA (FS) SULLA FASCIA DI SCIVOLAMENTO



DETERMINAZIONE DEL FATTORE DI SICUREZZA (FS) DELL'AMMASSO ROCCIOSO A TERGO DELLA ZONA DI FRANA

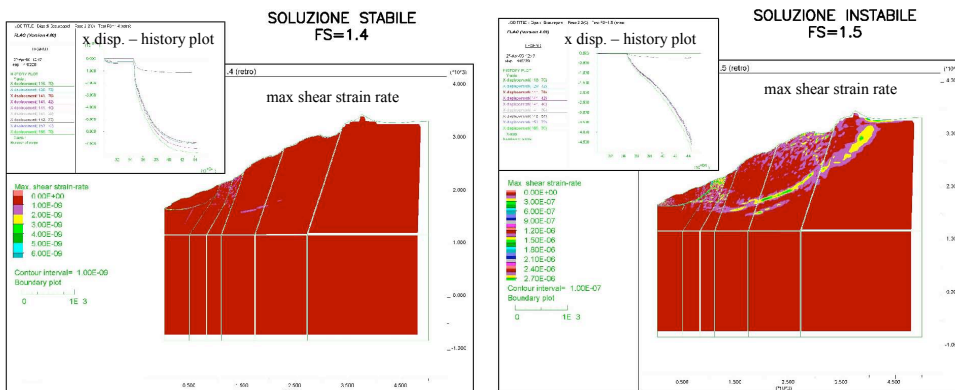


Figura 24. Analisi tensio-deformativa. Fase 2-2 (Piezo 2). Zone plastiche, RM, valutazione di FS.

Valori di RM prossimi o uguali all'unità sono presenti nelle zone di piede, al di sotto della fascia di scivolamento ed in limitate zone corticali al piede del versante maggiormente detensionate. Lungo la fascia di scivolamento si hanno valori di RM massimi pari a 0.8-0.9 ⁽¹²⁾, ad indicare un margine di sicurezza residuo. All'interno del corpo di frana si hanno valori di RM variabili mediamente tra 0.5 e 0.8.

Le zone del modello che raggiungono condizioni di plasticizzazione, già a partire dalla Fase 2-1 (Piezo 1), sono (Figura 24):

- la porzione di piede della Zona 3a;
- la fascia di scivolamento;
- le zone corticali del versante, corrispondenti all'incirca alle zone superficiali di materiale detritico rilevate in sito e da foro aeree;
- la zona di piede del versante, al di sotto della fascia di scivolamento, dove il valore di RM è prossimo all'unità, ad indicare il decadimento dei parametri da valori di picco a valori residui, corrispondenti ai parametri delle Zone 3a e 3b. Tale indicazione di condizioni più scadenti nella zona di piede (*Zona di taglio di Beauregard*) è indice non di un significativo grado di fratturazione (i valori di RQD rilevati dalle carote estratte mediante perforazioni di sondaggio sono sempre maggiori del 70% circa), bensì, probabilmente, di una zona dove la scistosità più marcata, accompagnata a zone che hanno subito deformazioni duttili, rende globalmente l'ammasso più scadente, sia alla scala del laboratorio (si è evidenziata infatti una resistenza a compressione monoassiale mediamente più bassa rispetto alle altre zone del versante) che alla scala areale del sito (evidenze di lineamenti geofisici sub-paralleli alla scistosità);
- tratti considerevoli delle zone di faglia.

L'innalzamento piezometrico a quote che si raccordino ad una quota di invaso di 1770 m s.l.m. (Piezo 4 - Figura 23) comporta il raggiungimento di condizioni di instabilità ($FS \leq 1$) in zone al piede del versante (potenti circa 30 m), in prossimità della diga, se pure i Fattori di Sicurezza "globali" (sia con riferimento alla Zona 3a sia con riferimento al versante nel suo complesso) risultino ancora superiori all'unità ($FS=1.1-1.15$ sulla fascia di scivolamento; $FS=1.4$ nell'ammasso roccioso a tergo della zona di frana).

Le analisi di simulazione dell'evoluzione del movimento gravitativo (Fase 3) hanno evidenziato quanto segue:

- a) la simulazione numerica del fenomeno di oscillazione della superficie piezometrica non riesce a riprodurre in modo coerente con la realtà gli spostamenti misurati; gli spostamenti che il modello consente di cumulare ad ogni oscillazione annuale risultano infatti inferiori a quelli misurati, come ad indicare che la variazione dello stato tensionale efficace e le conseguenti deformazioni di rigonfiamento e consolidazione non sono sufficienti a spiegare, sulla base dei parametri adottati, il fenomeno reale; questo risultato potrebbe indicare un comportamento di *creep* su larga scala che, alla scala del laboratorio, non viene sufficientemente evidenziato;

⁽¹²⁾ Solo localmente raggiungono, talora, valori pari a 1.

- b) l'imposizione di uno spostamento della Zona 3a ("zona di frana") di circa 1.4 m in direzione x (destra-sinistra) non comporta significative variazioni del valore di Fattore di Sicurezza (FS). In termini di Rapporto di Mobilitazione (RM), si registra un'estensione della zona a $RM=0.8$ nelle zone interne del versante ed un incremento nei valori di RM all'interno del corpo di frana, che comunque restano inferiori all'unità, e quindi compatibili con il criterio di rottura. Si registra un'estensione delle zone plastiche a tergo della Zona 3a in frana, in una zona limitata all'interno del corpo di frana ed al di sotto della superficie di scivolamento lungo lineamenti all'incirca paralleli alle faglie; il fatto che RM non raggiunga valori unitari indica che lo stato tensionale agente in corrispondenza dei suddetti punti di plasticizzazione è "rientrato", nel corso delle analisi, entro livelli compatibili con il criterio di rottura. Gli spostamenti calcolati, con particolare riferimento agli spostamenti in x (destra-sinistra), di vari punti di controllo (ubicati sulla superficie topografica del versante come indicato nella Figura 23) crescono pressoché linearmente in funzione dello spostamento del punto di riferimento corrispondente alla testa del pendolo PR4 (Figura 25). Non si registrano accelerazioni dei movimenti dei punti controllati in funzione dello spostamento del piede. I punti di monte, a tergo della Zona 3a ("zona di frana"), si muovono meno velocemente dei punti della Zona 3a stessa, ad indicare che il versante a tergo non "insiste" sulla zona di piede (Zona 3a).

Alcune considerazioni sulle analisi eseguite

Per una completa comprensione delle ipotesi poste alla base della modellazione, occorre sottolineare quanto segue:

- le analisi numeriche hanno riguardato la stabilità della zona medio-bassa del versante e delle zone di monte, a tergo della "zona di frana"; esse hanno avuto lo scopo di studiare la stabilità "globale" del versante, prescindendo da fenomeni di instabilità localizzati (blocchi rocciosi) o corticali (detrito superficiale), il cui studio, che esula dagli scopi del presente lavoro, richiederebbe modelli mirati ad una differente e più ridotta "scala di analisi";
- le analisi sono state condotte in condizioni statiche, non considerando effetti dinamici (ad es. forze sismiche ⁽¹³⁾) e neppure considerando forze dovute a flussi idraulici (non sono state condotte analisi tensio-deformative e di flusso in modo "accoppiato"; non sono state condotte analisi per simulare situazioni di svaso rapido);

(¹³) Vale ricordare che la Valle d'Aosta, e quindi Valgrisenche, non rientrano nell'elenco delle "Località sismiche di prima e seconda categoria" (Allegato alla legge del 25 novembre 1962, n. 1684), aggiornate con le successive modifiche ed integrazioni. Valgrisenche risulta non classificata anche nella proposta di riclassificazione del GdL del 1998. Nella Classificazione Sismica dell'Ordinanza 20 marzo 2003 - Allegato 1 - Allegato A, Valgrisenche è classificata come zona 4 (grado minimo di sismicità).

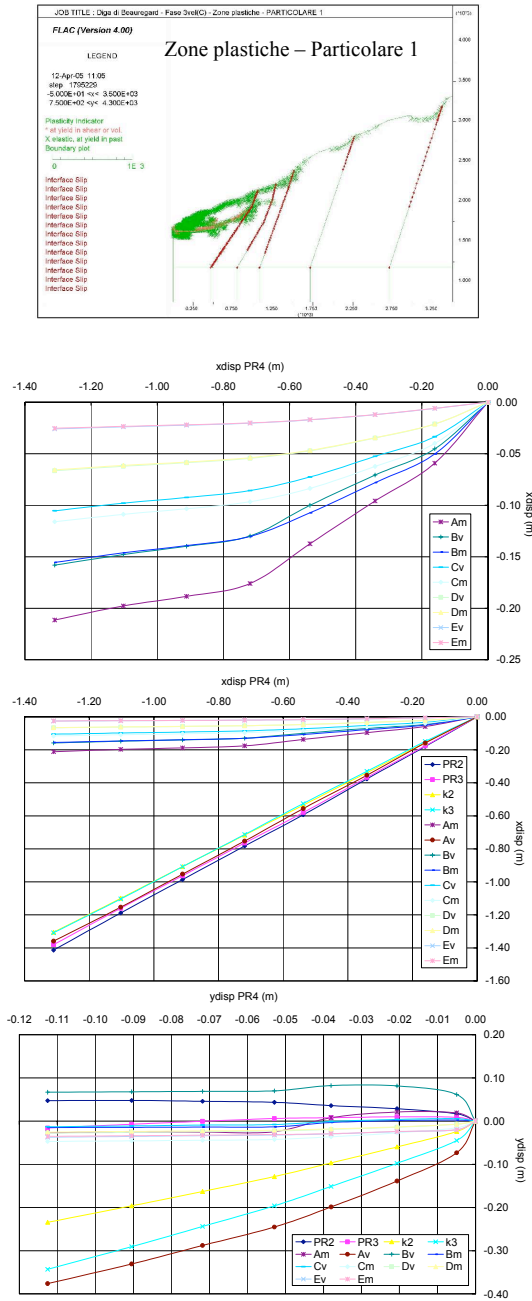


Figura 25. Analisi tensio-deformative. Fase 3. Zone plastiche, spostamenti di alcuni punti di controllo in funzione degli spostamenti al pendolo PR4.

- non è stato considerato un comportamento dipendente dal tempo (*creep*), peraltro non messo in luce dalle prove attualmente disponibili sul materiale in laboratorio;
- non è stata considerata la presenza della diga al piede del versante, né dei consolidamenti eseguiti in sponda sinistra all'epoca della costruzione. Questo al fine di simulare correttamente una situazione bidimensionale che prescindendo dagli effetti "locali" della struttura e che sia rappresentativa di una situazione "intrinseca" dell'ammasso lungo una sezione, a monte della diga, che attraversi la zona in frana in direzione monte-valle versante;
- in considerazione delle leggi costitutive e dei criteri di resistenza adottati per la fascia di scivolamento, si ritiene che il modello messo a punto e le analisi eseguite siano maggiormente rappresentativi della zona in cui la fascia di scivolamento presenta una consistente componente di materiale sciolto (limo argilloso-sabbioso - v. sondaggi S1/03 e S1/04) più che di una sezione (zona Bochat) dove la fascia di scivolamento è costituita prevalentemente da brecce (v. sondaggio S2/04).

Pur tenendo doverosamente conto delle schematizzazioni adottate, talune peraltro inevitabili in qualunque modello numerico, si ritiene che le analisi condotte ben rappresentino, nell'ambito dei margini di sicurezza valutati, la situazione attuale del versante.

5. Conclusioni

A conclusione del lavoro svolto vale riportare alcune considerazioni di sintesi con riferimento agli aspetti più significativi del problema.

- Un aspetto importante riguarda l'affidabilità del sistema di controllo del versante e della diga, recentemente integrato con strumentazione di alta precisione. I risultati del monitoraggio evidenziano infatti una generale congruenza dei fenomeni deformativi rilevati con la differente strumentazione installata.
- L'analisi dei dati storici di monitoraggio e gli elementi conoscitivi attualmente a disposizione indicano come la frana in esame sia caratterizzata da un fenomeno di scivolamento lento e pressoché rigido di una porzione di pendio su una sottostante superficie (fascia) continua che si presenta, nella parte medio-inferiore del versante ed in corrispondenza della diga, poco inclinata e costituita da materiale fine con legge di comportamento prevalentemente di tipo duttile. Le velocità di spostamento in corrispondenza della diga sono di circa 4-6 mm/anno; velocità maggiori (fino a 11-13 mm/anno) sono invece registrate nelle zone idrograficamente più a monte (Bochat).
- Il fenomeno gravitativo dipende dal grado di saturazione del versante, che risulta condizionato dagli apporti idrici dovuti all'infiltrazione delle acque meteoriche, soprattutto delle acque provenienti dallo scioglimento del manto nevoso. Lo spostamento annuale avviene infatti prevalentemente nel periodo dello scioglimento delle nevi (all'incirca da maggio-giugno a settembre-ottobre); nel

restante periodo dell'anno il versante non registra praticamente alcun movimento, se non, addirittura, un più o meno significativo "recupero".

➤ L'invaso, gestito alle quote attuali, drena (in prevalenza) il versante e non alimenta la falda in maniera significativa per la stabilità. L'incremento di velocità del movimento gravitativo che si è evidenziato nel periodo degli "invasi alti" è stato infatti dovuto all'innalzamento della piezometrica nel versante, che ha "drenato" l'invaso (ossia l'invaso ha fornito acqua al versante).

➤ I risultati delle misure indicano come la deformazione della diga dipenda strettamente dalla deformazione gravitativa del versante in sponda sinistra e si sia sviluppata, in particolare a partire nel periodo degli "invasi bassi", con visibile regolarità nel tempo, a velocità pressoché costante. Le velocità medie di spostamento, valutate con le misure ai pendoli su tutto il periodo di monitoraggio (compreso il periodo degli "invasi alti"), sono di circa 2.7-4.4 mm/anno; se si considera il solo periodo degli "invasi bassi" esse risultano di circa 1.8-3.0 mm/anno.

➤ Considerando le limitazioni attuali alla quota di invasore e sulla base dei risultati delle misure storiche disponibili (sia in termini di eventi meteorici che di spostamenti ad essi correlati), non risultano dunque prevedibili accelerazioni improvvise del versante. Tale conclusione è confermata dai risultati della modellazione condotta, che non evidenziano condizioni di instabilità, né accelerazioni globali del versante al progredire dello spostamento della zona di piede, nell'ambito delle attuali gestioni del livello di invasore e delle condizioni piezometriche così come evidenziate dalle misure ai piezometri ad acquisizione automatica recentemente installati. Si può pertanto ragionevolmente considerare che, a parità di condizioni generali, il fenomeno continuerà a manifestarsi con le velocità medie sopra indicate.

➤ Allo scopo di validare l'attendibilità dei risultati ottenuti con la modellazione e per ulteriore controllo, si sta ulteriormente integrando la rete di monitoraggio topografico in automatico del versante fino a coprire le zone a quote più elevate (circa 2900 m s.l.m.); anche sul corpo diga sono stati recentemente installati nuovi riscontri topografici. La rete di monitoraggio topografico così integrata e la restante strumentazione già in opera sul versante e nel corpo diga garantiscono un adeguato controllo, anche in considerazione dell'alta qualità e precisione degli strumenti e della frequenza delle letture effettuate. I dati che si raccoglieranno nei prossimi anni in maniera continuativa, grazie alla nuova strumentazione ad acquisizione automatica, forniranno sempre più elementi per la validazione del modello concettuale ad oggi delineato e per l'analisi dei rapporti causa-effetto nel fenomeno in esame. Ciò è in linea con un approccio metodologico di continua verifica, normalmente utilizzato in casi analoghi, ossia in quei casi che prevedono la schematizzazione di un fenomeno reale complesso, in continua evoluzione, con un modello concettuale interpretativo tradotto, a sua volta, in un modello numerico a scopo predittivo.

6. Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare tutti coloro che hanno collaborato nelle varie fasi del lavoro sopra descritto, in particolare:

- Alessia Musso, Salvatore Sucato e Andrea Torre (Geodes s.r.l.), per i rilievi geologici sul terreno e l'interpretazione dei dati raccolti;
- Ugo Rabagliati e Giovanna Piovano (Geodes s.r.l.), per il lavoro di modellazione numerica e di interpretazione dei dati di monitoraggio;
- Davide Bazzanella e Gilberto Billia (C.V.A. S.p.A.), per l'organizzazione delle attività in sito e l'indispensabile apporto nella raccolta e nell'interpretazione dei dati di monitoraggio;
- Paola Maio (Geodes s.r.l.), per la parte grafica.

Si ringraziano inoltre Angelica Catalano e Paolo Paoliani (Registro Italiano Dighe), per aver reso possibile la consultazione dell'archivio della sede di Roma.

Un ulteriore ringraziamento è rivolto a Maurizio Furani (Progeo s.r.l.), per la sua disponibilità nelle innumerevoli dissertazioni sulle indagini geofisiche.

Si ringraziano infine le Imprese (Progeo s.r.l. per la geofisica, C.S.I. s.r.l. per i sondaggi, sial.tec Engineering s.r.l. per la strumentazione, IsmesGeo s.r.l. per le prove di laboratorio), con le quali è sempre stata instaurata una piacevole e proficua collaborazione nell'affrontare i molteplici aspetti tecnici ed organizzativi di un lavoro multidisciplinare e assai complesso come quello concernente la problematica della diga di Beauregard.

7. Bibliografia

- Bieniawski Z.T. (1989), *Engineering rock mass classifications*, John Wiley and Sons, New York.
- Bonnard Ch., Forlati F., Scavia C. (2004), *Identification and mitigation of large landslide risks in Europe - Advances in risk assessment*, Balkema.
- Carraro F., Ferrero E., Forno M.G., Ricci B. (1980), Dati preliminari sull'evoluzione neotettonica dell'arco delle Alpi Occidentali. Contr. prelimin. *Carta Neotettonica d'Italia*, pubbl. n°. 251 Prog. Final. Geodinamica., pp. 235-249.
- Castiglioni G.B. (1989), *Geomorfologia*, Utet., XVI - 436 p., Torino.
- Dal Piaz G.V., in collaborazione con Bortolotti V., Castellarin A., Cita M.B., d'Argenio B., Praturlon A., Vanossi M. (2004), *Guide Geologiche Regionali, Alpi dal M. Bianco al Lago Maggiore*, Ed Be-Ma, 311 p., Milano.
- Dawson E. M., Roth W. H., Drescher A. (1999), Slope stability analysis by strength reduction, *Géotechnique* 49, No. 6, pp. 835-840.
- Desio A. (2003, ristampa anastatica della terza edizione riveduta e aggiornata pubblicata nel 1973), *Geologia applicata alla Ingegneria. Mezzi e metodi d'esplorazione del sottosuolo* -

Idrogeologia e geomorfologia applicate - Geologia delle costruzioni – Geologia mineraria, Terza Edizione riveduta ed aggiornata, Hoepli.

Geodes s.r.l. (2005), Diga di Beauregard. Valgrisenche (AO). Approfondimenti tecnico-conoscitivi per la verifica delle caratteristiche del dissesto sinistro vallivo in corrispondenza della diga e per l'integrazione del sistema di monitoraggio, in risposta alle richieste del Servizio Nazionale Dighe (ora Registro Italiano Dighe). Modello geologico-geotecnico del versante sinistro, *Relazione RL. 0685*, Aprile 2005.

Hoek E., Brown, E.T. (1997), Practical estimates of rock mass strength, *Int. J. Rock Mech. Sci.*, Vol. 34, n. 8, pp. 1165-1186.

Itasca Consulting Group Inc. – FLAC (2000), *Fast Lagrangian Analysis of Continua*, Version 4.0, 2000.

Mortara G., Sorzana P. F. (1987), Fenomeni di deformazione gravitativa profonda nell'arco alpino occidentale italiano. Considerazioni lito-strutturali e morfologiche, *Boll. Soc. Geol. It.*, 106, pp 303-314.

Piovano G. (1992), Indagine geofisica e geostrutturale sul versante orografico sinistro del bacino della diga di Beauregard, *Relazione tecnica N° 1380*.

Platt J.P. (1986), Dynamics of orogenic wedges and the uplift of high-pressure metamorphic rocks, *Geol. Soc. Am. Bull.*, Vol. 97, pp. 1037-1053, Boulder.

Polino R., Dal Piaz G.V., Gosso G. (1990), Tectonic erosion at the Adria margins and accretionary processes for the Cretaceous orogeny in the Alps, *Mem. Geol. Soc. France*, Vol. 156, pp. 345-367, Paris.

Puma F., Ramasco M., Stoppa T., Susella G. (1989), Movimenti di massa nelle alte valli di Susa e Chisone, *Boll. Soc. Geol. It.*, 108, pp. 391-399.

Regione Piemonte, U.E., Universite J. Fourier Lirigm. (1998), *Rischi generati da grandi movimenti franosi - Studio comparato di 4 siti nelle Alpi franco-italiane - Testo di raccomandazioni*, Programma interregionale 1 Italia-Francia.

Schuster R.L. (2000), Dams built on pre-existing landslides, *Conference Proceedings: GeoEng200 – An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering*, 19-24 November 2000, Melbourne, Australia.