

**Zeitschrift:** Archi : rivista svizzera di architettura, ingegneria e urbanistica = Swiss review of architecture, engineering and urban planning

**Herausgeber:** Società Svizzera Ingegneri e Architetti

**Band:** - (2004)

**Heft:** 2

**Artikel:** La geo-ingegneria e le grandi opere : conferenza del 23 gennaio 2003, SUPSI, Lugano

**Autor:** Lombardi, Giovanni

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-132944>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 07.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# La geo-ingegneria e le grandi opere

Conferenza del 23 gennaio 2003, SUPSI, Lugano

Giovanni Lombardi

## Prologo

Sono assai lieto di poter illustrare questa sera alcuni aspetti della nostra professione d'ingegnere del genio civile ed anche di difenderla in una certa misura. Voglio perciò ringraziare sentitamente gli organizzatori di questa serata che mi offrono questa occasione di prendere la parola.

Dicevo poc'anzi della difesa della professione in quanto nell'opinione di molti – di fronte allo sviluppo di nuovi rami della scienza e di nuove tecniche – quello del genio civile viene purtroppo trascurato, in quanto considerato – certamente a torto – una professione compiuta che non merita più particolare attenzione, né speciale impegno di ricerca. Il decrescente numero di studenti alle scuole politecniche e professionali, nonché la riduzione dei crediti per l'insegnamento e la ricerca – sottratti a queste facoltà a favore di altre considerate più moderne – è purtroppo segno e conferma di questa deplorabile evoluzione. Si tratta di un problema che saremo chiamati a pagare a caro prezzo nel corso dei prossimi lustri, o decenni, ovvero: la mancanza di ingegneri qualificati di varie specializzazioni e di personale tecnico in genere. Che questo problema incominci già oggi a diventare critico si evidenzia, ad esempio, nel fatto che i titolari di centrali nucleari temono di non poter più disporre di sufficiente personale adeguatamente formato per gestire questi impianti e garantire l'affidabilità del servizio. Molte grandi opere sono state realizzate nei campi detti «civili», tant'è che ci siamo abituati a ritenere scontata la messa a disposizione in ogni luogo ed in ogni tempo di acqua potabile, di fognature, di impianti di depurazione, di energia elettrica, di mezzi di trasporto pubblici e privati per persone o merci, e ciò senza parlare di molte altre costruzioni ed edifici. Per quanto concerne l'importanza della nostra professione, ricordiamo semplicemente che secondo gli storici, gli ingegneri civili, con la messa a disposizione di acqua potabile, hanno fatto assai più per la salute di cittadini nel secolo XIX in Europa che non l'intera scienza medica. Per inciso si può anche ricordare che oggi ancora almeno un miliardo

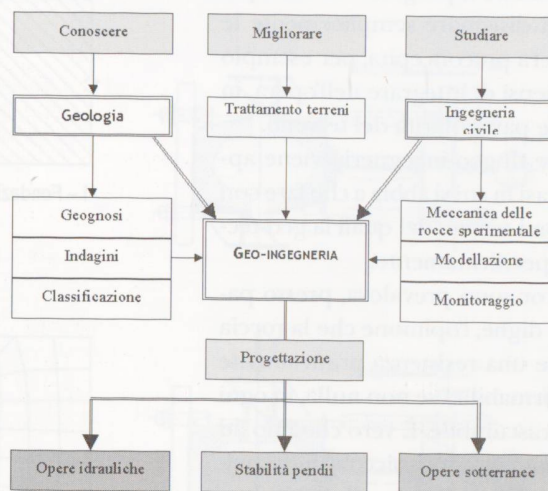


Tavola 1 – Geo-ingegneria

di persone non dispongono di acqua veramente potabile, con le ben note conseguenze sanitarie. Da noi la tentazione è oggi comunque assai forte di pensare che i bisogni e i desideri dell'attuale società in tutti questi campi siano definitivamente soddisfatti e che ci si possa spensieratamente dedicare ad altre forme di occupazione, che non a quella del costruire. Si dimentica purtroppo assai sovente che dette opere vanno controllate, mantenute, riparate, completate ed eventualmente sostituite o eliminate, allo scopo di assicurare la disponibilità dei relativi servizi con ogni ragionevole garanzia di funzionamento e di sicurezza. Sembra però che ci siano alcuni problemi che non devono in nessun modo essere risolti, perché nel caso contrario – come diceva a suo tempo l'onorevole Nello Celio, allora Direttore del Dipartimento delle Costruzioni –, non avremmo più argomenti di discussione; e con ciò non faccio nemmeno riferimento al completamento della galleria stradale del San Gottardo! Per la verità, lui pensava all'adesione della Svizzera alle Nazioni Unite nonché al voto delle donne. Si trattava di argomenti di discussione che nel contempo sono venuti a mancare, ma che sono stati immediatamente sostituiti da altri! Ma torniamo al nostro argomento: la geo-ingegneria.



## Parte I. La geo-ingegneria

### Introduzione

Partendo dalle nozioni di «ingegneria» e di «geologia» è stato creato il neologismo di geo-ingegneria; ma, se il nome è relativamente recente, l'oggetto non lo è (tav. 1).

Si può definire la geo-ingegneria come il ramo dell'ingegneria civile che si occupa di quelle opere per le quali le condizioni geologiche o geotecniche incidono sulla definizione stessa dell'opera e ne possono perfino determinare il progetto. In altre parole non si tratta di disegnare semplicemente le fondazioni di un'opera preconcepita, per esempio dall'architetto, ma bensì di integrare nell'opera, in modo sottile, tutte le particolarità del terreno.

Di regola la nozione di geo-ingegneria viene applicata piuttosto ai casi in cui si abbia a che fare con la roccia che non con i terreni dei quali la geotecnica si occupa più specificatamente.

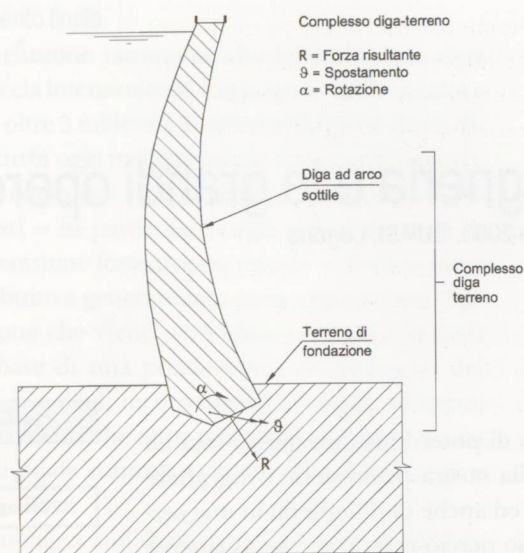
Solo cinquant'anni or sono prevaleva, presso parecchi progettisti di dighe, l'opinione che la roccia di fondazione avesse una resistenza praticamente illimitata e una deformabilità se non nulla, in ogni modo certamente trascurabile. È vero che fino ad allora essi avevano costruito solo piccole dighe nelle zone geologicamente più favorevoli, in particolare nel granito delle Alpi. In realtà, opinioni divergenti erano già emerse in America ad esempio presso il U.S. Bureau of Reclamation.

Questa situazione mi aveva condotto allora a difendere, nell'ambito della mia tesi, il concetto secondo il quale lo studio e l'analisi matematica di una diga ad arco non poteva limitarsi al solo corpo di calcestruzzo, ma doveva estendersi al complesso formato dalla muratura e dal massiccio di fondazione (fig. 1). Questo concetto – poi ripreso e successivamente sviluppato da vari autori – è diventato oggi tanto ovvio da non più essere discusso; ha anzi condotto a certe esagerazioni in quanto si vede a volte una minuscola diga posata su un'enorme montagna di Elementi Finiti di cui molti lasciano alquanto perplessi circa il loro effettivo contributo all'equilibrio dell'opera (fig. 2).

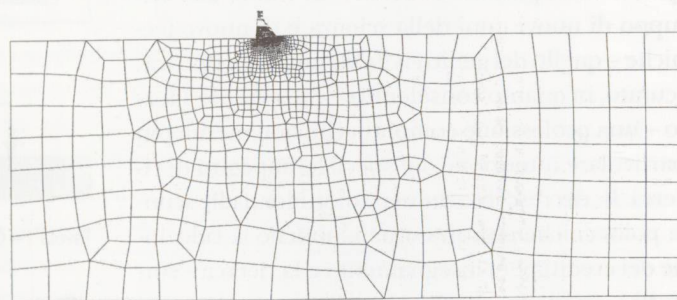
### Lo sviluppo della meccanica delle rocce

La realizzazione di importanti opere di geo-ingegneria, cui ebbi la fortuna di partecipare, mi permise poi di dare qualche contributo allo sviluppo di quella nuova disciplina che era «la meccanica delle rocce».

La diga di Contra, in Val Verzasca, assai snella, esercita sulle fondazioni rocciose importanti reazioni di appoggio. Sorse dunque a quel punto la domanda a sapere se i fianchi della valle fossero in grado di sorreggere dette spinte.



1 – Fondazione diga ad arco



2 – Sproporzione diga-terreno

Con la consulenza del compianto Prof. Enzo Dal Vesco, ci si rese ben presto conto che determinanti per la stabilità e la rigidezza delle spalle non erano tanto la resistenza e la deformabilità intrinseche della matrice rocciosa quanto le condizioni di attrito e di coesione nel piano delle discontinuità naturali del massiccio roccioso che potevano essere mobilitate. Non esistevano a quel momento dati attendibili in merito, per cui si dovette sviluppare un apparecchio di prova al taglio adatto a questo scopo. Furono utilizzate – perché presenti sul cantiere – le presse allora in uso nel laboratorio per misurare le deformazioni visco-plastiche del calcestruzzo. Nacque così un apparecchio particolare per lo studio del taglio diretto su discontinuità rocciose che si diffuse poi assai rapidamente nei laboratori di ricerca sui materiali, dove fu ovviamente perfezionato e automatizzato (fig. 3). Poco dopo nacque, sul piano Europeo, l'interesse per la citata «meccanica delle rocce». La roccia non veniva più considerata come semplice corpo omogeneo elastico – ossia come equivalente ad una massa di cal-



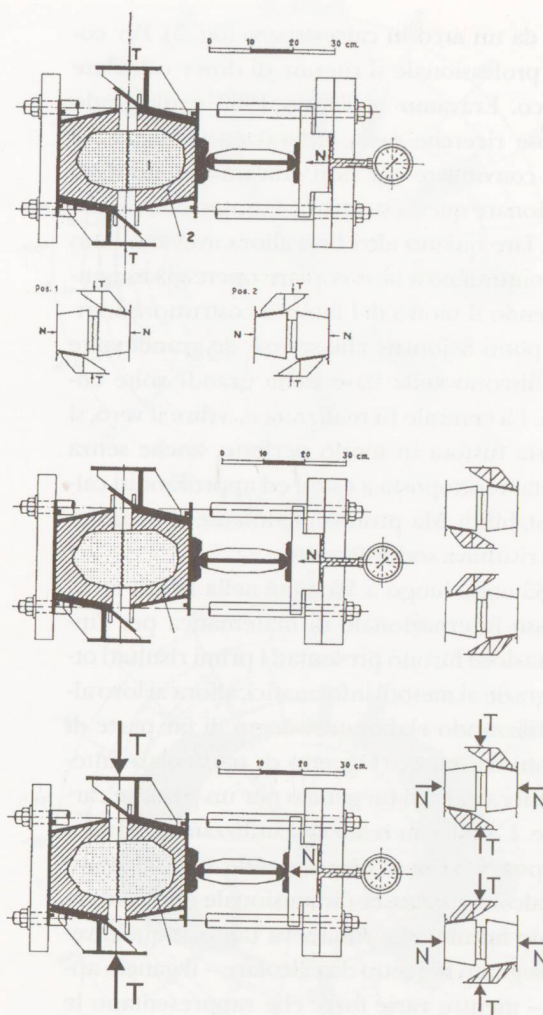
cestruzzo, – ma come un assemblaggio di singoli elementi lapidei. Fino a quel momento si usava infatti analizzare la matrice rocciosa, determinandone unicamente la resistenza e il modulo d'elasticità, come per i materiali da costruzione. Si determinavano di fatto due parametri certo non ininteressanti, ma malgrado tutto secondari per il nostro problema rispetto alle due nuove proprietà prese in conto: l'angolo di attrito e la coesione nelle discontinuità. Questo è un esempio assai semplice di come necessità pratiche di progettazione possano orientare o ri-orientare i metodi sperimentali di ricerca tradizionalmente in uso nei laboratori. Con ciò la sicurezza della diga di Contra – quasi contemporaneamente a quella di Vouglans in Francia – fu tra le prime ad essere analizzata valutando adeguatamente anche la resistenza degli appoggi rocciosi. Questo principio fu purtroppo disatteso in altri casi ciò che condusse ad esempio al crollo della diga di Malpasset – detta anche di Fréjus –, che causò parecchie centinaia di vittime.

A quell'epoca fu fondata a Salisburgo in Austria la prima associazione scientifica, nazionale prima, internazionale poi, per lo studio della meccanica delle rocce. Inutile aggiungere che a seguito degli studi condotti sulle fondazioni, il progetto della diga di Contra fu successivamente raffinato, applicando con ciò i principi della «futura» geo-ingegneria.

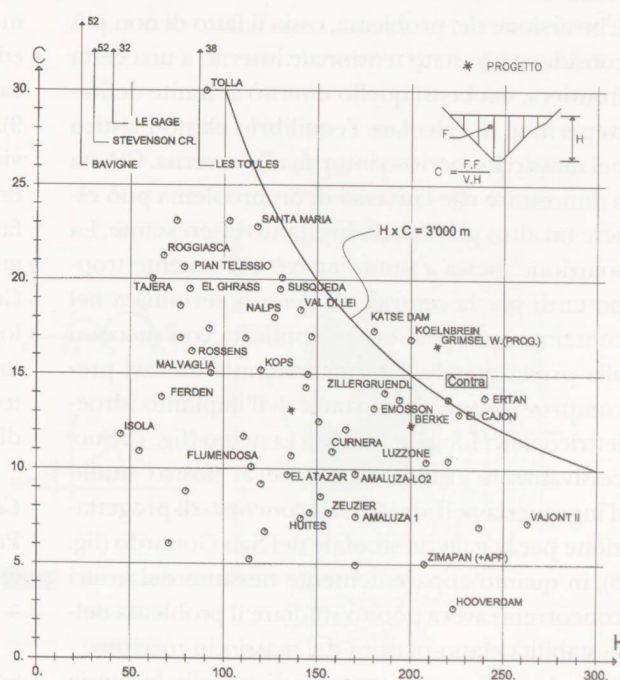
Sia detto per inciso, la diga della Verzasca presenta anche due altre particolarità: in primo luogo quella di essere stata una delle prime dighe ad arco, se non la prima in assoluto, ad essere stata calcolata – seppure con le grandi difficoltà di allora, quasi mezzo secolo or sono – con l'ausilio di uno, anzi di due elaboratori elettronici a dipendenza delle limitate possibilità di calcolo di ognuno di loro.

L'altra sua particolarità è di essere stata a quel momento la diga ad arco la più snella o la più ardita al mondo, come si diceva allora. Questa affermazione si basava sul cosiddetto coefficiente di snellezza, che è un coefficiente adimensionale di forma, messo a punto da noi qualche anno prima (fig. 4). Ben inteso, quest'ultima particolarità della diga, quella di essere la più ardita, fu resa nota solo un decennio dopo la sua costruzione – quando i termini di prescrizione erano scaduti –, ché ad essere conosciuta a quel momento, il progetto sarebbe stato difficilmente avallato dalle competenti autorità. Il concetto di snellezza porta a definire un'iperbole limite – funzione dell'altezza – oltre la quale le dighe ad arco presentano o possono presentare problemi, come alcune opere costruite successivamente hanno purtroppo abbondantemente confermato.

L'impianto idroelettrico della Verzasca comporta anche una centrale in caverna, detta di Tenero, so-



3 – Taglio lungo discontinuità; diga di Contra



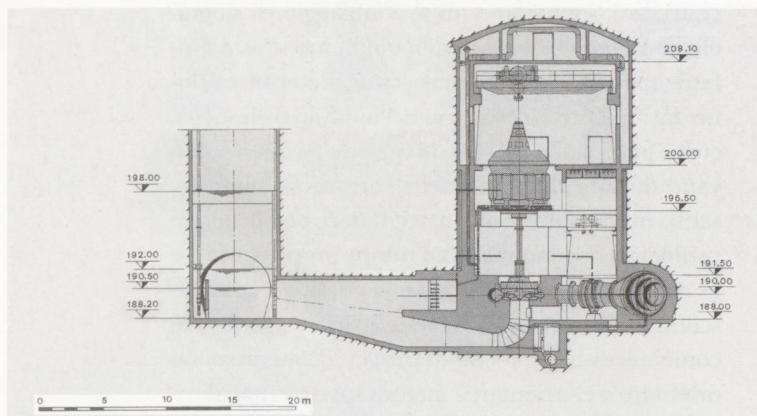
4 – Coefficiente C; diga di Contra



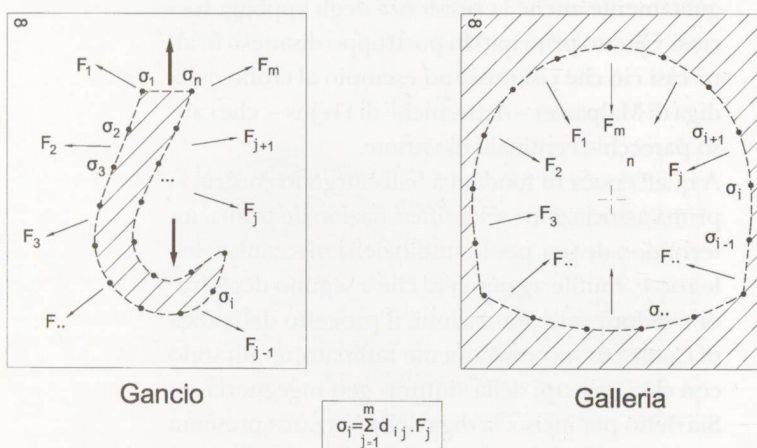
stenuta da un arco in calcestruzzo (fig. 5). Per coscienza professionale si ritenne di dover calcolare quell'arco. Eravamo nell'anno 1962 e malgrado numerose ricerche nella letteratura tecnica ci si dovette convincere che non eravamo in grado di dimensionare questa struttura. Fummo con ciò costretti a fare quanto altri fino allora avevano fatto e anzi continuano a fare: copiare opere già eseguite seguendo il motto del famoso costruttore francese di ponti Séjourné che scrisse «le grandi volte si costruiscono sulla base delle grandi volte costruite». La centrale fu realizzata e, a dire il vero, si comporta tuttora in modo perfetto, anche senza essere stata sottoposta a estesi ed approfonditi calcoli di stabilità. Ma professionalmente la situazione non risultava soddisfacente.

Nel 1965 ebbe luogo a Weimar nella DDR il terzo congresso internazionale di matematica per l'ingegneria dove furono presentati i primi risultati ottenuti grazie ai metodi informatici, allora ai loro albori, utilizzando elaboratori degni di far parte di collezioni da museo. Oggetto di particolare interesse fu il calcolo di un gancio per un pesante carroponte. L'analisi fu realizzata utilizzando il metodo proposto dal prof. Massonet (fig. 6). Si trattava di un calcolo elastico bi-dimensionale realizzato in un piano infinito che rimaneva tale, sul quale veniva disegnato l'oggetto da calcolare – il gancio appunto – mentre varie forze che rappresentano le incognite del problema agivano nel piano, all'esterno dell'oggetto studiato, in modo da ottenere le volute sollecitazioni sui suoi bordi. Data l'unicità della soluzione elastica, lo stato tensionale all'interno del corpo stesso risultava con ciò definito.

L'inversione del problema, ossia il fatto di non più considerare lo stato tensionale interno a una certa frontiera, ma bensì quello esterno al limite definito permise di calcolare l'equilibrio elasto-plastico nel massiccio roccioso intorno alla caverna. Ciò sta a dimostrare che l'inverso di un problema può essere un altro problema altrettanto interessante. La soluzione messa a punto arrivò ovviamente troppo tardi per la centrale di Tenero, terminata nel contempo, ma poté essere applicata con successo alla prima grande caverna sostenuta da cavi precompressi, quella di Veytaux dell'impianto idroelettrico dell'Hongrin sul lago Lemano (fig. 7). Successivamente risultò assai utile al nostro studio d'ingegneria nell'ambito del concorso di progettazione per la galleria stradale del San Gottardo (fig. 8), in quanto apparentemente nessuno dei nostri concorrenti aveva potuto studiare il problema della stabilità elasto-plastica del massiccio roccioso. Sulla base di questo metodo di calcolo, la teoria delle linee caratteristiche per il problema bi-di-



5 – Centrale in caverna di Tenero



6 – Inversione di un problema elastico

mensionale poté essere notevolmente sviluppata ed è tuttora di grande utilità nei procedimenti di calcolo e di costruzione di opere sotterranee (fig. 9). La linea caratteristica mette in relazione il movimento di convergenza della cavità con l'intensità della pressione o forza di sostegno. Rappresenta di fatto un punto d'incontro fondamentale tra ingegneria e geologia.

Con lo sviluppo della meccanica delle rocce la geologia, di norma descrittiva e qualitativa, otteneva una nuova dimensione quantitativa e meglio poteva integrarsi, almeno parzialmente, nella nuova disciplina della geo-ingegneria.

#### Campi della geo-ingegneria

Principali campi della geo-ingegneria possono essere considerati i seguenti:

- le opere idrauliche, e in particolare gli sbarramenti;
- i problemi di stabilità dei pendii;
- le opere sotterranee.

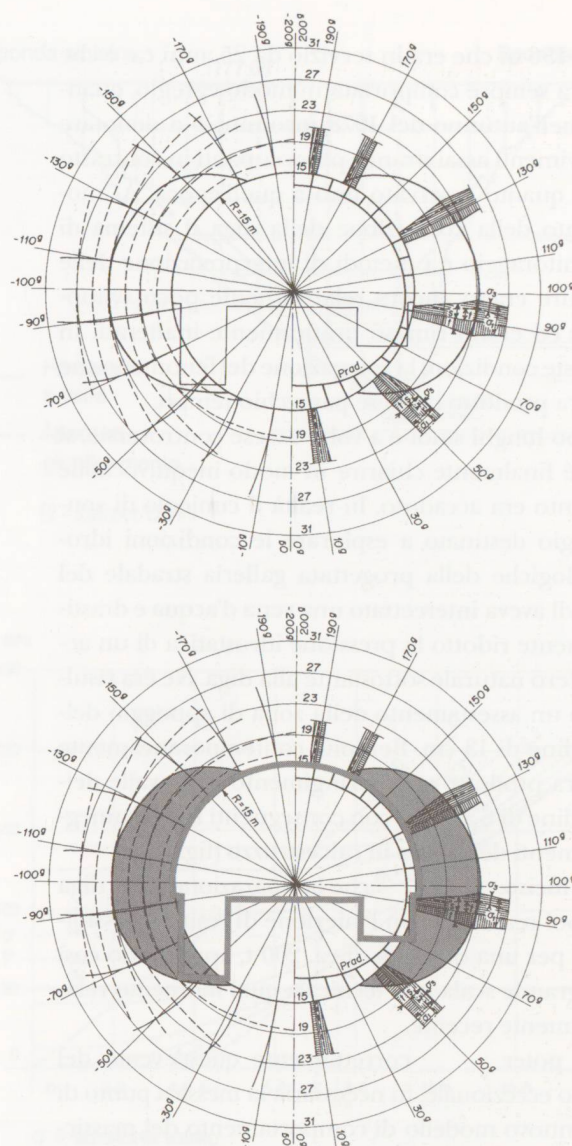


Un'enorme massa rocciosa del Monte Toc si mise in movimento e franò nel bacino del Vajont causando un'altissima onda che sorpassando la diga distrusse il paese di Longarone e altre località sottostanti.

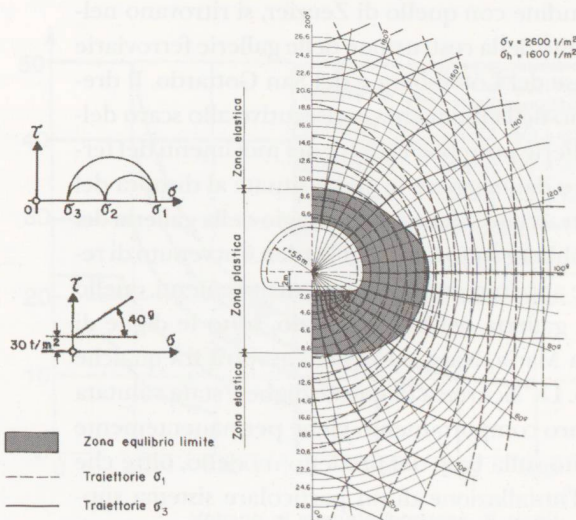
Questo disastro che nell'ottobre del 1963 causò oltre 2'000 vittime mise purtroppo bene in evidenza l'importanza dell'angolo di attrito e della coesione nonché quella della pressione idrostatica ed idrodinamica agente negli interstizi della massa rocciosa. L'importanza della meccanica delle rocce per la geo-ingegneria nello studio del comportamento e la sicurezza delle grandi opere fu allora più generalmente percepita anche nel campo delle dighe. L'eccellente risultato di segno opposto ottenuto con lo scavo della galleria di drenaggio, che ha permesso di fermare lo slittamento di Campo Vallemaggia in atto da parecchi secoli, ne è la chiara contro-prova (fig. 10).

Ma come spesso accade – e non solo nella tecnica – si passa facilmente da un eccesso all'altro. Mentre mezzo secolo fa si trascurava completamente il comportamento della fondazione rocciosa delle opere, si è poi in alcuni casi passati all'estremo opposto, ritenendo, per esempio, la roccia di fondazione della diga di Koelnbrein in Austria come responsabile delle fessure che si erano prodotte nel calcestruzzo della stessa. In realtà, la ragione dei danni era altra in quanto imputabile ad eccessive iniezioni dei giunti di contrazione dell'arco durante la costruzione. Questa errata interpretazione ritardò per vari anni la riparazione dell'opera, realizzata poi con la costruzione di un arco di appoggio (fig. 8 a p. 66). L'incertezza creata indusse inoltre a scegliere una soluzione non adeguata per la diga di Zillergründl costruita durante il periodo di chiarimento.

In altri casi ancora, si cercò nella fondazione rocciosa la causa di deformazioni della diga che erano dovute in realtà ad un rigonfiamento del calcestruzzo per reazione alcali-silicati, ossia ad un fenomeno di tutt'altra natura. Si tratta in realtà di un fenomeno di alterazione del calcestruzzo messo in evidenza da non molto che richiederà grande impegno e complessi studi in un prossimo avvenire. Il terzo importante campo di applicazione della geo-ingegneria e della meccanica delle rocce è quello delle opere sotterranee di cui parleremo più avanti. Mi sia nondimeno concesso di menzionare in questa sede un problema che potrei dire combinato in quanto interessa nello stesso istante dighe e gallerie, anche se, come detto, quello delle dighe non sarà il nostro argomento questa sera. Lo spunto di questa digressione è quello del caso assai speciale della diga ad arco di Zeuzier (fig. 11)



7 – Centrale di Veytaux



8 – Limite plastico



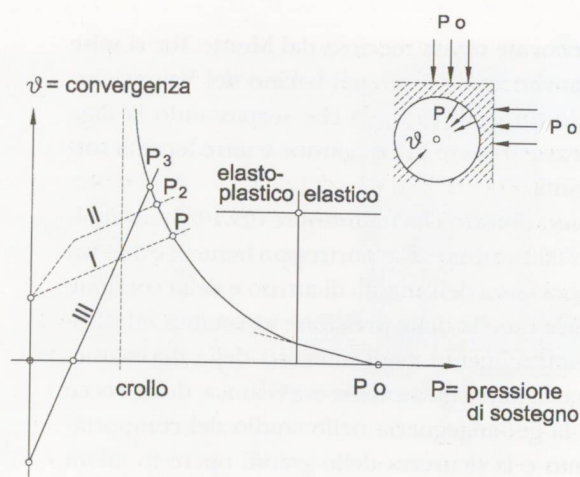
alta 156 m che era in servizio da 25 anni ca. e che si era sempre comportata in modo egregio, quando nell'autunno del 1978 incominciò a denotare movimenti assai strani e preoccupanti in contrasto con quanto osservato fino a quell'epoca. Al momento della costruzione della diga il sistema di monitoraggio e i metodi di interpretazione delle misure erano ancora relativamente poco sviluppati ed erano rimasti praticamente inalterati. In queste condizioni la spiegazione del fenomeno che si era prodotto richiese parecchio tempo.

Dopo lunghi studi e a volte accese controversie, si poté finalmente chiarire in modo inequivocabile quanto era accaduto. In realtà il cunicolo di sondaggio destinato a esplorare le condizioni idrogeologiche della progettata galleria stradale del Rawil aveva intercettato una vena d'acqua e drasticamente ridotto la pressione idrostatica di un acquifero naturale sottostante alla diga. Ne era risultato un assestamento della zona di appoggio dell'ordine di 13 cm. Ben più, contemporaneamente si era prodotto un restringimento della valle dell'ordine di 6 a 7 cm, con conseguenti forti danneggiamenti dell'opera in calcestruzzo (fig. 12).

Per inciso, che la riparazione della diga fu poi realizzata con l'iniezione di resine epossidiche per una quantità di ca. 200 t, applicando così su grande scala una tecnica a quel momento relativamente recente.

Per poter correttamente quest'evento del tutto eccezionale, fu necessaria la messa a punto di un nuovo modello di comportamento del massiccio roccioso chiamato FES, per «Roccia Fessurata Elastica Saturata», che successivamente si è rivelato essere uno strumento assai potente per l'esame del comportamento di massicci rocciosi sotto carico e in presenza di acque interstiziali (fig. 13).

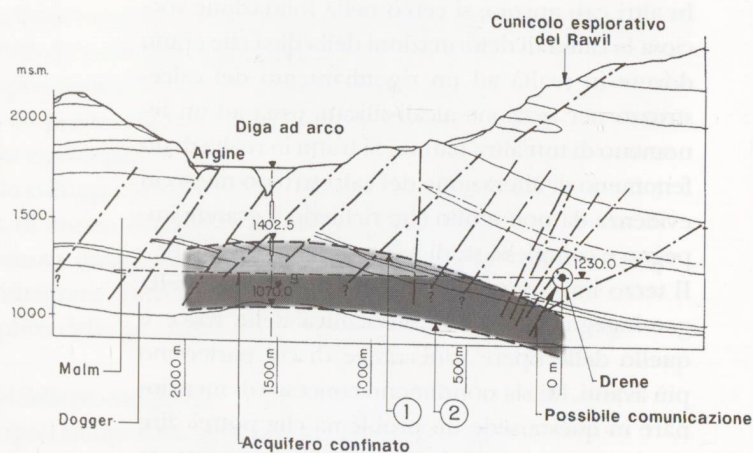
Scenari, che potrebbero presentare una certa similitudine con quello di Zeuzier, si ritrovano nell'ambito della costruzione delle gallerie ferroviarie di base del Lötschberg e del San Gottardo. Il drenaggio della montagna consecutivo allo scavo delle gallerie potrebbe causare dei movimenti del terreno e danneggiare le dighe situate al disopra del loro tracciato. Mentre il passaggio della galleria del Lötschberg sotto la diga di Ferden è avvenuto di recente apparentemente senza inconvenienti, quello della galleria del San Gottardo, sotto le dighe di Santa Maria, Naps e Curnera avverrà fra qualche anno. La sicurezza di queste dighe è stata valutata e il loro comportamento viene permanentemente seguito sulla base del predetto modello, oltre che con l'installazione di un particolare sistema supplementare di monitoraggio orientato all'analisi di questi specifici problemi. Se deformazioni del ter-



9 - Linee caratteristiche di cavità e sostegni



10 - Fronte Campo Vallemaggia



11 - Profilo geologico Zeuzier



reno o della diga superiori ai limiti accettabili dovessero prodursi, precise disposizioni dovranno essere prese.

Invertendo il problema del drenaggio sul comportamento del massiccio roccioso si passa a considerare condizioni opposte – esse pure assai interessanti – quelle dell'aumento delle pressioni a seguito di iniezioni di cemento a scopo di consolidamento. Questo sviluppo ha portato al concetto ormai generalmente accettato di «intensità di iniezione» messo a punto nella riparazione della diga di El Chocón in Argentina. Su questa base è stato definito il valore GIN (Grouting Intensity Number) con la collaborazione del Prof. Don Deere dell'università della Florida, già noto come padre del RQD (Rock Quality Designation), uno dei primi concetti pratici introdotti nella meccanica delle rocce. Quest'ultimo parametro caratterizza, come si sa, l'intensità della fessurazione di un massiccio roccioso (fig. 14).

Il concetto dell'intensità d'iniezione è poi stato sviluppato in varie tappe per diventare un metodo completo di trattamento delle rocce. L'idea basilare consiste nel ridurre la pressione d'iniezione in funzione del volume di miscela cementizia già iniettato. Ne risulta nuovamente tutta una serie di iperbole il cui parametro è appunto l'intensità di iniezione prescritta. Si tratta di un concetto che urtava tradizioni ormai centenarie, ma che incomincia a prendere piede in diversi paesi per la realizzazione di iniezioni tanto di consolidazione quanto di impermeabilizzazione della fondazione di opere idrauliche o dei massicci circostanti le opere sotterranee.

Questo semplice esempio dimostra nuovamente che l'inversione di un problema noto può dar avvio ad interessanti nuovi sviluppi.

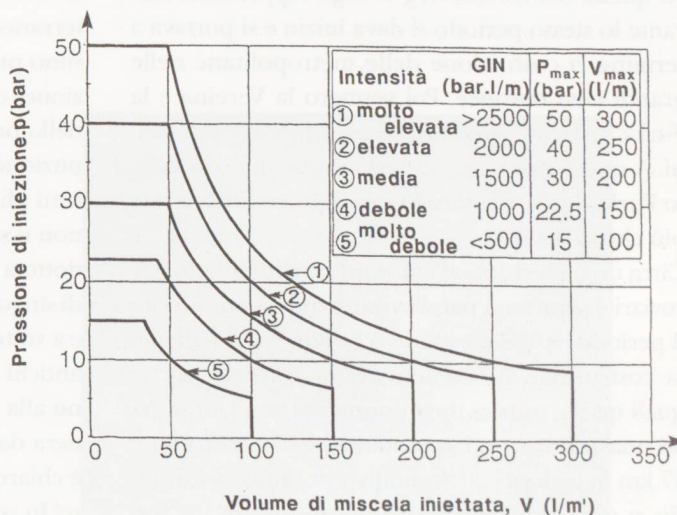
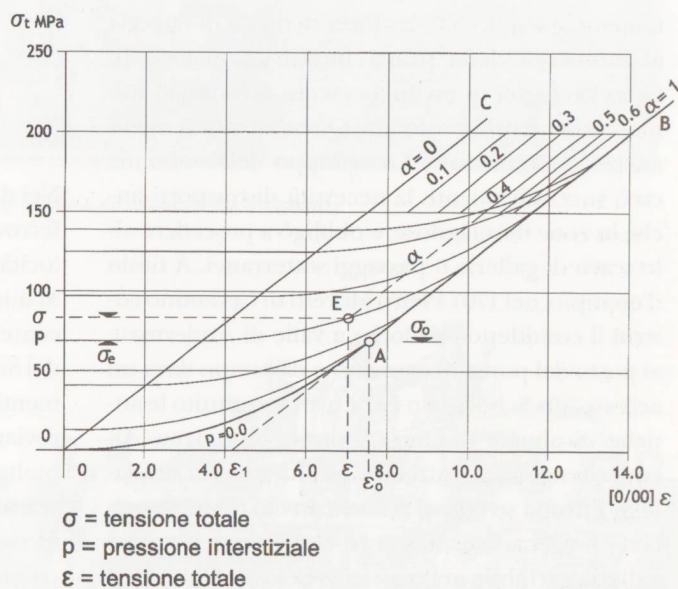
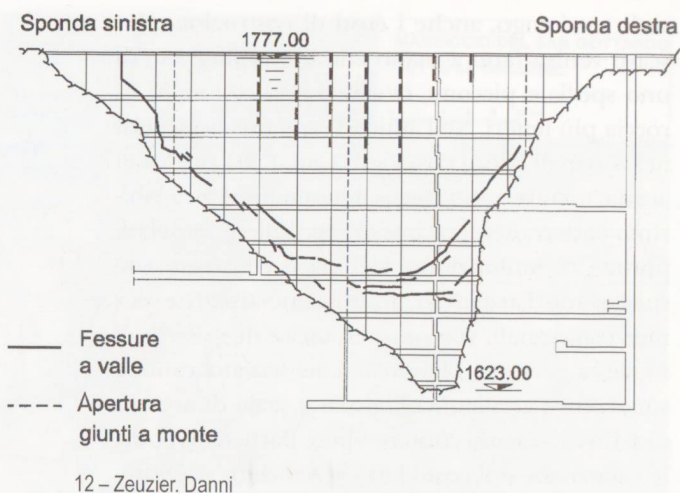
## Parte II. Gallerie

### Introduzione

Ma veniamo ora a parlare di gallerie o meglio di opere sotterranee.

Dalla più alta antichità gli uomini hanno sfruttato le caverne naturali o grotte – laddove le condizioni geologiche ne avevano permesso la formazione – a scopo di rifugio, di abitazione o anche di sepoltura. Poi, come sempre, l'uomo ha cercato di imitare la natura e vi è anche riuscito creando cavità più o meno vaste con scopi diversi.

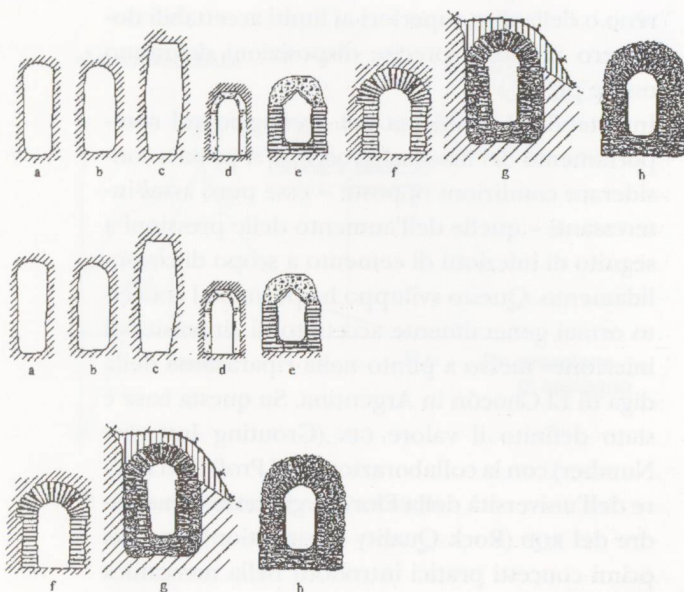
Gli antichi egizi, che avevano costruito montagne, ovvero le piramidi, al disopra delle camere mortuarie dei loro Faraoni, hanno successivamente scavato le tombe nella roccia della Valle dei Re. In qualche modo anche loro hanno invertito un problema, riducendo notevolmente l'impegno neces-





sario e, ritengo, anche i costi di costruzione. Lo scavo veniva fatto a mano con il semplice uso di uno speciale piccone, ovviamente negli strati di roccia più teneri. Nell'antica Persia furono scavati nei detriti di falda i cosiddetti Ganat alla ricerca di acqua, mentre sotto Gerusalemme un intero labirinto sotterraneo era inteso raccogliere le deboli portate di infiltrazione. I Greci e i Romani trasportavano l'acqua su grandissime distanze per mezzo di canali, viadotti ma anche di gallerie di modesta sezione. Hanno anche scavato camere sotterranee con cunicoli, pozzi e scale di accesso (fig. 15) e ciò senza contare opere particolari come le catacombe e il cosiddetto «Orecchio» di Dionisio a Siracusa. Nel Medioevo la ricerca di minerali pregiati condusse a creare tutta un'industria mineraria sotterranea che Agricola descrisse dettagliatamente già nel 1550. La forte richiesta di energia al momento della prima industrializzazione in Gran Bretagna fu invito a cercare carbone in miniere sempre più profonde. Quest'attività si estese anche al Continente. Lo sviluppo dell'economia creò successivamente la necessità di trasporti anche in zone montagnose, e obbligò a procedere allo scavo di gallerie o passaggi sotterranei. A titolo d'esempio, nel 1707 Pietro Moretti di Cerentino costruì il cosiddetto «Urilo» a valle di Andermatt, al posto del ponte di catene che da tempo dava un accesso alla Schöllenen e che aveva sostituito le antiche «Scalinate romane» sopra la montagna. Alcuni ritengono si tratti della prima galleria stradale in Europa se non al mondo. In ciò c'è forse una certa esagerazione. Era però certamente la prima galleria carrabile nel massiccio del San Gottardo. Un secolo più tardi ebbe inizio l'epoca delle ferrovie. Opere inimmaginabili fino ad allora vennero realizzate, così la galleria del Mont D'or, del Fréjus, del Gottardo, del Sempione e nel secolo successivo quelle del Lötschberg e degli Appennini. Durante lo stesso periodo si dava inizio e si portava a termine la costruzione delle metropolitane nelle grandi città europee. Poi vennero la Vereina e la Furka per citare solo alcuni esempi a noi più vicini. A quell'epoca anzi si parlò molto del cosiddetto Furka-Loch, nel senso però di buco finanziario, più che di traforo!

Circa un secolo dopo l'era storica delle gallerie ferroviarie, iniziò nei paesi sviluppati e anche da noi il periodo delle autostrade o Strade Nazionali con la costruzione di numerosissime gallerie, tra le quali quella tuttora incompiuta del San Gottardo, ad una sola canna. Essa rimane per ora con i suoi 17 km la galleria autostradale più lunga del mondo, e comunque l'unica di tal importanza e con tanto traffico a circolazione bi-direzionale.



15 - Gallerie greco-romane

Nei decenni appena passati, il ritorno al trasporto ferroviario riprende slancio con i treni ad alta velocità e con la costruzione della galleria sotto la Manica, di quella del Sekan in Giappone e più recentemente delle gallerie di base del Lötschberg e del San Gottardo ad opera di AlpTransit. Senza dimenticare numerose altre importanti gallerie ferroviarie in vari paesi europei. Nel contempo però molte migliaia di chilometri di gallerie erano state scavate nell'ambito della realizzazione di impianti idroelettrici, in particolare nelle Alpi. Con ciò, si costata un'accumulazione impressionante di opere sotterranee in certe zone, come nel massiccio del San Gottardo (fig. 16).

#### *Progressi della tecnica*

Il recente enorme sviluppo delle costruzioni sotterranee è stato reso possibile da un importantissimo progresso o sviluppo della tecnica di costruzione, che si è tradotto in un continuo aumento della produttività e dunque in una radicale diminuzione dei costi reali. Questo sviluppo – come in tutti gli altri campi della tecnica o delle scienze – non è stato né continuo né regolare, ma si è prodotto a salti più o meno importanti, a dipendenza di singole invenzioni o innovazioni, che dir si voglia, e a volte anche di rivoluzioni. Così, dal tempo degli antichi egizi poco era cambiato in questo campo fino alla messa a punto nel XIV secolo della polvere nera da parte del monaco Berthold Schwarz. Non è chiaro se il nome viene dal colore o dall'inventore! In realtà si trattava di una riscoperta che la polvere nera era nota ai cinesi già molti secoli prima.

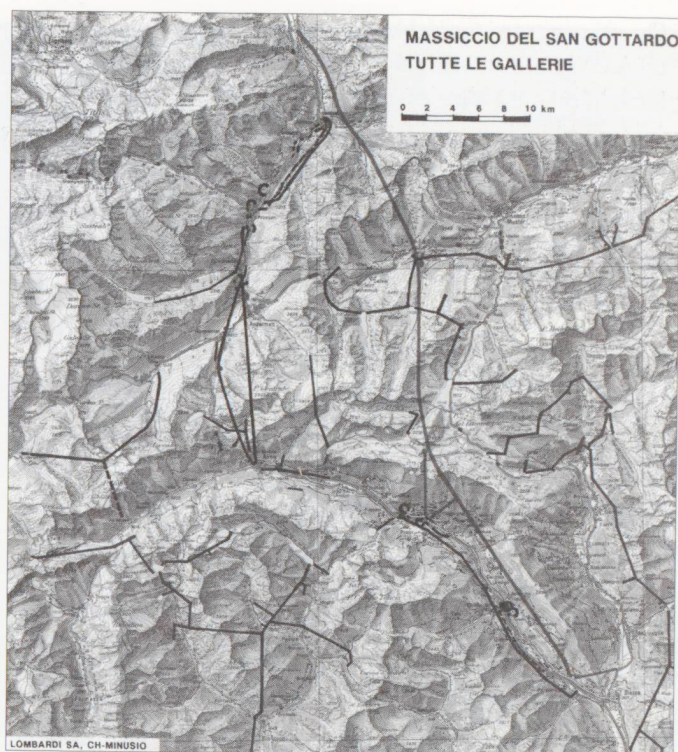


Fabbricato a partire da carbone, zolfo e salnitro questo esplosivo venne dapprima utilizzato in modo assai poco efficiente per demolire la roccia. Stranamente si dovette aspettare quasi 300 anni prima che venisse introdotto compatto in perforazioni e ivi bloccato. Questa procedura ovviamente ne moltiplicò l'efficacia in enormi proporzioni.

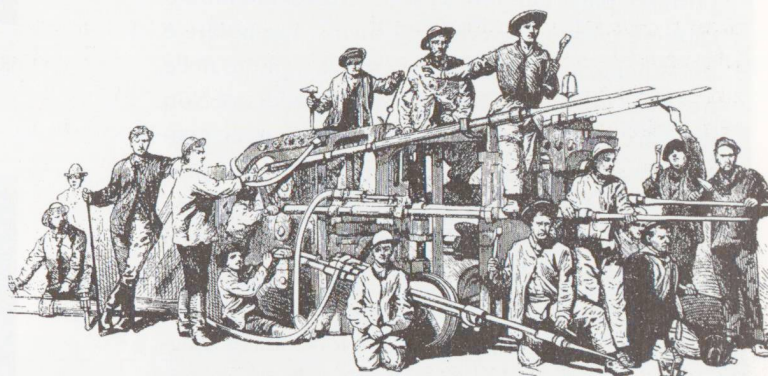
Inizialmente detti fori venivano realizzati a mano «con punta e martello» e notevole dispendio di tempo e ciò di regola fino a metà del XIX secolo. Successivamente furono inventati i martelli meccanici azionati da acqua e poi da aria compressa, secondo l'idea dell'ing. Collandon. I martelli furono montati in seguito su carrelli per il cantiere della galleria ferroviaria del San Gottardo (fig. 17). Ma la meccanizzazione non si fermò lì e macchine cosiddette Jumbo furono poi sviluppate, come ad esempio quelle usate per il San Gottardo stradale oltre un secolo più tardi (fig. 18).

Un ulteriore radicale progresso poté essere registrato quando nel 1866 la polvere nera fu sostituita dalla dinamite secondo i procedimenti messi a punto dal chimico svedese Alfredo Nobel. Ma già a quell'epoca si pensava alla costruzione di una scavatrice meccanica detta anche «fresatrice», e così nel 1880 l'ing. francese Beaumont presentò la sua idea intesa ovviamente per lo scavo di rocce assai tenere (fig. 19). Tuttavia, fu solo poco prima della metà del secolo successivo che queste macchine poterono essere costruite in modo da perforare anche rocce resistenti con diametri vieppiù importanti, passati con il tempo da poco meno di 3 m fino a 14 m e con strutture sempre più complete (fig. 20).

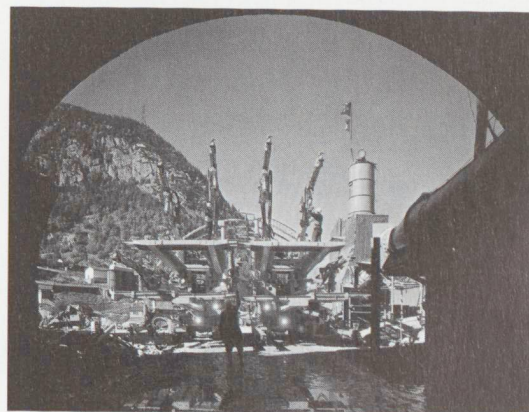
Come ognuno sa, le frese che stanno scavando la galleria di AlpTransit del San Gottardo formano, con le attrezzature connesse, un complesso meccanico di oltre 400 m di lunghezza e di ca. 3'000 t di peso. Si tratta di vere «fabbriche di gallerie» che lasciano dietro di sé un'opera, se non completamente terminata, almeno una cavità stabile e con platea agibile. Avanzamenti medi di 20 m per giorno sono concepibili. Rappresentano circa 3 volte quanto era stato raggiunto nello scavo della galleria stradale del San Gottardo circa 30 anni or sono. Ovviamente, parallelamente allo sviluppo dei mezzi di scavo, anche quelli dedicati allo smarino, alla messa in opera dei sostegni e al rivestimento definitivo delle cavità hanno subito grandi evoluzioni. Così, per quanto riguarda il sostegno, il classico imboscimento (fig. 21) è stato sostituito da centine metalliche, ancoraggi, calcestruzzo spruzzato armato da reti metalliche o fibre. Hanno fatto anche apparizione ancoraggi di vario tipo, metallici o di vetro-resina (fig. 22).



16 – Gallerie sul massiccio del S. Gottardo



17 – Carrello porta martelli (S. Gottardo ferroviario)



18 – Jumbo (S. Gottardo stradale)

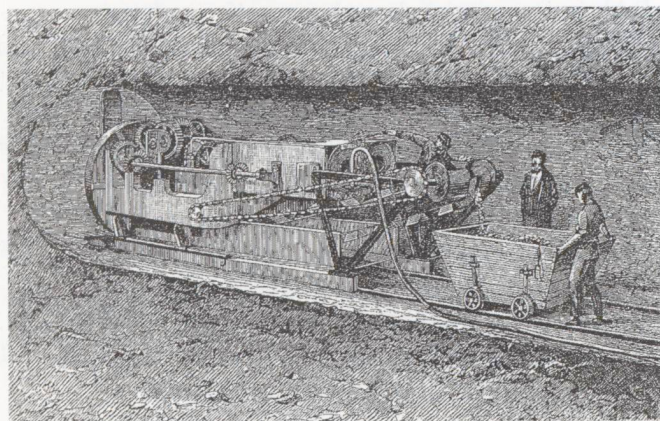


Questi progressi tecnici hanno aumentato radicalmente la produttività sui cantieri. Se nella galleria ferroviaria del Fréjus costruita tra il 1856 e 1870 ci volevano circa 200 ore lavorative per realizzare un m<sup>3</sup> di galleria scavata e rivestita, per il San Gottardo ferroviario dal 1872 al 1882, questo valore si era dimezzato e solo 100 ore erano richieste per lo stesso lavoro. L'enorme progresso era stato reso possibile da due fattori essenziali: l'introduzione dei martelli pneumatici per l'esecuzione dei fori e l'uso della dinamite.

Nel corso dei decenni successivi questo miglioramento è continuato, sicché per il Fréjus stradale costruito dal 1975 al 1979 ci vollero solo 5.2 ore ca., mentre la cifra scendeva a 5.0 ore per la galleria stradale del San Gottardo, realizzata dal 1969 al 1980. Attualmente si può forse calcolare con 4 ore o poco più per m<sup>3</sup> di galleria scavata in condizioni geotecniche favorevoli.

Ovviamente oltre a queste prestazioni dirette sul cantiere vi sono quelle necessarie alla finizione della galleria, alle installazioni elettromeccaniche e a molti ulteriori interventi che non erano usuali nel secolo precedente, ma che sono nel contempo diventati di regola. Va pure considerato che un'importante parte del lavoro eseguito inizialmente sul cantiere è stato trasferito in officina. Esempio è ovviamente la costruzione e la messa a punto delle fresatrici meccaniche di cui si è appena detto. Non dimeno, si può ritenere che, in termini reali, i costi delle opere sotterranee si sono ridotti nella proporzione da 20 a 1 nell'arco di un secolo e mezzo circa. Quest'importantissimo fattore fa sì che oggi sono realizzabili opere sotterranee nemmeno pensabili in precedenza, e ciò tanto per quanto concerne l'aspetto tecnico quanto, e forse ancor maggiormente, quello economico. Così le opere sotterranee di AlpTransit non sarebbero economicamente sopportabili – e certamente non giustificabili – se dovessero essere realizzate con i rendimenti di allora, ovvero con costi moltiplicati perlomeno per 20, se non di più. In tali condizioni le opere non potrebbero essere realizzate a causa dell'eccessivo, sproporzionato impegno economico che imporrebbero.

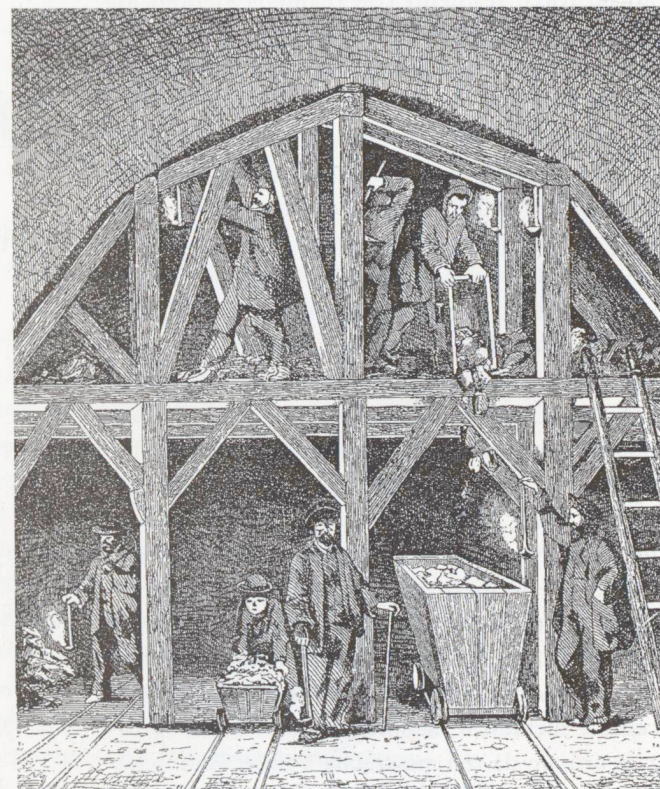
Un notevolissimo vantaggio dei nuovi metodi di costruzione è quello rappresentato dalla maggior sicurezza ottenuta sui cantieri. Il solo fatto che il numero delle persone contemporaneamente presenti in galleria si sia ridotto in enormi proporzioni, fa sì che anche i peggiori incidenti possano causare un numero di vittime radicalmente ridotto. Con l'introduzione delle frese meccaniche scudate la sicurezza sul lavoro è poi ulteriormente migliorata, vuoi per l'assenza di esplosivo, vuoi per la



19 – Fresa Beaumont



20 – Fresa moderna



21 – Imboschimento





22 – Caverna Gran Sasso



protezione che la struttura dello scudo offre contro la caduta di massi, vuoi per il fatto che il fronte di scavo è permanentemente sostenuto dalla spinta della macchina. Che misure igieniche e sanitarie adeguate abbiano infine permesso di migliorare radicalmente le condizioni del lavoro in sotterraneo rispetto a quelle, per esempio, delle gallerie del XIX secolo, è ben noto. Pensiamo solo alle vittime della galleria ferroviaria del Gottardo mietute a decine da diverse malattie. Il loro numero non è nemmeno noto con precisione. Tutto ciò non vuol dire evidentemente che il lavoro in galleria non richieda ancor oggi un permanente impegno e una prudenza sostenuta, ma i risultati ottenuti con detti sviluppi sono importantissimi e oltremodo significativi, anche se ulteriori migliorie rimangono concepibili.

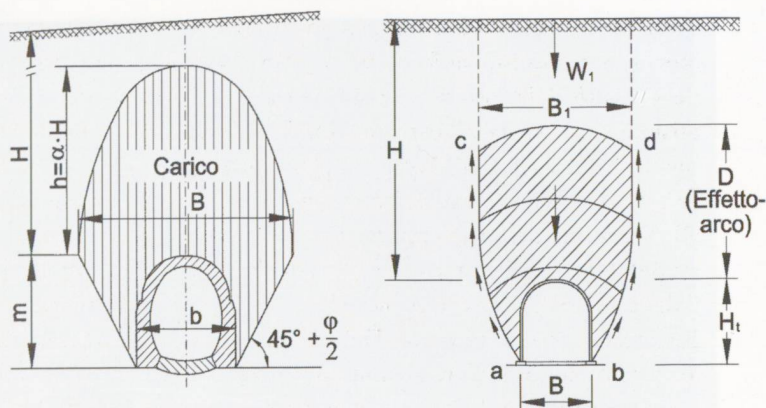
La continua evoluzione di cui si è detto e i notevoli progressi realizzati non tolgono che ogni nuova opera sotterranea non presenti problemi particolari, a volte sconosciuti o poco sperimentati. Così, la galleria di base del San Gottardo dovrà affrontare temperature della roccia assai più elevate di quanto constatato in tutte le altre opere realizzate attraverso le Alpi e ciò a causa della sua ben maggior profondità rispetto alla superficie del terreno. La ricerca della massima sicurezza possibile non si limita agli addetti ai lavori, ma si estende anche a quella dei futuri utenti dell'opera. Si tratta tuttavia di un vasto argomento che esula dal tema di questa esposizione.

#### *Sviluppo dei metodi di progettazione*

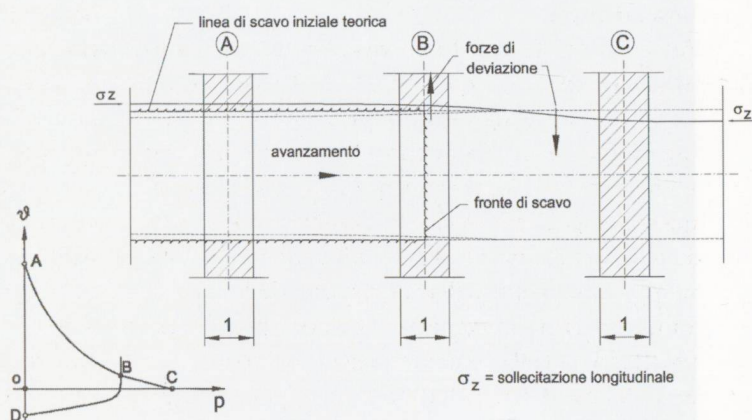
Durante il secolo passato, ma specialmente durante gli ultimi decenni, anche i metodi di progettazione delle opere sotterranee sono radicalmente cambiati. Più recentemente l'introduzione dell'informatica e del calcolo numerico ha avuto un grosso impatto, a volte perfino determinante, nella comprensione dei problemi in gioco. Non è così lontano il tempo in cui i sostegni detti provvisori venivano definiti empiricamente senza alcuna analisi matematica.

Se ci limitiamo, al calcolo del sostegno definitivo di una cavità sotterranea, possiamo notare che nei primi decenni del secolo scorso il rivestimento di calcestruzzo o di muratura della cavità veniva dimensionato come una semplice struttura portante sottoposta a dei carichi verticali valutati secondo formule assai semplici (fig. 23). Queste formule sono oggi interamente superate, benché alcune di esse siano state sviluppate e messe a punto da illustri maestri come da Terzaghi.

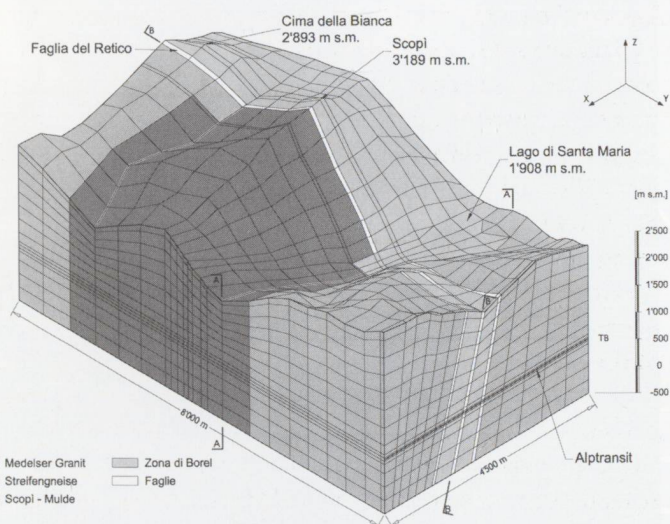
L'introduzione del concetto delle linee caratteristiche ha successivamente creato le basi per una vi-



23 - Ipotesi storiche di calcolo



24 - Equilibrio al fronte (3D)



25 - Assestamento per drenaggio



sione più ampia del problema intrinsecamente iper- e non più iso-statico e ha permesso di rendersi conto della relazione d'influenza reciproca esistente tra cavità e sostegno durante l'avanzamento dello scavo. È dunque ora possibile scegliere tra vari sostegni quelli che meglio si addicono alla soluzione del problema, tanto dal punto di vista della sicurezza quanto da quello dell'economia o della semplicità di costruzione.

Per inciso, incontriamo un'ulteriore quasi-iperbole; quella che regge la relazione tra la deformazione di convergenza della cavità e la pressione o forza di sostegno (fig. 24).

Il professore e poeta Francesco Chiesa si troverebbe certamente a suo agio, lui che definiva questo paese quello dell'iperbole! Ma forse lui pensava ad altro!

Anche in questo ambito, come in svariati altri campi della tecnica, gli Elementi Finiti hanno fatto il loro fracassante ingresso; dapprima nel caso bi-dimensionale e poi in quello tri-dimensionale; sarebbe troppo dispersivo entrare nei dettagli di questa evoluzione. A titolo d'esempio menziono solo il modello di calcolo FES utilizzato per valutare gli assestamenti della fondazione della diga di Santa Maria sul Lucomagno che potrebbero essere causati dall'effetto di drenaggio dovuto alla galleria di base del San Gottardo (fig. 25) al quale già si è accennato.

Se è vero che anche in questo campo la potenza dei mezzi di calcolo ora disponibili ha dato risultati chiaramente positivi, è purtroppo anche vero che spesso volte è stato perso di vista un giusto equilibrio tra l'impegno di calcolo richiesto e il risultato ovviamente solo approssimativo che può essere ottenuto, a causa delle inevitabili incertezze esistenti su tanti elementi e parametri di base, ma pure a seguito di procedure di costruzione che non permettono sempre di ottenere una perfetta concordanza tra progetto teorico allestito a priori e opera eseguita. Dette incertezze sono legate ovviamente alle limitate disponibilità di indagine per opere tanto estese e a così grande profondità sotto la superficie.

#### *Un esempio*

Dopo aver parlato di tecniche che permettono di realizzare, con costi relativamente ridotti e con velocità di scavo elevatissime, gallerie di grande lunghezza in massicci rocciosi anche molto resistenti, occorre segnalare che esistono pur sempre altri casi dove ci si trova a dover affrontare condizioni di scavo parecchio più complesse. Così ad esempio quando si devono attraversare masse di detriti di falda assai eterogenee, poco stabili e comportanti

notevoli vuoti naturali, nonché situazioni di chiara dissimetria geometrica. Simili condizioni si erano presentate e furono risolte a suo tempo al portale di Göschenen della galleria stradale del San Gottardo, quando fu attraversata la discarica dei materiali di scavo della precedente galleria ferroviaria.

Attualmente sono in corso due importanti opere di questa natura: la prima concerne l'attraversamento della voluminosa «Ganna di Bodio» ossia dell'imponente massa di detriti di falda al portale Sud del AlpTransit (fig. 26), e l'altra in un notevole tratto della galleria di Kirchenwald sul lago di Lucerna. A Bodio il procedimento di scavo consiste nell'iniettare la zona da scavare e nell'eseguire lungo la periferia della calotta un infilaggio di tubi metallici poi iniettati. Il fronte di scavo deve anche lui essere assicurato con un elevato numero di ancoraggi di vetro-resina (fig. 27). Lo scavo avviene in due fasi: la calotta dapprima, l'abbassamento in seguito. Gli enormi blocchi di roccia frammisti a materiale fine in presenza di vuoti a volte consistenti, creano condizioni di avanzamento assai difficili, che sono però state finora magistralmente superate grazie ad un particolare impegno da parte di tutti i partecipanti: committente, progettisti, direzione lavori e impresa. L'avanzamento è stato dell'ordine di 1 m al giorno per ognuna delle due canne. Il traforo della prima canna ha avuto luogo recentemente. Un'intelligente ottimizzazione del progetto e una curata esecuzione hanno realmente dato ottimi risultati. La definizione giornaliera delle misure da prendersi, oltre al seguimiento in tempo reale dei lavori, ha assicurato una perfetta esecuzione entro i termini e i costi preventivati. Ovviamente, condizioni di questo tipo richiedono un serio e a volte pesante impegno personale di tutti i partecipanti, dato il limitato grado di meccanizzazione e di automatizzazione che può essere raggiunto.

#### *C. Futuri sviluppi*

Si pone ora la domanda a sapere quali sviluppi tecnici sono prevedibili o auspicabili nel campo della geo-ingegneria.

#### *Monitoraggio*

Un aspetto essenziale nella costruzione, manutenzione e sorveglianza delle grandi opere è quello del monitoraggio. La problematica concerne tanto la stabilità dei pendii, le opere idrauliche e le dighe, quanto le opere sotterranee.

L'importanza del monitoraggio non si limita però alle opere di geo-ingegneria, ma concerne ogni tipo di struttura come ponti ed edifici.



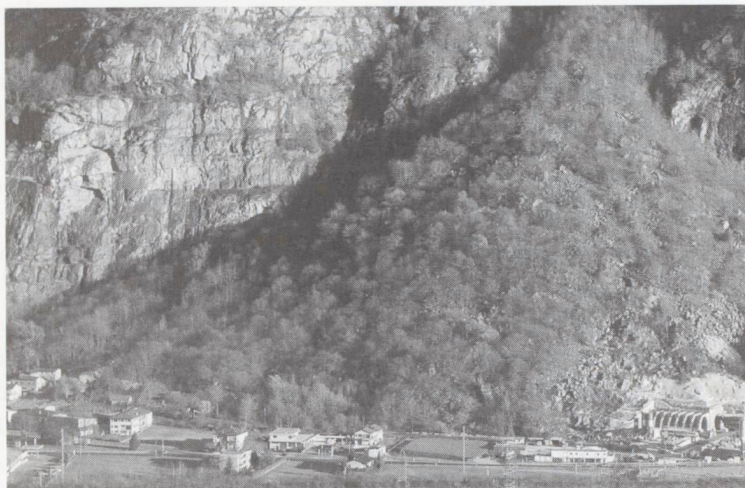
Notevoli sforzi in questo campo sono stati portati a termine e hanno condotto, ad esempio, al metodo del «Modello Interpretativo Combinato» detto anche MIC, in uso per il controllo permanente di un certo numero di dighe in Svizzera e all'estero. Esso parte da una modellazione deterministica allestita a priori, e procede poi a un affinamento statistico basato sul comportamento reale dell'opera nel corso degli anni.

Per quanto concerne la procedura di costruzione di gallerie, sono in fase di applicazione sui cantieri della galleria di base del Lötschberg e in fase di installazione su quelli del San Gottardo programmi di rilevamento dei dettagli geologici e costruttivi con lo scopo di creare una banca dati completa dell'opera che permetta proiezioni continue allo scopo di ottimizzare il processo di costruzione e di valutare in ogni momento l'evoluzione dei tempi e dei costi. Inoltre tutti i dati saranno sempre a disposizione per ogni eventuale futuro intervento sull'opera. Queste procedure passano sotto il nome di SISO, ovvero di «Sistema Informatico per il Seguito delle Opere». Monitoraggi di questo tipo permettono un controllo serio e reale del comportamento delle opere, nonché una precisa valutazione del loro stato di conservazione e sicurezza durante tutta la vita utile.

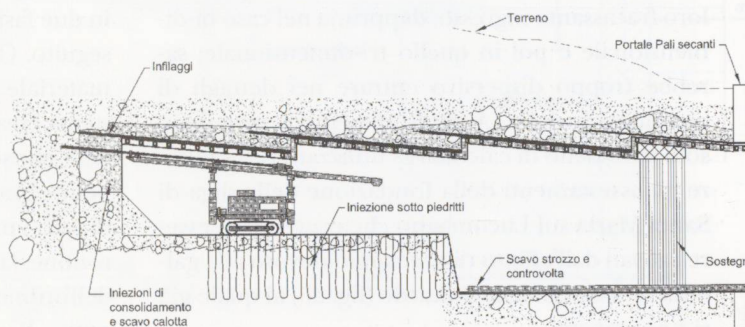
Anche se i sistemi di monitoraggio menzionati forniscono ottimi risultati, è nondimeno ovvio che potranno e dovranno essere perfezionati e completati in avvenire sotto diversi aspetti, allo scopo di aumentarne ancora l'affidabilità e la polivalenza. Inoltre v'è da pensare che nuovi strumenti di misura più precisi e automatici o di nuovo tipo potranno essere introdotti in diversi campi della geotecnica.

#### *Tecnica costruttiva*

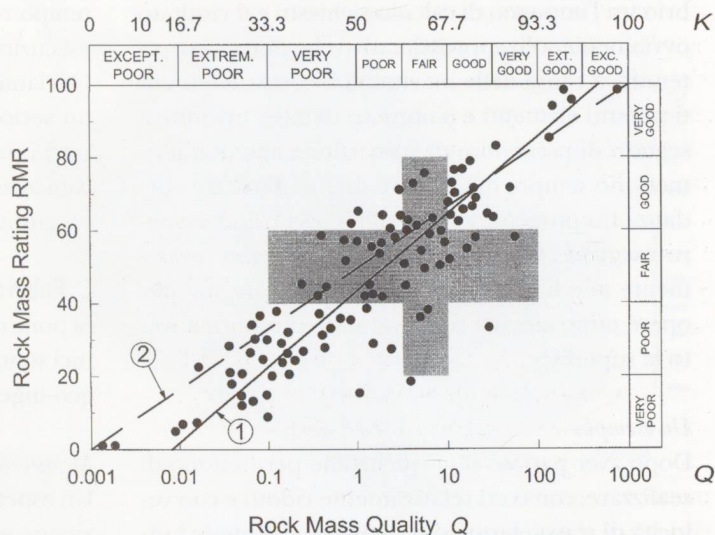
Potrebbe sembrare, da quanto detto finora, che sia stato raggiunto un livello definitivo nella tecnica di costruzione di gallerie ed opere sotterranee in genere, ma ciò certamente non è. Vari sviluppi sono possibili e chiaramente auspicabili. Richiedono ricerche e studi notevoli, tanto sul piano della geologia e della geofisica, quanto su quello dell'ingegneria. Malgrado la qualità raggiunta dalle tecniche geognostiche, applicabili ai terreni e ai massicci rocciosi, rimangono sempre numerose incognite. V'è dunque una precisa necessità di migliorare e potenziare questi metodi di indagine oltre alle attrezzature corrispondenti onde poter meglio precisare la natura e le caratteristiche delle zone da attraversare, e ciò tanto in modo globale – al momento della pianificazione e progettazione – quanto in modo più locale – immediatamente davanti



26 – Ganna di Bodio



27 – Galleria a Bodio



28 – Classificazione rocce



al fronte di scavo – al momento dell'esecuzione. Per altro verso, si fa ricorso da tempo a diversi metodi di classificazione delle rocce con lo scopo di creare basi comuni alla progettazione, costruzione e contabilità delle opere. Sono metodi più o meno empirici che si basano su alcuni dati geometrici e pochi parametri meccanici. Purtroppo la classificazione della roccia da «pessima» a «eccellente» avviene in modo assai differente, a seconda degli autori (fig. 28). Inoltre, il concetto stesso di qualità non ha un significato intrinseco, ma dipende dal metodo di scavo e di realizzazione scelto per la costruzione.

Un esempio assai interessante a questo proposito è quello delle gallerie idrauliche di scarico della centrale di Manapouri al Sud della Nuova Zelanda, dove a 15 anni di distanza due gallerie di 10 km di lunghezza e di 10 m di diametro, sono state realizzate: l'una con i metodi tradizionali e la seconda con l'ausilio di una fresa meccanica di tipo moderno. lato pratico la stessa roccia è risultata classificabile in modo molto diverso dall'una all'altra galleria. Nella seconda galleria sono sorti problemi non individuati né individuabili durante la costruzione della prima.

S'intende dunque che nel campo della definizione della qualità della roccia, la quale spesso volte serve anche a definire il prezzo dello scavo e del sostegno, sono indispensabili ulteriori e approfonditi studi e sostanziali miglioramenti. Progressi dovranno essere fatti anche per superare con le frese più facilmente zone di rocce a caratteristiche variabili, dato che le migliori delle macchine tutt'oggi esistenti sono state concepite e costruite in funzione di ben definite proprietà del massiccio roccioso. In realtà queste proprietà finiscono per non essere così costanti e uniformi come si presume generalmente in fase di progettazione, non potendo far meglio.

L'allestimento di correlazioni valide tra le caratteristiche di fessurazione del massiccio roccioso e la sua permeabilità merita indubbiamente ancora notevole impegno di ricerca e studio. Ma perfino una migliore comprensione tra i diversi addetti ai lavori, ovvero la formulazione di un linguaggio comune a geologi, ingegneri e specialisti di vario tipo, nonché ai realizzatori dell'opera sarebbe altamente auspicabile, dato che anche il più perfetto sistema di classificazione della roccia non può supplire a una mancanza di comprensione tra le persone interessate.

#### Ricerca e sviluppo

Durante questa presentazione ho segnalato alcuni sviluppi teorici ed alcuni perfezionamenti tecnici.

È stato possibile portarli a maturazione all'occasione della progettazione e la costruzione di grandi opere di geo-ingegneria solo grazie all'apertura di mente e alla disponibilità dei relativi commitenti. Mi è dunque doveroso ringraziarli di cuore per averci ritenuti degni della loro fiducia e con loro ringrazio tutti i collaboratori che hanno contribuito alla riuscita di questi progetti e delle innovazioni menzionate. Ci si può solo augurare che questa apertura di spirito continui a manifestarsi in futuro, malgrado gli attuali chiari segni di chiusura che trovano la loro giustificazione formale in certe recenti disposizioni legali.

#### Formazione

In quest'ordine di idee e di fronte al notevole volume di lavoro d'ingegneria civile prevedibile in futuro non solo per nuove costruzioni, ma ancor maggiormente per la manutenzione e la riparazione o trasformazione di opere esistenti, è estremamente auspicabile che gli studi nel campo del genio civile possano attrarre un numero maggiore di giovani e che parallelamente i mezzi necessari per la ricerca e l'insegnamento in questo campo vengano sostanzialmente potenziati e certamente non ridotti, come si propone da varie parti con intenti a volte abbastanza intuibili.

È con ciò senza dubbio altamente desiderabile che anche la SUPSI possa contribuire a questi sforzi, offrendo una solida formazione polivalente a coloro che si sentono attratti dall'affascinante mondo del genio civile e dai suoi vari aspetti, di cui ho toccato di striscio uno solo: quello della geo-ingegneria.