

IL CONTROLLO CON METODI GEODETICI DELLE DIGHE DELL'ENTE AUTONOMO DEL FLUMENDOSA

Prof. RENATO TRUDU
dell'Università degli Studi di Cagliari

*Comunicazione presentata al IX Convegno nazionale della S.I.F.E.T.
Cagliari, maggio 1964*

1. *Introduzione.*

Le opere di sbarramento dell'Ente Autonomo del Flumendosa, trascurando le minori, consistono attualmente in due dighe poste, la prima sul fiume Flumendosa e la seconda sul rio Mulargia. Esse costituiscono gli elementi basilari dei piani dell'Ente che, utilizzando un invaso di 600 milioni di mc d'acqua, comportano: l'approvvigionamento di acqua potabile per Cagliari, ed altri 36 comuni per un complesso di 300 000 abitanti; la produzione di energia elettrica per un ammontare di 80 milioni di kwh nell'anno medio; e la irrigazione di oltre 100 000 ha nella pianura del Campidano, motivo di una imponente opera di trasformazione agraria.

La terza categoria molto spesso è stata effettuata con operazioni a terra ma non sono mancati i casi in cui si è ricorsi all'aerofotogrammetria.

È del tipo ad arco-gravità, e perfettamente simmetrica; alta 119 m, spessa da 3,77 a 6,64 al sommo e 30 m alla base, il suo sviluppo al coronamento è di 253 m. A curvatura variabile con l'altezza — raggio dello estradosso da 141 m in cima a 75 al pulvino — l'opera ha richiesto l'impiego di 320 000 mc di calcestruzzo. Nel suo corpo sono cunicoli e pozzi per le ispezioni e la sistemazione degli strumenti di controllo. Il bacino imbrifero di alimentazione, tolti i 180 distratti al servizio degli impianti idroelettrici dell'Alto Flumendosa, è di 580 kmq, ed il serbatoio che risulta dallo sbarramento ha una capacità di 317 milioni di mc, con superficie dell'acqua, a massimo invaso utile, a 267 m s.l.m.

La diga sul Mulargia è posta sul torrente omonimo, affluente del Flumendosa, alla stretta di M.te su Rei. Questa ha circa le stesse caratteristiche della precedente: impostata sul pulvino portato da porfiriti siluriane compatte e cristalline è di tipo arco-gravità, perfettamente simmetrica. La sua altezza è di 99 m, il suo spessore di 5 m in cresta e 30,8 alla base, il suo sviluppo in coronamento di 234 m. Il raggio dell'estradosso varia da 150 m al sommo a 109 m al contatto col pulvino e nella costruzione sono stati impiegati 240 000 mc di calcestruzzo. Anche questa diga è servita da cunicoli, collegati con pozzetti, nei quali sono sistemati gli strumenti di controllo. Il bacino imbrifero interessante direttamente questo sbarramento — 172 kmq — è nettamente inferiore a quello del Flumendosa ma la capacità del lago è di 334 milioni di mc con superficie libera utile a 258 m s.l.m.: una galleria di raccordo — lunga 6 km e di 4 m di diametro — consente il travaso dell'acqua dal bacino del Flumendosa in questo, dal quale si dipartono le prese principali.

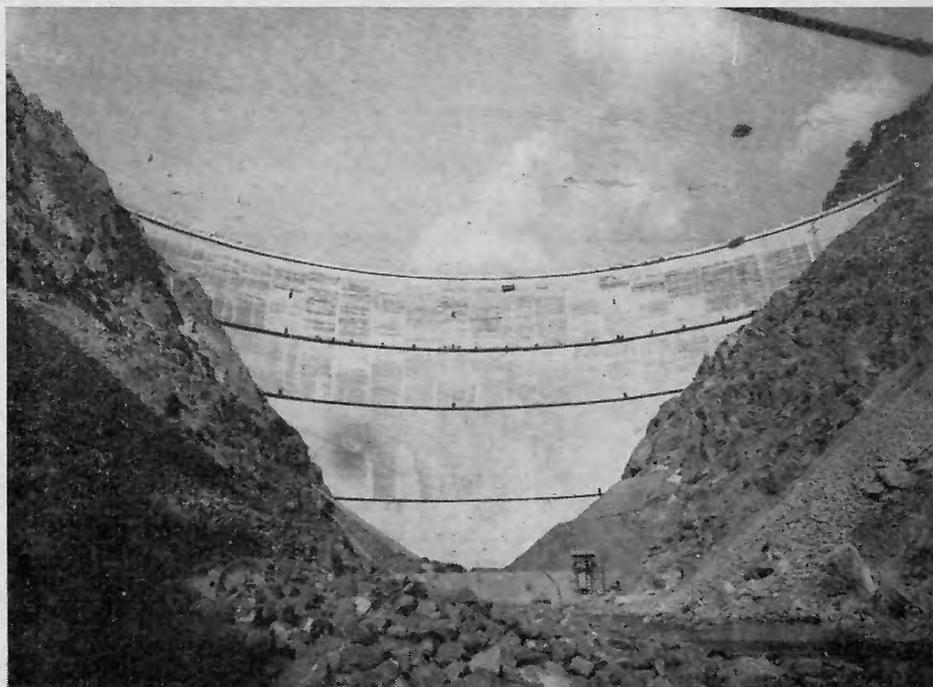


Fig. 1 - Diga sul Flumendosa.

La mole e le caratteristiche costruttive delle due opere di sbarramento hanno consigliato la integrazione delle osservazioni di controllo già sistemate nelle dighe — collimatori, pendoli, estensimetri, termometri, etc. — con altre che, di modalità e precisione di tipo geodetico e rilevamento periodico, consentissero di seguire sistematicamente gli spostamenti dei manufatti e del terreno più direttamente interessato dalle opere e dal bacino.

2. *Il piano delle osservazioni.*

Le osservazioni di carattere geodetico sulle dighe EAF sono state programmate in armonia ai criteri normativi dettati dal Sottocomitato misure del Comitato Italiano della Commissione Internazionale delle Grandi Dighe e prevedono misure planimetriche ed altimetriche di precisione. In relazione alle esigenze — osservazioni di punti del coronamento e del paramento di valle della diga e di punti in roccia alle imposte a monte ed a valle nei dintorni dello sbarramento — ed alla morfologia dei luoghi — gole strette e profonde di non facile praticabilità — il piano del rilevamento è stato articolato in una rete alta fondamentale, una bassa — di diga —, ed una linea di livellazione ramificata. Le osservazioni sono eseguite, attualmente, con cadenza semestrale (primaverile ed autunnale), integrate da misure parziali.

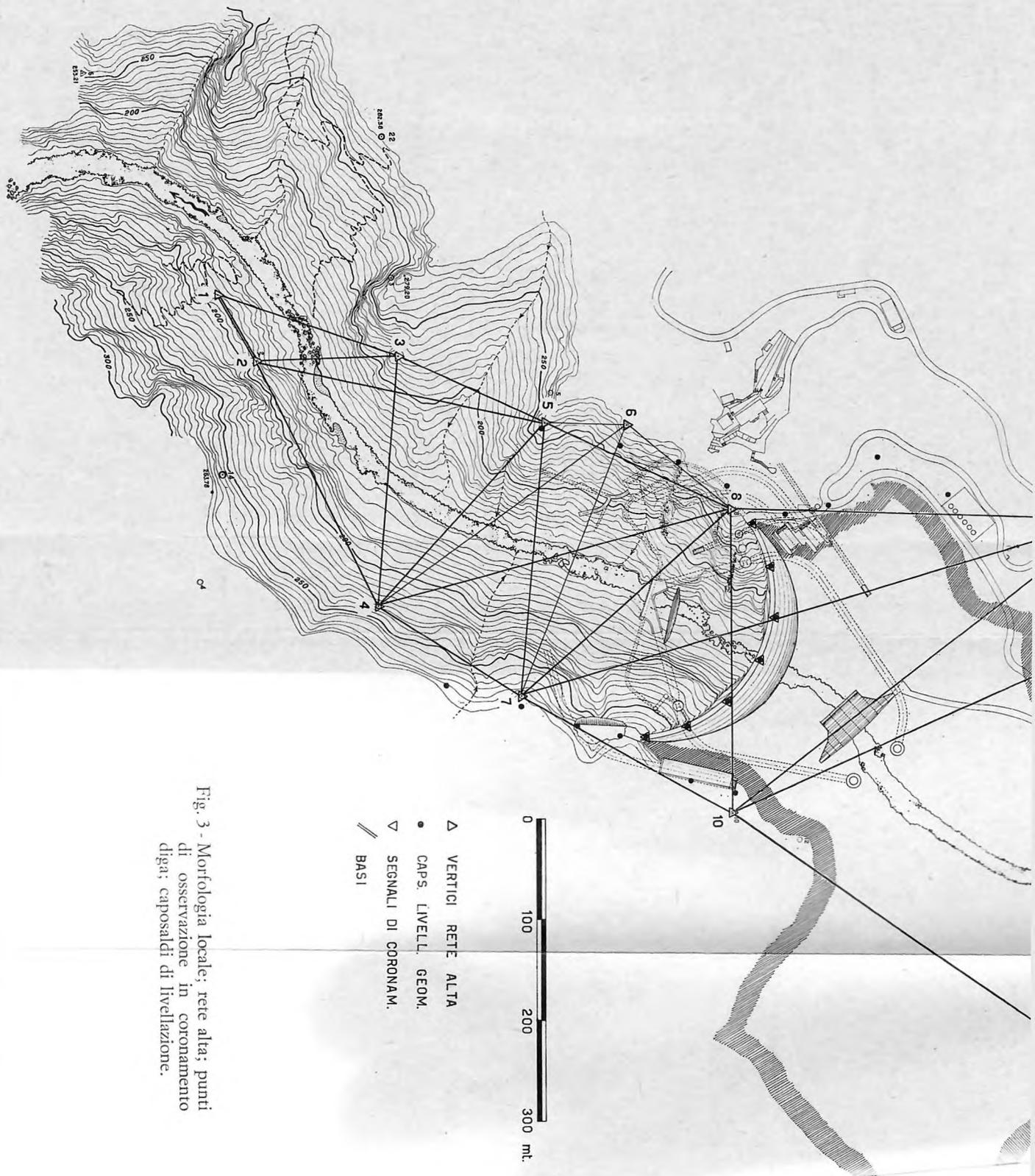


Fig. 3 - Morfologia locale; rete alta; punti di osservazione in coronamento diga; caposaldi di livellazione.

- △ VERTICI RETE ALTA
- CAPS. LIVELL. GEOM.
- ▽ SEGNALI DI CORONAM.
- /// BASI

0 100 200 300 mt.

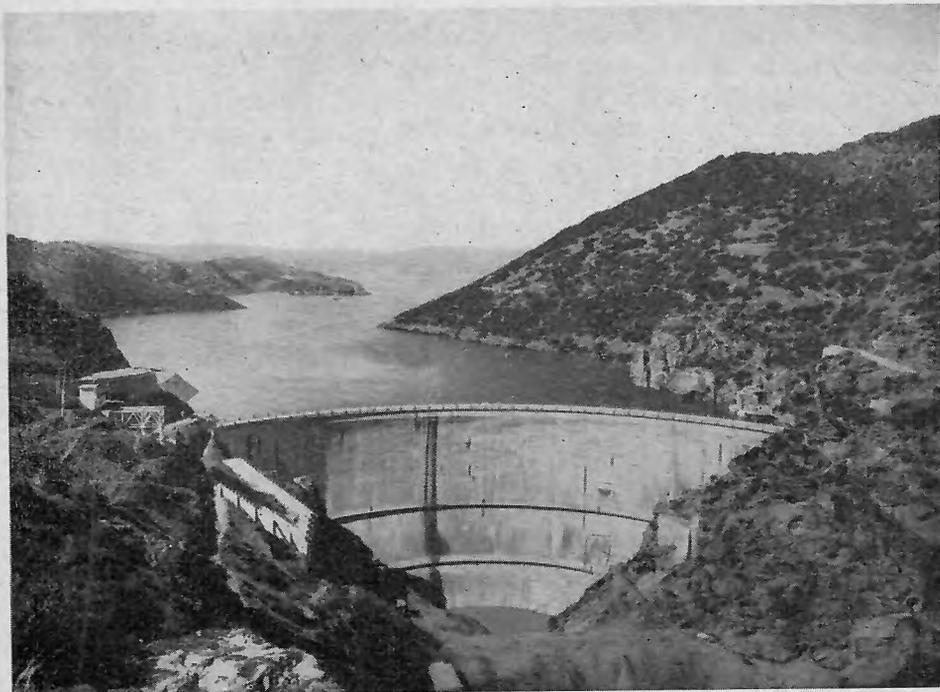


Fig. 2 - Diga sul Mulargia e lago.

Poiché impianto, struttura, metodologia operativa ed elaborazione dei dati si ripetono quasi assolutamente nei due bacini, verranno prevalentemente trattate, nel seguito, le opere attinenti alla diga del Flumendosa; ma le cose dette valgono, convenientemente adattate, anche per la situazione Mulargia.

2.1. *La rete alta.*

La rete alta che serve la diga del Flumendosa si componeva originalmente di 15 vertici ugualmente distribuiti sulle due sponde, ubicati con la migliore regolarità compatibilmente con i luoghi impervi e la visibilità. Essa, con una larghezza che varia da 130 a 600 m, si distende secondo l'asse della gola per circa 1100 m da valle a monte della diga, crescendo monotonamente in quota da 234 m a 305 e passando circa 10 m sopra la costruzione. La rete, si apre e si chiude su due basi lunghe 72 m quella di valle e 144 m quella di monte.

I vertici sono materializzati con pilastri in cemento armato a sezione quadra di 40 cm di lato ed altri 80 cm, fondati direttamente su roccia sana, e serviti da una piattaforma indipendente ad uso dell'operatore. In testa portano la piastra per il centramento forzato dello strumento goniometrico e delle mire. I pilastri non sono isolati termicamente: ma considerazioni elementari sulla influenza della temperatura ha portato a concludere sulla inutilità di questa precauzione nel presente ambiente di lavoro¹. Il motivo di errore non è stato però sottovalutato,

ed in fase di misura i pilastri sia di stazione che di mira vengono protetti dalla luce solare diretta mediante ombrelloni, posti in loco molte ore prima dell'inizio delle operazioni.

La rete alta è stata, in passato, osservata due volte, ma discontinuamente nel dic./gen. 1958/59 e marzo 1960, limitatamente alla sua planimetria, e con diversa connessione dei vertici nelle due occasioni: nella prima osservando tutte le visuali possibili, nella seconda rilegando semplicemente i vertici con una catena di triangoli distesa fra le due basi; con evidente eccesso di misure nel primo caso — ed un sistema di condizione di 30 equazioni — e difetto di elementi irridenti nel secondo.

Con l'inizio del 1963 la rete è stata reimpostata secondo lo schema mostrato in figura (v. fig. 3), declassando taluni vertici per conservarne soltanto 11 e conformandola come catena di 4 quadrilateri completi iniziata a valle con un triangolo. La rete assunta, composta con figure di buona conformazione compatibilmente con la natura dei luoghi, comporta un sistema di condizione di 18 equazioni, di cui 13 agli angoli, 4 ai lati ed una alle basi. Essa si completa con il vertice n. 6 che, unitamente al 7 forma una base di osservazioni della diga molto bene orientata: detto vertice è stato appoggiato ai 4 vertici del 1° ordine vicini con compensazione indipendente delle osservazioni.

Per l'orientamento della rete è stato stabilito un segnale, distante circa 2,5 km sulla cima del M.te Nieddu bene osservabile dalla massima parte dei vertici: esso è stato collimato, insieme alle direzioni più significative del giro di orizzonte, nei punti 2, 8, 14 di buona stabilità e bene distribuiti lungo la rete. Il vertice 2, molto bene fondato su roccia viva e compatta, a valle della diga e distante da essa 570 m, e perciò presumibilmente fuori della zona più interessata dallo sbarramento, è stato assunto come origine, e la direzione di M.te Nieddu, circa orientata secondo la gola, come asse delle ascisse (v. fig. 4).

2.2. La rete bassa.

La rete bassa o di diga è formata da una catena di 2 quadrilateri completi appoggiati, nelle basi estreme, alla rete superiore. Essa istituisce 4 nuovi vertici, squotati mediamente di 30 m sulla rete alta e di poco meno sul coronamento, e che risultano circa alla altezza della passerella centrale della diga (v. fig. 5).

¹ Lo spostamento orizzontale e della faccia superiore del pilastro, può essere valutato, nel suo limite superiore con la

$$e = \int_0^h x \cdot \frac{\alpha \cdot \Delta t}{l} \cdot dx = \frac{\alpha \cdot h^2 \cdot \Delta t}{2 l}$$

in cui α = coeff. di dilat. lineare del cemento, h = altezza del pilastro, l = larghezza del pilastro, t = diff. di temperatura fra le facce verticali opposte. Nel caso specifico ($h = 0,8$ m; $l = 0,4$ m), e per $t = 10$ °C, e può raggiungere i 0,1 mm. Per il lato più corto della rete, e per la combinazione peggiore degli effetti nei pilastri di stazione ed in collimazione, questa causa può portare errori sino ad oltre 1°, niente affatto trascurabili se questo risultato non fosse il limite massimo, calcolato nelle condizioni peggiori e per differenza di temperatura fra le facce opposte notevolmente alta. Resta comunque dimostrata la necessità di evitare squilibri accentuati nella temperatura di parti diverse del pilastro.

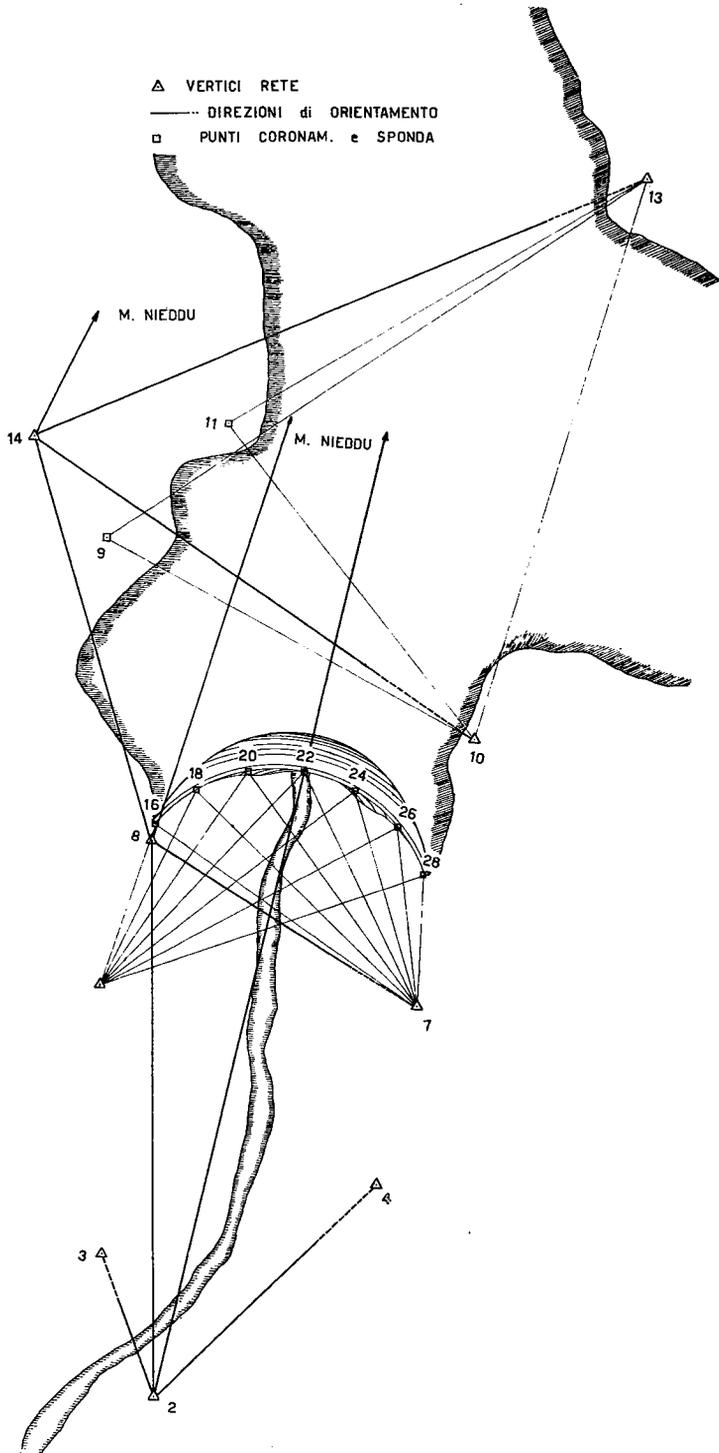


Fig. 4 - Direzioni di orientamento rete alta; e punti, in coronamento diga e sponde, osservati con triangolazione.

2.3. *I punti in osservazione.*

I punti in osservazione sono 7 sul coronamento della diga, 1 ogni 4 conci, 14 sul paramento di valle, distribuiti su 3 file per le quote 245, 225, 193 e negli stessi conci segnalizzati in corona, 8 sulle spalle circa alle stesse quote, in prossimità del pulvino pochi metri a valle ed, infine, 3, nei pressi della sponda del lago, non distante dalla chiusa, già vertici della rete, ora declassati (v. figg. 6 e 4).

I punti di coronamento, come gli ultimi 3 citati, sono materializzati con piastrini atti alla stazione e sono rilevati dalla rete alta con operazioni di triangolazione; quelli di paramento, ed in roccia, sono segnalizzati con piastrine circolari con bottone centrale semisferico bianco su fondo nero e sono osservati con modalità di intersezione multipla, — 7 con tripla, 8 con quadrupla, 3 con quintupla, 4 con sestupla — dai vertici della rete inferiore, integrati, quando il caso, da quelli superiori.

2.4. *Le misure altimetriche.*

Le misure altimetriche sono state condotte con livellazioni geometriche e trigonometriche.

2.4.1. *Le linee di livellazione geometrica.*

Le linee di livellazione geometrica, passando sul coronamento — 7 caposaldi in corrispondenza dei punti trigonometrici — si diramano poi per circa 200 m a monte — 4 cps in sponda D e 2 in sponda S — ed a valle — 4 cps in sponda D ed altrettanti in sponda S — della diga. I caposaldi terminali di valle, possono essere ritenuti sufficientemente stabiliti per costituire elementi fissi di riferimento, sia per la loro fondazione in roccia di ottime caratteristiche, sia per la loro distanza dalle opere di chiusa; e la disponibilità di punti geometrici di tali caratteristiche su entrambe le sponde, costituisce ulteriore elemento di confronto e sicurezza. I caposaldi finali in sponda destra coincidono, infine con vertici delle triangolazioni.

I segnali, in bronzo marino di 12 mm di diametro a testa semisferica, sono cementati in pozzetti a chiusino.

Di non modesto impegno sono stati i lavori eseguiti per ricavare nei luoghi impervi itinerari utili per l'esecuzione della livellazione.

2.4.2. *La livellazione trigonometrica.*

La livellazione trigonometrica si sviluppa fra i vertici alti e bassi 43-7-6-11, ed i rami subordinati 43-46-6 e 43-45-7 allo scopo di quotare i punti 45, 46, 6, 7 dai quali vengono osservati, a scopo di livellazione, i punti di controllo di paramento e sulle spalle. I punti estremi della linea — vertici 43 e 11 — appartenen-

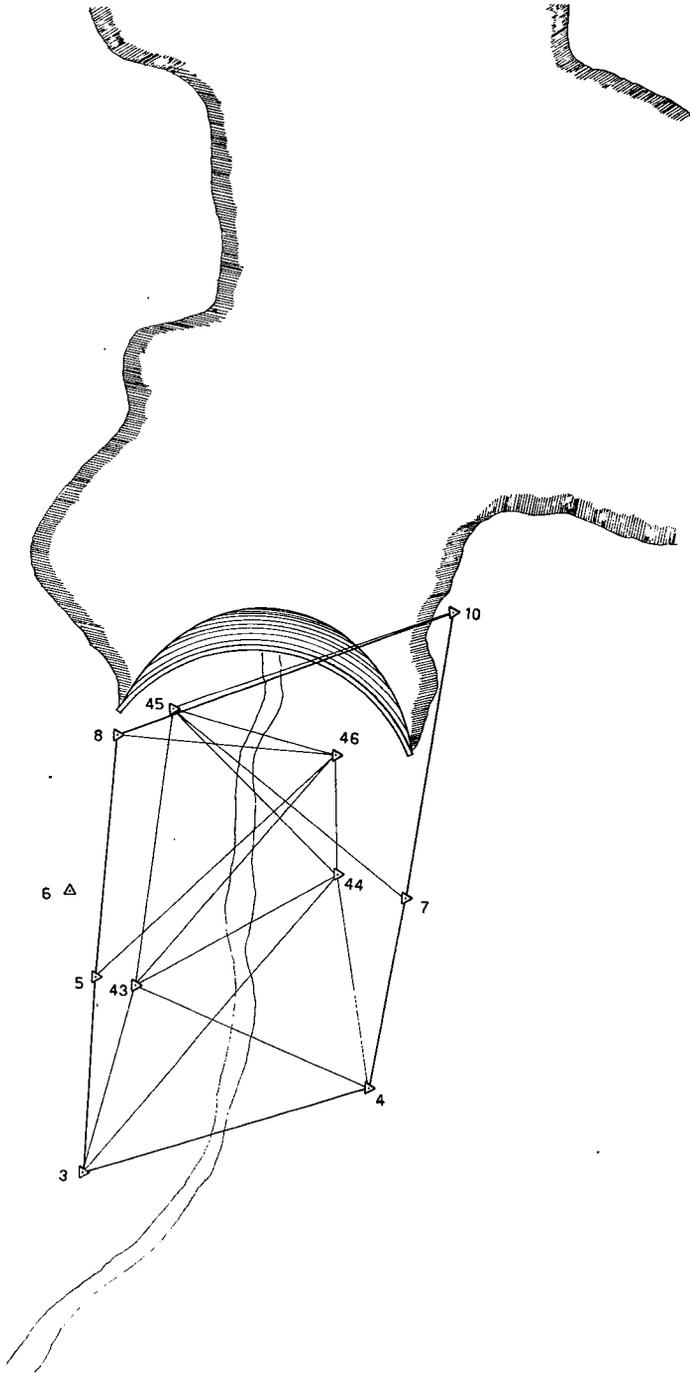


Fig. 5 - Rete bassa, « di diga ».

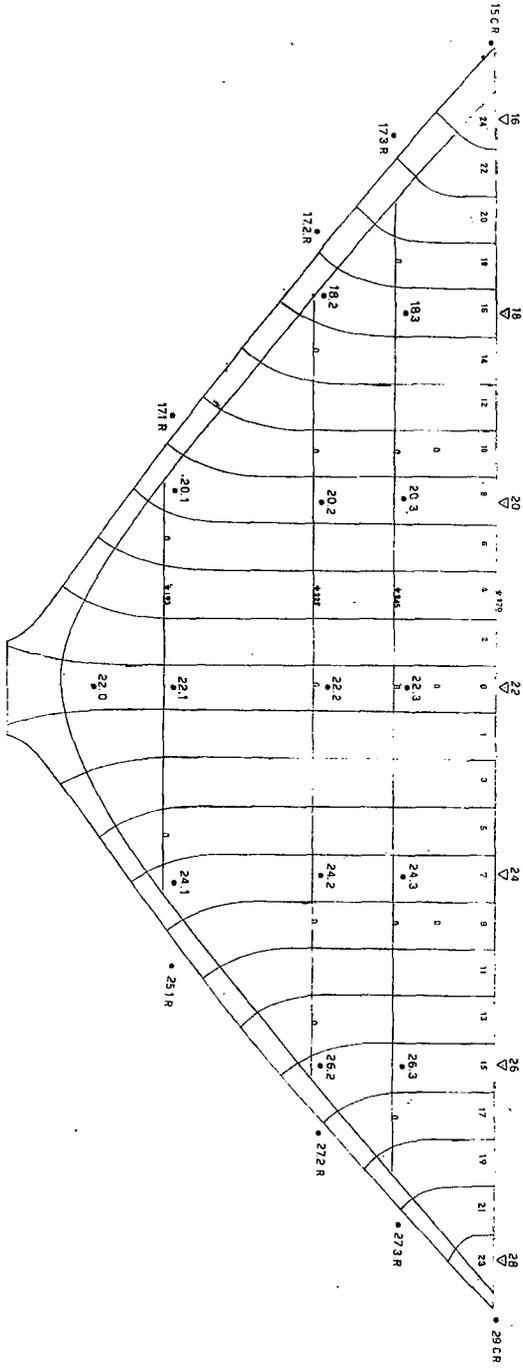


Fig. 6 - Vista diga con ubicazione segnali sul parametro e sulle imposte.

...no anche alla linea geometrica con conseguente rilegamento fra gli esiti delle due serie di osservazioni e possibilità di compensazione della linea trigonometrica.

2.5. *Le collimazioni.*

Tre punti — chiave e reni — dell'arco di coronamento della diga vengono infine osservati con frequenza bimensile, con collimazione a visuali fisse e mira mobile graduata.

3. *La strumentazione e le modalità esecutive.*

La strumentazione impiegata nelle misure è di tipo e precisione pienamente rispondente al fine e consiste in:

- a) un teodolite Wild T3 centesimale a codolo per centramento forzato nella stazione e reperto per altezza dello strumento sul basamento;
- b) un basimetro a fili di invar da 24 m, tipo Jaederin, di costruzione Askania;
- c) un livello Wild N3 con coppia di stadie da 3 m in invar;
- d) un collimatore Galileo con corredo di mire mobili e fisse.

La strumentazione citata è ben nota e diffusa per richiedere chiarimenti: tuttavia qualche notizia sul basimetro è degna di interesse. Esso consta di 4 fili di invar di 1,7 mm di diametro, tre tarati e muniti di certificato, ed il quarto per istruzione e servizio. I fili sono avvolti su un tamburo elastico che garantisce contro tensioni soverchie dei fili durante l'avvolgimento ed il magazzinaggio. I pesi tenditori sono da 10 kg e vengono collegati ai fili con cordini flessibili appoggiati a carrucole con cuscinetti a sfere portate da grucce tenute da ausiliari. I segnali, di tipo a chiodo o per treppiede, hanno la testa conica con cilindretto inciso in corrispondenza della generatrice coincidente con l'asse del cono.

Onde seguire le eventuali variazioni dei fili nel tempo, nella parete di una galleria sita nei pressi della diga, a valle, è stata disposta una base di controllo di 24 m sulla quale vengono sistematicamente osservati i fili prima, ed a chiusura, di ogni ciclo operativo.

Le basi sono state segnalizzate stabilmente disponendo ogni 24 m fra i pilastri terminali che la definiscono, solidi pilastrini in tubo di ferro da 8" con testa in legno per la sistemazione dei segnali di riferimento allineati e livellati sugli estremi della base. Opportuni stenditori presso ogni base consentono di porre i fili impiegati in condizioni di lavoro qualche ora prima della misura.

Ciascuna base viene sistematicamente misurata quando in ombra, con due fili differenti, ed in andata e ritorno ruotando di un piatto i segnali per eliminare gli eventuali difetti di eccentricità dei reperti sui pilastri terminali. Ogni tratta viene osservata 10 volte con avvicendamento periodico degli osservatori. Stanti le condizioni operative raggiunte, le misure, mediate, vengono ridotte soltanto per la temperatura, che viene rilevata unitamente agli altri dati meteorologici.

Le osservazioni angolari, vengono rilevate per angoli semplici su tutto il giro di orizzonte per i vertici della rete alta, e a strati con 4 reiterazioni in tutti gli altri casi; e vengono eseguite soltanto nelle prime ore del giorno o dopo il tramonto del sole.

Le livellazioni vengono sempre eseguite in andata e ritorno.

4. *La elaborazione dei dati.*

La disponibilità in Cagliari presso la Facoltà di Ingegneria di un centro di Calcolo Elettronico¹ dotato di un calcolatore IBM 1620 ha consentito di programmare il trattamento dei dati senza eccessiva preoccupazione per il carico di lavoro che essi comportano. In particolare è stato possibile impostare le compensazioni con criteri rigorosi applicando esclusivamente il principio dei minimi quadrati.

La programmazione ha presentato qualche difficoltà in relazione a due aspetti negativi del sistema elettronico usato: la modesta capacità — 20 000 posizioni di memoria — del calcolatore, ed il fatto, comune ai linguaggi di impiego normale, che i risultati delle operazioni vengano troncati, al numero delle cifre in uso, senza arrotondamento, e perciò, alla lunga, con scadimento di precisione. Per il primo inconveniente, i calcoli sono stati suddivisi in blocchi con un modesto aggravio di tempo operativo, ma possibilità di aggruppamento a piacere delle diverse fasi; per il secondo è stato usato un linguaggio Fortran modificato, preparato specificamente per l'ordinatore elettronico detto nell'Istituto di Scienza delle Costruzioni di Cagliari², il quale, pur conservando le caratteristiche del linguaggio originale consente la conduzione dei calcoli con numeri a mantissa di lunghezza variabile a piacimento da 8 a 38 cifre. Nel caso specifico, sono stati eseguiti calcoli con 8 e con 12 cifre: per esempio, nella elaborazione della rete alta, sono state impiegate 12 cifre, ma le operazioni sui sistemi di condizione e normale, di grande ingombro, sono state fatte con sole 8. Il numero delle cifre, sempre esuberante alla bisogna, è di larga garanzia nella elaborazione numerica, che viene inoltre seguita attraverso numerosi controlli, automatici o semi, distribuiti nei programmi.

Le fasi di calcolo e compensazione sono state le seguenti:

- a) compensazione della rete alta (con correzione diretta sugli angoli osservati col metodo delle osservazioni condizionate), e sua risoluzione;
- b) orientamento della rete (compensazione sugli angoli osservati, col metodo delle osservazioni indirette) e calcolo delle coordinate orientate;
- c) confronto delle coordinate con quelle di diversa età, isoorientate o no;
- d) calcolo delle coordinate dei vertici ausiliari e della rete di diga (con compensazione per variazione di coordinate);
- e) calcolo delle coordinate dei segnali di controllo (con compensazione della intersezione multipla per variazione di coordinate);

¹ Centro di Calcolo Elettronico della Università - Facoltà di Ingegneria - Piazza d'Armi - Cagliari.

² A. BERIO - Comunicazione privata.

f) calcolo delle linee di livellazione trigonometrica, loro compensazione sulle geometriche, e calcolo delle quote.

I metodi di compensazione sono stati scelti in relazione alle caratteristiche della rete ed alle necessità di programmazione limitando, per quanto possibile, il numero delle variabili in calcolo: da ciò il frequente uso della compensazione per variazione di coordinate che richiede solo 2 variabili per vertice in compensazione avendo trascurato le correzioni sulle direzioni con l'impiego delle equazioni in i .

Uno dei punti più delicati per la deduzione dei movimenti del manufatto e dell'ambiente, è il confronto fra le reti principali, alte, rilevate in diversa epoca. Variazioni nella origine e nell'orientamento dei sistemi di riferimento nei due casi, si traducono in spostamenti, in realtà inesistenti, dei vertici. Per evitare questo pericolo è stato scelto un caposaldo di orientamento esterno all'ambiente in studio ed una origine di tutta fiducia, ma anche queste attenzioni non possono escludere la causa di errore. Per questa ragione è parso conveniente appoggiare il confronto a tutti i punti della rete alta, nell'assunto che essa non debba subire movimenti di tipo rigido e sistematico, e la gran parte dei vertici che la compongono abbiano avuto soltanto spostamenti insignificanti. Seguendo questi criteri il confronto fra le reti di diversa età viene fatto precedere dal movimento rigido della rete in paragone rispetto a quella di riferimento sino a rendere minima la somma dei quadrati delle distanze, trattate come scarti, fra vertici omologhi, ricavando quindi la differenza di origine ed il disorientamento fra i due sistemi di riferimento.

Questo metodo di calcolo ha certamente minore importanza nelle posizioni attuali, ma è particolarmente utile nella ripresa di vecchie osservazioni prive di orientamento conveniente: con esso, p. es., è stata messa in luce una differenza di orientamento fra le deduzioni 1958 e 1960 di circa 10^{cc} , responsabile di spostamenti nella direzione delle ordinate che, alla distanza di oltre 1 km che corre fra i vertici estremi, raggiungono i 16 mm riscontrati nel confronto bruto.

Come già detto, il rilevamento sistematico delle osservazioni, è stato intrapreso solo lo scorso anno, ed è prematura una analisi sistematica degli esiti: è possibile soltanto una valutazione della precisione conseguita nei cicli rilevati nel 1963.

A titolo di esempio, le basi del Flumendosa sono state misurate con errore medio della media di: 0,16 e 0,10 mm quella di valle e 0,25 e 0,18 mm quella di monte nelle due occasioni, con errori relativi varianti fra 2,25 ed $1,25 \cdot 10^{-6}$ sempre inferiori, ed il più delle volte largamente, al limite imposto del $2,5 \cdot 10^{-6}$; le misure angolari, nella rete alta, hanno denunciato un errore della unità di peso di $1,3^{\text{cc}}$ ancora inferiore alla tolleranza che è di $1,6^{\text{cc}}$; e nelle livellazioni geometriche le chiusure sulle tratte sono sempre state inferiori ai 0,5 mm.

Gli esiti, paiono quindi positivi e rispondenti pienamente alle esigenze di un rilevamento di tanta delicatezza.

Mi è gradito ringraziare l'E.A.F. ed il suo Direttore Generale ing. Filippo Pasquini per l'autorizzazione a svolgere questa relazione.

