



L'ACQUA

ESTRATTO

Giuseppe Baldovin, Ezio Baldovin

DIGA DI ROSAMARINA.

Uno sbarramento per Palermo ed area litoranea nelle Dolomie di Sicilia



Direttore Responsabile

Armando Brath

direttore@idrotecnicaitaliana.it

Comitato di redazione

Paolo Carta

Maria Cristina Collivignarelli

Renato Drusiani

Francesco Federico

Gabriele Freni

Maurizio Giugni

Ruggiero Jappelli

Michele Mossa

Giuseppe Rossi Paradiso

Giovanni Ruggeri

Comitato tecnico-scientifico

Renata Archetti

Baldassare Bacchi

Lorenzo Bardelli

Marcello Benedini

Giuseppe Bortone

Bruno Brunone

Carlo Ciaponi

Pierluigi Claps

Bernardo De Bernardinis

Paolo De Girolamo

Roberto Deidda

Vittorio Di Federico

Giorgio Federici

Marco Franchini

Andrea Goltara

Salvatore Grimaldi

Goffredo La Loggia

Francesco Macchione

Beatrice Majone

Antonio Massarutto

Mario Rosario Mazzola

Giovanni Menduni

Alberto Montanari

Francesco Napolitano

Francesco Puma

Roberto Ranzi

Enrico Rolle

Paolo Salandin

Maria Giovanna Tanda

Attilio Toscano

Lucio Ubertini

Massimo Veltri

Pasquale Versace

Responsabile di redazione

Olimpia Arcella

328 1205467

arcella.acqua@idrotecnicaitaliana.it

Segretaria di redazione

Caterina Porfidia

320 7872904

caterina@idrotecnicaitaliana.it

Impaginazione e grafica

PixelStudio di Michele Massara

pixelstudio@fastwebnet.it



In copertina: Serbatoio di Orzignano nel comune di San Giuliano Terme (PI). Foto di Moreno Toti. Per gentile concessione di Acque S.p.A., Pisa.

Editore**Associazione Idrotecnica Italiana**

Via di Santa Teresa, 23 - 00198 ROMA

www.idrotecnicaitaliana.it

e-mail: acqua@idrotecnicaitaliana.it

Autorizzazione del Tribunale di Roma n. 15595 del 21 agosto 1974
Iscrizione al ROC n. 4201 del 29 agosto 2002
Spedizione in abbonamento postale 70% - ROMA

Le opinioni e i contenuti espressi dagli Autori non impegnano la Direzione
La riproduzione delle illustrazioni e degli articoli pubblicati dalla rivista è riservata e non può avvenire senza l'autorizzazione della Casa Editrice.

Finito di stampare nel mese di Giugno 2017 da Romana Editrice srl - Via dell'Enopolio, 37 - 00030 San Cesareo (RM)

QUOTE SOCIALI E ABBONAMENTI 2017**QUOTE DI ISCRIZIONE ORDINARIE 2017**

SOCIO SOSTENITORE

€ 1000,00 (a partire da)

SOCIO COLLETTIVO

€ 310,00

SOCIO INDIVIDUALE

€ 100,00 / 140,00 se intende ricevere il cartaceo de L'Acqua

SOCIO GIOVANE (Laureando)

€ 35,00

ABBONAMENTO

€ 150,00

MODALITÀ DI PAGAMENTO

Il pagamento va effettuato all'ordine di: Associazione Idrotecnica Italiana, Via di Santa Teresa, 23 - 00198 Roma

☐ Versamento su c/c postale n. 27066000

☐ Bonifico Bancario c/c n. 000004894978 presso la UNICREDIT BANCA, Ag. Roma Nomentana "A"

IBAN: IT17V0200805109000004894978; codice BIC SWIFT: UNCRITMMXXX

☐ Paypal dal sito www.idrotecnicaitaliana.it

Si invitano i Soci e gli Abbonati, qualora non l'avessero già fatto, ad inviare l'indirizzo e-mail a: segreteria@idrotecnicaitaliana.it.

Giuseppe Baldovin, Ezio Baldovin*

DIGA DI ROSAMARINA.

Uno sbarramento per Palermo ed area litoranea nelle Dolomie di Sicilia

ROSAMARINA DAM.

A Reservoir for Palermo and Coastal Area in Sicilian Dolomite

Nel quadro dei numerosi serbatoi ad uso plurimo, oltre 20, realizzati in Sicilia negli ultimi decenni del '900, si inserisce, per la sua rilevanza, quello di Rosamarina sul Fiume S.Leonardo, ubicato a 30 km ad Est di Palermo. Il serbatoio regola un bacino di 500 km² ed ha un volume di 100x10⁶ m³. La diga, unica di questo tipo nell'isola, è ad arco-gravità, ha un'altezza di 93 m ed uno sviluppo in coronamento di circa 200 m. E' localizzata all'imbocco di una caratteristica forra calcareo-dolomitica, diretta S-N, che il fiume attraversa per 2.5 km fra la piana occupata dal serbatoio e la foce nel Mar Tirreno. La formazione rocciosa costituisce un'ampia struttura anticlinale rocciosa con asse ONO-ESE, sul cui fianco meridionale è ricavata l'imposta della diga. Sul corpo dello sbarramento è posizionato, nella parte centrale, lo scarico di superficie, a soglia fissa, dello sviluppo di 72 m e della capacità di circa 2000 m³/s. A monte della diga sono stati necessari rilevanti interventi di stabilizzazione dei versanti all'imbocco della forra. La costruzione della diga, che è stata sviluppata con criteri di massima attenzione per la salvaguardia dell'ambiente naturale, ha contribuito in misura decisiva a risolvere l'annoso problema dell'approvvigionamento idrico della Città di Palermo garantendo nel contempo l'irrigazione per 50 km dell'area litoranea ad Est del Capoluogo.

Parole Chiave: Diga, Serbatoio, Acquedotto, Progetto, Costruzione.

Among the numerous multipurpose reservoirs, more than 20, built in Sicily in the last years of the 20th Century, that on S.Leonardo River, about 30 km eastward of Palermo, is quite important. The impound controls a watershed of 500 km² and has a capacity of 100x10⁶ m³. The dam, the sole of this type in the island, in an arch-gravity structure 93 m high, with a crest 200 m long. Its location corresponds to the entrance of a typical dolomitic gorge, directed S-N and 2.5 km long, that the river crosses between the reservoir and its mouth in the Tirreno Sea. The gorge develops through an anticline of various mesozoic deposits including the dolomitic limestone. The spillway, consisting in a free sill 72 m long, for a maximum flood of 2000 m³/s, is positioned in the central section of the crest of the dam. The geomorphological conditions of the gorge made important works necessary for slopes stabilisation upstream of the structure. The dam, accurately preserving the peculiar characteristics of the local spectacular environment, gave a substantial contribution to the solution of the historical problem of water supply for the City of Palermo and to the irrigation of 50 km of its Eastern littoral.

Keywords: Dam, Reservoir, Water supply, Design, Construction.

1. INTRODUZIONE

Nel piano di organica valorizzazione delle limitate risorse idriche disponibili in Sicilia che ha portato, sul finire del '900, alla realizzazione nell'isola di oltre 20 grandi invasi (Bigalli et al., 1980), merita evidenza, per la sua rilevanza tecnica e per i benefici indotti, quello di Rosamarina.

Il complesso definito "Diga Rosamarina" è costituito da un ampio sistema di impianti a fini multipli, volto a soddisfare i fabbisogni per gli usi civili, agricoli ed industriali dell'area litoranea fra Palermo e Cefalù⁽¹⁾

Le opere che fanno parte del complesso sono (Fig.1):

- il Serbatoio Rosamarina sul Fiume San Leonardo, circa 30 km ad Est di Palermo;
- l'adduttore principale dal serbatoio verso Ovest ed Est, con funzione mista irrigua e potabile;
- le reti di distribuzione a servizio di tutto il comprensorio.

*Giuseppe Baldovin, Ingegnere - Progettista, Ezio Baldovin, Ingegnere - Geotecnica Progetti Srl - Milano.

⁽¹⁾ I dati essenziali sul serbatoio e sulla diga sono stati anticipati, all'epoca dei lavori, sullo speciale n.2/1991 di Idrotecnica, in lingua inglese, per il XV Congresso ICOLD (Baldovin et al., 1991).

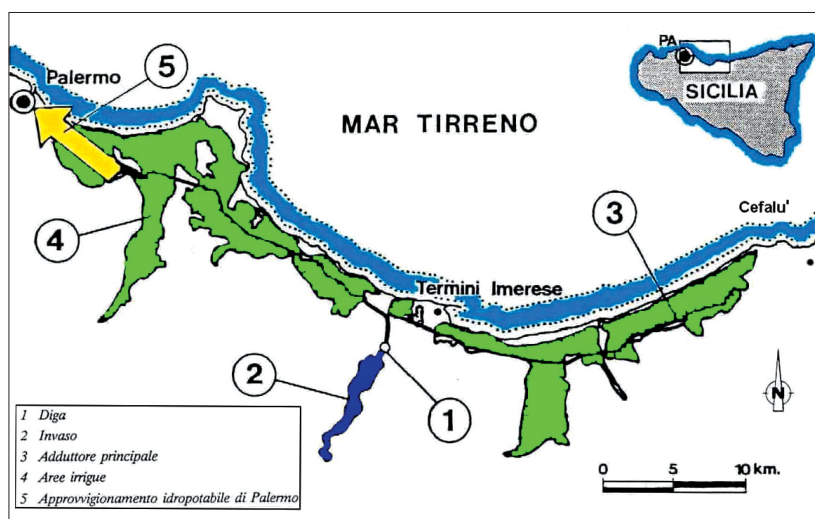


Figura 1 - Il complesso "Rosamarina".



Figura 2 - Fiume S.Leonardo: area d'invaso.

Le risorse del sistema sono le fluenze del Fiume S.Leonardo, che vengono derivate con una diga ubicata a pochi chilometri dalla foce; il fiume ha ivi un deflusso medio annuo di 93 milioni di m³, che è regolato con un serbatoio della capacità di 100 milioni di m³.

Questo serbatoio (Fig.2) fu indicato, già nel 1935, fra quelli da considerare per un possibile utilizzo idroelettrico. Vent'anni dopo, nel 1954, abbandonata l'idea originaria, l'Ente Riforma Agraria della Sicilia (E.R.A.S.) avviò gli studi per un diverso utilizzo dell'acqua. La domanda, che l'Ente si proponeva di soddisfare, riguardava in origine l'irrigazione di 15.200 ha lordi, al di sotto di quota 200 m s.m., lungo il litorale ad Est della Città di Palermo.

Successivamente, per una parte di questa superficie fu individuata una diversa fonte di approvvigionamento. Perciò degli apporti del Fiume S.Leonardo meno del 50% fu destinato ad uso irriguo; un volume maggiore fu riservato all'approvvigionamento per usi civili della Città. Negli anni '60 venne redatto un progetto che prevedeva la realizzazione del serbatoio con una diga a volta snella (arco) a doppia curvatura.

Il progetto esecutivo fu approvato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici nel Luglio 1969 e venne finanziato dall'Assessorato Agricoltura e Foreste della Regione, che ne affidò la realizzazione in concessione all'Ente di Sviluppo Agricolo (E.S.A.). I lavori vennero appaltati nel 1972.

I primi scavi per l'imposta diga segna-

rono peraltro alcune peculiarità della roccia che avrebbero reso piuttosto problematica e costosa la costruzione di una diga con le previste geometrie.

In effetti la geologia generale di progetto e le favorevoli caratteristiche geomeccaniche del fondo e della sponda sinistra venivano sostanzialmente confermate; invece sulla sponda destra, nella sua parte superiore, già coperta da un consistente manto detritico, la roccia risultava più fratturata e di incerta affidabilità sotto il profilo geostutturale.

Vennero quindi eseguiti nuovi dettagliati accertamenti geognostici e fu approntato un aggiornamento del progetto che individuava per la tipologia della diga due soluzioni in alternativa, una ancora "a volta", ma "ad arco-gravità" ed una seconda "a gravità".

Nel Marzo 1976 il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici approvò la prima soluzione, intesa come progetto preliminare esecutivo. Il progetto esecutivo, a firma di G. Baldovin e B. Polizzi, presentato nel Febbraio 1978, veniva poi approvato nell'Aprile dello stesso anno.

La diga del tipo prescelto, oltre ad assicurare un più adeguato livello di sicurezza alle imposte, rendeva possibile anche una semplificazione dello scarico di superficie, che era originariamente previsto con una galleria in sponda sinistra e che, stante la consistenza muraria della struttura definitiva, veniva ricavato, in alternativa, sullo stesso corpo diga, profilandone, in parte, la sommità con una soglia sfiorante.

La diga, che si illustra nel seguito anche quale contributo all'auspicata "Storia dell'Ingegneria delle Dighe in Italia" (Jappelli et al., 2011), è poi stata costruita negli anni Ottanta, ed è attualmente gestita dall'Assessorato Regionale dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità della Regione Siciliana.

2. IL BACINO IMBRIFERO ED IL SERBATOIO DI ROSAMARINA

La sezione di sbarramento è ubicata sul Fiume S. Leonardo, all'imbocco lato Sud di una caratteristica forra rocciosa (Fig.3), a circa 6 km dalla foce nel M. Tirreno, ed ha la quota d'alveo 90.0 m s.m..



Figura 3 - Forra Rosamarina da monte.

La sua posizione ricade in prossimità del contatto fra le formazioni calcaree dolomitiche sovrastanti Termini Imerese, dominate dal M. Rosamarina (540.0 m s.m.), e le formazioni del Flysch argillo-scistoso della Piana di Vicari a monte della forra. Lo sviluppo di quest'ultima è di circa 2.5 km; la sua ampiezza in cresta non supera i 1000 m. Il bacino imbrifero sotteso dalla diga (Fig.4) è di 500 km²; esso è all'incirca orientato SW-NE ed ha la quota media 600 m s.m.. Il suo perimetro delinea un'area pressoché quadrilatera in cui confluiscono, con andamento "a ventaglio", diverse ramificazioni fluviali che scendono rispettivamente sul lato Ovest dal Pizzo della Trigna (1257 m s.m.), dalla Rocca Busambra (1613 m s.m.) e dal Pizzo Cangialoso (1457 m s.m.), a Sud dal Cozzo Monaci (841 m s.m.) e dal Monte Carcaci (1196 m s.m.), a Est dal Pizzo Lanzone (917 m s.m.) e da un lungo spartiacque a quote meno elevate (max 700-800 m s.m.).

L'ampiezza trasversale massima del bacino è di circa 20 km; la sua estensione di circa 35 km.

I corsi d'acqua principali che formano la rete idrografica confluyente nel Fiume S. Leonardo sono il F. Azziriolo da O, il F. della Mendola lungo l'asse maggiore SO/NE ed i Valloni Riena e Margana da SE.

La pendenza media del più importante fra essi, il F. della Mendola, poi S. Leonardo, fra lo spartiacque e la coda

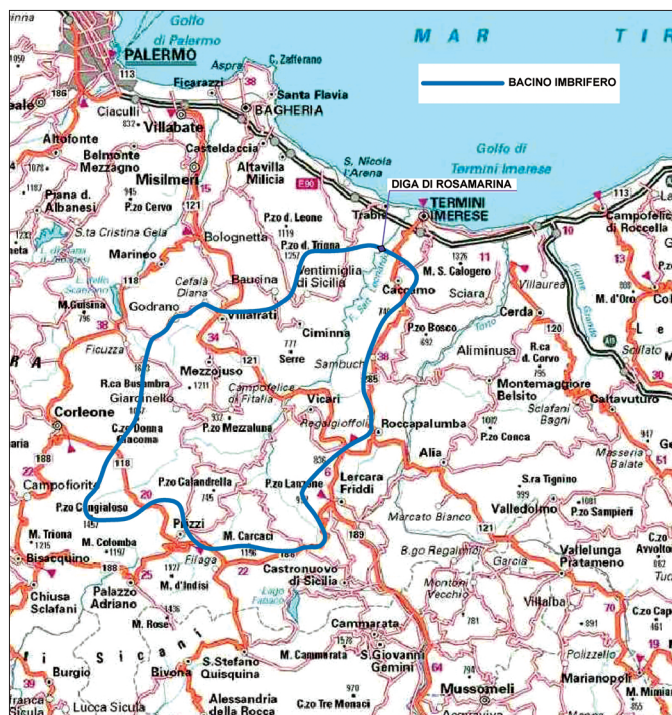


Figura 4 - Bacino imbrifero.

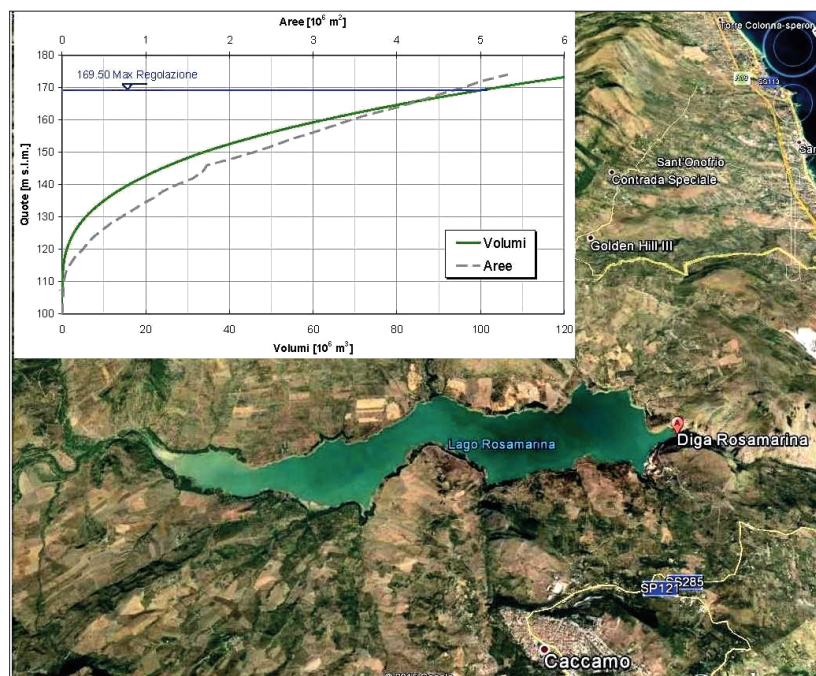


Figura 5 - Vista planimetrica e caratteristiche del serbatoio.

del serbatoio, su di uno sviluppo di 28 km circa, è del 2.0%; quella del fondo serbatoio dell'uno per cento. Il deflusso medio annuo, con un coefficiente 0.2, è dell'ordine di $93 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Data la notevole irregolarità delle portate, che alla sezione di sbarramento hanno un valore medio di circa $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$, il serbatoio è concepito per esercitare una rilevante compensazione pluriennale. Con la capacità di $100 \times 10^6 \text{ m}^3$, è possibile, in effetti, garantire l'erogazione di $70-80 \times 10^6 \text{ m}^3$, al netto dell'evaporazione, con una frequenza elevata.

L'invaso (Fig.5) è essenzialmente contenuto entro l'ampia Piana di Vicari e sommerge esclusivamente terreni del Flysch. Ha uno sviluppo massimo di 8 km ed una superficie di 5.2 km^2 . La quota massima di regolazione è 169.5 m s.m.; quella di minimo invasore è fissata a 122.0 m s.m. e quindi l'escursione del livello, in esercizio, risulta di 53 m.

3. GEOLOGIA DELL'AREA DI INVASO E DELLA DIGA⁽²⁾

Gli studi e le indagini geologiche per la costruzione di un'opera di ritenuta in località Rosamarina furono avviate già nel corso della prima metà del '900 a cura dei Prof. Giorgio e Giambattista Dal Piaz e, dopo varie interruzioni, proseguirono nei primi anni '70 sotto la direzione del Prof. Arvedo Decima.

Le ricostruzioni geologiche a supporto dei vari livelli progettuali per l'area occupata dalla diga e dall'invaso prospettano la presenza di una successione sedimentaria con assetto monoclinale ad immersione costante verso Sud, che, a scala maggiore, costituisce il fianco meridionale di un'ampia struttura anticlinale con asse orientato circa ONO-ESE (Fig. 6).

Le formazioni geologiche costituenti tale successione comprendono una serie di unità marine di età crescente dal Triassico superiore-Giurassico inferiore fino all'Oligocene.

I sedimenti più antichi affiorano in corrispondenza della profonda forra, ove è stato realizzato lo sbarramento, incisa dal Fiume S. Leonardo lungo il suo percorso, ad orientazione S-N, verso la foce in mare. Essi comprendono, nel dettaglio, prevalenti dolomie e calcari dolomitici biancastri e grigio-chiari, vacuolari, compatti, talora distintamente stratificati in strati e banchi, altrove più massivi: formazioni queste ben rare in Sicilia e di rilevante estensione soltanto nell'area di Palermo. Nell'invaso e in gran parte del bacino imbrifero dominano, invece, formazioni pelitiche in facies flyschoidi di età terziaria, prevalentemente costituite da litotipi argilloso-siltosi.

Dal punto di vista geomorfologico, la conformazione della valle del S. Leonardo in prevalenza rispecchia il risultato di una lunga evoluzione guidata principalmente dai processi di erosione selettiva operati dal corso d'acqua sulle formazioni rocciose affioranti. Il solco vallivo attuale presenta, infatti, ampi slarghi in corrispondenza del-

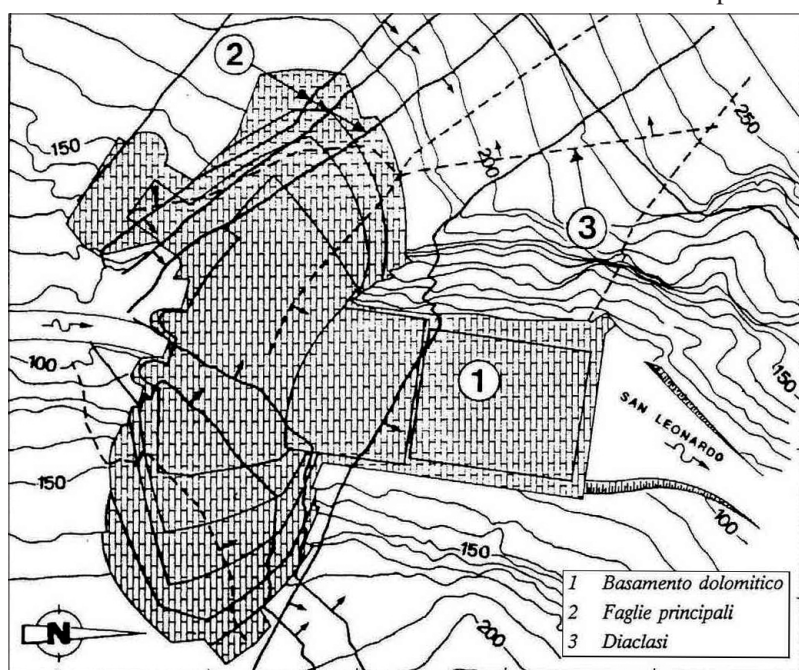


Figura 7 - Schema discontinuità su pianta scavi.

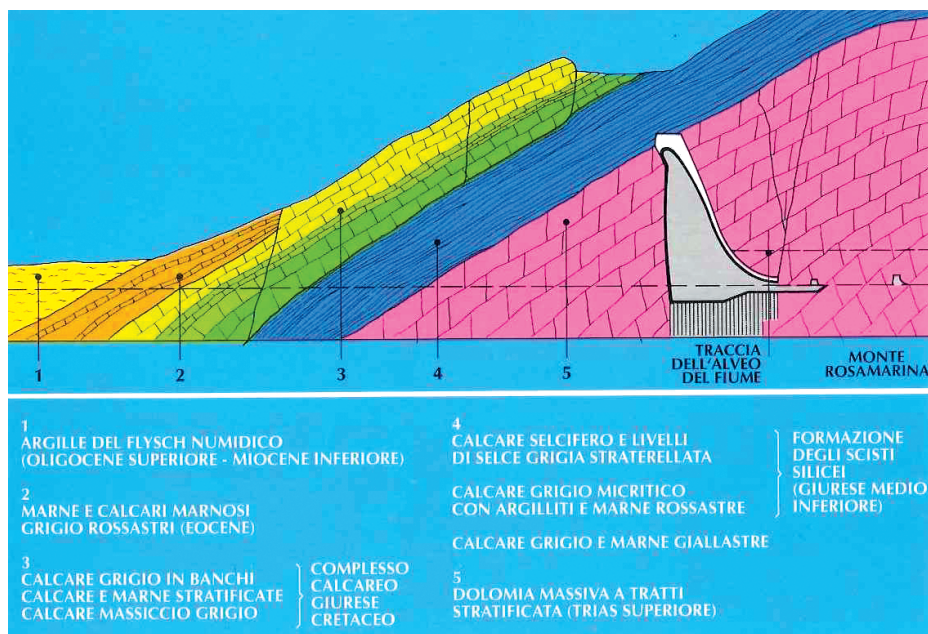


Figura 6 - Sezione geologica in asse diga (SSO-NNE).

l'affioramento delle formazioni marnoso-argillose più tenere e degradabili, mentre risulta fortemente incassato a guisa di gola all'attraversamento della formazione dolomitica triassica sede dello sbarramento.

La sezione di imposta della diga ricade all'imboccatura lato Sud della gola; la formazione presenta (Fig. 7) importanti discontinuità di origine tettonica (faglie e fratture) con persistenze da pluridecimate a ettometriche, che hanno esercitato uno stretto controllo sull'evoluzione morfologica delle pareti rocciose della forra. A tali discontinuità di ordine maggiore si sovrappone, a scala minore, un reticolo che interessa pervasivamente la formazione con intensità variabile da zona a zona e che, a luoghi, specie in destra, conferisce alla roccia un aspetto marcatamente brecciato.

L'orientazione delle discontinuità di ordine maggiore segue con buona concordan-

⁽²⁾ Redatto con la collaborazione del Dott. Geol. Gian Luca Morelli, Geotecnica Progetti Srl - Milano.

za le principali direttrici tettoniche presenti nella Sicilia Settentrionale, ove rappresentano le manifestazioni più evidenti della recente tettonica fragile.

La costruzione della diga ha imposto l'esecuzione di rilevanti scavi di modellamento delle sponde rocciose e l'asportazione delle coperture detritiche, che in origine occultavano il substrato roccioso per ampie aree, soprattutto in sponda destra.

All'imposta il substrato risulta strutturato con strati regolarmente immergenti verso S-SO, con inclinazioni di 30° - 40° circa, in concordanza con quelle della formazione direttamente sovrastante. Dal punto di vista geostrutturale, sono individuabili due set principali di discontinuità tettoniche, di cui uno con direzione NE-SO ed inclinazione di 50° - 60° , e l'altro, subverti-

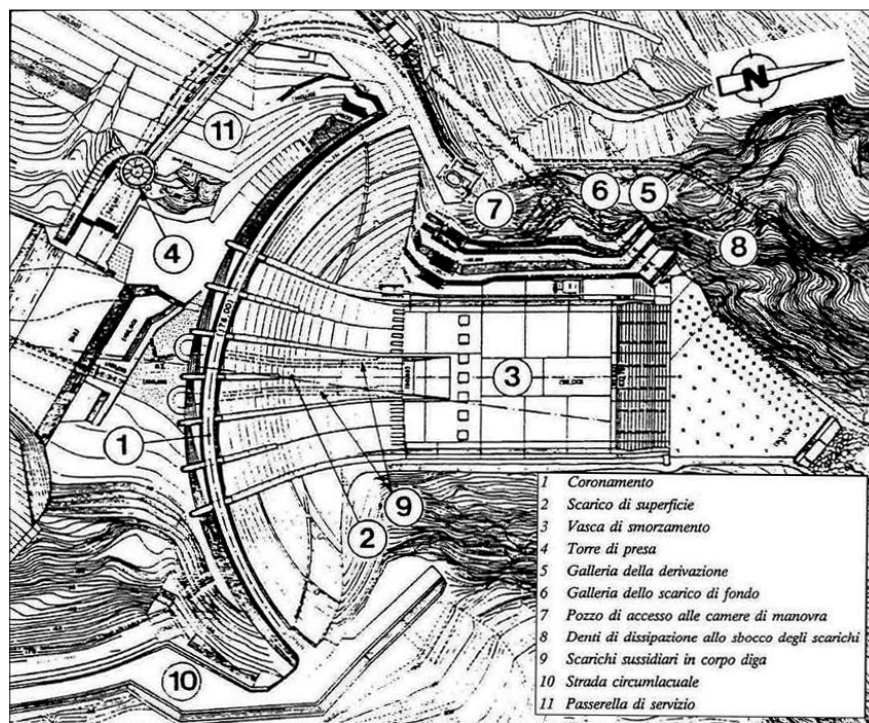


Figura 8 - Planimetria delle opere.

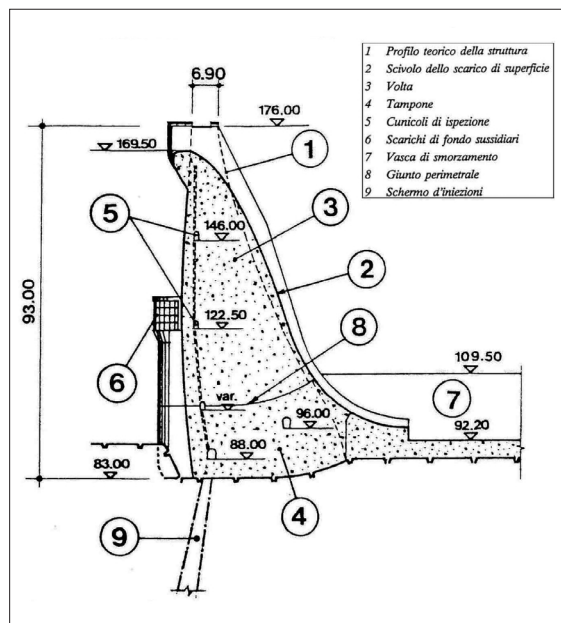


Figura 9 - Sezione maestra della diga.

riabili nell'intervallo 20° - 35° e giunti frequentemente chiusi e lisci, talora marcati da sottili riempimenti limo-argillosi.

Per la sismicità, il sito della diga, ubicato in Comune di Caccamo, rientrava, all'epoca della costruzione, nella Categoria II della classificazione allora vigente.

A seguito della riclassificazione del territorio nazionale di cui all'OPCM 3274 del 2003, successivamente adottata con l'OPCM 3519 del 2006, il sito è attualmente classificato in Zona 2.

cale, con orientazione NO-SE (Fig.10).

Tali discontinuità si osservano soprattutto in sponda sinistra, ove hanno determinato una marcata suddivisione dell'ammasso roccioso in grandi elementi colonnari, morfologicamente ben evidenti sulle pareti rocciose dell'imposta. In generale, queste grandi geostrutture risultano orientate sulle due sponde secondo direzioni circa parallele ed ortogonali alle direttrici di spinta degli archi della diga.

Si tratta, nello specifico, di geostrutture tettoniche poco evolute e caratterizzate, a grande scala, da un certo grado di segmentazione e da rigetti relativamente modesti.

La stratificazione, presente discontinuamente nell'ammasso carbonatico di imposta, ha spaziature molto variabili, da decimetriche a plurimetriche a seconda delle zone. Essa è rappresentata da superfici immergenti verso Sud con inclinazioni va-

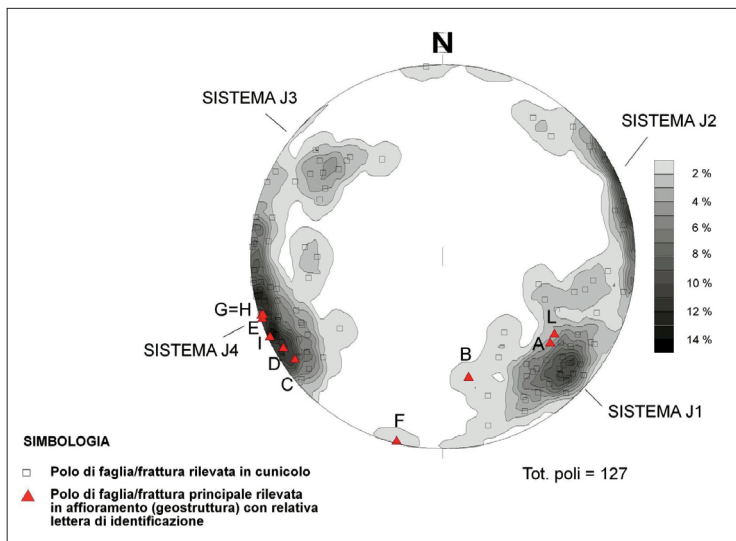


Figura 10 - Stereogramma faglie/fratture.

4. CARATTERISTICHE DELLA DIGA

4.1 Criteri e linee di progetto

La forma della forra, una V con pendenza delle sponde dell'ordine di 1/1, e la presenza della roccia calcareo-dolomitica hanno suggerito sin dagli studi di fattibilità la scelta di una diga a volta impostata nella sezione più stretta, all'imbocco di monte.

Questo tipo di diga veniva adottato per la prima volta in Sicilia per un'opera di altezza rilevante; la scelta era chiaramente motivata dalla singolarità delle condizioni geologiche e strutturali, rappresentate dalla rara presenza, nell'isola, di una formazione dolomitica ben idonea e con una morfologia favorevole.

Un primo progetto prevedeva, come detto, una diga ad arco. La soluzione definitiva si orientava invece verso una struttura più massiccia, con le caratteristiche di un'arco-gravità (Figg.9 e 11). Con questo affinamento rimaneva quasi invariata la posizione originaria dell'imposta sinistra, ma veniva spostata la destra verso monte di 40/50 m, allontanandola in tal modo dalla zona interessata dai maggiori disturbi tettonici; veniva poi irrobustita la struttura del corpo diga alle quote medio-inferiori e si migliorava l'impatto degli archi lungo l'intera imposta.

Sempre in destra veniva inserita, alle quote superiori, una spalla a gravità, destinata a realizzare un locale più profondo immersione dello scavo di fondazione, ed a diffondere meglio, su questa sponda, la spinta degli archi prossimi al coronamento.

Ne è derivata una rotazione dell'asse diga che comportava anche un modesto addentramento dell'imposta sinistra, ove l'ammasso, pur compatto, era interessato corticalmente da alcuni giunti subverticali più persistenti, orientati secondo la direzione di spinta degli archi.

La sezione maestra della diga (Fig.9) ha i lineamenti tipici delle dighe ad arco-gravità, con spessore alla base piuttosto rilevante (~0.42 h). Il paramento di monte è profilato secondo un arco di parabola con asse orizzontale, sicché la sua metà inferiore risulta lievemente a strapiombo. Quello di valle è invece mistilineo, con un'inflessione rientrante verso la verticale alle quote inferiori, prossime alla fondazione.

Nella parte centrale del corpo diga la configurazione del paramento di valle si discosta da quella "geometrica" per assumere, per una certa ampiezza, la profilatura a "scivolo" dello scarico di superficie.

La geometria della struttura (Fig.11) è quella di una volta simmetrica formata da archi a spessore variabile. Gli archi si impostano sulla roccia tramite un pulvino, cui si giustappongono con un giunto perimetrale; alle quote inferiori il pulvino si trasforma gradualmente in uno spesso tampone.

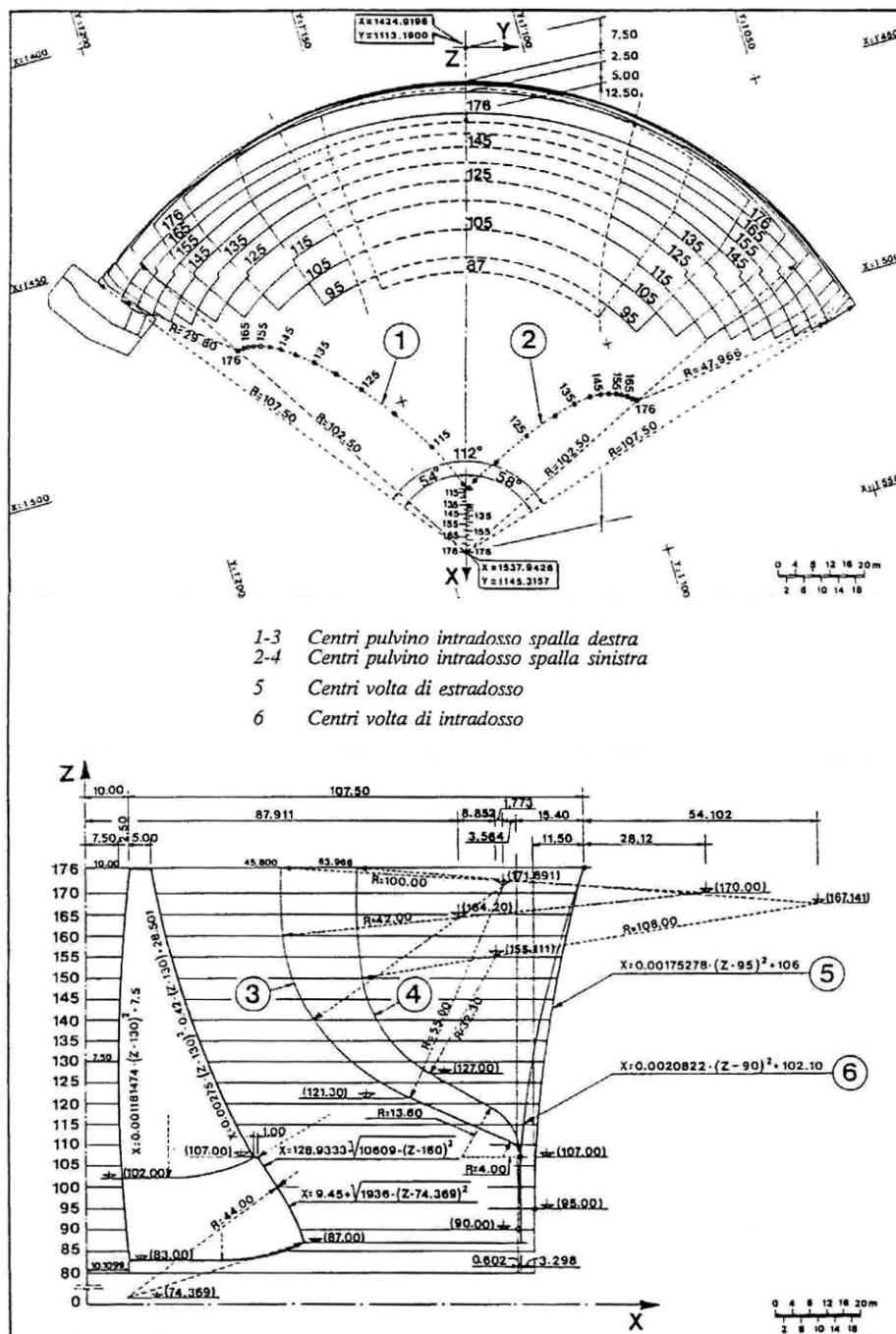


Figura 11 - Geometrie della diga.

Le caratteristiche principali della diga sono:

• Quota coronamento	176.0 m s.m.	• Spessore al piede diga	41.9 m
• Quota massima di regolazione	169.5 m s.m.	• Raggio di estradosso in coronamento	107.5 m
• Massimo invasivo	175.0 m s.m.	• Raggio di intradosso in coronamento	102.5 m
• Altezza massima	93.0 m	• Sviluppo al coronamento	200.3 m
• Spessore in coronamento	5.0 m	• Volume	350.000 m ³

Per la costruzione il corpo diga è stato suddiviso, con giunti trasversali, in 12 conci dell'ampiezza di circa 14 m in coronamento e di 20 m circa alla base (Figg. 12 e 13). I giunti si dipartono dalle sommità con andamento pressoché verticale e tendono a divenire perpendicolari all'imposta nella parte inferiore.

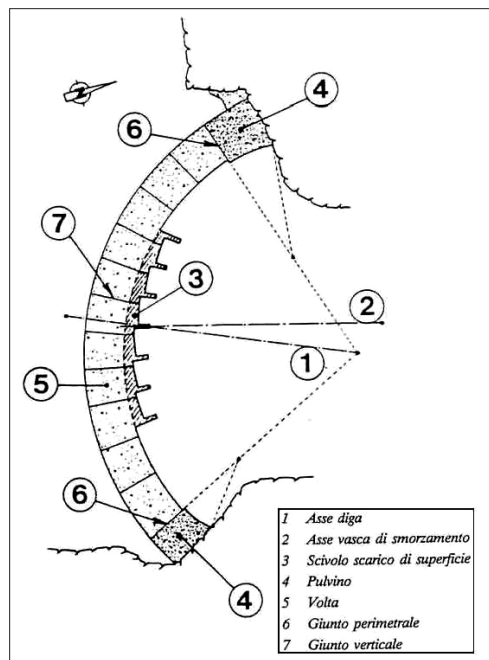


Figura 12 - Schema arco tipo.

Un particolare modellamento del paramento di valle è stato adottato nel settore dello scarico di superficie; all'uopo i conci interessati sono stati variamente ispessiti a valle. Tuttavia, i sovrasspessori non intervengono nel comportamento strutturale degli archi, in quanto le porzioni dei giunti trasversali esterne alla configurazione geometrica di riferimento del paramento non sono sigillate. L'asse d'assieme dello sfioratore è leggermente angolato (8°) rispetto all'asse geometrico del corpo murario.

Per realizzare dei giunti che sulle corsie dello scivolo affiorino secondo linee parallele alla direzione di flusso dell'acqua ne sono state leggermente deviate le generatrici orizzontali, nel tratto interessato dal sovrasspessore per le corsie, si da ridurre al minimo l'effetto erosivo della corrente sugli spigoli contigui. Per la parte in sovrasspessore sono stati realizzati nelle corsie tre giunti permanenti orizzontali.

Al piede di valle un giunto verticale cilindrico separa la struttura arcuata della diga dalla parte terminale degli scivoli dello scarico di superficie. La soglia sfiorante è leggermente aggettante sul paramento di monte e determina quindi un ispessimento in cresta della struttura che si estende a tutto lo sviluppo del coronamento, e cioè anche oltre lo sviluppo dello scarico di superficie, con ciò costituendo un efficace elemento di irrobustimento sommitale ai fini del comportamento statico della diga.

Un sistema di cunicoli (Figg. 9 e 17) è ricavato nel corpo murario: due di essi, alle quote 146 e 122.5 m s.m., sono orizzontali; un terzo, nel tampone, segue il profilo della fondazione in modo da rendere possibile, se necessaria, la ripresa dello schermo profondo di iniezioni; un ulteriore cunicolo con andamento perimetrale si sviluppa in corrispondenza del giunto fra archi e pulvino.

Un dispositivo formato da canne drenanti è disposto a tergo del paramento di monte e fa confluire nei cunicoli orizzontali, in quello perimetrale, nonché in quello a piede tampone, eventuali filtrazioni dall'invaso.

Le superfici dei conci di costruzione sono rinforzate con maglie di armatura metallica, più consistenti nel pulvino ed in prossimità del coronamento, specie nel corpo della soglia sfiorante.

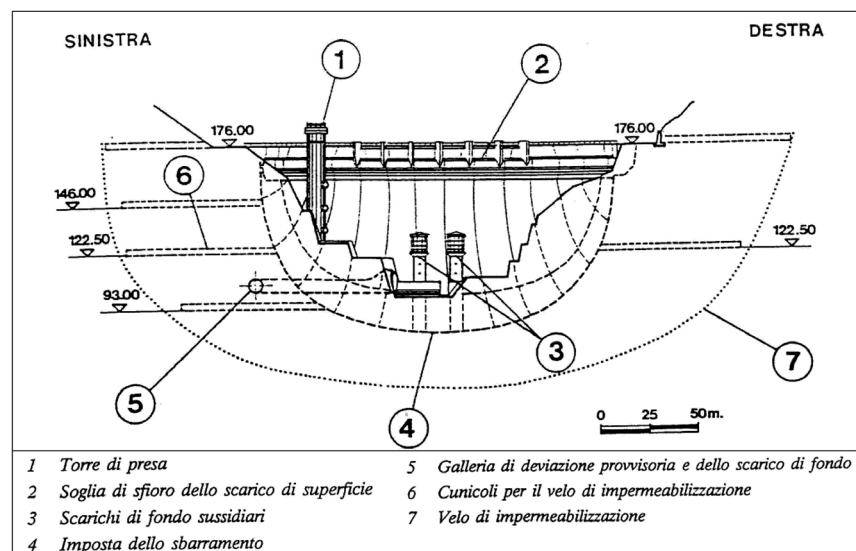


Figura 13 - Vista schematica da monte diga ed opere.

Nei giunti sono posizionati profilati in PVC di 44 cm, rispettivamente due a monte, cui è assegnata la funzione di tenuta ed uno a valle. Lungo le superfici di giunto sono collocati i circuiti tubolari tramite i quali, nella stagione fredda, è stata operata con iniezioni, a fine costruzione, la sigillatura fra conci.

A tergo dei profilati a monte, un pozzo verticale, a cavallo di ciascun giunto, consente il drenaggio di eventuali filtrazioni ivi localizzate.

4.2 Fondazione

La diga è tutta fondata sulla formazione di dolomie e calcari dolomitici, con stratigrafia inclinata $25^\circ \div 30^\circ$ verso monte.

La roccia dell'imposta è in generale sana e compatta, ma, come detto, è interessata nella massa da un rilevante sistema di giunti principali con giacitura prossima alla verticale.

In sponda sinistra, i più importanti fra questi giunti (Fig. 7) hanno una direzione molto prossima alla tangente degli archi all'imposta, sono talora aperti, e sono coniugati con un sistema perpendicolare minore di fratture, sicché l'ammasso viene ad assumere un aspetto "a quinte".

In sponda destra i movimenti tettonici hanno determinato invece una più spinta frammentazione della roccia, con giunti variamente orientati. I principali fra essi ripetono l'andamento della sinistra, ma con una frequenza maggiore; sono inoltre più chiusi e talora intasati da strati di materiale fino, spesso cementato da calcite.

Gli scavi sono stati perciò approfonditi in destra fino a $30 \div 40$ m all'interno del versante, allo scopo di fondare la struttura al di là della fascia corticale più decompressa ed allentata; in sinistra risultano molto meno addentratati. Di profondità modesta (circa 15 m) sono stati quelli nel fondovalle per la fondazione del tampone.

Tutta l'area di imposta è stata consolidata con una maglia di iniezioni cementizie per una profondità variabile, mediamente dell'ordine di 10 metri.

Per la spalla sinistra si sono adottati articolati interventi di consolidamento: le iniezioni sono state eseguite per fasi successive, con pressioni crescenti; la roccia è stata inoltre trattata con un sistema diffuso di barre cementate con funzione di saldatura dei giunti più importanti, esteso fino alla profondità sensibile alla spinta della struttura. Questi interventi sono stati operati sia dall'esterno, sia da cunicoli con locali nicchie e pozzi di servizio, e sono stati integrati, a monte dell'imposta, con un robusto placcaggio in calcestruzzo della sponda.

A valle dell'imposta della diga, in tutta l'area della vasca di smorzamento dello scarico di superficie, sono stati attuati consistenti interventi di placcaggio su entrambi i versanti, anche con rivestimenti massicci in calcestruzzo estesi, in qualche zona, fino a $2/3$ dell'altezza della diga (Fig. 14).

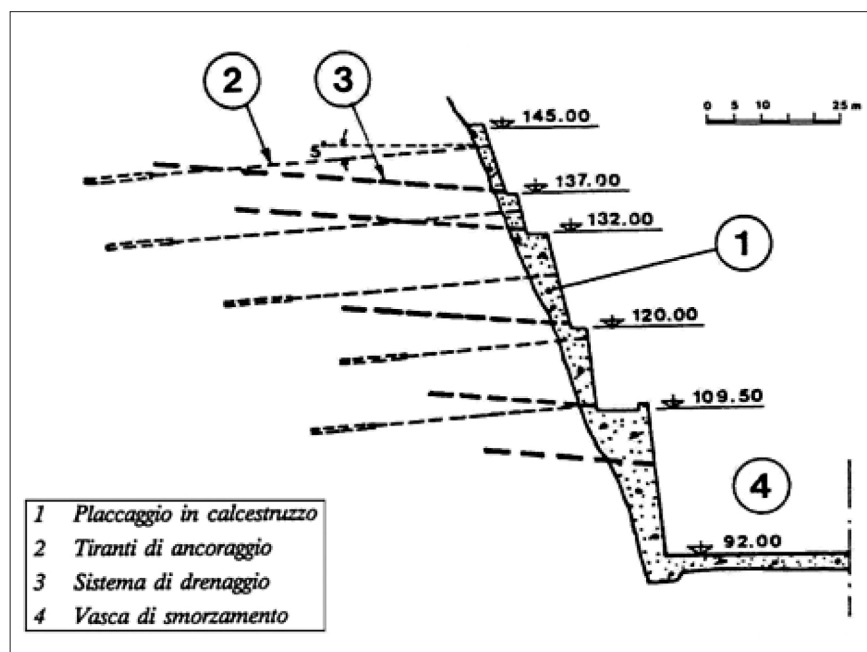


Figura 14 - Placcaggio in sinistra a valle diga.

4.3 Lo schermo profondo di tenuta ed il sistema drenante

La tenuta profonda è affidata ad uno schermo di iniezioni saldato con l'imposta della struttura in prossimità del piede di monte.

Nella zona d'alveo lo schermo consiste in un "ventaglio" di tre file di fori sub verticali in roccia lanciati verso monte e con assi convergenti nel cunicolo profondo del tampone (Fig. 15).

Alle quote superiori le iniezioni sono state invece eseguite, sempre su tre file a ventaglio, da cunicoli orizzontali in roccia accessibili dal perimetrale, oppure dall'esterno, in particolare dalla quota coronamento.

Trattamenti complementari suborizzontali sono stati lanciati a raggiatura dai cunicoli in roccia per raccordo con il sistema di iniezioni subverticali.

L'andamento generale dello schermo segue, in pianta, la curvatura della diga alla base del corpo murario; nelle spalle, alle quote medio-superiori, è invece orientato con direzione subortogonale ai versanti (Fig. 16).

I cunicoli in roccia, orizzontali, sono 6 in sponda sinistra e 4 in sponda destra. Fra quelli in sinistra, alla quota coronamento ed alle quote 144.0, 122.5, 92.5 sono posizionate le teste foro di quattro tratte parziali del velo; alle quote 122.5 e 92.5 m s.m. due cunicoli, a valle dello schermo, attrezzati per il drenaggio con raggiatura di foro radiali, si dipartono dall'imposta e sono orientati in modo da intercettare al meglio i giunti principali della roccia.

In destra, la diversa situazione geostutturale e l'assenza di fratture "aperte", hanno consentito di ridurre a 3 i cunicoli per il velo. Anche qui sono due i cunicoli di drenaggio, che peraltro sono più orientati verso valle per

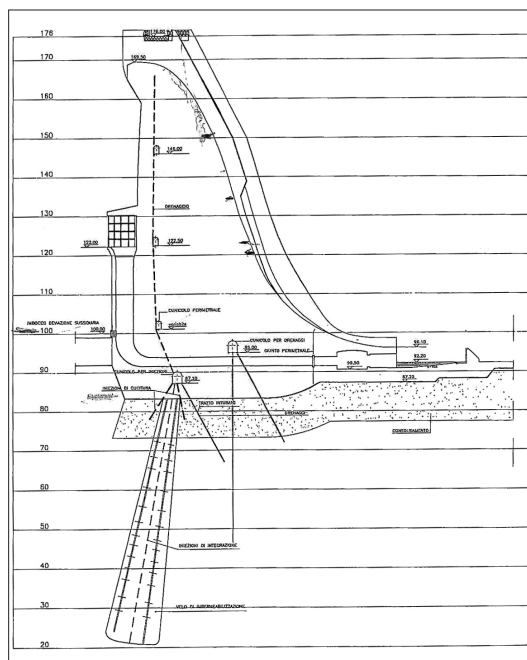


Figura 15 - Schema iniezioni e drenaggi.

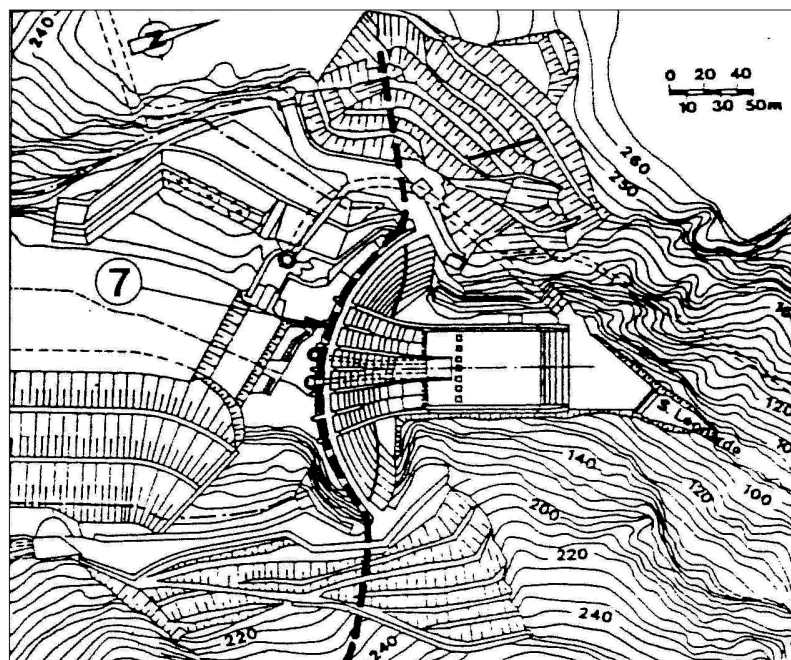


Figura 16 - Traccia planimetrica dello schermo.

esercitare un'azione efficace anche sulla piezometria del corpo di questa spalla, maggiormente interessato da sistemi di giunti ravvicinati e più o meno estesi.

L'intero schermo copre una superficie di 50.000 m². Ha una profondità massima di 60 m dal fondo (2/3 del carico idrostatico massimo) e si addentra nelle imposte subverticali per 80 m in sinistra e 90 m in destra. I fori per iniezioni hanno, in genere, in ciascuna fila, un passo di 3 m, che si riduce a 1.5 m nelle zone più fratturate.

L'esecuzione delle iniezioni è stata sistematicamente preceduta da un'indagine condotta in fori distanziati circa 30 m, nella fila più a monte, in cui sono state effettuate, nel corso della perforazione, prove di permeabilità su sezioni di 5 m.

A parte la zona corticale in sinistra con giunti "aperti", la permeabilità della roccia è risultata piuttosto variabile, intorno a 3-5 Lugeon nelle zone più superficiali, minore in profondità. Dopo il trattamento la stessa è stata ridotta ovunque a non oltre 1-2 Lugeon. L'assorbimento medio è stato di 70 kg di cemento al metro di foro. La miscela era formata da cemento pozzolanico con qualche per cento di bentonite. Lo schermo è stato eseguito prima dei getti, a scavi aperti, nella parte inferiore, e dai cunicoli in spalla nel corso dell'elevazione del corpo diga; è stato poi ripreso, in parte, nel corso dei primi invasi.

Il sistema di tenuta in corrispondenza del tampone è controllato con una estesa rete di fori drenanti lanciati verso il basso dai cunicoli, nonché dalle strutture di raccordo dello scivolo con la vasca di smorzamento.

Lungo tutta l'imposta è stata realizzata la saldatura fra lo schermo e la struttura muraria mediante una fitta rete di iniezioni di cucitura.

4.4 Analisi di stabilità della struttura

La diga ha un rapporto fra lo sviluppo del coronamento e l'altezza superiore a 2 ed uno spessore della sezione maestra crescente da 5 a 42 m circa.

Il rapporto di snellezza A^2/VH , che correla l'area della sezione verticale sviluppata, il volume e l'altezza massima, è invero inferiore a 10, sicché l'opera si inserisce fra le dighe a pianta arcuata in cui il contributo statico delle membrature verticali (mensole) è rilevante, specie per la parte medio-inferiore della struttura.

Il comportamento dell'opera è stato verificato con diversi metodi di calcolo.

Con una prima analisi la struttura è stata schematizzata con una maglia di 8 archi e 14 mensole, per la quale è stata imposta la congruenza delle deformazioni nei nodi; per gli archi non sono stati considerati gli effetti dei sovrappessori dovuti alla presenza dello scivolo dello scarico di superficie.

Un'analisi di raffronto semplificata è stata poi condotta con il metodo Ritter modificato.

Per queste verifiche si è tenuto conto della deformabilità della roccia secondo il criterio di Vogt, assumendo un rapporto E_c/E_r fra il modulo elastico del calcestruzzo e quello della roccia variabile fra 2 e 4.

Un calcolo conclusivo è stato poi sviluppato con un modello tridimensionale secondo il metodo agli elementi finiti, considerando, oltre alla struttura, anche un esteso volume della roccia di imposta. Il modello considerava 1576 elementi e 2132 nodi, con circa 5000 gradi di libertà.

Il carico sismico è stato assunto in conformità con le Norme vigenti all'epoca in Italia, che classificavano la zona diga nella classe S=9.

I risultati delle analisi indicavano tensioni/deformazioni in linea con i valori abituali per dighe del tipo arco-gravità. Il valore massimo della compressione all'imposta veniva infatti determinato in 2.3 MPa per l'arco a q.155 m s.m., ed in 2.5 MPa al piede diga nella mensola centrale; la massima compressione nel calcestruzzo, risultava di 4.5 MPa per l'arco a q.165.0 m s.m..

4.5 Apparecchi di misura

Il corpo diga è controllato, oltreché con misure topografiche, con un complesso di strumenti automatici o manuali, con letture centralizzate nella casa di guardia. La verifica dell'efficienza degli apparecchi è programmata periodicamente e viene integrata con interventi specifici nei casi di rilevamento di dati anomali.

Dispositivi di misura sono anche installati in roccia, alle imposte degli archi ed in fondazione, per controllo delle deformazioni, specie in corrispondenza delle più importanti discontinuità.

I principali strumenti installati (Fig.17) consentono la misura:

- delle temperature del calcestruzzo, dell'acqua e dell'aria;
- di sforzi e deformazioni nella struttura, con estensimetri a corda vibrante;
- di sforzi e deformazioni in roccia, mediante estensimetri e pressimetri;
- degli spostamenti orizzontali in cresta mediante un pendolo diritto ed uno rovescio, nonché con basi per collimazione;
- degli spostamenti verticali, con livellazioni di precisione sul coronamento e sulle spalle;
- di rotazioni, con basi per clinometri nei diversi cunicoli;
- di movimenti relativi nei giunti, con dilatometri a coda vibrante ed estensimetri;
- di carichi piezometrici in fondazione e nelle spalle;
- di filtrazioni d'acqua in corpo diga ed in fondazione.

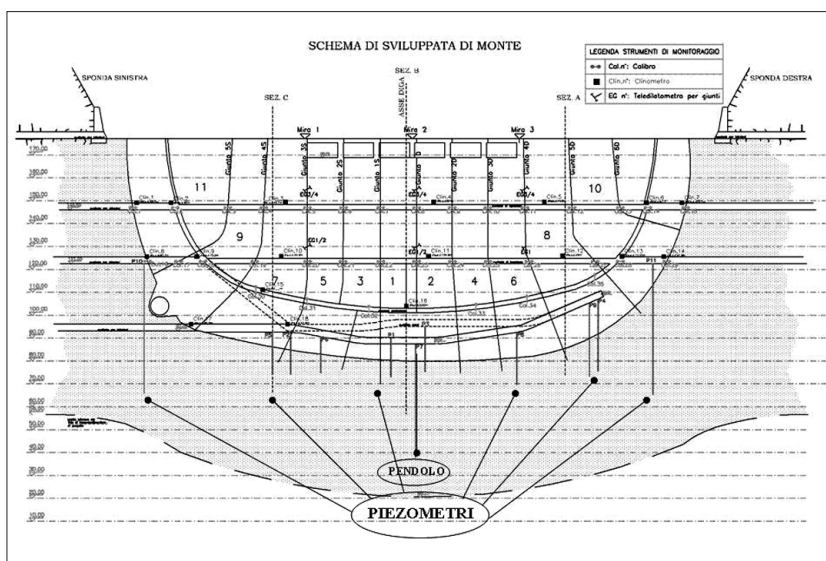


Figura 17 - Sviluppo diga con disposizione strumenti.

5. OPERE DI SCARICO

5.1 Scarico di superficie

Lo sfioratore (Figg.8, 9, 18, 19), ricavato in corpo diga, è formato da una soglia a quota 169.5 m s.m., che si sviluppa su 8 luci per la lunghezza totale di 72 m. La portata massima dello scarico è di 1935 m³/s, e corrisponde ad una quota massima dell'invaso 175.0 m s.m., con tirante di 5.5 m. La soglia è leggermente in aggetto rispetto al paramento di monte; la cresta ha una sagomatura circolare che si raccorda con il profilo Crea-ger dello scivolo.

L'asse del complesso dello scarico coincide con l'asse medio dell'alveo nella stretta ed è pertanto leggermente angolato (8°) rispetto all'asse di simmetria dello sbarramento. Le 6 corsie sono delimitate da muri andatori solidali con il corpo diga e convergono in modo da immettere l'acqua sfiorata in una vasca di smorzamento della larghezza di 45 m, lunga 70 m. Tre dei muri andatori si sviluppano soltanto per una parte dello scivolo, sicché l'immissione in vasca avviene con tre corsie.



Figura 18 - Diga sfiorante.

Il calcestruzzo degli scivoli è realizzato con elevato dosaggio di cemento, sì da garantirne la massima compattezza; la superficie è stata trattata con additivi antierosione. La vasca, con platea a q.92.00 m s.m., contiene un tirante d'acqua di 17.50 m, ed ha una soglia terminale elevata 8.79 m sul fondo.

Nella platea della vasca sono disposte due file di blocchi di smorzamento per contenere le dimensioni del risalto: dodici di essi sono "a piede scivolo", sette, "i dissipatori", sono collocati ad un terzo della lunghezza della vasca; sono tutti in cemento armato, blindati ed ancorati in profondità con un consistente sistema di tirantature.

L'intera opera di scarico, ed in particolare il profilo della soglia, l'andamento delle corsie, le dimensioni della vasca e le caratteristiche dei blocchi sono stati delineati e poi controllati con un modello idraulico presso l'Istituto di Idraulica dell'Università di Padova.

Sul modello è stata in particolare verificata la piezometria lungo la platea delle corsie, accertando l'inesistenza di depressioni.

La velocità di ingresso in vasca dell'acqua è risultata dell'ordine di 30 m/s.

5.2 Scarichi di fondo ed opere di derivazione

Gli scarichi di fondo consistono in una galleria di diametro 4.5 m in sponda sinistra (Fig.19), intercettata da due paratoie piane, ed in due condotti sussidiari in corpo diga di diametro 2.3 m, intercettati da valvole tipo Howell Bunger (Figg.8,16,19).

La galleria imbocca alla base di una torre con platea a q.116.50 m s.m., e si sviluppa interamente in roccia per 229 m, restituendo le acque a valle con una caduta a salto di sci di circa 22 m.

I due condotti in corpo diga hanno la bocca di presa a quota 122 m s.m., sono formati da una tratta verticale di 30 m ed una orizzontale di circa 60 m, e scaricano direttamente nella platea della vasca di smorzamento, con asse parallelo a quello della vasca stessa.

La capacità massima dello scarico di fondo in sinistra è di 250 m³/s, quella dei condotti ausiliari di 254 m³/s complessivi. Gli scarichi di fondo consentono una utile flessibilità in esercizio; sono in grado di evacuare, unitamente con lo scarico di superficie, una portata di 2439 m³/s, sensibilmente superiore alla piena millenaria modulata dalla laminazione.

Nella torre di imbocco dello scarico in sinistra, di diametro 6.5 m, è collocata anche l'opera di derivazione in una tubazione verticale, all'interno della torre, in cui immettono 4 bocche di presa a diverse quote, che consentono di operare con carico ottimale per l'ossigenazione (Fig.19).

La tubazione verticale è poi collegata con una galleria di diametro 2.10 m, che si sviluppa per circa 1000 m nella spalla sinistra fino al termine della gola del Fiume S. Leonardo, donde si dirama la rete del sistema irriguo e potabile alimentato dal serbatoio.

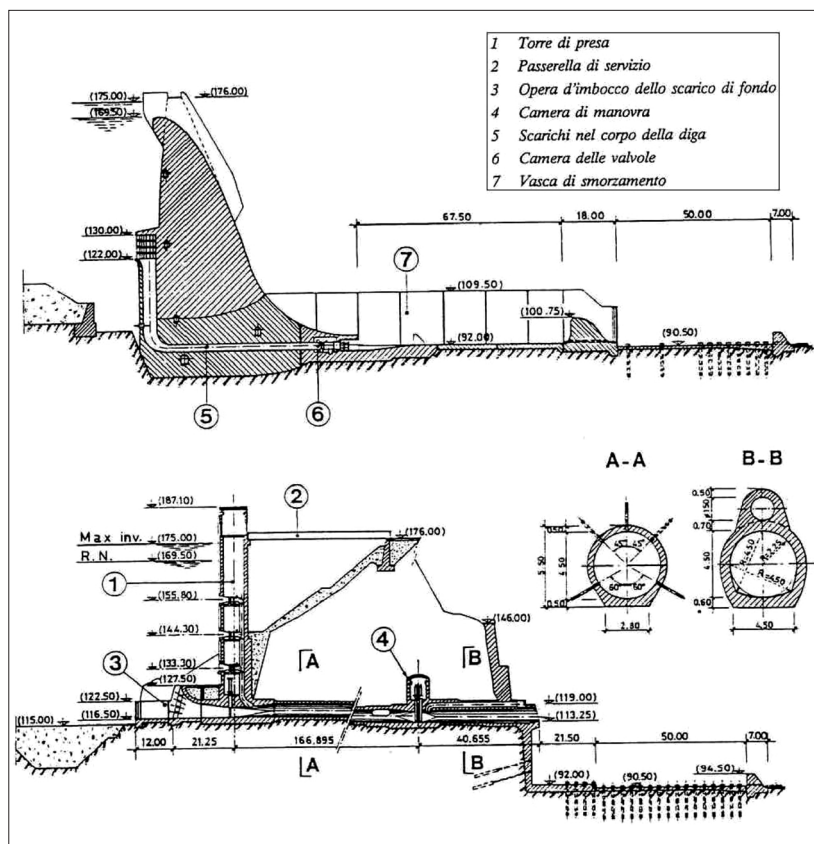


Figura 19 - Profilo scarichi di superficie e di fondo.

6. STABILIZZAZIONE DEI VERSANTI

Le peculiarità geomorfologiche della stretta di Rosamarina hanno richiesto importanti interventi di stabilizzazione dei versanti a monte della diga, all'imbocco della forra.

Invero fra la formazione dominante dei calcari dolomitici di base ed i calcari del Cretaceo che sovrastano la serie, è presente un'alternanza di strati di marna, calcare e scisti, talora spessi soltanto pochi centimetri, intensamente fratturati.

In ragione della giacitura della serie, che immerge verso monte, queste ultime formazioni, poco affidabili sotto il profilo geomeccanico, vengono a nudo, ancorché con giacitura favorevole della stratificazione, in prossimità della torre e dello scarico di fondo in sinistra, a quote eguali o inferiori al livello di ritenuta.

Si è quindi reso necessario contrastare sui versanti i possibili effetti dell'escursione dell'invaso sugli strati di marna i cui giunti, in qualche zona, avrebbero potuto rendere precarie le condizioni di stabilità del pendio.

La soluzione adottata si è articolata in diversi interventi (Fig.20):

- una colmata del fondo valle con materiale detritico, per uno spessore massimo di 20 m e per uno sviluppo di 250 m.;
- la formazione, in sponda destra, di un rilevante rincalzo in rockfill con pendenza 1/1.7, intestato al piede su di un plinto in calcestruzzo; la sommità del rockfill supera la quota di massimo invasore. Al di sopra del rincalzo, ove sbocca una breve galleria della strada di accesso alla diga, è stato eseguito un esteso consolidamento della roccia. In adiacenza alla diga, un robusto muro in blocchi cementati stabilizza alcuni grossi massi del Cretaceo in equilibrio instabile;
- in sponda sinistra, 3 pozzi del diametro di 13 m, profondi 22 m, riempiti di calcestruzzo, che formano la struttura di piede di un placcaggio in calcestruzzo, includente grossi blocchi calcarei, giuntato e drenato, che riveste gli strati più degradati della roccia, fino a 4.5 m al di sopra dell'invasore.

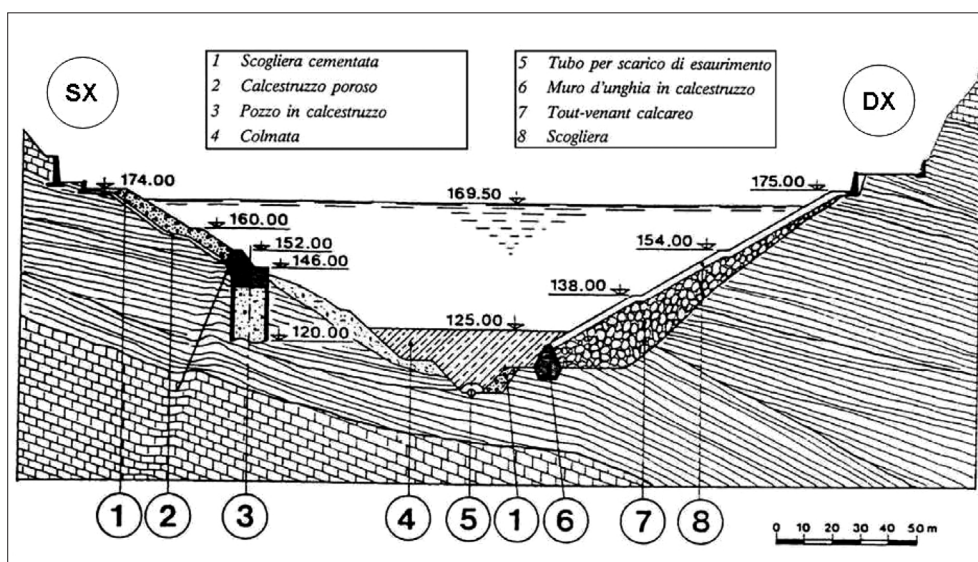


Figura 20 - Stabilizzazione versanti a monte diga.

7. I LAVORI DI COSTRUZIONE

Gli scavi per la realizzazione della diga (Fig.21) sono stati impegnativi per l'elevata acclività delle sponde e per la presenza di rilevanti coperture detritiche anche alle quote superiori al coronamento.

L'ovvia esigenza di sagomare le incisioni nei versanti in modo da preservare al meglio, a lavori finiti, le caratteristiche tipiche della forra rocciosa nell'intorno dell'opera li ha volutamente condizionati.

Sono consistiti nella preventiva asportazione del materiale detritico e nel modellamento e stabilizzazione delle scarpate, che sono state poi rivestite con risarcimenti di materiale lapideo e, quando necessario, con strutture di calcestruzzo semplice o proiettato ed armato, ancorate in profondità.

Gli scavi di fondazione di prima fase per l'imposta sono stati sviluppati dalla sommità diga sino al fondo; la rifinitura delle superfici di fondazione e gli interventi di consolidamento e di drenaggio, sono stati invece eseguiti in risalita, con il procedere dei getti di elevazione del corpo diga.

In sponda destra la profilatura della roccia, tenendo conto della posizione e della giacitura dei vari sistemi di giunto, è stata realizzata in modo da conseguire superfici continue e regolari con inclinazione massimal 1/10.

In sponda sinistra, avendo impostato gli archi della diga su un ammasso di roccia ben salda, ancorché contrassegnato, come detto, da alcuni giunti subverticali aperti, immergenti a NE, è stata prevista una particolare profilatura dello scavo, a gradoni, al fine di consentire al cantiere accessi indipendenti, a varie quote, per la realizzazione di un placcaggio funzionale adiacente all'estradosso della diga.



Figura 21 - Scavi diga visti da monte.

Il placcaggio consisteva in un getto di calcestruzzo, interposto tra la struttura della diga e le scarpate dello scavo per l'addentramento dell'imposta, che tamponava l'affioramento, sulla superficie degli scavi, delle discontinuità previamente intasate e sigillate a fondo.

Subito dopo gli scavi di prima fase sono stati intrapresi gli interventi con iniezioni per la formazione dello schermo profondo di tenuta; si è operato essenzialmente dal fondo scavo per la parte inferiore della diga, e dall'esterno o da cunicoli per le tratte medio superiori, più acclivi, del profilo d'imposta. Queste operazioni sono state poi integrate, seguendo i getti con le iniezioni di cucitura calcestruzzo diga/roccia.

I getti per la diga sono iniziati dai conci centrali costituenti il tampone e poi sono stati gradualmente proseguiti con i pulvini rampanti e con la volta vera e propria (Astaldi S.p.A., 1990).

Per il calcestruzzo è stato usato un cemento pozzolanico 325 con dosaggio di 270 kg/m³ per tampone e pulvini e di 240 kg/m³ per la volta. Gli aggregati, suddivisi in 5 classi, venivano prodotti per frantumazione da roccia calcareo-dolomitica di resistenza fra 100 e 200 MPa.

La curva granulometrica di riferimento era rappresentata dalla: $P\% = 100 \sqrt[3]{d/D_{\max}}$ con $D_{\max} = 100$ mm.

Per i calcestruzzi si sono conseguite densità di 2.5 t/m³ e resistenze a compressione sempre superiori a 29.0 MPa.

La permeabilità, a carico costante, è risultata dell'ordine di $10^{-10} \div 10^{-11}$ m/s.

L'impianto di produzione era dimensionato per 120 m³/ora.

Il trasporto e la distribuzione sono stati operati con auto miscelatori e con una torre mobile (Fig.22) di altezza 80

m e braccio di 95 m, scorrevole su di una struttura in c.a., poco a monte della diga; il cantiere operava su due turni di 8 ore; un terzo turno era riservato alla movimentazione delle casseforme ed ai servizi di assistenza e manutenzione. Il calcestruzzo è stato vibrato in strati di 50 cm; l'altezza di getto è stata limitata ad 1 m nei blocchi del tampone sotto quota 100 m s.m. ed a 2 m nelle parti in elevazione.

Non sono stati adottati interventi per la dispersione del calore. La massima temperatura misurata nel calcestruzzo è stata di 45°C.

I lavori di costruzione (Fig.23) si sono sviluppati nel periodo 1980÷1990; hanno subito, peraltro, una lunga interruzione fra il 1983 ed il 1987, per ragioni amministrative.

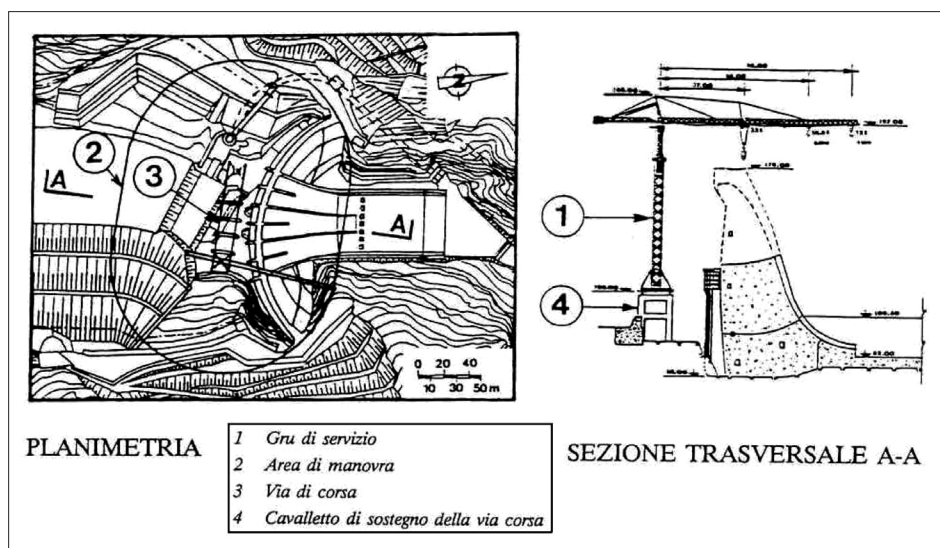


Figura 22 - Distribuzione calcestruzzo con gru mobile.



Figura 23 - Diga in costruzione.



Particolarmente curate sono state le superfici di ripresa dei getti, dopo la sospensione, specie in alcuni conci del tampone, che non avevano raggiunto il giunto perimetrale nella prima fase di costruzione. Queste superfici sono state trattate con la rimozione dello strato degradato per ragioni meteorologiche e termiche, la sutura di locali fessure con resine epossidiche, l'interposizione di un water stop e la posa di uno strato di malta ad elevato contenuto di cemento, armato con maglia metallica.

La realizzazione delle opere sussidiarie e degli scarichi ha avuto luogo negli anni 1980÷1990.

8. COMPORTAMENTO DELL'OPERA

L'invaso del serbatoio ha avuto inizio nell'Ottobre del 1981.

Il suo riempimento, peraltro condizionato dall'ultimazione delle opere di derivazione e da fattori di carattere amministrativo, è proceduto secondo le prescrizioni della Commissione di Collaudo Ministeriale.

Per due anni il livello massimo è stato fatto oscillare intorno alla quota media 120.0 m s.m.. E' stato poi elevato a circa 145.0 m s.m., ove è rimasto stazionario, con escursioni $\pm 5-6$ m, per sette anni (fino a Ottobre 2000). La quota di ritenuta normale (169.50 m s.m.) è stata poi raggiunta gradualmente, con escursioni annuali di 5-7 m, nel Marzo 2006 (Fig.24). Lo scarico di superficie è stato interessato da piene di entità limitata che sono state regolarmente smaltite.

In parallelo si sono susseguite le operazioni di misura e controllo con le apparecchiature ed i dispositivi posti in opera, nonché le verifiche sulla conformità dei risultati delle misure con le previsioni di progetto.

Un sistematico riscontro a queste previsioni è stato perseguito con l'ausilio di un apposito modello di calcolo numerico di verifica della struttura nel quale erano state recepite, con grande dettaglio, le pur modeste variazioni intervenute in fase di costruzione per la sagomatura dell'imposta, nonché alcune lievi rifiniture geometriche della struttura, in particolare dello scivolo dello scarico di superficie, suggerite dal modello idraulico.

Si sono così potute precisare nel dettaglio, per le variabili quote dell'invaso, le deformazioni e tensioni di calcolo degli archi e delle mensole; l'affinamento ha, fra l'altro, riconfermato, sostanzialmente, nelle grandezze fondamentali, i risultati già previsti nel progetto esecutivo.

Le misure più significative hanno segnalato quanto segue:

- l'escursione annua della temperatura oscilla per l'aria fra i valori 5° - 28° e per l'acqua fra 9° e 26° ; quella del calcestruzzo fra 11° e 23° ed è quindi mediamente un po' superiore ai riferimenti di progetto;
- le tensioni nel calcestruzzo sono dell'ordine di quelle di calcolo;
- le deformazioni orizzontali in cresta, misurate con due pendoli, uno dritto ed uno rovescio, nella sezione maestra, nonché con collimazioni automatiche su più punti del coronamento, hanno avuto l'andamento di Fig.25. Il controllo con i due sistemi di misura ha fornito risultati molto



Figura 24 - Diga in esercizio e M. Rosamarina.

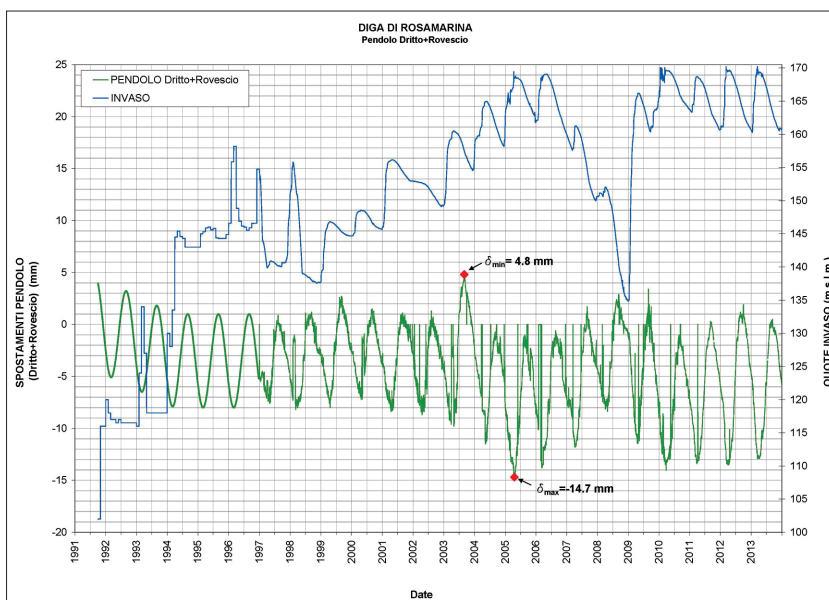


Figura 25 - Escursione del pendolo.

simili. La deformazione massima verso valle della cresta risulta di circa 14-17 mm in entrambi i casi. Questo valore è in linea con i risultati delle elaborazioni numeriche, che indicano come massimo lo spostamento di 20-23 mm, inclusi gli effetti termici. Il contributo alla deformazione totale in cresta diventa rilevante per livelli di invaso oltre quota 140-150 m s.m., a motivo del prevalente contributo degli archi nella parte medio superiore della diga.

Le deformazioni, per reiterate permanenze dell'invaso intorno a specifici livelli (es.q. 140.0 e 169.5 m s.m.) si confermano nell'entità; ciò segnala il comportamento elastico della struttura e l'assenza di significativi cedimenti anelastici in fondazione.

Le deformazioni in fondazione, controllate con gli estensimetri in roccia, sono dell'ordine del mm.

- I piezometri a valle dello schermo di iniezione segnalano ovunque quote solo lievemente superiori all'imposta diga.
- Le filtrazioni complessive, localizzate in alcuni drenaggi prossimi ai giunti di costruzione, sono di circa 2.0 l/s; tutti i cunicoli di drenaggio all'interno di entrambe le spalle segnalano l'assenza di venute d'acqua.
- Le sponde dell'invaso, salvo locali modesti assestamenti puntualmente risarciti, non hanno segnalato, dopo ripetute escursioni del livello, problemi di stabilità.
- Il comportamento dell'opera, dopo diversi anni di esercizio è, in definitiva, soddisfacente e ben conforme alle previsioni di progetto e conferma l'idoneità del tipo prescelto, del posizionamento delle sue imposte e del dimensionamento.

A trent'anni dall'ultimazione della diga, è allo studio una ipotesi di manutenzione straordinaria dei dispositivi di drenaggio volta a ripristinarne la funzionalità ed a ridurre l'inclusione nelle filtrazioni, pur esigue, del finissimo depositato sul fondale adiacente alla struttura di sbarramento.

9. L'UTILIZZO DELLE ACQUE REGOLATE DAL SERBATOIO

9.1 Risorse idriche del Palermitano - Funzione multiuso dell'Invaso sul F. S.Leonardo

Con il piano di utilizzo delle risorse idriche del Fiume. S.Leonardo originariamente si prevedeva un impianto idroelettrico regolato dal Serbatoio di Rosamarina.

Dopo lo studio di varie alternative si ritenne invece ben più motivato un progetto che assegnava all'invaso la funzione multiuso di modulatore delle acque del fiume: a) per alimentare prioritariamente l'Acquedotto di Palermo; b) per gli usi civici di altri centri minori; c) per attuare l'irrigazione della fascia agricola, di 15.000 ha, a quota inferiore a 200 m s.m., che si estende lungo il litorale tirrenico fra la Piana di Lascari, presso Cefalù, e l'agro di Villabate, alle porte di Palermo.

L'Acquedotto del Capoluogo ha avuto un avvio ed una progressione di notevole interesse storico. Riteniamo utile perciò soffermarci qui, con qualche rapido cenno, sulle sue origini e sul complesso delle opere che ne hanno via, via costituita l'ossatura e garantita l'efficienza.

Ne risulterà, nel contesto, la rilevanza fondamentale e risolutiva che, per Palermo, è venuta ad assumere la recente realizzazione del Serbatoio di Rosamarina.

Il Golfo di Palermo, intorno al quale è costruita la città, è il ricettore delle acque sotterranee e di superficie confluenti da una vasta area (la "Conca d'Oro") in cui la falda, alimentata dalle alture circostanti, è quasi ovunque poco profonda.

In superficie vi scorrevano, in epoca preistorica, due corsi d'acqua denominati Kemonia e Papireto (*Benfratello*, 2015), fra i quali sorgeva il primo nucleo di Palermo; essi sfociavano a mare ne "la Cala", lato Sud dell'attuale porto, con una disposizione "a ventaglio", configurando in pianta, in continuità con la costa, la geometria di un "fiore" (*Di Piazza*, 2008).

Da ciò prese lo spunto la prima denominazione della città; quest'ultima fu poi chiamata, peraltro, "Tutto porto", "Panormos", per la funzione anticamente svolta dai due torrenti.

Ancora oggi i corsi d'acqua che convergono nel Golfo, e fra questi vanno considerati anche il Torrente Passo Rigano a Nord ed il Fiume Oreto a Sud, pur se in gran parte non più in vista perché captati alla sorgente o perché coperti a seguito dell'urbanizzazione, costituiscono un elemento caratterizzante nella copiosa idrografia dell'area. Soltanto il torrente Kemonia è stato deviato verso il F. Oreto prima della foce.

Con una falda quasi affiorante, l'utilizzo delle acque non poteva che avvenire, nell'antichità, con prelievo da pozzi, mediante sollevamento umano o animale, oppure, quando possibile, con collegamento diretto alle sorgenti. A volte i pozzi venivano scavati nell'interno degli stessi edifici od erano disposti nell'ambito di giardini attrezzati per utilizzo pubblico.

Nel Medio Evo si sviluppò molto la derivazione diretta dalle sorgenti: evolvendosi nella tipologia, essa veniva ad assumere via, via caratteristiche singolari.

Si diffuse, infatti, un metodo di attingimento, derivato dalla dominazione araba, consistente nel convogliare l'acqua nei "qanat" (gallerie artificiali) od in tubature di terracotta interrate, denominate "Incatasati", che venivano

stese dall'affioramento delle sorgenti fino a raggiungere delle tipiche costruzioni in muratura, i "Castelletti", la cui sommità corrispondeva alla quota della presa alla sorgente, o comunque ad un livello sufficiente ad alimentare le utenze.

Queste ultime erano in genere di modesta entità, in quanto costituite da nuclei mono o plurifamiliari. Di frequente i "Castelletti" erano incorporati nelle mura della città.

Queste costruzioni venivano ad assumere, nei secoli, lineamenti gradevoli, raffinati ed adornati, sicché il loro insieme formava dei complessi tipici di un'architettura di "stile floreale" (Fig.26).



Figura 26 - Alcuni "Castelletti" nelle Mura della Città.

9.2 Recente evoluzione dell'Acquedotto di Palermo

Soltanto verso la fine del 1800 fu avviata, per la Città, la costruzione di un moderno sistema acquedottistico. Si realizzò, infatti, un'importante canalizzazione, denominata "Acquedotto Scillato", che convogliava a Palermo le acque delle omonime sorgenti, affioranti alle falde del M. Fanusi, nel Gruppo delle Madonie, unitamente a quelle delle sorgenti Presidiana, nei pressi di Cefalù, nonché a quelle attinte dal F. Imera Settentrionale.

Da queste fonti le acque venivano trasferite a Palermo (Fig.27) con una condotta, prevalentemente "a pelo libero", dello sviluppo di ben 70 km, che raggiungeva due serbatoi localizzati a San Ciro, all'estremità SE della città. L'Acquedotto Scillato rappresentò per molti anni la spina dorsale del sistema cittadino di approvvigionamento idrico. Esso ebbe via, via un consistente progressivo sviluppo, con l'allaccio di nuove fonti e la posa sempre più estesa di reti di condotte di distribuzione, in parallelo con il dilatarsi del tessuto urbano dall'originario nucleo fino all'attuale vasta ed articolata configurazione.

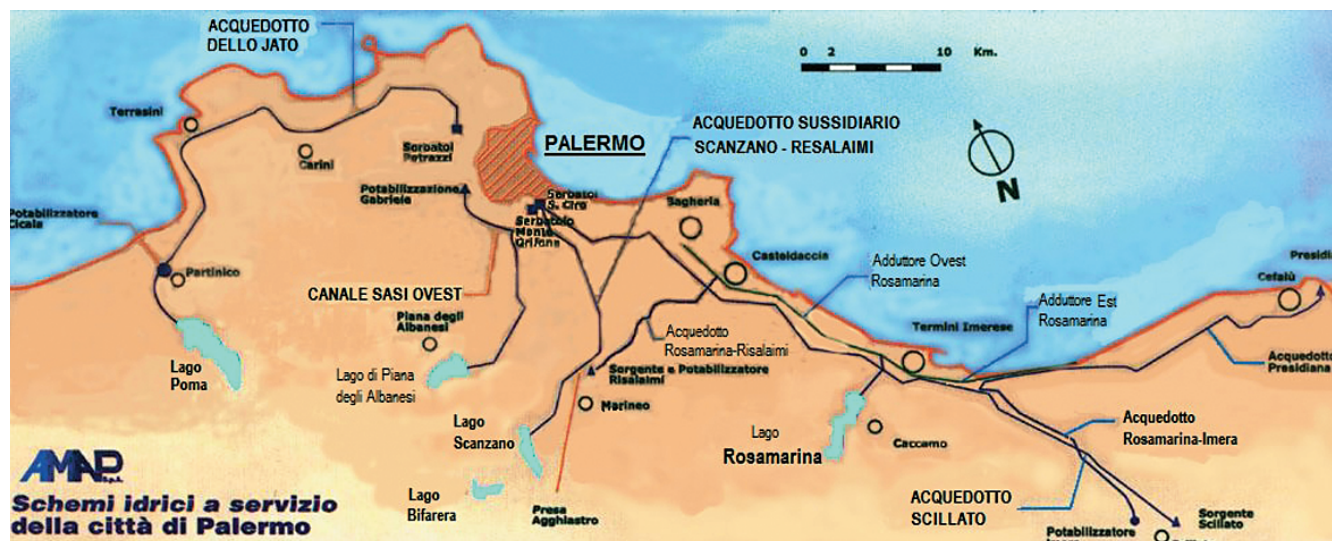


Figura 27 - Tracciato schematico dell'Acquedotto Scillato e delle altre derivazioni a servizio della Città di Palermo.

Per l'evoluzione del territorio e degli edifici, nell'area cittadina, l'Acquedotto è venuto, peraltro, ad assumere fin dalle origini un ruolo fondamentale.

Le opere idrauliche in genere, e fra esse i siti delle sorgenti, i manufatti di captazione, i serbatoi e le canalizzazioni all'aperto ed in sotterraneo delle acque fluenti, venivano infatti realizzate adottando sistematicamente eleganti, e spesso pregiate, linee architettoniche, ed erano talora anche impreziosite con rifiniture ornamentali scultoree.

Fu curata una assai diffusa installazione di piccole artistiche fontane. Nei punti importanti della città (vie, piazze, porte) le fontane stesse assumevano rilevanza dominante e, spesso, monumentale (Fig.28).

In definitiva, sembra proprio che chi ha costruito, nei secoli, la grande Palermo abbia verosimilmente voluto pre-

servare, in qualche misura, le caratteristiche degli antichi spazi del territorio, in tal modo giustificando appieno l'appellativo di "Città d'Acqua" che da sempre fu attribuito al Capoluogo siciliano.

Ritornando allo sviluppo storico dell'Acquedotto va qui segnalato che nel primo e, più ancora, nel secondo dopoguerra, si evidenziarono alcuni aspetti critici del complesso impianto idraulico, in quanto si rese evidente l'insufficienza di molte delle sue componenti e della stessa sua potenzialità.

Si dovette pertanto dar corso, con urgenza, alla posa di una seconda condotta principale, realizzando un integrativo "Nuovo Acquedotto Scillato", ultimato solo nel 1980, che consisteva essenzialmente in un'adduttrice in pressione che affiancava il vecchio canale, e per la quale si adottarono invero i più evoluti criteri di costruzione e di esercizio dell'epoca.

Ciò nonostante, il rapido aumento della popolazione ed il crescente degrado, dovuto a vetustà, di molti fra i più datati manufatti (soprattutto delle tubazioni in città, da cui si segnalavano perdite d'acqua anche molto consistenti), fecero emergere l'assoluta necessità di individuare le condizioni per un massiccio straordinario potenziamento delle complessive disponibilità d'acqua per l'acquedotto.

Dopo il 1950 fu così programmato, e poi realizzato, un grandioso complesso di nuove opere. Si attuarono dapprima la captazione e la regolazione di altre sorgenti, fra cui quelle importanti denominate Gabriele, nella zona di Boccadifalco, e quelle, più a Sud, di San Ciro Maredolce.

Si avviarono poi interventi di prevalente rilevanza, allacciando alla rete le risorse provenienti da invasi artificiali, che furono realizzati con la costruzione di grandi dighe sui fiumi principali della Sicilia Occidentale (Fig.29).

Nell'ordine furono prima allacciate all'Acquedotto le acque dell'Invaso di Piana degli Albanesi (già Piana dei Greci) del volume di $25 \times 10^6 \text{ m}^3$, che modulava un affluente del F. Belice destro con una diga costruita fin dal 1923.

Seguirono poi (1978) le derivazioni dal nuovo Invaso Poma, sul F. Jato (volume $68 \times 10^6 \text{ m}^3$) e successivamente (nei primi anni '80) da quello di Scanzano sul F. Eleuterio (volume $17 \times 10^6 \text{ m}^3$). Le risorse da Piana degli Albanesi venivano derivate con una condotta che convogliava le acque nel serbatoio/ potabilizzatore realizzato a Gabriele.

Le acque dell'Invaso Poma, dedicato in parte all'irrigazione dell'area di Partinico, dopo la potabilizzazione venivano trasferite, con una condotta, verso l'area Nord della città, ove si costruivano pure alcuni capaci serbatoi di distribuzione, fra cui i più importanti furono il Petrazzi Alto e, successivamente, più a Nord, il Gallo.

Il trasferimento dell'acqua dall'Invaso di Scanzano e da prese minori veniva attuato con una derivazione Scanzano – Risalaimi, serbatoio quest'ultimo nel quale, oltre alle omonime sorgenti, convergeva anche il Nuovo Scillato, e che recentemente è stato ampliato ed integrato, con un importante moderno impianto di depurazione.

La derivazione raggiungeva poi i serbatoi a SE della città.



Figura 28 - Fontana Pretoria: "Macchina d'acqua".

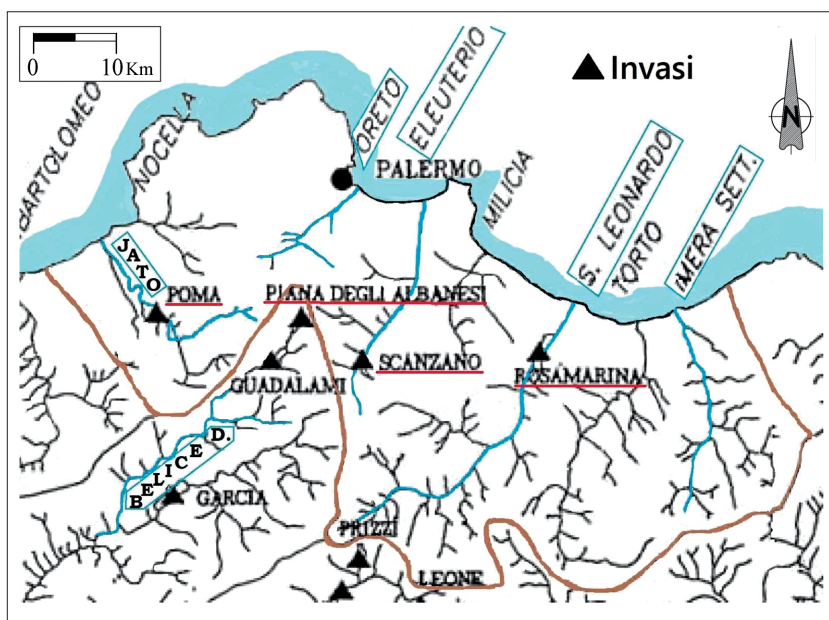


Figura 29 - Rete idrografica del Palermitano

— Corsi d'acqua utilizzati dall'Acquedotto

Questo complesso quadro veniva infine completato negli anni '90 con il più rilevante fra gli allacciamenti, rappresentato dall'utilizzo del grande Invaso di Rosamarina qui in argomento.

9.3 Il "Complesso Rosamarina" e la sua connessione con gli altri manufatti dell'Acquedotto

L'opera di derivazione delle acque dall'Invaso di Rosamarina, in sponda sinistra, comprende due rami distinti denominati rispettivamente Adduttore Est ed Adduttore Ovest.

Il primo tratto della derivazione a valle dell'opera di presa è comune ai due adduttori. Esso consiste in una galleria in pressione che si sviluppa per oltre 1.5 km nella falda Est del Monte Rosamarina e raggiunge un manufatto sotterraneo di "disconnessione" e "regolazione". Da quest'ultimo la galleria si biforca: un ramo Est raggiunge la vicina vasca di carico dell'adduttore Est; l'altro prosegue in galleria a pelo libero, per 2 km circa, per raggiungere la vasca di carico Ovest.

Dalla vasca Est una condotta in pressione va a connettersi, dopo il trattamento dell'acqua in un impianto di depurazione (Imera), con l'Acquedotto Scillato per Palermo, in prossimità di Buonfornello.

Dalla vasca di carico Ovest si diparte una lunga condotta in pressione che raggiunge Trabia, prosegue poi fino a Casteldaccia, ed ancora, con sollevamento, sino al serbatoio/depuratore di Risalaimi. Le acque, qui depurate, unite a quelle provenienti da Scanzano, vengono poi dirette verso la rete urbana.

Facendo, in definitiva, una sintesi dell'attuale complesso idrico, risulta che la città di Palermo è oggi alimentata (Figg.29 e 30) dai quattro importanti invasi artificiali su menzionati, da svariate minori prese fluenti (Fiumi Oreto, Eleuterio, Imera e Jato), con relativi potabilizzatori, da quattro copiose sorgenti (Gabriele, Scillato, Presidia-na, Risalaimi), nonché da moltissimi pozzi che sono ancora in esercizio, specie nelle aree di Trabia, Altavilla Milicia, Bagheria e Ciaculli.

Tutta la rete è servita poi da diversi serbatoi di distribuzione di cui il maggiore è quello di Monte Grifone, a Sud della città, alimentato dall'adduttrice Scanzano-Risalaimi e dall'Acquedotto Scillato.

Va ancora segnalato che recentemente è stato ultimato un ramo di acquedotto denominato "Pedemontano", tra i serbatoi Grifone (Sud) e Petrazzi Alto (Nord), che permette di spostare, ove necessario, volumi di acqua da una parte all'altra della città, ottimizzando in tal modo il servizio di distribuzione.

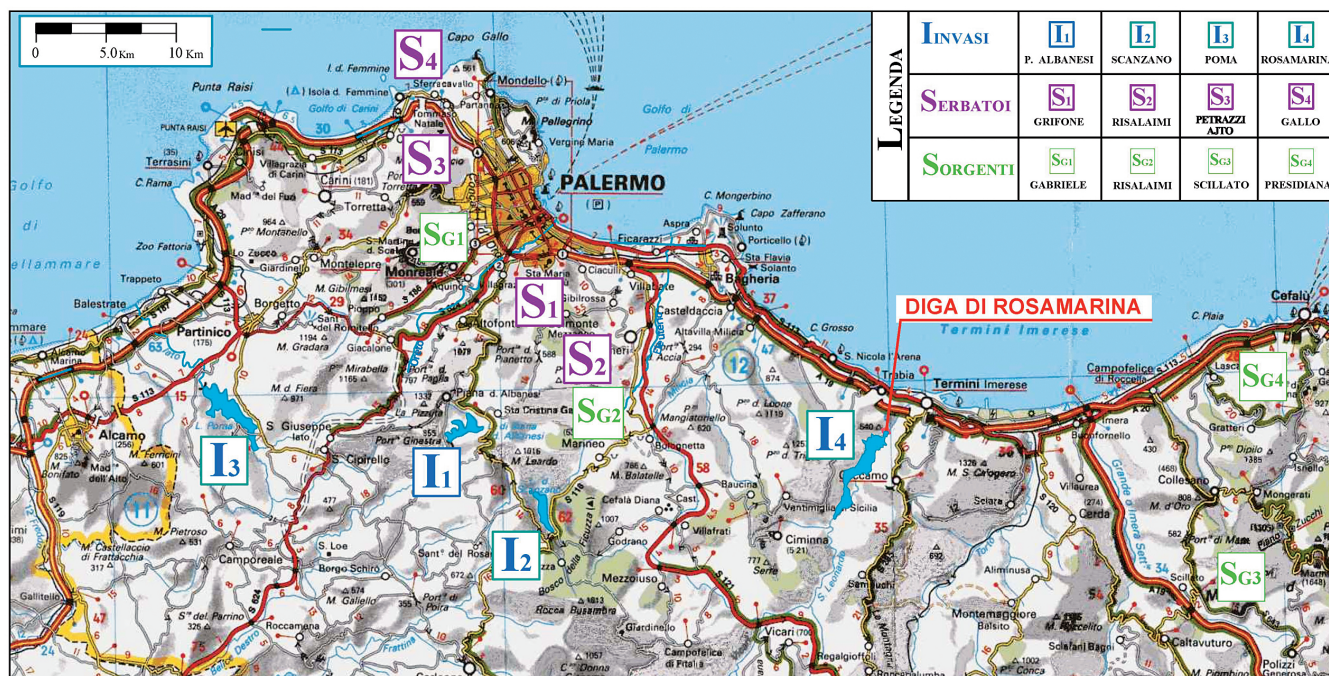


Figura 30 - Ubicazione principali opere componenti il sistema idrico connesso con l'Acquedotto di Palermo.

9.4 Il contributo di Rosamarina per l'Acquedotto e per le esigenze irrigue del litorale Est

Sul finire dell'800, e cioè all'epoca in cui fu attuato il superamento, con nuovi criteri, della storica distribuzione a "Castelletti", Palermo aveva una disponibilità di acqua di 6000 m³/giorno. Gli abitanti erano circa 85.000, sicché la dotazione dell'utenza media era di 70 l/giorno/abitante.

Cento - centoventi anni più tardi, il bacino dell'Area Metropolitana, e cioè il complesso abitativo comprendente, oltre al nucleo centrale, anche i vari "distretti" periferici a Sud e, soprattutto, a Nord, contava già almeno un milione di abitanti.

Fu dunque nella seconda metà del '900 il momento in cui si presentò, in forma acuta, per l'acquedotto, la maggiore e più recente criticità.

In effetti la potenzialità del sistema idrico, che pure era stata sistematicamente incrementata con i descritti progressivi adeguamenti, in parallelo con l'evoluzione urbanistica, non superava i $50-60 \times 10^6$ m³/anno medio.

La dotazione media di acqua per abitante era dunque di circa 150 l/giorno. Malgrado i molti interventi migliorativi operati sulla rete di condotte, le cui carenze erano state peraltro in buona parte superate, detta dotazione era comunque ancora piuttosto deficitaria per le esigenze a lungo termine di un grande centro urbano, specie negli anni idrologicamente scarsi.

Appariva dunque essenziale il contributo di una nuova rilevante risorsa che, nel caso, non poteva essere rappresentata che dall'Invaso di Rosamarina. Il volume derivabile da questo serbatoio a favore dell'Acquedotto fu originariamente stimato in circa 30.0×10^6 m³/anno.

Peraltro, in fase di costruzione, l'Amministrazione decise di utilizzare il refluo della parte sudorientale dell'area urbana per l'irrigazione di una parte del Comprensorio agricolo di progetto. In tal modo 20 milioni di m³ di acqua all'anno, previamente depurati nel potabilizzatore di Acqua dei Corsari/Ficarazzi, venivano immessi nella rete irrigua; conseguentemente dal Serbatoio di Rosamarina poteva derivarsi un volume di 20×10^6 m³ in più di acqua potabile a favore dell'Acquedotto di Palermo, che veniva, con ciò, a disporre, dal S. Leonardo, di un volume totale di 50.0×10^6 m³/anno.

In definitiva, considerando anche le risorse per l'acquedotto fornite da tutte le altre fonti di alimentazione, la città può contare, attualmente, su di un volume complessivo di circa $110-120 \times 10^6$ m³/anno medio.

Tenendo pure conto delle perdite per evaporazione degli invasi e di quelle della rete, nonché delle escursioni meteoriche annuali, qui sovente molto marcate, risulta disponibile, nel periodo medio-lungo, per il Capoluogo, anche negli anni più poveri di afflussi, una dotazione certa dell'ordine di oltre 200 l/g per abitante, che si può ritenere del tutto soddisfacente e cautelativa.



Figura 31 - Vista da Caccamo sul serbatoio.

10. CONCLUSIONI

L'Invaso di Rosamarina è il più capace fra quelli che l'Amministrazione ha recentemente portato a compimento nella Sicilia Occidentale.

Il volume rilevante del serbatoio, 100×10^6 m³, consente di soddisfare finalmente in misura adeguata i fabbisogni dell'area metropolitana di Palermo, per la quale è stato anche sostanzialmente completato l'ammodernamento della rete di distribuzione.

Le disponibilità idriche dell'Acquedotto del Capoluogo, in particolare, sono state incrementate con l'invaso dell'ottanta per cento circa; viene in tal modo data soluzione ad un problema che, sul finire del '900, aveva assunto

il carattere di una seria emergenza, anche a motivo della progressiva decrescita degli apporti idrologici dovuta alle recenti variazioni climatiche.

Il nuovo serbatoio, ad uso plurimo, rende pure disponibili nuovi apporti per diversi centri minori della Provincia ed attiva l'irrigazione di 12.000 ha di area agricola fertile e pregiata lungo la fascia litoranea fino a Cefalù. La realizzazione della diga rappresenta quindi una vera svolta storica nell'utilizzo delle risorse idriche del Palermitano.

Lo sbarramento, del tipo ad arco-gravità, è stato concepito con criteri e scelte che, valorizzando la rara presenza, in Sicilia, di formazioni rocciose calcareo-dolomitiche, e la particolare geomorfologia della valle del Fiume S.Leonardo (la "forra" di Rosamarina), hanno reso possibile un congruo e relativamente economico dimensionamento delle opere, ed in particolare della struttura della diga.

La realizzazione del complesso è stata anche un'interessante occasione per approfondire le conoscenze sulla geostruttura e sulla tettonica della forra, nonché sulle caratteristiche geomeccaniche della roccia d'impasto.

Un'accorta organizzazione dei cantieri ed una mirata conduzione delle fasi costruttive hanno preservato adeguatamente, malgrado la complessità degli interventi, le tipicità ambientali e paesaggistiche di questo singolare e spettacolare ambito del territorio siciliano.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano l'Amministrazione per aver resa possibile questa comunicazione.

Ricordano anche con gratitudine Tecnici ed Imprese che hanno fornito il loro prezioso contributo per la realizzazione della diga: in particolare i Dirigenti dell'E.S.A., il Coprogettista Ing. B. Polizzi, il Direttore dei Lavori Ing. R. Pezzini, l'Assistente Governativo Ing. A. Cusmano, l'Impresa Astaldi ed i suoi Dirigenti, ed in particolare l'Ing. L. Coen e l'Ing. F. Barro, l'Impresa Rodio, il Servizio Dighe e la Commissione di Collaudo.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

A.M.A.P., 2016. *Cenni storici - Cronologia dell'Acquedotto di Palermo*, Sito Web.

Astaldi SpA, 1990. *La diga di Rosamarina sul Fiume S. Leonardo*, Monografia Eurotip, Roma.

Baldovin G., Barro F., Coen L., Lavorato A., Pezzini R., 1991. *Rosamarina Dam Design and Construction*, Idrotecnica, 2.

Benfratello G., 2015. *Racconto del recupero ambientale del territorio dominato dal Monte Herkte*, L'Acqua, 6.

Bigalli F., Dolcimascio F., Jappelli R., Pezzini R., Toti M., Valore G., 1980. *Dighe in Sicilia*, Ed. Aster, Milano.

Di Piazza M., 2008. *Palermo Città d'acqua*, A.M.A.P., Palermo.

Ferla M., Jappelli R., 2014. *Verso il centenario della Diga Piana dei Greci*, L'Acqua, 1.

Jappelli R., Iadevaia F., Catalano A., 2011. *Per la sopravvivenza di un insostituibile patrimonio infrastrutturale*, L'Acqua, 4.

Miceli G., 1990. *Una moderna azienda per l'area metropolitana di Palermo*, A.M.A.P., Palermo.

NOTIZIARIO A.I.I. ASSOCIAZIONE IDROTECNICA ITALIANA*Via di Santa Teresa, 23 - 00198 Roma - Tel. 06.8845064 - E-mail: segreteria@idrotecnicaitaliana.it***Presidente onorario**

Ugo Majone

Presidente

Armando Brath

Vice Presidenti

Beatrice Majone

Andrea Mangano

Segretario generale

Roberto Zocchi

Revisori dei contiGianvito Mingolla (Presidente), Sergio Massetti,
Cinzia F. Ambrogio**Consiglieri**

Salvatore Alecci, Gennaro Bianco, Vincenzo Bixio,
 Francesco Bosco, Emanuela Cartoni, Giorgio Cesari,
 Giancarlo Chiaia, Cornelia Cocos, Carlo Collivignarelli,
 Vito Antonio Copertino, Giovanni de Marinis, Renato
 Drusiani, Mario Fossati, Giuseppe Frega, Andrea
 Gambi, Massimo Gargano, Giuseppe Giordano,
 Maurizio Giugni, Ruggiero Jappelli, Catello Masullo,
 Anna Maria Martuccelli, Mario Rosario Mazzola, Carlo
 Messina, Nicola Montaldo, Rossella Monti, Michele
 Mossa, Francesco Napolitano, Patrizia Piro, Giovanni
 Ruggeri, Giorgio Verri, Salvatore Villani

Soci sostenitori

ACEA S.p.A. - Roma

ACEA ATO 2 S.p.A. - Roma

ACEA ELABORI S.p.A. - Roma

ACQUA CAMPANIA S.p.A. - Napoli

ACQUE S.p.A. - Ospedaletto (PI)

ACQUEDOTTO DEL FIORA S.p.A. - Grosseto

ANBI - Roma

CAE S.p.A. - San Lazzaro di Savena (BO)

CAPRARI S.p.A. - Modena

COMITATO NAZIONALE ITALIANO PER LE GRANDI
DIGHE - Roma

CONSORCIO AGUA AZUL S.A. - S. Isidro, Lima (Perù)

CONSORZIO DI BONIFICA SARDEGNA MERIDIONALE - Cagliari

ENTE ACQUE DELLA SARDEGNA - Cagliari

FAVER S.p.A. - Bari

FITT S.p.A. - Sandrigo (VI)

G.E.A.L. S.p.A. - Lucca

GORI S.p.A. - Ercolano (NA)

HERA S.p.A. - Bologna

OFFICINE MACCAFERRI ITALIA S.r.l. - Zola Predosa (BO)

ORDINE DEGLI INGEGNERI Prov. di Firenze

ORDINE DEGLI INGEGNERI Prov. di Palermo

ORDINE DEGLI INGEGNERI Prov. di Perugia

PUBLIACQUA S.p.A. - Firenze

ROMAGNA ACQUE - Società delle Fonti S.p.A. - Forlì

SOGESID S.p.A. - Roma

SYSTEM GROUP - Lunano (PU)

UMBRA ACQUE S.p.A. - Perugia

UTILITALIA - Roma

VEOLIA WATER TECHNOLOGIES ITALIA S.p.A. - Milano

VIANINI INDUSTRIA S.p.A. - Roma

XYLEM WATER SOLUTION ITALIA S.r.l. - Lainate (MI)