



L'ACQUA

ESTRATTO

Giuseppe Baldovin, Ezio Baldovin, Mario Toti
RINASCITA E VALORIZZAZIONE DELLO STORICO INVASO DI LENTINI



ISSN 1125-1255 - Poste Italiane S.p.A. - Spedizione in abbonamento postale - D.L. 353/2003 (convertito in L. n. 46 del 27/02/04) art. 1 comma 1 - D.C.B. ROMA

Direttore Responsabile
Mario Rosario Mazzola

Vicedirettore
Maurizio Giugni

Comitato di redazione
Lorenzo Bardelli
Nicola Bazzurro
Gabriele Freni
Ruggiero Jappelli
Michele Mossa
Enrico Rolle
Giuseppe Rossi Paradiso
Aurelia Sole
Michele Zazzi

Comitato tecnico-scientifico
Aronne Armanini
Baldassare Bacchi
Ignazio Becchi
Marcello Benedini
Giuseppe Bortone
Armando Brath
Bruno Brunone
Luigi Da Deppo
Giuseppe De Martino
Giampaolo Di Silvio
Leopoldo Franco
Francesco Lettera
Ugo Majone
Andrea Mangano
Antonio Massarutto
Ugo Moisello
Luigi Natale
Andrea Rinaldo
Giovanni Seminara
Maria Giovanna Tanda
Lucio Ubertini
Massimo Veltri
Pasquale Versace

Responsabile di redazione
Olimpia Arcella
arcella.acqua@idrotecnicaitaliana.it

Segretaria di redazione
Caterina Porfidia
caterina@idrotecnicaitaliana.it

Impaginazione e grafica
PixelStudio di Michele Massara



Questo periodico è associato
all'Unione Stampa Periodica Italiana

Stampata su carta **Burgo**

respecta



In copertina: La cascata del lago di Malga Boazzo in Val Daone (Trentino-Alto-Adige). Foto di Carmen Buffa.

Editore Associazione Idrotecnica Italiana
Via di Santa Costanza, 7 - 00198 ROMA
Redazione: Tel. 06.64780700 - Fax 06.8552974
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 - D.L. 353/2003 (convertito in L. n. 46 del 27/02/04) art. 1 comma 1 - D.C.B. 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.

Licenziato in tipografia l'8/02/2012. Finito di stampare nel mese di febbraio 2012 dallo Stab. Tipolit. U. Quintily S.p.A. - Roma Viale Enrico Ortolani, 149/151 - Tel. 06-52169299

Collaborano alla rivista:

Associazione Nazionale Bonifiche e Irrigazioni (ANBI), Federazione delle Imprese Energetiche e Idriche (FederUtility); Mediterranea delle Acque S.p.A. (Gruppo IREN), Romagna Acque Società delle Fonti S.p.A. (Forlì), SOGESID S.p.A. (Roma).

Giuseppe Baldovin, Ezio Baldovin, Mario Toti*

RINASCITA E VALORIZZAZIONE DELLO STORICO INVASO DI LENTINI**

HISTORIC LENTINI RESERVOIR RENAISSANCE

L'Invaso di Lentini (Sicilia) è stato ricostituito con una diga perimetrale in materiali sciolti sull'area di un antico lago interno naturale. E' alimentato con i deflussi provenienti dal Fiume Simeto e dal Fiume S. Leonardo. L'acqua è destinata a scopi irrigui, industriali e civili delle province di Catania e Siracusa. Con una capacità di 127 milioni di m³, modula circa 70 milioni di m³/anno di deflussi medi. La diga ha un'altezza massima di 33 m e ed una lunghezza complessiva di 9 km con due distinti rami. Realizzata in calcarenite e rockfill basaltico, è controllata da un esteso sistema di filtri e drenaggi ed è rivestita con un manto di calcestruzzo bituminoso. Le opere di scarico e di derivazione sono ubicate in corrispondenza di un rilievo che separa le due porzioni della diga. La costruzione dell'opera ha richiesto un'estesa bonifica della fondazione, già coperta dai depositi del vecchio lago. Data la profondità della fondazione è stato creato un sistema complesso di drenaggio, naturale e con pompaggio, che comporta una sistematica impegnativa manutenzione in esercizio. L'area ha sismicità medio-elevata, con fonte sismogenetica prevalente nella "scarpata maltese", faglia sottomarina che corre parallela alla costa a 10-20 km di distanza. Un recente sisma ha reso necessari lavori di risarcimento del manto bituminoso.

Parole Chiave: Ripristino serbatoio multiuso, Manto bituminoso, Drenaggio, Canali allaccianti, Sicurezza sismica.

The historical Lentini Lake (Sicily) has been re-created with a perimetrical earth rockfill dam enclosing the area of an old internal natural pond. The new reservoir, of 127x10⁶ m³ capacity, has solved a secular problem for the Provinces of Catania and Siracusa, supplying water for civil, irrigation and industrial needs. The flooded area is a tectonic graben, constituted by a pleistocenic formation of marine clay 200 m thick. The main dam is 33 m high and its axis, divided in two sections, is 9 km long. The embankment is formed with calcarenite and basalt rockfill; its upstream face is lined with a bituminous concrete lining. The foundation of the dam requested various important works for the reclamation of the sediments of the old lake. Due to the deepness of the lacustrine and alluvial sediments overlaying the marine clay, a complex network of drainages, both natural and with pumps, safeguards the inspection galleries and the embankment, requiring a compelling and systematic maintenance in operation. The seismicity of the area is rather high, the main seismogenetic source being the "Malta Escarpment", a submarine fault with direction parallel to the Eastern Sicily coast, 20 km far. A recent 5.4 Magnitude earthquake caused some fissures in the bituminous lining, when the reservoir was still empty, so that they have been easily restored.

Key Words: Multipurpose Reservoir Re-creation, Bituminous Concrete Lining, Drainage, Supply Conveyor Channels, Seismic Safety.

1. CENNI STORICI

La creazione di grandi serbatoi è spesso ottenuta ampliando o regolando laghi naturali esistenti o con il ripristino di storici invasi abbandonati o prosciugati nel tempo. Tali situazioni sono frequenti in Italia. Basti ricordare la regolazione a serbatoio dei Laghi Maggiore e di Como, del Lago di S. Croce, il Serbatoio di Vernago in Val Senales, il Serbatoio di Bilancino, già lago prosciugato dagli Etruschi, la Vasca artificiale di Clarea. Il caso più recente è quello del nuovo Invaso di Lentini che è stato ricostituito in Sicilia in un'area storica conosciuta nell'epoca dell'antica Roma come il granaio dell'Impero e che fu cantata da poeti e scrittori, come Omero⁽¹⁾, e descritta da Cicerone, pretore di Sicilia⁽²⁾.

Durante il Medio Evo alla confluenza di alcuni corsi d'acqua minori locali, circa 10-15 km prima della foce dell'attuale Fiume S. Leonardo, si formò un piccolo lago naturale interno senza bacino imbrifero proprio, che veniva utilizzato per scopi diversi; Federico II di Svevia (1200) promosse la formazione dei "pantani artificiali" per la coltura della pesca, con una prima

* Giuseppe Baldovin, Ing., Ezio Baldovin, Ing., Geotecnica Progetti Srl, Via Roncaglia 14, 20146 Milano; Mario Toti, Ing., Libero Professionista.

** Il presente articolo è tratto da una memoria presentata alla Giornata di studio ITCOLD, 28 ottobre 2010.

(1) "Sei di navigammo, e notti sei; e col settimo sol della sublime città di Lamo dalle larghe porte, di Lestrigonia pervenimmo a vista. Quivi pastor, che a sera entra col gregge, chiama un altro, che fuor con l'armento esce. Quivi uomo insonne avria doppia mercede. L'una pascendo i buoi, l'altra le agnelle dalla candida lana: sì vicini sono il diurno ed il notturno pasco" (Odissea X).

(2) "...Campus ille Leontinus, nobilissimus ac feracissimus; uberrima Siciliae pars, caput rei frumentariae..." "...giacché qui il grano nasce spontaneo, produce cento volte la semente e la dea Cerere ne diffonde la coltura in tutte le contrade..."

diga in terra alla foce del fiume Teria (oggi S. Leonardo). L'invaso fu ampliato gradualmente, da Alfonso I e Ferdinando II di Aragona (1200-1400), anche con l'irrobustimento della prima diga, fino a raggiungere la superficie di alcune migliaia di ettari ed assumere la denominazione "Biviere": "*Lacus milia prope duo a civitate - Leontinorum manu factus non cultus ante patrum nostrorum, cum Bivarii nomine...*". La diga in terra fu poi sostituita da D. G. Branciforte, Principe di Butera (1700), con una diga in muratura.



Figura 1 - L'antico "Biviere".

2. GEOLOGIA DELL'AREA

L'area occupata dal serbatoio si ubica ad una quota media di circa 15 m s.m.. La formazione di base è costituita da depositi argillosi marini datati al Pleistocene Inferiore (Siciliano o Calabriano) che raggiungono spessori massimi di 200 m circa. Detti depositi risultano mascherati in superficie da una coltre di alcuni metri di alluvioni recenti argilloso-sabbiose terrazzate, talora ciottolose, e di limi lacustri bruni ricchi in sostanze organiche, costituenti il materiale di fondo del vecchio lago.

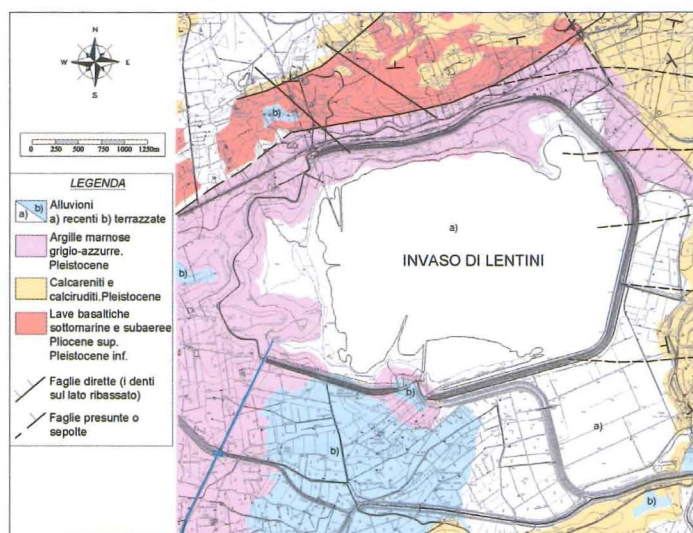


Figura 2 - Geologia dell'area del serbatoio.

Talune faglie vicarianti di questo sistema sembravano interessare direttamente la diga principale: in realtà durante la costruzione delle opere non si è avuto riscontro diretto di questa situazione.

3. IL SERBATOIO E LA DIGA

3.1 Dati principali

Il serbatoio ha una forma trapezia, copre una superficie di 10 km² con un tirante d'acqua massimo di 20 m circa ed ha la capacità utile di 127x10⁶ m³. E' contenuto da una lunga diga formata da due rami: il principale ha una linea d'asse a forma di U sui lati N-E-S, altezza massima sulla fondazione 33 m e sviluppo 7.250 m; il secondo ramo, lato Sud, ha un'altezza massima 20 m e lunghezza 1.550 m.

La sponda Ovest è formata dal versante naturale (Figura 3).

Negli ultimi secoli il serbatoio fu progressivamente abbandonato e, per ragioni igieniche, l'area dovette essere infine drenata (Figura 1).

Seguì, negli anni tra il 1930 ed il 1950, a cura dello Stato Italiano e per esso del Consorzio di Bonifica del Lago di Lentini, la grande bonifica della Conca di Lentini, con il riordino e la sistemazione di tutta la rete idraulica, e la contestuale rivalorizzazione dell'area su di un comprensorio di 11.000 ettari.

Nel periodo 1970-2000 è stato realizzato nel sito un nuovo grande serbatoio artificiale, con la costruzione di una lunga diga perimetrale in materiali sciolti, il cui asse si sviluppa lungo tre lati di un poligono contenente l'antico lago.

Il serbatoio verrà utilizzato per irrigazione, a servizio dell'industria e per usi civili ed è considerato un elemento essenziale ai fini dello sviluppo economico della Sicilia essendo collocato nella parte più produttiva dell'isola.

Le "argille azzurre" marine pleistoceniche di base, sono in realtà argille limose e limi argillosi, poco sabbiosi. Verso la base del deposito alcuni sondaggi hanno rivelato la presenza di sottili orizzonti ghiaiosi.

Il substrato profondo delle argille è costituito da formazioni a consistenza lapidea di Calcareniti (Pleistocene Inferiore) e da più antichi basalti appartenenti alla formazione delle Vulcaniti.

Le Calcareniti sono depositi organogeni giallastri a grana grossolana e tessitura stratificata con percentuali di carbonato di calcio del 70÷80 %. Esse risultano in trasgressione o, talora, in continuità stratigrafica con le Vulcaniti.

Dal punto di vista tettonico, l'area sede del bacino costituisce una depressione originatasi a seguito di dislocazioni del substrato esplicatesi lungo due sistemi di faglie principali, di cui il più importante ha direzione E-O (Figura 2).

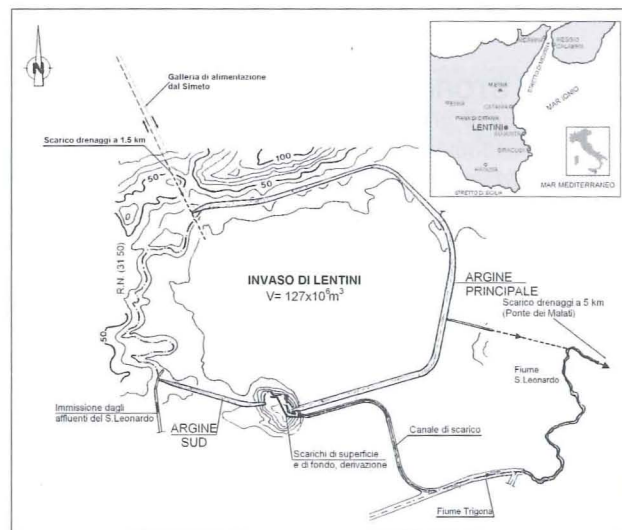


Figura 3 - Planimetria dell'Invaso.

3.2 Il corpo diga

Il corpo diga, il cui volume complessivo è di circa 9.000.000 m³, è realizzato con l'impiego di calcareniti e di basalti ampiamente presenti nella zona. La tenuta idraulica è affidata ad un manto bituminoso sul paramento di monte, che consente il controllo delle filtrazioni ed è perciò formato da due strati impermeabili di 8 cm di spessore ciascuno con incluso uno strato drenante. Il manto ha uno spessore complessivo di 32 cm e si estende su di una superficie di circa 385.000 m². La pendenza del paramento è 1/1,8 (Figura 4).

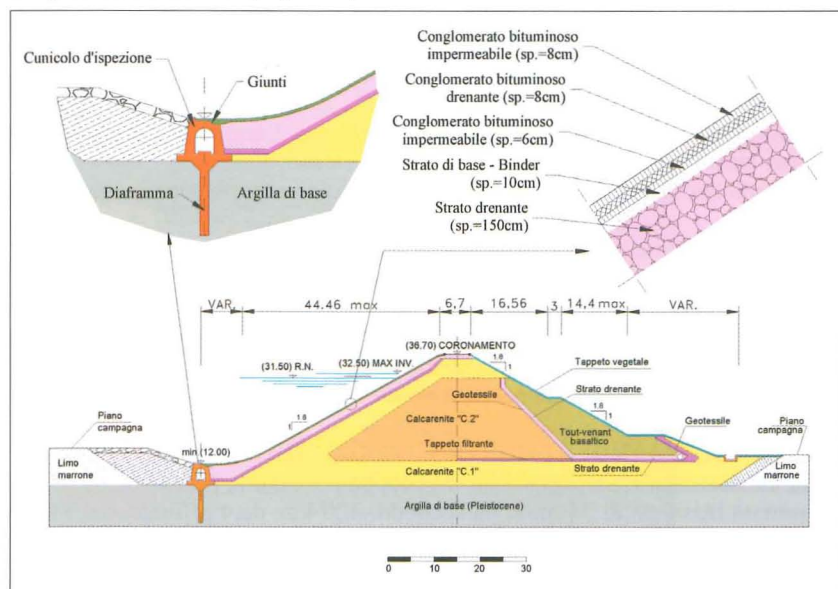


Figura 4 - Sezione tipo della diga.

- la zona di valle in rockfill basaltico, profilata con pendenza del paramento di 1/1,8 e due banchine rompitratta.

La strutturazione del corpo diga è concepita in modo da realizzare il controllo delle eventuali filtrazioni da monte nel rilevato ed attraverso la fondazione, ma anche delle acque provenienti dalle falde presenti nei declivi circostanti e confluenti sul banco di argille azzurre di base.

La zona di valle in rockfill basaltico, oltreché svolgere una funzione strutturale, rappresenta anche una difesa nei riguardi di eventuali acque superficiali che dovessero eccezionalmente confluire da detti declivi verso il piede diga.

Un sistema molto articolato di filtri, zone di transizione e dreni controlla la filtrazione dell'acqua nel corpo diga e nella fondazione.

In particolare, al passaggio tra calcarenite C2 e strato drenante subverticale, stante la granulometria delle frazioni più fini in C2, è stato utilizzato un geotessile di adeguata capacità di ritenzione e permeabilità; lo stesso geotessile forma il filtro al piede di valle, nello zoccolo posto a difesa dalle acque superficiali esterne (ICOLD, 1986; Baldovin E., 1990; Baldovin E., 1992).

Come risulta dalla Figura 5, in cui è indicata la granulometria media estrapolata dai controlli durante la costruzione, le calcareniti coprono una fascia granulometrica piuttosto ampia, con $d_{15} = 0,063$ mm, $d_{50} = 1,8$ mm, $d_{85} = 45$ mm, mentre lo strato drenante $\sim 2/70$ mm ha la tipica curva con banda ristretta.

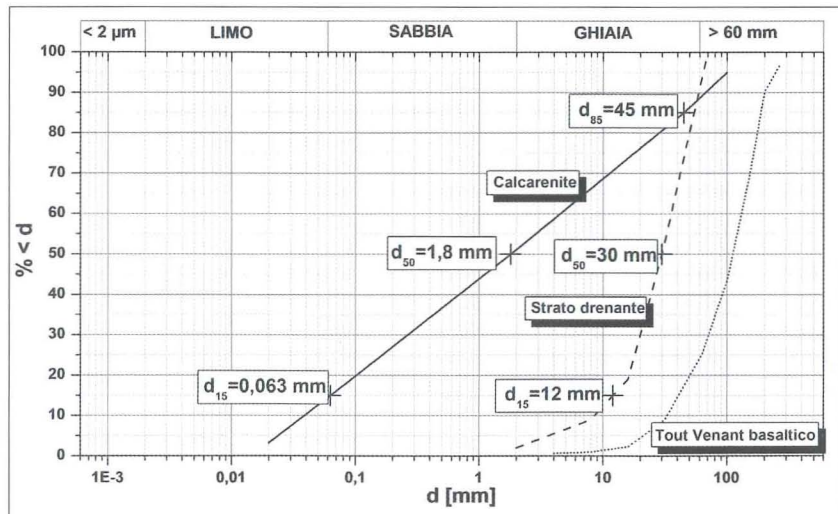


Figura 5 - Curve granulometriche medie.

Alla base il manto si salda ad un cunicolo in calcestruzzo armato per ispezione e raccolta dei drenaggi, raccordato con un taglione che si immorsa direttamente nelle argille azzurre di base.

I materiali costituenti la diga sono disposti a formare le zone seguenti:

- una fascia drenante, di spessore 1,5 m, posta a letto del manto bituminoso di tenuta, e seguita da uno strato di transizione spesso 0,5 m;
- il corpo centrale, realizzato con calcarenite selezionata in cava, distinta in tipo C1, alla base e sotto il paramento di monte, e tipo C2 altrove: il tipo C2 si differenzia per un maggiore contenuto in frazione fine, che svolge una funzione di tenuta sussidiaria in caso di lesione del manto (permeabilità $k=3 \times 10^{-6}$ m/s); la sua delimitazione verso valle è costituita da un geotessile e da uno strato drenante subverticale spesso 1,0 m, che separa il corpo calcarenitico dalla zona di valle;

Il geotessile impiegato è un non tessuto agugliato in poliestere di peso 350 g/m² e spessore 2,6 mm. Il diametro di filtrazione D_f è di 54 micron, la permeabilità media è $k = 2,7 \times 10^{-3}$ m/s sotto un carico di 2 kPa, con permittività $\psi = 0,30$ s⁻¹.

Entrambi i criteri di ritenzione e permeabilità, abitualmente utilizzati, sono ampiamente rispettati.

Nel complesso la quantità di geotessile posato ammonta a circa 400.000 m².

3.3 La fondazione ed il dispositivo generale dei drenaggi

La fondazione della diga è costituita ovunque dalla formazione di "argilla azzurra" pleistocenica, a circa dieci metri di profondità dal piano campagna.

Questa disposizione è stata adottata soprattutto per ragioni di sicurezza nei riguardi delle sollecitazioni di carattere sismico, malgrado in alcune aree le argille azzurre fossero ricoperte da lenti di limo sabbioso con caratteristiche meccaniche di per sé accettabili.

Un importante scavo è stato dunque eseguito per eliminare lo strato di alluvioni fini depositatosi durante la vita dell'antico lago.

Conseguentemente si è dovuto realizzare un reticolo complesso di raccolta e drenaggio delle acque, in parte per caduta naturale e in parte con pompaggio, lungo tutto lo sviluppo della diga. E' in tal modo assicurata la preservazione all'asciutto di tutti i cunicoli di servizio, anche profondi.

Nove cunicoli trasversali collegano quello longitudinale principale, posto al piede del manto di monte, ed il collettore al piede di valle.

La restituzione delle acque drenate avviene, dopo un lungo percorso, nel Fiume S. Leonardo per l'argine Sud e per la diga principale sui lati E e S e nel Fiume Simeto per il lato Nord.

In particolare il S. Leonardo viene raggiunto utilizzando anche una galleria esistente (1,5 km) con un percorso complessivo di 5 km.

Sul lato Nord, dopo un percorso in galleria di 800 m, il recapito è un compluvio che scarica nel Simeto. Per questa tratta si è utilizzata la stessa galleria che allaccia a Lentini le acque del Simeto da Ponte Barca, inserendo nell'arco rovescio un condotto che evacua il drenaggio in contropendenza rispetto all'alimentazione del serbatoio.

Per il controllo della diga sono monitorate 17 sezioni, con circa 200 strumenti, che registrano le deformazioni della fondazione e del rilevato ed il regime piezometrico. Inoltre un nutrito numero di stazioni misura i valori di filtrazione attraverso il corpo diga e la fondazione. La rete di monitoraggio sismico viene illustrata nel paragrafo 5.4.

4. CANALI ALLACCIANTI, SCARICHI DELLA DIGA E MANUFATTI DI DISTRIBUZIONE

Le adduzioni al serbatoio (Figura 7) sono costituite da due canali: un primo, che si sviluppa per 20 km, parzialmente in galleria, proviene dal Fiume Simeto (lato N), per la portata massima di 24 m³/s; un secondo, di 9 km, da 4 affluenti del Fiume S. Leonardo (lato S), per una portata massima di 50 m³/s. In definitiva la massima portata che può essere immessa nell'invaso è di 74 m³/s. La presa sugli affluenti del S. Leonardo è realizzata mediante traverse (Figura 6). Lo sbarramento dei torrenti avviene con paratoie a settore con sovrapposta ventola, manovrabili manualmente od in automatico. Ogni traversa è munita di dispositivo di continuità idraulica (scale a pesci) e di una vasca dissabbiatrice.

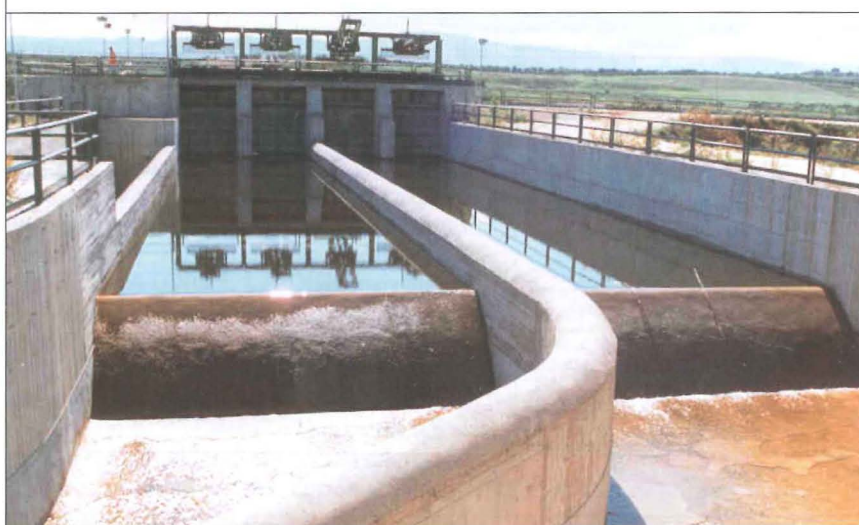


Figura 6 - Traversa e vasca dissabbiatrice.

Il canale adduttore è costituito da una prima parte con tubazioni in cemento, poi da un breve tratto in galleria, quindi prevalentemente da uno scatolare doppio in calcestruzzo armato interrato. La derivazione del Simeto è realizzata con tubazioni e, per un breve tratto, in galleria. Le alimentazioni d'acqua derivate sono direttamente controllate dalla sala quadri della casa di guardia dell'invaso. Lo scarico di superficie del serbatoio (Figura 7) è ubicato tra la sezione Sud e quella della diga principale, ed è costituito da uno sfioratore a soglia fissa, capace di smaltire 160 m³/s, e cioè la portata massima in arrivo dai canali, sommata con la piena massima prevista per il piccolo bacino proprio dell'invaso.

L'imbocco dello scarico di fondo e le bocche di presa delle derivazioni d'acqua sono ubicati all'interno di un apposito edificio a torre (Figura 8). Segue una galleria a pelo libero, lunga circa 330 m, scavata nelle argille di base. Lo scarico di fondo è intercettato da 2 paratoie rettangolari e può smaltire una portata massima di 200 m³/s. Nella platea della galleria sono alloggiati 2 tubi per le derivazioni dirette verso Lentini,

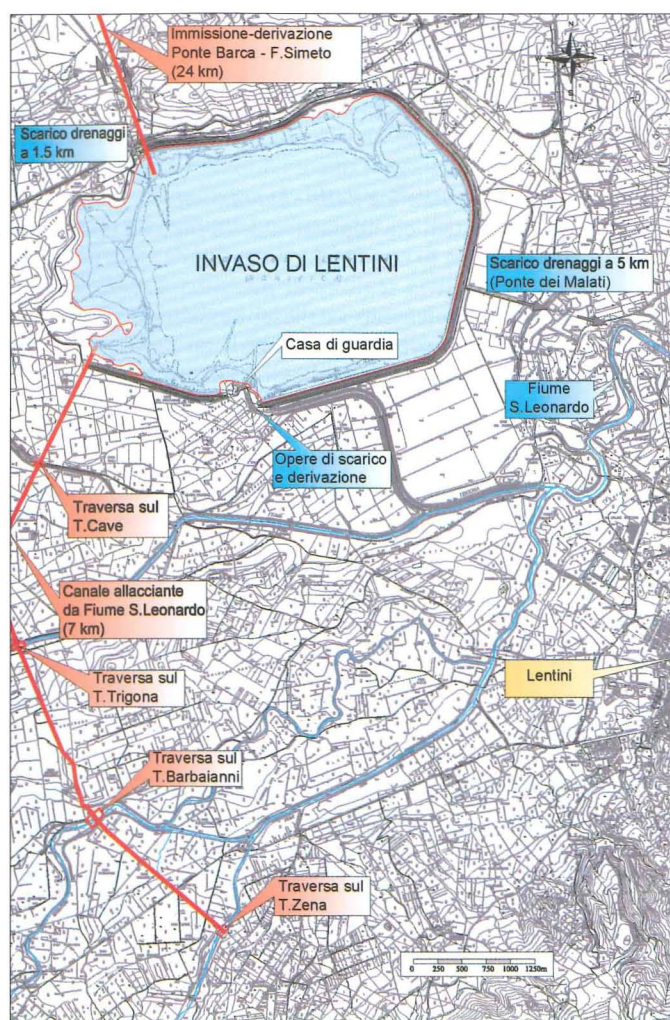


Figura 7 - Adduttori e scarichi - Planimetria generale.

La sicurezza sismica della diga è stata attentamente esaminata (ICOLD, 1986). Sebbene la maggiore concentrazione di eventi sia localizzata nell'area caratterizzata dal graben di Simeto-Scordia-Lentini, ed in particolare modo nella zona di intersezione tra la faglia trascorrente Scicli-Ragusa-Monte Lauro e la struttura a graben, i terremoti più forti sono solitamente localizzati più a Est, in prossimità della Scarpata di Malta (Figura 9).

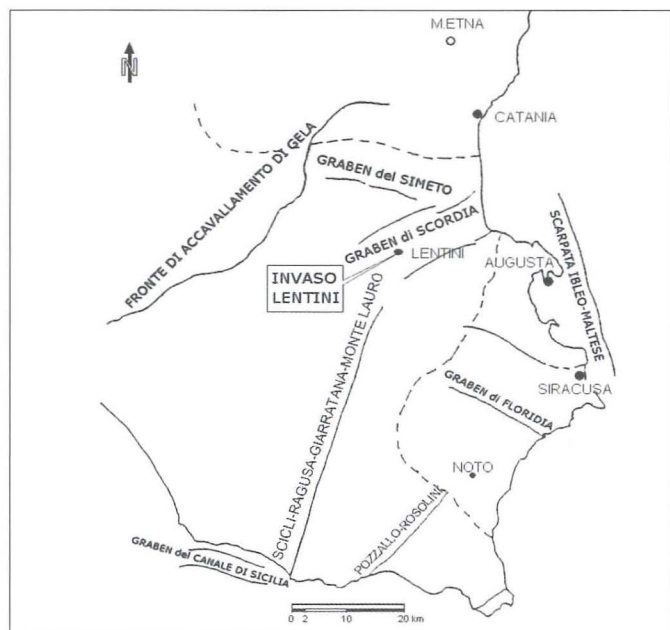


Figura 9 - Lineazioni tettoniche.

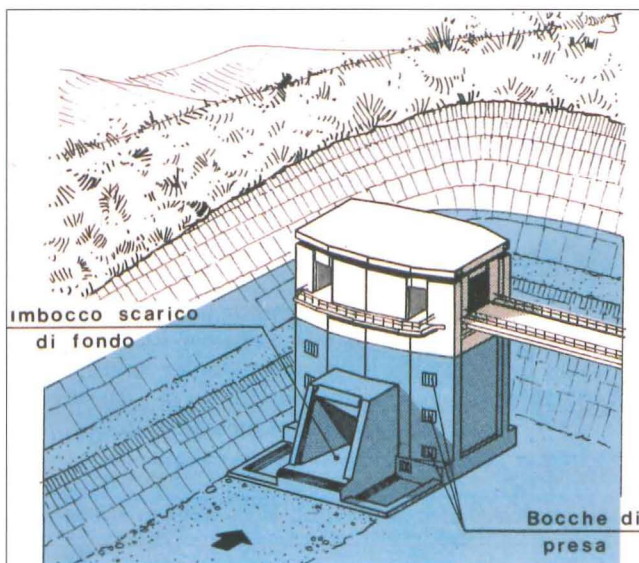


Figura 8 - Torre di presa.

Catania ed Augusta ad uso dell'irrigazione e dell'industria. Al termine della galleria la vasca di dissipazione dello scarico di fondo affianca quella dello scarico di superficie. Un unico canale lungo 2.300 m convoglia le acque dei due scarichi fino all'immissione nel Torrente Trigona, affluente del S. Leonardo.

5. VALUTAZIONE SICUREZZA SISMICA DELLA DIGA

5.1 Sismicità dell'area

La Piana di Lentini è il risultato di movimenti tettonici piuttosto energetici, con deformazioni e faglie la cui età è databile all'ultima parte del Quaternario.

Poiché l'area è storicamente interessata da eventi sismici importanti e relativamente frequenti, la valutazione della si-

curità sismica della diga è stata attentamente esaminata (ICOLD, 1986). Sebbene la maggiore concentrazione di eventi sia localizzata nell'area caratterizzata dal graben di Simeto-Scordia-Lentini, ed in particolare modo nella zona di intersezione tra la faglia trascorrente Scicli-Ragusa-Monte Lauro e la struttura a graben, i terremoti più forti sono solitamente localizzati più a Est, in prossimità della Scarpata di Malta (Figura 9).

5.2 Valutazione dell'hazard sismico

In base alla classificazione sismica nazionale l'area delle opere è definita di 2^a categoria.

Per lo studio di hazard sismico è stato seguito l'approccio probabilistico utilizzando la metodologia di Cornell (Cornell, 1968). Allo scopo si è operata una suddivisione delle aree circostanti in zone caratterizzate da una sufficiente omogeneità. A ciascuna di esse è stata attribuita una legge di ricorrenza applicando la relazione Gutenberg-Richter sulla base della sismicità storica.

Si sono quindi stabilite le leggi di attenuazione dei parametri caratteristici del moto del terreno in funzione del mezzo in cui si propagano le onde e delle condizioni locali del sito, adottando la formulazione ricostruita da Sabetta e Pugliese su dati italiani (Sabetta-Pugliese, 1996).

L'analisi è stata eseguita per due tempi di ritorno, rispettivamente 475 anni per l'OBE e 975 anni per l'MDE. Le valutazioni sono state effettuate in termini di valori di picco del moto (PGA, PGV) e di valori spettrali (PSA) in cinque punti topografici, rispettivamente al centro ed alle estremità cardinali dell'invaso.

I valori di picco massimi sono stati ottenuti nel sito Est, che

per un tempo di ritorno di 975 anni (MDE) presenta PGA di 0,21 g. La Figura 10 riporta gli spettri di risposta in accelerazione, con smorzamento 5%, a ricorrenza millenaria.

Essi presentano una forma piuttosto regolare. I valori massimi delle ordinate spettrali ricadono nell'intervallo di periodo 0,15-0,4 secondi con valori di amplificazione fino a 2,7. Anche in questo caso il sito Est (sezione principale della diga) risulta il più gravoso.

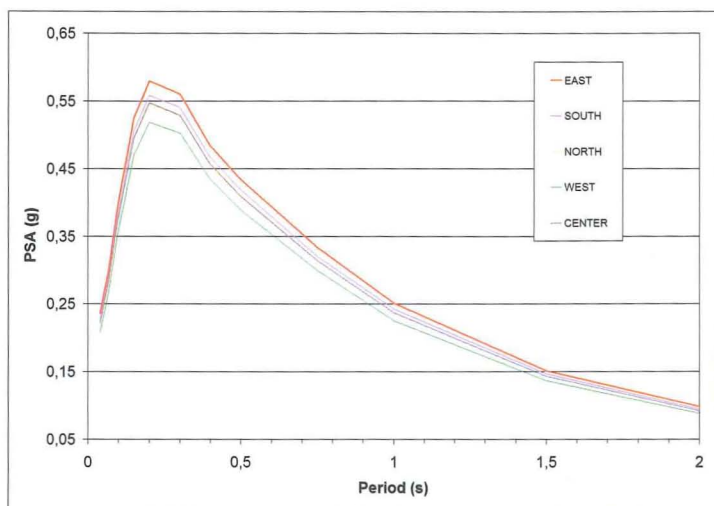


Figura 10 - Spettri di accelerazione di progetto (Tr=975 anni).

to, utilizzando i risultati di esperienze condotte su altre dighe italiane in materiali sciolti. In particolare il modulo di taglio G è stato assunto come una frazione decrescente di G_0 a basse deformazioni ($G_0 = a + k_2 * (\sigma')^{0.5}$) e lo smorzamento D compreso tra 0,5 e 25 % al crescere delle deformazioni tangenziali.

Il reticolo adottato è identico a quello dell'analisi statica. L'analisi dinamica di riferimento dell'argine principale è stata effettuata con il modello lineare-equivalente, utilizzando 6 accelerogrammi rappresentativi del MDE individuati nella valutazione di hazard. I valori di picco del moto in corrispondenza del coronamento risultano inferiori a 0,6 g, con una frequenza propria della struttura prossima a 3,5 Hz.

Il calcolo degli spostamenti permanenti svolto secondo il modello "sliding block" di Newmark (Newmark, 1965), è stato sviluppato sia con correlazioni empiriche che con integrazione numerica. Si sono così ottenuti cedimenti massimi rispettivamente di 0,6 m (anche perché le magnitudo di riferimento delle correlazioni superano abbondantemente la $M=6,5$ dell'MDE) e 0,3 m.

Infine è stata ripetuta l'analisi dinamica anche con un modello non lineare confermando un cedimento irreversibile del coronamento a fine terremoto di 0,35 m. Il franco di progetto di 4,2 m, stabilito in conformità alle Norme italiane, risulta quindi ampiamente dimensionato per fronteggiare i potenziali cedimenti indotti dal sisma di progetto.

5.4 Monitoraggio sismico

Allo scopo di controllare la sismicità naturale ed indotta dalla formazione dell'Invaso di Lentini è stato installato un sistema di monitoraggio dinamico costituito da 3 stazioni accelerometriche "strong motion" installate in corrispondenza della sezione di massima altezza dell'argine principale (free field al piede di valle, in asse all'interno del cunicolo trasversale, e sul coronamento) e da 2 stazioni accelerometriche "strong motion" ubicate sul coronamento di due delle opere di presa dal Fiume S. Leonardo.

Tale sistema è stato integrato con una rete microsismica installata a copertura generale del perimetro del serbatoio, con particolare attenzione ad eventuali moti differenziali a Nord e a Sud della citata faglia Est-Ovest (Figura 2) ad antica dislocazione subverticale. Detta rete è costituita da una stazione con sismometro triassiale in corrispondenza della casa di guardia, attrezzata con un sistema di telemetria ed un'antenna, e da cinque stazioni monoassiali verticali alimentate con pannelli fotovoltaici ed allocate in manufatti appositamente realizzati in calcestruzzo armato rivestito con pietra Sabucina per un miglior inserimento ambientale.

6. ESERCIZIO E MANUTENZIONE

L'esercizio e la manutenzione del sistema risultano piuttosto complessi ed onerosi a causa dell'estensione notevole dei manufatti di adduzione e derivazione, del grande sviluppo della diga e della specifica collocazione di parte delle opere.

In particolare per la manutenzione sono prevalenti gli interventi per:

- la conservazione del manto di monte in conglomerato bituminoso e del paramento vegetale di valle della diga, soggetti ad elevati sbalzi stagionali di temperatura. Il paramento di monte è stato all'uopo protetto con pellicola antisoletto;
- il funzionamento del sistema di pompaggio, per sollevare le acque raccolte dai dreni della diga e dal perimetro esterno all'area del serbatoio, e del relativo sistema di scarico;
- l'automatismo degli impianti elettrici a servizio del controllo e della gestione, essenzialmente delle opere di presa, degli scarichi e delle derivazioni, dell'illuminazione, del monitoraggio e del sollevamento delle acque profonde;

- il monitoraggio di tutte le opere;
 - il controllo e l'esercizio delle traverse, richiedenti rilevanti interventi periodici di asportazione del trasporto solido.
- Un'unità operativa permanente, comprendente qualche decina di tecnici, è dedicata allo svolgimento di queste funzioni.

Un intervento straordinario è stato eseguito sul manto bituminoso in conseguenza di un evento sismico occorso nel Dicembre 1990. Tale evento ha avuto magnitudo $M_L = 5,4$, con epicentro a profondità 12,7 km, localizzato nel Mar Ionio a N di Augusta, a circa 25 km di distanza dalla diga.

Ha provocato vittime nell'area di Lentini e danni alle strutture in tutta la Provincia di Siracusa.

Al verificarsi del sisma il serbatoio era praticamente vuoto. Si sono registrate lesioni del manto bituminoso interno sul lato S, nella sezione di maggiore altezza della diga.

In numero limitato, esse presentavano andamento continuo, obliquo, dalla base al coronamento, senza spostamenti relativi dei due lembi, erano distanti alcune decine di metri ed avevano un'apertura di 1-1,5 mm.

Hanno danneggiato peraltro solo lo strato bituminoso impermeabile superiore dei due costituenti il pacchetto di tenuta.

La riparazione è stata effettuata con fresatura di una striscia a cavallo della lesione e successivo rifacimento dello strato superficiale, oltretutto con sigillature locali e diffuse, specie in prossimità del coronamento e del piede del manto.

7. SOSTENIBILITÀ DELL'OPERA

Un'attenzione speciale è stata dedicata al tema della sostenibilità del nuovo complesso nell'ambiente, data la sua importanza naturalistica e storica.

A parte le linee generali del progetto, basate su criteri di costruzione ed esercizio compatibili, uno studio particolare è stato sviluppato per valorizzare il fatto che il serbatoio è localizzato sulle rotte degli uccelli migratori dall'Africa al Nord Europa (Figura 11).



Figura 11 - Cavaliere d'Italia nell'area umida.

In questo modo la nidificazione sarà protetta e l'"area umida naturale", con la vegetazione tipica, che rappresentava la caratteristica dell'antico stagno, sarà ripristinata, controllata e preservata.

Tutte le opere di presa dell'acqua dagli affluenti del Fiume S. Leonardo sono poi realizzate quanto più possibile con materiali naturali e con ripristino integrale degli spazi erbosi e vegetali.



Figura 13 - Casa di guardia.

E' risultata necessaria la limitazione dell'area naturale soggetta ad alterne condizioni di sommersione ed emersione, in modo da rendere attrezzata una specifica area con bassi fondali.

A tale scopo esiste una soluzione progettuale piuttosto avanzata che prevede la creazione di un piccolo lago permanente sul lato Ovest del nuovo serbatoio, mediante la costruzione di una diga "minore" intermedia (Figura 12).

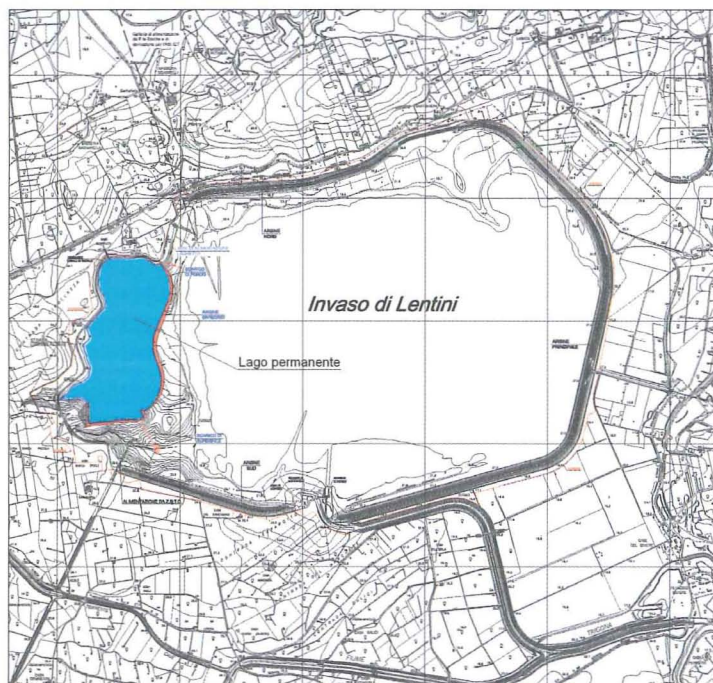


Figura 12 - Planimetria con ubicazione lago permanente.

Il grande adduttore dal San Leonardo è tutto in sotterraneo. La derivazione delle acque dal San Leonardo e dal Simeto è prevista soltanto in occasione delle morbie, con un attento rispetto del deflusso minimo vitale.

L'accesso di persone estranee agli impianti è consentito soltanto in misura limitata e con controllo rigoroso.

L'edificio centrale di controllo è realizzato con la tipica architettura delle torri "Normanne" (Figura 13), così come le altre costruzioni di servizio, ed è rivestito con lastre della locale pietra Sabucina.

8. CONCLUSIONI

La ricostruzione di un antico lago risulta un impegno costoso, così nella realizzazione come nella manutenzione (Baldovin G. et al., 2010). L'esempio di Lentini (Figura 14), peraltro, prova che essa può essere un motivato spunto per la creazione di nuovi serbatoi multiuso, a servizio delle diverse esigenze sociali ed economiche di una regione. Al tempo stesso si restituiscono all'area condizioni pienamente sostenibili quali furono quelle che videro storicamente fiorire la presenza di locali Comunità in simbiosi con zone umide vitalizzate. A conclusione non sembra superfluo ricordare i benefici "strategici" conseguiti con la realizzazione dell'impianto:

- la creazione di una grande riserva idrica per le aree di Catania e Siracusa, che consente tra l'altro di eliminare l'utilizzo di una fitta rete di pozzi di emungimento da falda preesistenti nella zona prossima alla costa;
- il riordino idraulico di tutta l'area San Leonardo-Biviere;
- il miglioramento del microclima dell'area determinato dall'estesa superficie del serbatoio.

A fronte degli innegabili elementi positivi, da quanto detto si deduce anche un costo importante di gestione dell'intero impianto, che peraltro può trovare un'adeguata copertura nell'equilibrata valorizzazione, anche commerciale, già attuata in molti casi in Italia, dell'acqua distribuita, ove la stessa possa essere erogata, come è il caso di Lentini, ad uso plurimo, con elevata garanzia di continuità, anche pluriennale.

RINGRAZIAMENTI

Gli Autori ringraziano l'Amministrazione che ha reso possibile la presente comunicazione.



Figura 14 - Vista del Serbatoio e del Vulcano Etna innevato dalla casa di guardia.

BIBLIOGRAFIA

- Baldovin E., "Impiego di un geotessile negli argini dell'Invaso di Lentini", *L'ingegnere*, 1-4/1990.
- Baldovin E., "New developments of filters in some recent Italian embankment dams", In: Brauns J., Heibaum M. and Schuler U. (eds), *Proc. of the 1st Int. Conf. "Geo-Filters"*, Karlsruhe, Germany, Balkema, Rotterdam, 1993.
- Baldovin G. et al., *Invaso di Lentini - Rapporto finale della Direzione Lavori*, 2010.
- Baldovin G. et al., "Renaissance of the historical Lentini Lake", *8th ICOLD European Club Symposium*, Innsbruck 2010.
- Cornell C. A., *Engineering seismic risk analysis*, BSSA 58, 1968.
- Geotecnica Progetti, *Invaso di Lentini - Opuscolo informativo*, 1986.
- ICOLD, *Geotextiles as filters and transitions in fill dams*, Bulletin 55, 1986.
- ICOLD, *Earthquake analysis procedures for dams-State of the art*, Bulletin 52, 1986.
- Newmark N. M., "Effects of earthquake on dams and embankments", *Geotechnique*, 15, 1965.
- Sabetta F., Pugliese A., *Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motion*, BSSA 86, 1996.