

Ludington pumped storage project; embankment design

E. COMNINELLIS *

SUMMARY: The Ludington Pumped Storage Project is located on the eastern shore of Lake Michigan and uses the lake as the lower reservoir. The upper reservoir, located on the lake bluffs, is formed by a continuous embankment six miles long. An asphalt lining on the upstream face of the embankment overlapped at the toe by a clay blanket lining the bottom of the reservoir, forms a continuous impervious membrane. The reservoir, with a capacity of 83,000 acre feet, is constructed on a 30 feet deep loose to medium dense glacial outwash deposit, overlying dense materials. Author reports on the design and construction of the embankment, including foundation preparation, asphalt and clay lining and provisions against frost heave.

The Ludington Pumped Storage Project when completed in the fall of 1973 will have a generating capacity in excess of 2000 MW at maximum head. The project is located midway on the eastern shore of Lake Michigan. Lake Michigan serves as the lower reservoir, with the upper reservoir located on the lake bluffs (See figure 1). The project, which was designed and constructed by Ebasco Services, is owned by Consumers Power Company of Jackson, Michigan and the Detroit Edison Company of Detroit, Michigan, provides peaking power to the Michigan Power Pool. The design and construction of the unusual features of the upper reservoir described herein were an influencing factor in the selection of the project by the American Society of Civil Engineers as the Outstanding Civil Engineering Achievement of 1973.

The upper reservoir is formed by a continuous embankment which is approximately six miles long (See figure 2). An asphalt lining on the upstream face of the embankment overlapped at the toe by the reservoir bottom clay lining forms a continuous, impervious membrane. The reservoir, with a gross storage capacity of 83,000 acre-feet, is constructed on loose to medium-dense glacial outwash deposits which are approximately 30 feet deep, overlying exceptionally dense material.

Embankment Design and Construction

The only materials which were economically available in the vicinity of the project for the construction of the embankment are the fine sands which primarily form the Lake Michigan bluffs (See figure 3).

All the material for the embankment, which has a maximum height of 170 feet, was obtained from

the interior of the reservoir area. Zoning the embankment made the best use of the available materials, placing them according to their structural characteristics in order to provide maximum integrity. In addition, the zoning was such as to maintain as low a saturation line as possible in the embankment in the event of seepage.

The dike was zoned as shown in Figure 3. The 4.5 foot layer under the asphalt lining is calcareous silty sand. This material was placed at this location because it was the best material available to provide a satisfactory working surface for the asphalt placing equipment. When dry, the calcareous silty sand provides an excellent wearing surface but difficulties arose when wet. Therefore an application of a water repellent was made to

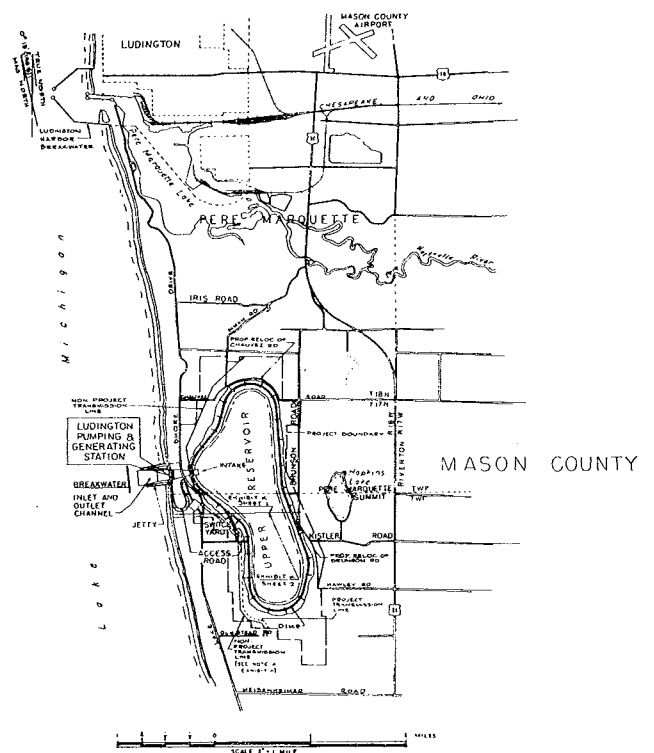


Fig. 1. — Project location plan

* Project Engineer, Ebasco Services Inc., New York.

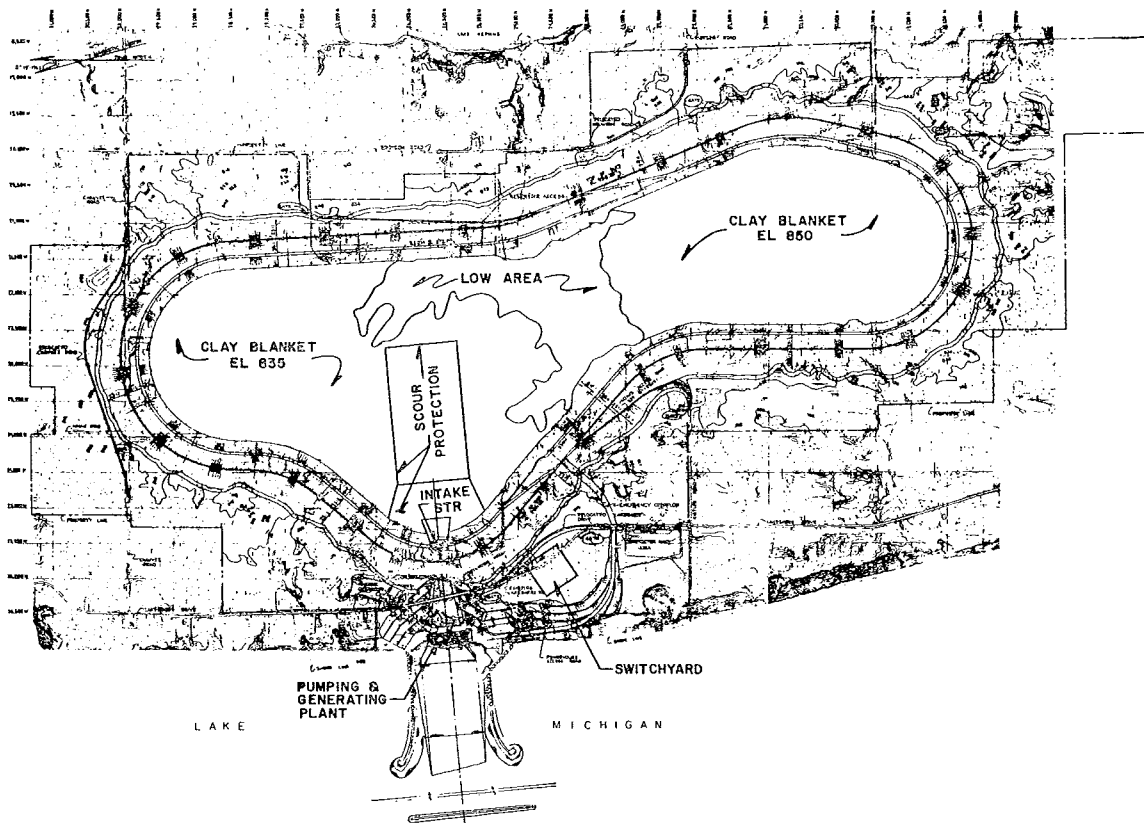


Fig. 2. — Plain of project

ZONE	TYPE OF MATERIAL	PERCENTAGE OF FINES	COMPACTION
①	SITE SAND	LESS THAN 20% PASSING 200 SIEVE	8" LOOSE LIFTS PER 6 PASSES
2	RANDOM FILL	ALL AVAILABLE MATERIAL	8" LOOSE LIFTS PER 6 PASSES
3	CLEAN SITE SAND	LESS THAN 5% PASSING 200 SIEVE	8" LOOSE LIFTS PER 6 PASSES
4	CALCAREOUS SILTY SAND		8" LOOSE LIFTS PER 6 PASSES
5	RANDOM FILL (AT LOW AREAS)	ALL AVAILABLE MATERIAL	8" LOOSE LIFTS PER 6 PASSES
6	CLAY BLANKET	MINIMUM 40% PASSING 200 SIEVE	7" LOOSE LIFTS PER 8 PASSES

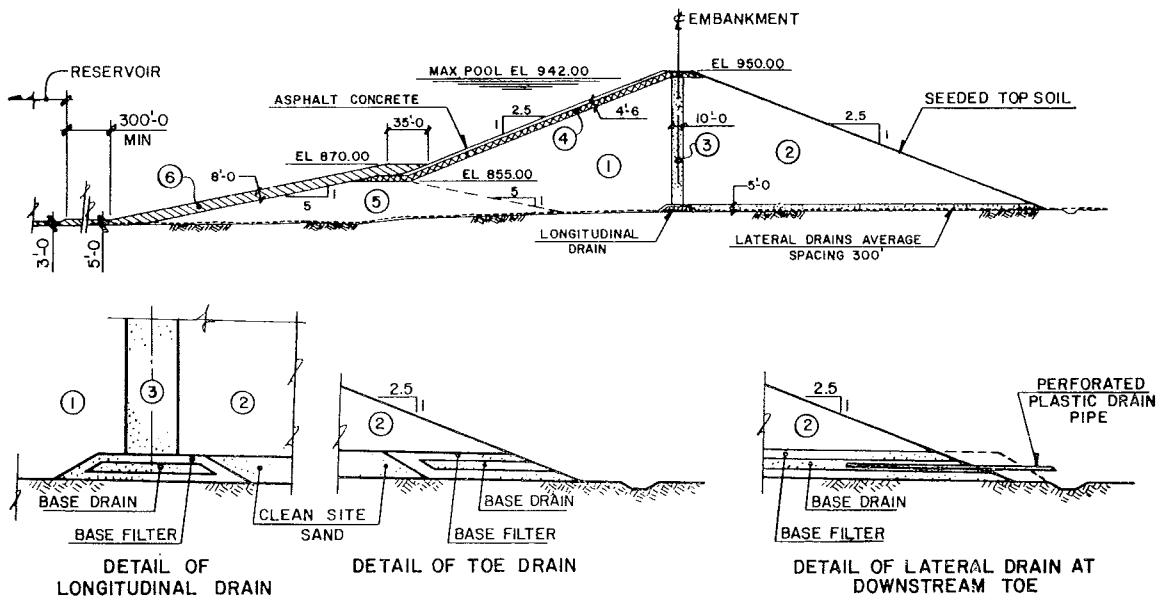


Fig. 3.

An investigation was carried out to locate the loose areas under the embankment which were not suitable for the embankment foundation.

This investigation was carried out with the Dutch cone penetrometer. The criterion was to locate and remove all loose material with the exception of the lower 12 ft. The material that was left in place was then compacted with a ten ton vibratory smooth drum roller. This effected a compaction which was satisfactory for the dike foundation. No compaction was carried out on the reservoir bottom which, with the exception of the low area, was excavated to several feet below original ground and therefore as in a dense strata.

Haul Equipment

Various types of equipment were considered by the prospective contractors for moving the material to the embankment. The successful contractor used 24 ton scrapers which proved to be the ideal equipment for the project. In wet borrow pit areas however, it was necessary to assist the scrapers with dozers.

Embankment Construction

The six mile long embankment required careful planning in order to avoid time consuming equipment traffic congestions. The 40 million cubic yards of fill was placed essentially in two short construction seasons. The maximum rate of placement was 180,000 cubic yards in one day.

The quality of placement was very carefully inspected to assure that the 8 inches thickness of loose lifts was not exceeded and that every section was subjected to a minimum of 6 passes.

Clay Lining

A clay lining was selected to form the required impervious membrane for the bottom of the reservoir. The selection was made on the basis of availability and economy. The thickness of the lining in general varies from three feet in the central portion of the reservoir to five feet in the area within 300 feet from the toe of the embankment to 8 feet on the 5 to 1 slope and ten feet on the 870 berm where the clay overlaps with the asphalt lining. See Figure 3. The clay borrow pits for the reservoir bottom lining were a short distance outside of the project area. Considerable quantity of clay, however, was obtained from inside the reservoir area but the quality was not as good as that of the outside borrow pits. This re-

servoir area clay was placed in the less sensitive areas and where the lining thickness was more than three feet. The placement of the clay lining presented many problems when the moisture content was high and when the lower layers were too wet for support of the hauling and compaction equipment. For this reason there was a very limited time of placement since it was necessary to halt operations after every rain. Even though the specifications called for a minimum density the emphasis was on obtaining a homogenous lining, since the purpose of the clay was to provide an impervious blanket. Several pits were excavated to assure the required homogeneous placement was achieved. It was found that there was no conclusive variance in laboratory determined permeability for clays which were placed at several percent points wet from the optimum moisture content, and those placed under optimum moisture content.

Measures were taken to prevent the clay lining from developing shrinkage cracks during the summer months. This was done by finishing the lining in sections and then keeping it wet by ponding water which was contained by small dikes. In such areas such as the 5 to 1 slope and the 870 clay berm where ponding of water was not possible, the clay was sprayed with water repellent compound which also reduced evaporation. Only one small section of the lining was exposed to an entire winter's temperatures prior to filling the reservoir. The water for ponding was rain water with the exception of the last two months when water for initial filling was pumped into the reservoir from Lake Michigan. That water was pumped by means of small powerhouse cooling water and construction pumps.

The primary purpose of this low capacity pumping was to prevent erosion of the lining on the slopes leading to the low areas. High velocities of water would have been experienced by the large pump-turbines during the initial filling.

The pump-turbines are capable of pumping as much as 12,000 cfs at low head but it was not considered desirable to throttle the flow to less than 10,000 cfs for long periods. Although the clay has very good erosion resistant properties it was noted that for long duration flows gullies formed on well compacted clays which needed repair. The clay lining in front of the intake structure is protected with riprap up to the point where model tests showed water velocities exceed three feet per second when all six units are pumping. In addition, special riprap protection was provided for the initial reservoir filling.

Model tests were made with the reservoir empty and one unit pumping to determine the extent of probable erosion of the lining during the initial filling of the reservoir. All the areas where the model stones were displaced were protected with selected riprap. In addition, in order to prevent pile-up of stones in the event of initiation of stone movement which may trigger extensive failure of the riprap, wire mesh was placed on top and anchored into the riprap. This served very well during the initial filling as determined by underwater inspection immediately after the filling and also several months later. To dissipate the energy of the discharge during initial filling, a diversion wall was constructed at the intake structure outlet. The location, size and shape of this wall was determined by model tests.

Asphalt Lining

The selection of asphalt concrete for the embankment impervious membrane was based on economics and its ability to deflect and adjust to the flexible foundation. Figure 5 shows the multilayer structure of the asphalt facing. Special consideration was given to the large variation of weather conditions to which the asphalt concrete

is exposed. Extensive laboratory tests developed the required mixes which would best meet the water tightness requirement, ability to obtain satisfactory compaction and to develop resistance to rapidly changing weather conditions.

The 18 in. crushed limestone drain provides a means to collect any water that enters the upper asphalt layers. This water can be removed by submersible pumps which are located in pipes on the lower asphalt layer on the slope. The water removal is facilitated by a 10 in. pipe which is located at the toe of the drain and extends over the entire periphery of the embankment. The pumps have been sized to lower the water in the drain section at a rate which is at least as fast as the rate of lowering the reservoir when all the powerhouse units are generating. This rate is eight feet per hour. The reason for this requirement is to prevent uplift on the outer asphalt layers. The gradation of the crushed stone drain was such that in addition to providing the required draining properties it was easily compacted to withstand the reservoir water loads. The compaction was effected by means of front end loaders. The transfer of loads in the membrane on the drain material to the embankment is effected by means of a binder course on the lower asphalt course. In addition there is a binder asphalt course to

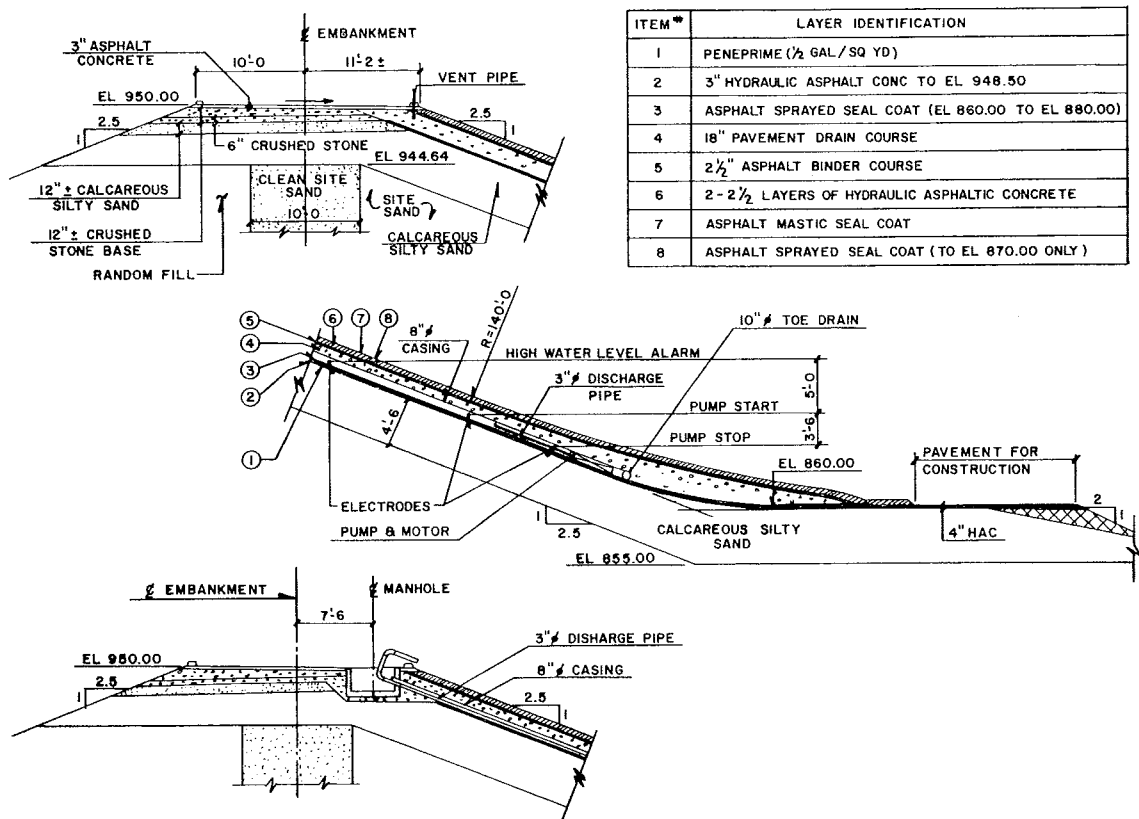


Fig. 5. — Embankment asphalt facing

assure the adequate transfer of forces between the reservoir loading and the drain material.

The placement and compaction of the asphalt lining was performed by relatively conventional spreaders and rollers which were winched from the top of the embankment. In addition, special equipment was fabricated for this project which consisted of steel trusses on which moved the spreading equipment under very accurate controls. These trusses which spanned one half of the asphalt slope moved laterally on crawlers.

Frost Heave

The calcareous silty sand which is placed under the asphalt lining was found to be potentially susceptible to frost heave action. Slow freeze and thaw tests were performed which indicated that this material was affected by frost heave after the second freeze cycle. If a substantial depth of the material is affected by frost heave it could affect the bearing properties which would lead to deterioration of the asphalt lining.

It was necessary, therefore, to provide adequate

protection against frost penetration. The crushed rock drain is an excellent thermal insulator and calculations showed that this drain material combined with the asphalt concrete layers would allow only a small frost penetration in the calcareous silty sand at the higher embankment levels which was considered too small to be of any concern.

The degree of frost penetration was also measured at an asphalt test slope and the results agreed favorably with the calculated values. Frost penetration is likely to occur only above or near the high water line where the dike face is most exposed to the weather elements because it is not sheltered by the water.

In order to guard against the occurrence of deep frost penetration during very severe winters there are thermometers installed at various depths in two stations. In the event that there are indications of frost penetration in the calcareous silty sand the reservoir operation will be modified to maintain the water level as high as possible to provide the required insulation during the cold period.

SOMMARIO

Il progetto della diga in terra dell'impianto di ripompaggio di Ludington

L'impianto di ripompaggio di Ludington, una volta completato, avrà una capacità produttiva massima di 2.000 MW. L'impianto è situato al centro della sponda orientale del lago Michigan, che funziona da serbatoio inferiore; il serbatoio superiore è situato sulla sponda del lago (fig. 1).

L'impianto è stato realizzato dalla Consumers Power Company di Jackson e dalla Detroit Edison Company di Detroit, e fornisce l'energia di punta alla Michigan Power Pool; il progetto e la costruzione sono stati affidati alla Ebasco Services. Gli aspetti originali della soluzione adottata per il serbatoio superiore, descritti in questa nota, hanno giocato un ruolo importante nella scelta dell'impianto quale « Outstanding Engineering Achievement » per il 1973 da parte dell' ASCE.

Il serbatoio superiore è delimitato su tutto il perimetro da un rilevato della lunghezza di circa 10 km (fig. 2). Il rivestimento bituminoso del paramento di monte della diga è sovrapposto al piede ad un tappeto di argilla che riveste il fondo del serbatoio, formando una membrana impermeabile continua. Il serbatoio, con una capacità totale d'invaso di 100 milioni di metri cubi, è costituito su un deposito di materiali a grana grossa di origine glaciale, che presentano un grado di addensamento da « sciolto » a « medio » per uno spessore di 10 m circa, mentre al disotto sono estremamente addensati.

Progetto e costruzione del rilevato diga

Gli unici materiali reperibili per la costruzione della diga entro distanze economicamente accettabili sono le sabbie fini che costituiscono le sponde del lago Michigan.

Tutto il materiale per la diga, che ha un'altezza massima di 51 m, è stato prelevato dall'area del serbatoio. La sezione tipo prevista permetteva una utilizzazione ottimale del materiale, che veniva disposto nelle varie zone a seconda delle sue caratteristiche. Si mirava in tal modo ad ottenere un massimo di stabilità e a deprimere quanto più possibile la linea di saturazione dell'interno del rilevato nel caso che, per una rottura del rivestimento, il rilevato stesso fosse interessato da moti di filtrazione.

La sezione tipo è illustrata in fig. 3. Lo strato di base, dello spessore di 1,4 m, al disotto del rivestimento bituminoso, è costituito da sabbia limosa calcarea. Questo materiale fu adottato in quanto, fra quelli disponibili, esso era l'unico che consentiva la realizzazione di una soddisfacente superficie di lavoro per le attrezzature di messa in opera del rivestimento bituminoso. Questa caratteristica veniva però meno se il materiale acquistava contenuti d'acqua troppo elevati; ad esso fu quindi applicato un prodotto idrofugo che lo manteneva asciutto e ne preveniva l'erosione. Un'altra importante ragione per l'uso di questo materiale in questa zona è la sua ridotta permeabilità, che contribuisce alla tenuta del rivestimento bituminoso.

La successiva zona, fra la sabbia limosa calcarea ed il dreno verticale, è costituita da sabbia con meno del 20 % di passante allo staccio n. 200. Le buone caratteristiche strutturali di questa sabbia conferiscono notevole stabilità al rilevato.

Procedendo verso valle, si incontra ora una zona dello spessore di 3 m costituita con la sabbia più pulita di cui si disponeva, e che aveva un passante allo staccio n. 200 inferiore al 5 %. Essa ha la funzione di dreno verticale ed intercetta l'acqua che dovesse eventualmente penetrare nel fianco di monte della diga. Essa è connessa al drenaggio longitudinale (descritto più oltre) che è situato al centro del rilevato.

Il fianco di valle è formato di materiali vari, che comprendono tutti i tipi di terreno reperiti sul posto. Essi sono disposti al disopra di uno strato orizzontale, dello spessore di 1,5 m, di sabbia pulita con un passante allo staccio n. 200 inferiore al 5 %.

Sempre allo scopo di deprimere una eventuale linea di saturazione, un dreno longitudinale corre al disotto del centro del rilevato per tutta la sua lunghezza.

Esso è costituito da pietrame messo in opera in una trincea, ed è collegato al piede di valle della diga ed al sistema di drenaggio esterno a mezzo di dreni laterali intervallati fra loro di circa 900 m.

La sezione tipo è disegnata in modo tale da restare stabile anche nel caso di un'improvvisa rottura del rivestimento bituminoso, almeno finché il livello del serbatoio non viene abbassato ad una quota di sicurezza.

Una delle più difficili fasi del progetto fu la individuazione dei più adatti macchinari per il costipamento del rilevato; a tal fine fu dato corso ad un ampio programma di indagini sperimentali su numerosi tipi di macchine costipanti quali rulli gommati, rulli lisci statici e vibranti, rulli a piè di pecora statici e vibranti. Il criterio di scelta era la capacità di fornire un costipamento adeguato senza effetti di solcatura e con una soddisfacente velocità di lavoro. Le prove dovevano anche definire il più adatto spessore degli strati ed il numero di passaggi del rullo richiesti; infine si è indagato sull'influenza della messa in opera e del costipamento di uno strato su quelli sottostanti.

Il macchinario prescelto fu il rullo a piè di pecora vibrante CF-43 Vibro Plus, in quanto forniva risultati soddisfacenti con i materiali di tutte le zone della diga. Lo spessore dello strato fu fissato in 20 cm prima del costipamento, ed il numero di passaggi in 6. I rulli erano trainati con un attacco triplo, due avanti ed uno dietro. Per lo strato di argilla si è adottato il rullo a piè di pecora statico Hyster C4 55A, con 17 cm di spessore dello strato ed 8 passaggi.

Zone particolari della diga

La zona della diga retrostante l'opera di presa fu oggetto di particolare attenzione; essa infatti ha forte curvatura in pianta ed inoltre è attraversata dalle condotte forzate (fig. 4), che sono in acciaio rivestite di calcestruzzo.

Il fianco di monte è costituito con materiale selezionato, in modo da minimizzare i cedimenti e rendere il rilevato meno permeabile, specialmente al contatto con il calcestruzzo. D'altro canto, nella zona a valle vi è uno strato di pietrame fra le condotte ed il materiale del rilevato, per prevenire l'insorgere di pressioni neutre nel rilevato stesso.

Preparazione del piano di imposta

Come si è detto, nell'area del serbatoio i 10 m più superficiali di terreno sono costituiti da materiali più o meno sciolti. Un'apposita indagine fu condotta per individuare, al disotto del rilevato, le eventuali zone tanto sciolte da non poter sopportare con sicurezza il carico del rilevato; l'indagine fu basata su prove di penetrazione statica.

Si adottò il criterio di rimuovere tutto il materiale sciolto entro profondità di 6 m dal piano campagna; il materiale lasciato in posto fu compattato con un rullo liscio vibrante da 10 ton, ottenendo in ogni caso un costipamento soddisfacente.

Il fondo del serbatoio non fu costipato in quanto, ad

eccezione della zona più depressa, esso era stato scavato per qualche metro rimuovendo in tal modo i materiali più sciolti presenti in superficie.

Movimenti di terra

Vari tipi di macchinari furono presi in esame, dalle Imprese partecipanti all'appalto, per i movimenti di terra per la formazione del rilevato. L'impresa che si aggiudicò l'appalto adottò ruspe da 24 ton, con esito molto soddisfacente. Nelle zone di scavo bagnate era necessario assistere le ruspe con apripista.

Costruzione del rilevato

Il rilevato, con i suoi 10 km di sviluppo, richiese un'attenta pianificazione onde evitare dispendiose congestioni nel traffico dei mezzi di cantiere. Gli oltre 30 milioni di metri cubi di rilevato furono messi in opera in due brevi stazioni; la massima velocità di costruzione fu di 140.000 metri cubi in un giorno. La posa in opera era rigorosamente controllata onde assicurare il rispetto delle prescrizioni.

Rivestimento impermeabile in argilla

Come si è detto, il fondo del serbatoio era impermeabilizzato con uno strato di argilla; tale soluzione fu adottata per motivi di disponibilità ed economia.

Lo spessore dello strato (v. fig. 3) è di 0,9 m nella zona centrale del serbatoio; di 1,5 m nell'area entro 100 m dal piede del rilevato; di 2,4 m sulla scarpata di pendenza 5:1 della banchina a monte del rilevato diga; di 3 m sulla banchina a quota 870 dove l'argilla si sovrappone al rivestimento bituminoso.

La cava per l'argilla era situata a breve distanza al di fuori dell'area del serbatoio. Notevoli quantità di argilla furono ottenute anche dagli scavi nell'area del serbatoio; poiché essa era però di qualità peggiore, il suo impiego fu limitato alle zone marginali e dove lo spessore del rivestimento era superiore a 0,9 m.

La posa in opera dell'argilla presentò notevoli problemi quando il contenuto d'acqua era elevato e quando gli strati inferiori erano troppo bagnati per permettere il transito dei macchinari per i movimenti di terra ed il costipamento. Era quindi indispensabile sospendere la lavorazione ad ogni pioggia, il che lasciò a disposizione un tempo molto limitato.

Benché le norme di capitolato richiedessero una densità non inferiore ad un certo valore, si tese soprattutto ad ottenere uno strato omogeneo, in quanto il requisito principale richiesto era l'impermeabilità del rivestimento.

Furono scavati una serie di pozzetti d'indagine, che mostrarono come la continuità e l'omogeneità del rivestimento erano state realmente ottenute; d'altro canto un programma di prove di laboratorio aveva mostrato che la permeabilità dell'argilla rimaneva sensibilmente costante al variare del contenuto d'acqua di posa in opera fra quello optimum e quello optimum più parecchi per cento.

Si ebbe cura di prevenire il ritiro per essiccamento dello strato di argilla completando lo strato stesso in settori che poi venivano tenuti sotto un modesto battente d'acqua a mezzo di piccoli argini. Sulla banchina a monte della diga, dove non era possibile ricorrere a questo accorgimento, l'argilla fu spruzzata con un idrofugo che riduceva sensibilmente l'evaporazione.

L'acqua di protezione dello strato argilloso era acqua piovana, salvo per i due ultimi mesi nei quali l'acqua per

il riempimento iniziale del serbatoio fu pompata dal Lago Michigan a mezzo delle piccole pompe sussidiarie dell'impianto di raffreddamento della centrale.

Lo scopo essenziale per l'uso di queste piccole pompe era quello di evitare l'erosione dell'argilla; infatti se si fossero adottate fin dall'inizio le pompe-turbine dell'impianto, l'acqua avrebbe assunto velocità assai elevate.

Le pompe-turbine sono in grado di pompare 335 m³/sec e non era possibile farle funzionare con portate minori di 280 m³/sec per lunghi periodi.

Benché l'argilla fosse molto resistente all'erosione, sotto l'azione di flussi prolungati in essa si formano canali di erosione. Per tale motivo il rivestimento di argilla anti-stante l'opera di presa è protetto con pietrame fino ai punti ove, a mezzo di prove su modello, si sono determinate velocità dell'acqua di almeno 1 m/sec con l'impianto in esercizio.

Ulteriori protezioni in pietrame sono state previste per il riempimento iniziale; a tal fine sono state effettuate apposite prove su modello. Come precauzione addizionale contro una eventuale asportazione progressiva del pietrame una rete metallica è stata stesa alla superficie ed ancorata nel pietrame stesso.

Questi provvedimenti si sono rivelati di grande efficacia, come è stato provato da ispezioni subacquee dopo il riempimento del serbatoio e qualche mese più tardi.

E da notare che, per dissipare l'energia dell'acqua durante il riempimento iniziale, all'uscita dell'opera di presa è stato disposto un muro di dissipazione.

L'ubicazione, la forma e le dimensioni di quest'opera sono state determinate a mezzo di prove su modello.

Rivestimento bituminoso

La scelta di un rivestimento in calcestruzzo bituminoso è stata basata su considerazioni economiche e sulla sua attitudine a deformarsi seguendo le deformazioni del supporto. La fig. 5 mostra la struttura, a più strati, del rivestimento. Una particolare attenzione è stata dedicata alle grandi variazioni climatiche cui è esposto il calcestruzzo bituminoso; un'ampia indagine sperimentale in laboratorio permise di mettere a punto miscele con soddisfacenti caratteristiche di impermeabilità, costipabilità e resistenza alle azioni atmosferiche.

Lo strato di pietrame calcareo, dello spessore di 45 cm, agisce come drenaggio per raccogliere qualsiasi eventuale infiltrazione d'acqua attraverso il rivestimento. Quest'acqua viene allontanata a mezzo di pompe sommerse disposte all'interno di tubi nella parte inferiore del paramento di monte.

La rimozione dell'acqua è facilitata da un tubo Ø 25 cm che è situato al piede dei dreni e si estende per tutto il perimetro del rilevato.

Le pompe sono state dimensionate in modo da deprimere il livello dell'acqua nel sistema di drenaggio con una velocità non minore di quella massima con cui si abbassa il livello del lago durante l'esercizio, pari a circa 2,4 m/h. In tal modo si evita l'insorgere di sottopressioni sul rivestimento.

La granulometria del pietrame era tale da rendere il materiale perfettamente drenante, ma anche compattabile per sopportare il carico indotto dall'acqua del lago; il costipamento fu effettuato con pale cariatrici.

Il carico dell'acqua è trasferito sul pietrame a mezzo di uno strato di binder che si appoggia sul calcestruzzo bituminoso.

La posa in opera del rivestimento bituminoso fu effettuata con spanditori e rulli relativamente convenzionali, comandati dal coronamento a mezzo di cavi e pulegge. In aggiunta, venne appositamente realizzata un'intelaiatura di profilati di acciaio che serviva da guida alle attrezzature. Tale intelaiatura, che ricopriva metà della scarpata, veniva spostata lateralmente con un sistema di slitte e rulli.

Rigonfiamento per azione del gelo

La sabbia limosa calcarea posta in opera al disotto del rivestimento bituminoso si rivelò potenzialmente suscettibile di rigonfiamento sotto l'azione del gelo.

Una serie di esperienze di gelo e disgelo indicarono che il materiale rigonfiava sensibilmente dopo il secondo ciclo di congelamento. Se uno spessore apprezzabile di tale materiale fosse stato affetto da rigonfiamento, si sarebbero verificati sensibili danni al rivestimento.

Fu pertanto necessario prevedere un'adeguata protezione contro la penetrazione del gelo. Lo strato di pietrame costituisce in realtà un'ottima protezione; calcoli e misure hanno mostrato che esso è sufficiente ad impedire la penetrazione del gelo, salvo che in ristrette zone nella parte alta del rilevato con esposizione sfavorevole. In tali zone il pericolo di danni è comunque minimo.

Ad ogni modo, come precauzione di riserva contro la eventualità di condizioni stagionali eccezionalmente severe, si sono installati una serie di termometri a varie profondità nel rivestimento. Nell'eventualità che essi indicano una penetrazione del gelo nello strato di sabbia limosa, l'esercizio dell'impianto viene modificato in modo da mantenere il serbatoio sempre pieno e sfruttare così l'azione isolante dell'acqua.